Computación Aplicada a la Industria de Procesos



INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO

Luis A. Moncayo–Martínez • David Fernando Muñoz Negrón
Adán Ramírez López • Sergio Romero Hernández
Editores

Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones
ITAM

Septiembre 2017

Documento maquetado con TEXIS v.1.0+.

Este documento está preparado para ser imprimido a doble cara.

Computación Aplicada a la Industria de Procesos

Tipo de Documento:
Actas del Congreso
CAIP'2017

ISBN: 978-607-8242-11-5

Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones
ITAM

Septiembre 2017

Copyright © ITAM

ISBN 978-607-8242-11-5

Se agradecen todas las facilidades otorgadas por las autoridades del ITAM para la realización del CAIP'2017

Asociación Mexicana de Cultura, A.C.

Se agradece el apoyo financiero otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México

Especialmente se agradece a Marisela Bustos por su gran apoyo administrativo

Así mismo, a todos nuestros alumnos de Servicio Social y Facultad Menor

Finalmente, pero no menos importante, agradecemos a todos los revisores que con sus comentarios hacen que el CAIP2017 sea un evento de mayor calidad.

Prefacio

Estimados Colegas y Amigos,

Sean ustedes muy bienvenidos al 13º Congreso Interamericano de Computación Aplicado a la Industria de Procesos (CAIP'2017) que este año es organizada por el Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM).

CAIP es una conferencia bi-anual celebrada desde 1992 bajo el auspicio de muchas universidades y centros, entre ellos el Centro de Información Tecnológica (CIT). Esta es una de las conferencias claves en la industria de procesos en Latinoamérica gracias a los investigadores participantes de 14 países (incluyendo europeos).

El objetivo del CAIP'2017 es presentar los resultados de sus investigaciones a la comunidad científica que estudia la aplicación de la computación en sus áreas de interés. Por tal motivo, ustedes podrán asistir a sesiones en temas relacionados con la simulación, optimización, minería de datos, aguas residuales, diseño, educación, materiales, entre otros.

Cabe mencionar que las actas del congreso están integradas por 142 artículos (aproximadamente 320 autores) que fueron rigurosamente seleccionados entre un total de 218. Así mismo algunos trabajos fueron apoyados por una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México.

El programa científico está compuesto por 32 sesiones regulares y por tres conferencias magistrales de científicos reconocidos en las áreas de simulación y materiales.

Como Comité Organizador queremos agradecer al personal involucrado en la realización del CAIP'2017 y a todos los colegas que con sus revisiones hicieron posible seleccionar los mejores 142 trabajos.

Finalmente, agradecemos a todos los patrocinadores y en especial al ITAM.

Comité Organizador

Dr. David Fernando Muñoz Negrón	Coordinador General
Dr. Luis A. Moncayo Martínez	Coordinador Académico
Dr. Sergio Romero Hernández	Coordinador Logístico
Dr. Adán Ramírez López	Comunicaciones

Comité Internacional

Dr. Pedro F. Arce	Universidad de São Paulo	Brasil
Dr. Manuel Cordeiro	Univ. De Trás-Os-Montes E Alto Douro Villa Real	Portugal
Dr. Fernando F. Espinosa	Universidad de Talcatalca	Chile
Dr. Rosendo Franco	Pontífica Universidad Católica de Perú	Perú
Ing. Ever A. Fuentes Rojas	Universidad Libre Bogotá	Colombia
Dr. Edison Gil Pavas	Universidad Eafit Medellín	Colombia
Dr. Alberto Herrera Gómez	Cinvestav–Querétaro	México
Dr. Bulent Kozanoglu	Universidad De Las Américas – Puebla	México
Dr. Jordi Poch	Universidad De Girona–Cataluña	España
Dr. Francklin Rivas Echeverría	Universidad De Los Andes–Mérida	Venezuela
Dr. Hugo Rodríguez Cortés	Cinvestav – Ciudad de México	México
Juan A. Rodríguez Renuncio	Universidad Complutense de Madrid	España
Dr. José O. Valderrama	Universidad de La Serena	Chile
Dr. Richart Vásquez Román	Instituto Tecnológico de Celaya	México
Dr. David F. Muñoz Negrón	Instituto Tecnológico Autónomo de México	México

ISBN 978-607-8242-11-5

Índice

Prefacio vii

7. Modelado y predicción del fenómeno el niño en piura, mediante redes neuronales artificiales usando matlab 1

13. Comparación de atributos contextuales para integración de procesos utilizando técnicas de clustering 11

15. Modelo de interfaz adaptativa basada en perfiles de usuario y ontologías para recomendación de objetos de aprendizaje 19

17. Análisis del origen de PST y PM10 en minería de carbón a cielo abierto usando gráficos polares 29

18. Simulación dinámica de presas en cascada 40

20. Reactive optimal power flow with stochastic parameter solved via method of lagrangian modified barrier function 48

21. Schedule modeling and expert knowledge elicitation using graphs applicated to a multiple fermenter system. 58

22. Evaluación del rendimiento de un sistema de fermentación por simulación para diferentes demandas de enfriamiento 67

25. Determinación de coeficientes de actividades de depósitos evaporíticos andinos. aplicación del modelo de pitzer 74

26. Manejo de Google cloud tools en el desarrollo de sistemas de aprendizaje nativos Windows. 81

27. Dispersión de las emisiones de PM10 de canteras en terrenos complejos 91

30. Evaporador 1.0: programa para el diseño y evaluación de evaporadores de efectos múltiples 100

33. Técnicas metaheurísticas para resolver el problema de gestión de suministros con demandas acotadas 109

34. Modelado de procesos continuos a través de ontología y uso de web semántica. 116

35. Filtrado del error de alta frecuencia en series de tiempo: aplicación de las ecuaciones de Euler-Lagrange 126

36. Determinación numérica del potencial eléctrico en el interior de materiales ortotrópicos 3D con aplicación de métodos variacionales 136

37. Concentración, dispersión y contribución de PM10 asociados a aerosoles marinos en una ciudad costera 144

38. Configuraciones geométricas que impactan en patrón de flujo de crudo y gas en una Simulación CFD 150

39. Modelo basado en agentes para la detección de fallas cognitivas en entornos de aprendizaje colaborativo 151

40. Clasificación de tornillos mediante visión artificial y lógica difusa 161

45. Análisis de la velocidad en la interceptación del balón por parte de los porteros profesionales de fútbol de salón 166

46. Tipologías de viviendas vulnerables a inundaciones en la cuenca urbana de Riohacha, La Guajira-Colombia 169

48. Encriptación/desencriptación de archivos usando RSA y un FPGA 178

49. Influencia de las crecidas del río ranchería sobre las inundaciones en la ciudad de Riohacha, La Guajira-Colombia 188

53. Generador de trayectorias para manejo y gestión de transporte de materiales al interior de una empresa 196

59. Software geo-referencial de pacientes, neoplasias e infraestructura contaminante asociados a la radiación electromagnética no ionizante 205

61. CFD simulation of a stirred-tank reactor in the soybean oil hydrolysis under subcritical water conditions 213

62. Arquitectura empresarial y simulación de procesos - una fusión necesaria antes de realizar cambios significativos en la estructura de negocio: caso aplicado. 225

66. Estimación de la temperatura de transición vítrea de líquidos iónicos mediante redes neuronales artificiales 235

67. Representaciones de la tecnología y el desarrollo sostenible: un análisis en la comunidad costera Wayuu Cangrejito, La Guajira, Colombia 243

68. Solubilidad de gases de aire a altas presiones en soluciones salinas de agua de mar 249

69. Diseño de un sistema experto difuso para un proceso de cromado duro 257

70. Solubilidad de gases en líquidos iónicos: modelado y consistencia termodinámica de datos experimentales 263

72. Comparación de descriptores de imágenes para la clasificación de larvas de mosquito 271

74. Admisibilidad de sistemas descriptores LPV 279

75. Un método práctico para la simulación del proceso de adsorción de metales en mezclas binarias. 289

77. Modelo de simulación de un sistema de control de producción pull como estrategia educativa bajo la metodología del aprendizaje basado en problemas-ABP 299

81. Modelo de simulación de un sistema de distribución logístico como plataforma virtual para el aprendizaje basado en problemas 308

82. Optimización del proceso secuencial coagulación-floculación -electro-oxidación para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil 317

83. Procesos electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil: optimización de las condiciones de operación 318

84. Detección de variabilidad en procesos hospitalarios aplicando minería de procesos 319

85. Cinéticas de los parámetros de color en el freído por inmersión de ahuyama (*cucúrbita máxima*) con previa deshidratación 330

86. Análisis de perfil de textura de ahuyama (*cucúrbita máxima*) sometida a freído atmosférico por inmersión 338

ISBN 978-607-8242-11-5

89. Modelado de variables que afectan el microclima de la sandía (*citrullus lanatus*) en la región sabana del departamento de Sucre, Colombia 347

90. Aplicación y optimización de sistemas de control implementado en sistemas de riego basado en modelos de microclima de cultivos tropicales 358

92. Análisis de procesos hospitalarios utilizando la técnica Variants Miner desde la perspectiva tiempo de minería de procesos 369

93. Model for designing human-computer interaction for virtual reality applications (MODIHC-VR) 379

94. Diseño de inversor para luminaria con aplicación en ambiente rural sin acceso a energía eléctrica 389

95. Programación de enlace bluetooth para el monitoreo de energía inalambrica transmitida 395

97. Compresión de imágenes JPEG con un FPGA para un centro de datos 401

98. Agrupación de técnicas inteligentes para predecir reacción adversa a medicamentos 411

99. Portero digital con raspberry Pi y tecnología DNLA 412

100Algoritmos para el ajuste de parámetros cinéticos y sus desviaciones para diferentes sistemas reactivos usando MatLab® 418

101Prácticas ancestrales, uso y manejo sostenible del agua: caso de estudio comunidades indígenas Wayuu de La Guajira Colombiana 419

102Análisis de la multiplicidad de estados estacionarios en sistemas químicos reactivos usando la metodología cell-mapping 426

105Salones digitales en la educación superior 427

106Modelo computacional experto para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud aplicando técnicas de análisis de redes sociales y minería de procesos 435

107Impacto y aprovechamiento de las TIC dentro de la educación superior 445

108Gamification en la educación superior como estrategia para incrementar la productividad y competitividad en el alumnado 454

109Model order reduction enhancement with optimization metaheuristics 462

114Programa de computador en MS-Excel para cálculos de equilibrio líquido-vapor mediante una EoS cúbica y reglas de mezclado de Huron-Vidal 471

115Design of control strategy for the automatically microalgae cultivation in a photobioreactor. 481

116Selección de micro algas apropiadas para la producción de biocombustibles en el caribe colombiano 490

118Optimización del inventario en sistemas de bicicletas compartidas 499

119Dispositivo electrónico para determinar la humedad de secado del café en tiempo real - DHS 507

120Validación del dispositivo DHS para medir el contenido de humedad en el café pergamino 508

121Sensibilidad paramétrica de la reacción de síntesis de nitroanilina en un reactor batch: análisis de un accidente en una planta industrial 514

ISBN 978-607-8242-11-5

122.Aplicación de la metodología de superficie de respuesta para la optimización del proceso Fenton como tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de café soluble 515

123.Diseño de un motor regenerativo stirling tipo alfa. 516

124.Conditioning of unstable systems for model order reduction computation of large-scale systems 524

125.Herramienta de simulación de servicios de salud para la enseñanza de la toma de decisiones en ingeniería industrial 534

126.Tuning equations for PID controllers based on first-order- plus-dead time process parameters and minimization of IAE and controller signal variance 543

129.Adsorción de cromo Cr(VI) usando carbón activado de origen bituminoso. metodología de superficie de respuesta como herramienta de optimización 554

130.Control predictivo generalizado restringido para seguimiento de trayectoria en un vehículo multi rotor 555

136.Simulación de la evolución termoestructural del calentamiento de una probeta dilatométrica por efecto Joule 565

137.Simulación numérica del calentamiento de un horno tipo empujador para palanquillas considerando desplazamiento continuo 573

138.Análisis de bifurcación a través de la plataforma de Aspen Plus®: hidrolisis de óxido de propileno 582

140.Análisis de datos en sistemas de información geográfica para zonas de riesgo en la Ciudad de México 583

142.Predicción de propiedades termodinámicas asistida por computadora 590

144.Simulación en 2D de la hidrodinámica de una columna de lechos fluidizados con variación en el ángulo de inclinación 591

145.Simulación de la fermentación en distintos tiempos en un biorreactor de tanque agitado 601

146.Composición al equilibrio en la producción de H2 por reformado de etanol y vapor de agua 606

147.Análisis de la movilidad vehicular en el departamento de la guajira usando simulación. caso: Riohacha y Maicao. 616

148.Performance shaping factors and human error probability in power systems control centers 618

154.Multiple attribute decision making applied to performance evaluation of transmission system operators 628

157.Condiciones socioeconómicas de una comunidad indígena en el departamento de la Guajira-Colombia. una oportunidad desde la ingeniería social. 638

159.Control óptimo en resonancia magnética nuclear. 644

161.Análisis económico del ciclo de reemplazo en una granja de cerdos con base en simulación de estado transitorio 650

163.Modelo matemático intrapartícula para determinar la cinética de absorción de hidrógeno en LaNi5 655

164.diseño de un prototipo de videojuego 3D para el desarrollo de habilidades mentales 662

ISBN 978-607-8242-11-5

167.Sensado de espectro mediante la correlación espectral en radio cognitiva 672

168.Código para la generación de modulación SPWM, embebida en un microcontrolador microchip, con tres fases de salida. 679

169.Sistema de control automático de demanda para un edificio público 685

170Hacia la obtención de rutas óptimas de navegación de un robot móvil en base a la aplicación de redes neuronales artificiales (RNA) y algoritmo de búsqueda local (ABL) en ambientes de operación estructurados 693

171.Una propuesta de proceso para la obtención del modelo dinámico de un manipulador robótico industrial en el marco de la mecánica Lagrangiana 705

173.Propuesta del concepto del "típico": una alternativa para la enseñanza de la nomenclatura en química básica y fundamental en ingenierías 721

174.Análisis numérico del procesamiento digital de imágenes en la cinética del *pleurotus pulmonarius* en fermentación solida 727

175.Sistema de información estratégica para la gestión universitaria en la Universidad de Otavalo (Ecuador) 734

177.Superficie de respuesta para optimizar el crecimiento del *pleurotus pulmonarius* sobre tusa de maíz en una biorreactor de bandeja 739

179.Estudio numérico de la disipación viscosa inducida por un impulsor de alto corte en un tanque agitado sin deflectores 748

180.Modelo de simulación de alternativas de productividad para apoyar los procesos de toma de decisiones en empresas del sector floricultor antioqueño. 757

181.Lectores de pantalla para el apoyo académico de estudiantes no videntes 768

183.Modelos basados en redes neuronales artificiales para la obtención de monoglicéridos: desarrollo y validación 775

184.Diseño óptimo de una red de agua para la disminución de cloruros en la localidad de Riohacha Colombia 782

185.Caracterización de la calidad sensorial de aceitunas negras naturales mediante ANFIS 795

186Selección de rutas terrestres para personas con discapacidad visual con apoyo de dispositivos móviles y realidad aumentada 802

187.Aplicación de la ISO 22301 al centro de datos del proyecto hidroeléctrico coca codo sinclair 803

188.Modelo matemático para determinar el esfuerzo máximo en carcasas soldadas de cajas reductoras a partir de métodos analíticos y resultados de simulación FEM 810

189.Evaluación de la integridad estructural de un tanque de GNV bajo el estándar API 579 utilizando simulación numérica 820

192Estación climatológica autosustentable de monitoreo remoto basada en una red inalámbrica embebida tipo internet de las cosas (IoT) para la predicción de heladas 830

193.Diseño de un calentador de agua solar basado en un seguidor de red neuronal artificial opto-difuso 839

194.Análisis de vibración inducida por flujo bifásico en una tubería horizontal utilizando un modelo transitorio FSI 847

ISBN 978-607-8242-11-5

195.Verificación del diseño aerodinámico de la hélice de un aerogenerador de 3 kW mediante software CFD 857

196.Determinación de tensiones residuales producidas por soldadura en una carcasa soldada de caja reductora mediante simulación por el método de elementos finitos 867

197.Un sistema de apoyo para la enseñanza del método simplex y su implantación en computadora 877

198.Optimización del proceso de aplicación de Quitosano para la clarificación de aguas residuales emulsionadas conteniendo petróleo 886

199.Determinación de coeficientes de transferencia de calor en procesos de criopreservación de germoplasma animal aplicando modelos computacionales 887

201.Concepción de un procedimiento DEA y su aplicación en un centro de educación superior 896

202.Optimización del plan de producción de toallas 897

203.Evaluación de la satisfacción en el proceso de atención a clientes 898

204.Aplicación de la modelación matemática multiobjetivo para la mejora del mantenimiento en una empresa de servicio 899

205.Diseño de organizaciones de servicios públicos. Aplicación de la simulación discreta 900

207.Simulación numérica mediante CFD de la laminación en caliente de aceros 901

208.Optimización multiobjetivo de la flexión de rodillos de trabajo durante la laminación plana en caliente de aceros 907

209.Sistemas embebidos en un GMAO para robustecer la visión holística de la condición de un motor diésel 908

210.Estimación de esperanzas en experimentos por simulación estocástica de dos niveles 918

212.Reconstruction of process loads based on CNC data 927

213.Un modelo para la estimación de la probabilidad de ganar las elecciones presidenciales 934

214.Comparative analysis of efficiency in higher education institutes (HEI) using data envelopment analysis: Mexican public HEI case 941

215.La ingeniería de procesos en los tiempos del diseño asistido por ordenador 942

217.Resistencia térmica del ácido poliláctico obtenido por extrusión reactiva: Efecto de la adición de nanoarcillas 943

218.Elaboración de heurística para la determinación de personal a domicilio en restaurante de comida rápida usando simulación 953

219.Automatización de reportes gerenciales e inteligencia de negocios utilizando Excel VBA: caso de estudio 963

220.Cálculo del trabajo durante un proceso adiabático usando aproximaciones tipo sumas de Riemann 970

221.La educación en valores y el método científico: una relación simbiótica 976

222.Uso de mapas conceptuales para la elaboración de contenidos básicos de la termodinámica 982

ISBN 978-607-8242-11-5

224.Retos y realidades de la implementación de las tecnologías de información y comunicación en la educación indígena en La Guajira Colombiana 988

237.Optimizando estrategias de negociación comercial 990

238.Clasificación de entidades con los tiempos de eventos de un proceso no homogéneo de poisson para simulación 1000

239Propuesta de un dispositivo portátil para monitorear ondas cerebrales para su presentación en LCD, con ayuda de Matlab 1006

240.Caracterización de aleaciones de aluminio con nanotubos de carbon decorados con plata 1013

241.Prevención de metal dusting en acero inoxidable 304 L por medio de recubrimientos de óxido de cromo 1019

ISBN 978-607-8242-11-5

Modelado y Predicción del Fenómeno El Niño en Piura, mediante Redes Neuronales Artificiales usando Matlab.

Miguel Jiménez-Carrión[1], **Flabio Gutiérrez-Segura**[2] y **Jorge L. Celi-Pinzón**[3]
(1) Facultad de Ingeniería Industrial, Dpto. Académico de Investigación de Operaciones, Universidad Nacional de Piura, Campus Universitario Miraflores, Castilla-Piura, Perú, email: mjimenezc@unp.edu.pe
(2) Facultad de Ciencias, Dpto. Académico de Matemática, Universidad Nacional de Piura, Campus Universitario Miraflores, castilla-Piura, Perú, email: flabio@unp.edu.pe
(3) Egresado de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Piura, email: jceli414@gmail.com

Resumen

Se ha aplicado redes neuronales artificiales a los datos climáticos de precipitación en Piura, temperaturas superficiales de mar en diferentes zonas calificadas como Niño y la velocidad de los vientos alisios para modelar y predecir el fenómeno El Niño, con seis meses de anticipación a la presencia del mismo. Se realiza un análisis preliminar de la información para determinar el grado de correlación entre las variables, luego se ha diseñado el modelamiento en dos fases, la primera usa las redes neuronales para modelar las variables como series temporales y en la segunda fase se diseña una red neuronal para que simule el comportamiento de las precipitaciones en Piura, y predecir el fenómeno anticipadamente usando datos de la primera fase y Matlab como lenguaje de programación, así mismo se hace suposiciones razonables planteando una escala en seis niveles de la presencia del fenómeno sin perder generalidad, luego se aplica reconocimiento de patrones en estas condiciones. Los resultados del estudio muestran que las redes neuronales son una técnica altamente confiable para primero encontrar un patrón de comportamiento de las precipitaciones y luego para predecir el fenómeno alcanzando una tasa de acierto del 95.495% en los datos de entrenamiento y de 100% en la predicción del primer semestre del año 2016.

Modeling and prediction of El Niño in Piura, using Artificial Neural Networks

Abstract

Artificial neural networks have been applied to climatic precipitation data in Piura including surface sea temperatures in different areas classified as El Niño, and speed of the trade winds to model and predict this climate phenomenon six months prior to its appearance. A preliminary analysis of the information is performed to determine the degree of correlation between variables. A model in two phases was later designed. In the first phase, neural networks were used to model variables such as time series and, in the second phase, a neural network was designed to simulate the nature of rainfall in Piura and predict the phenomenon in advance using data from the first phase and Matlab as the programming language. Additionally, reasonable assumptions were made posing a scale of six levels of the presence of this phenomenon without loss of generality, then pattern recognition was applied under these conditions. The study shows that neural networks are a highly reliable technique to first find a pattern of precipitation and then predict the phenomenon with a hit rate of 95.495% in the training data and 100% in predicting the first half of 2016.

Keywords: modeling, forecast, prediction, El Niño, weather, Artificial Neural Networks, artificial intelligence.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El fenómeno El Niño (FEN), es una de las más impactantes anomalías registradas sobre el planeta producida por un cambio en el sistema océano – atmósfera que ocurre en el océano pacifico y concluye abarcando a la totalidad del planeta, su poder de destrucción abarca inundaciones, deslizamientos de tierra que destruyen cosechas, favorece la formación de tormentas, de igual manera, aumenta la probabilidad de proliferación de vectores, así como la destrucción de viviendas, hospitales, centros de salud, escuelas, sistemas de redes eléctricas y de agua potable, además de dejar grandes pérdidas humanas y económicas. El Perú, y en especial la zona norte como Piura, es uno de los lugares que constantemente ha sufrido las consecuencias devastadoras de este fenómeno.

El FEN se define científicamente como la respuesta dinámica del océano pacífico, al forzamiento prolongado de los vientos ecuatoriales, anomalías de la temperatura superficial del mar, la variación de la temperatura ambiental y el régimen de lluvias, la intensidad y duración del FEN depende de la magnitud de las anomalías y del área de influencia. La predicción meteorológica en el Perú se realiza con modelos numéricos basados en ecuaciones diferenciales parciales, estos modelos presentan problemas (no linealidad alta, son adaptados a la realidad regional, no contemplan incertidumbre) que no permiten una predicción confiable del FEN.

Las redes neuronales artificiales (RNA), han demostrado ser más apropiadas para analizar diversos problemas relacionados con el reconocimiento de patrones y el análisis de datos cuya formulación mediante técnicas clásicas resulta difícil o inapropiada, más aún cuando se dispone de gran cantidad de información y problemas de alta no linealidad en los modelos, estas técnicas se han utilizado para predecir el tiempo ([1], [10]), el FEN ([2], [12]), y otros problemas relacionados con el clima, como heladas [9], tormentas [4], predicción de caudales de ríos ([8], [11], [13]), la radiación [3].

A nivel descriptivo, el FEN en Piura ha sido estudiado en ([5], [6], [7]). En el periodo 2000 – 2010, se ejecutó el proyecto "Mejoramiento de la capacidad de pronóstico y evaluación del FEN para la Prevención y Mitigación de Desastres en el Perú" financiado por el Banco Mundial, en el que participaron IMARPE, IGP, SENAMHI, DHN, este proyecto dio inicio al modelado numérico en las diversas instituciones estatales dedicadas a temas climáticos, así mismo ha permitido fortalecer parcialmente las actividades de pronostico a escala regional y mundial, sin embargo, la realidad muestra que es necesario mejorar y reforzar las actividades de predicción meteorológica.

La data para el modelamiento y predicción del FEN, proviene de dos fuentes, se encuentra en forma mensual y cubre el período 1979 a 2015; la misma consta de las temperaturas superficiales del mar (ºC) de las zonas Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4 ver Figura 1; y la velocidad de los vientos alisios (m/s) en la zona 165ºW – 110ºW, estos datos fueron obtenidos de los registros de la página web del *Climate Prediction Center* de la NOAA y la información correspondiente a las precipitaciones (mm), fue proporcionada de los registros del Proyecto Especial Chira Piura, para el mismo período y corresponden a la estación meteorológica Miraflores ubicada en el campus universitario de la Universidad Nacional de Piura, cuyas coordenadas geográficas son, Latitud: 5º10'00.0"S, Longitud: 80º36'51.0"W y Altitud: 30MSNM.

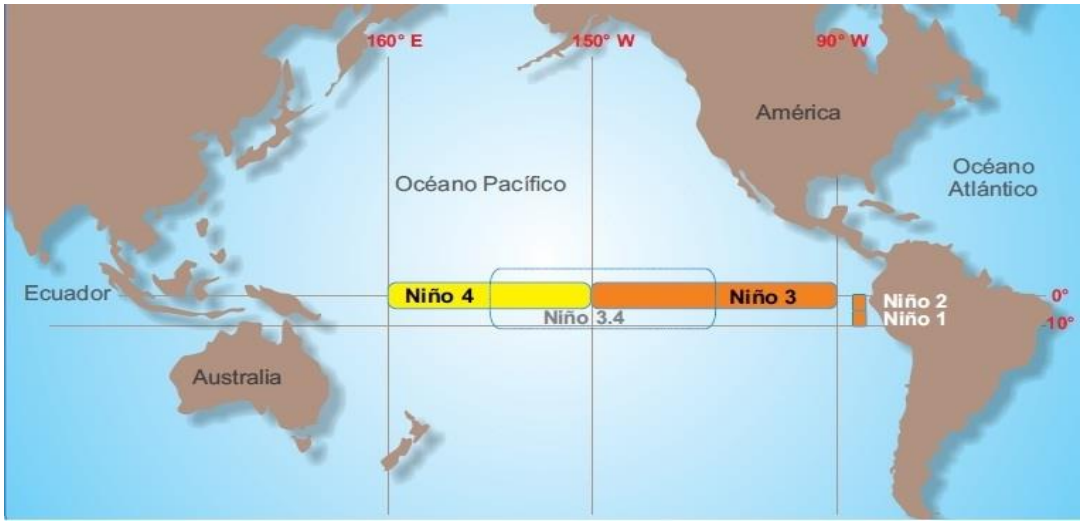


Figura 1: Regiones El Niño en el Océano Pacífico
Fuente: NOAA

ISBN 978-607-8242-11-5

METODOLOGIA

Se realizó un análisis preliminar de los datos para determinar su comportamiento referido al grado de correlación entre ellas, luego se determinó hacer escalamiento de los mismos para el tratamiento posterior con redes neuronales; así mismo se hicieron adaptaciones de los datos y pruebas preliminares de calibración de las redes neuronales a utilizar y posteriormente se construyeron los programas que se utilizaron para la captura de datos con la intención de obtener el menor error medio cuadrático (mse), evaluándose también el error porcentual medio absoluto (mape) y la desviación absoluta media (mad).

Tratamiento preliminar de la data

Se graficaron los datos de la precipitación de los 444 meses que comprende el período, se observó que no seguían ningún patrón teórico de comportamiento, por el contrario, se mostró comportamiento errático y a veces atípico en los períodos diciembre 1982 a junio 1983 y diciembre 1997 a abril 1998 circunstancias que se les conoce como niño extraordinario; y cuando se distribuyen los datos de precipitación mensualmente se observa que tienen una distribución asimétrica hacia la derecha con una media de 15.33 mm y una desviación estándar del orden de 71.93mm.

Del mismo modo se analizaron la distribución de las temperaturas superficiales del mar mensualmente en las zonas Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4; con medias de 23.42ºC, 26.10ºC, 28.66ºC y 27.10ºC y las desviaciones estándar correspondientes fueron, 2.2ºC, 1.21ºC, 0.63ºC y 0.92ºC; observándose en todos los casos una distribución simétrica y frecuencia aproximadamente uniforme.

Con relación a los vientos su comportamiento tiene una distribución asimétrica a la derecha con una marcada disminución de su frecuencia conforme avanza los meses de enero hasta junio haciéndose negativa en los meses de agosto a septiembre para comenzar a subir de octubre a diciembre, su media es de 6.12 m/s y su desviación estándar de 8.07 m/s.

El Modelo

El análisis de la información nos condujo a diseñar y programar tres modelos de redes neuronales artificiales, el primer modelo para las series temporales de las variables de temperatura superficial del mar en las zonas calificadas como Niño; el segundo modelo de red neuronal para la variable de serie temporal velocidad de los vientos alisios y el tercer modelo para la variable precipitación en la ciudad de Piura; éstos modelos utilizan el perceptrón multicapa previa adecuación de los datos para cada modelo; para el caso del tercer modelo se utilizó cinco variables en la capa de entrada (variables explicativas) y una neurona en la capa de salida que es la precipitación en Piura, ver modelo en la Figura 2. En todos estos modelos se utilizó el algoritmo de aprendizaje de *Levenberg-Marquardt* y la función hiperbólica sigmoidea como función de activación.

$$Net(serie\ tsm) = g(retardo, neuronas) \quad (1)$$

retardo = 4, 8, 12; corresponde al número de meses para predecir el que sigue
neuronas = 5, 15, 25; número de neuronas en la capa oculta
serie tsm = temperatura superficial del mar en las zonas Niño 1+2, Niño 3, Niño 4, Niño 3.4

$$Net(serie\ velocidad\ vientos\ alisios) = g(retardo, neuronas) \quad (2)$$

retardo = 4, 8, 12; corresponde a el número de meses para predecir el que sigue
neuronas = 8, 16, 24; número de neuronas en la capa oculta
serie vientos alisios = velocidad de los vientos alisios m/s.

$$Net(Niño) = f(neuronas\ capa\ oculta\ 1, neuronas\ capa\ oculta\ 2, épocas) \quad (3)$$

neuronas capa oculta 1: 4, 7, 10; número de neuronas en la primera capa oculta
neuronas capa oculta 2: 7, 14, 21; número de neuronas en la segunda capa oculta
épocas: 150, 200, 250; número de épocas o iteraciones que se repite el algoritmo
Niño: precipitación en Piura

Figura 2: Modelos de Redes Neuronales Artificiales (Net)

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza con disposición factorial del primer modelo mostró en todos los casos diferencias altamente significativas entre los factores retardo y número de neuronas en la capa oculta, con excepción de la zona Niño 1+2, que solo mostró significación a un nivel de 95% en el factor número de neuronas en la capa oculta; con relación al análisis de Duncan, las redes neuronales artificiales del primer modelo que mostraron estadística y numéricamente menores errores cuadráticos medios en todos los casos estudiados, fueron aquellas que tienen como retardo 12 meses y 25 neuronas en la capa oculta, estos mismos factores muestran influencia en la interacción, registrándose los menores errores como: 0.005175, 0.005423, 0.009528 y 0.007895, respectivamente en las zonas de estudio y cuyos coeficientes de variabilidad respectivos son, 0.1234%, 0.0581%, 0.0041% y 0.0215% los resultados se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Análisis de Duncan del cuadrado medio del error (mse) de la temperatura superficial del mar en las zonas Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4; con nivel de significación de 0.05 y 27 grados de libertad del error.

CLAVE	Retardos	Niño 1+2		Niño 3		Niño 4		Niño 3.4	
A1	4	0.047284	b	0.037715	b	0.017177	c	0.017177	a
A2	8	0.007143	a	0.008849	a	0.010906	b	0.010906	b
A3	12	0.008897	a	0.008677	a	0.010289	a	0.010289	c
CLAVE	**N° Neuronas ocultas**								
B1	5	0.024426	b	0.0202875	b	0.013994	b	0.017731	b
B2	15	0.018963	a	0.0178927	ab	0.012296	a	0.016491	b
B3	25	0.019934	a	0.017061	a	0.012082	a	0.013959	a
CLAVE	**Interacción**								
A1B1	4x5	0.049012	c	0.037622	c	0.018284	d	0.026789	f
A1B2	4x15	0.047040	c	0.037638	c	0.016921	c	0.025146	ef
A1B3	4x25	0.045801	c	0.037886	c	0.016325	c	0.022872	e
A2B1	8x5	0.008343	a	0.010056	ab	0.011896	b	0.0135	cd
A2B2	8x15	0.007154	a	0.008617	ab	0.010439	a	0.014693	d
A2B3	8x25	0.005932	a	0.007874	a	0.010384	a	0.011112	bc
A3B1	12x5	0.015925	b	0.013185	b	0.01180	b	0.012906	cd
A3B2	12x15	0.005608	a	0.007423	a	0.009529	a	0.009635	a
A3B3	12x25	0.005157	a	0.005423	a	0.009528	a	0.007895	a
CV =		**0.1234%**		**0.0581%**		**0.0041%**		**0.0215%**	

Es necesario precisar que las redes neuronales seleccionadas de este primer modelo son cuatro, una para cada zona sin embargo todas están compuestas por 12 neuronas en la capa de entrada (retardos), 25 neuronas en la capa oculta y una neurona en la capa de salida, lo que permitirá predecir el mes de enero del año 2016 en cada zona y para conseguir la predicción del mes de febrero del 2016, se ingresa a la red esta predicción de enero y así sucesivamente hasta conseguir todos los datos del primer semestre del año 2016. Hasta aquí solo tenemos las predicciones de las temperaturas superficiales del mar del primer semestre del año 2016, en las zonas calificadas como Niño.

En el segundo modelo el análisis de varianza de la red neuronal referida a la serie temporal velocidad de los vientos alisios muestra que existe diferencias altamente significativas entre los factores retardos y el número de neuronas en la capa oculta, así mismo se aprecia significación en las interacciones con un coeficiente de variabilidad de 0.0372%. El análisis de Duncan muestra que el factor retardo en su nivel 12, mostró estadísticamente el mejor resultado en el error cuadrático medio con un valor de 0.04134 y en el factor número de neuronas en la capa oculta los niveles de 16 y 24 meses alcanzaron los menores errores cuadráticos medios comportándose estadísticamente iguales, sin embargo numéricamente el nivel de 24 meses tiene el menor error con un valor de 0.05270; asimismo las interacciones 12x16 y 12x24 son estadísticamente iguales y fueron las que superaron al resto, sin embargo numéricamente la interacción que obtuvo el menor error medio cuadrático fue **12x24** con 0.032660. los datos se muestran en la Tabla 2.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 2: Análisis de Duncan del cuadrado medio del error de la velocidad de los vientos alisios; con nivel de significación de 0.05 y 27 grados de libertad del error.

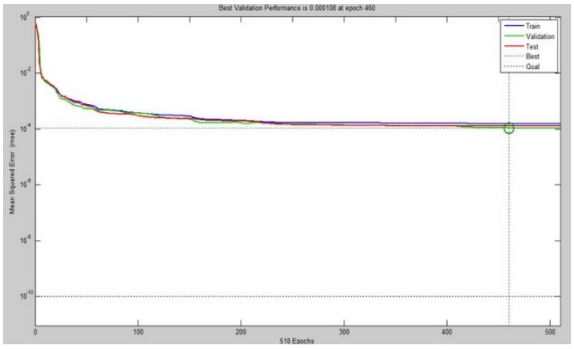
	Retardo		
	4	8	12
mse	0.072243	0.058969	0.041340
calif.	c	b	a

	Nº de Neuronas (CO)		
	8	16	24
mse	0.064218	0.055634	0.052700
calif.	b	a	a

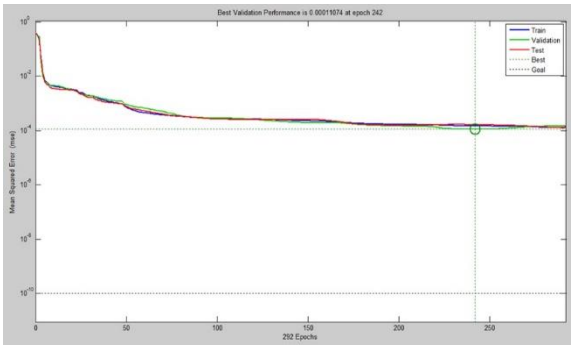
	Interacciones		
	4x8	4x16	4x24
mse	0.073844	0.069821	0.073064
calif.	e	de	e
	8x8	8x16	8x24
mse	0.065376	0.059154	0.052376
calif.	cd	bc	b
	12x8	12x16	12x24
mse	0.053436	0.037925	0.03266
calif.	b	a	a

En el caso del segundo modelo la red neuronal que se selecciona para predecir el comportamiento de los vientos alisios los primeros seis meses del año 2016 está compuesta por 12 neuronas en la capa de entrada (retardos), 24 neuronas en la capa oculta y una neurona en la capa de salida; las predicciones del primer semestre del año 2016, se realiza del modo ya comentado en el primer modelo; sin embargo hay que agregar que se realizó una transformación o escalamiento de los datos tanto de entrada como de salida entre -1 y 1.

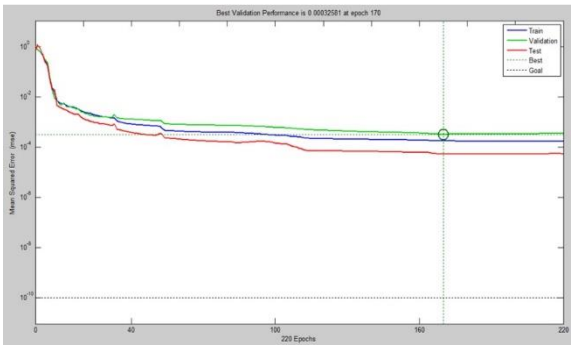
Las gráficas que siguen en la Figura 2, muestran el comportamiento del error medio cuadrático durante el aprendizaje de las cuatro redes neuronales aludidas anteriormente los datos del aprendizaje usan, 302 datos de entrenamiento, 65 datos de test y 65 datos de validación total 432 patrones. El error cuadrático medio con el cual se valida la red es el indicado en con el circulo verde en cada gráfica, además en la parte superior se registra el menor error cuadrático medio y en que época se presenta de los datos de validación. En forma general se observa que todas las redes neuronales construidas en este modelo logran alcanzar valores de error muy pequeños, y el análisis de las respectivas regresiones son superiores en todos los casos a 0.99 indicando que existe una alta correlación entre los datos de entrada y las salidas de la red.



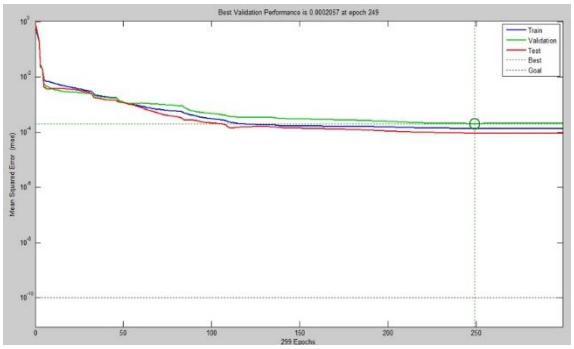
Net(Niño 1+2): mse=0.000108, época=460



Net(Niño 3): mse=0.00011074, época=242



Net(Niño 4): mse=0.00032581, época=170



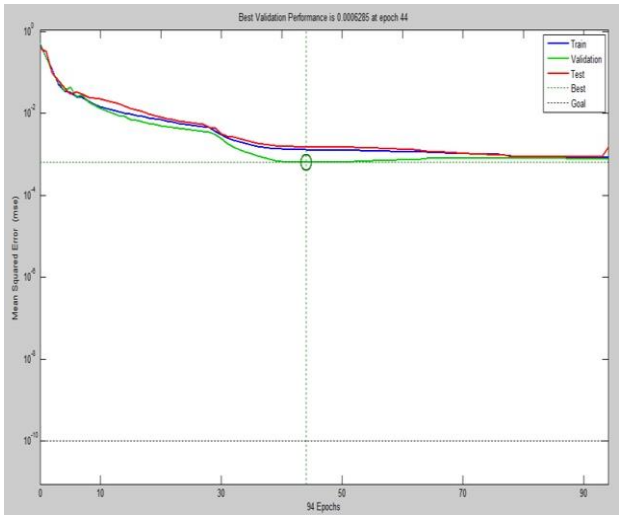
Net(Niño 3.4): mse=0.0002057, época=249

Figura 2: Comportamiento del error en el aprendizaje del Modelo 1

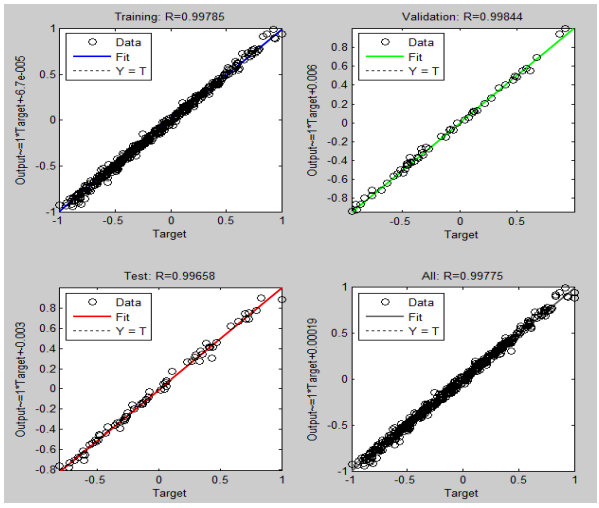
Analizando el comportamiento del error medio cuadrático durante el aprendizaje de la red en el segundo modelo referido a la velocidad de los vientos alisios, se observa que el error cuadrático medio con el cual se

ISBN 978-607-8242-11-5

valida la red es 0.0006285 y se encuentra en la época número 44, conforme se aprecia en la parte superior de la gráfica. Así mismo se observa un alto grado de correlación entre las variables de entrada y la salida de la red neuronal correspondientes a los datos de entrenamiento, test y validación y todos juntos; ver Figura 3.



Comportamiento del mse modelo neuronal 2



Regresión entre la variable de entrada y salida de la red para todos los datos.

Figura 3: Comportamiento del error cuadrático medio y regresión del modelo 2

En este estado termina la primera fase para la predicción del FEN en Piura, reportando los datos de salida de las redes neuronales referidos a las temperaturas superficiales del mar y a la velocidad de los vientos con la predicción del primer semestre del 2016, en la tabla que sigue, Tabla 3 se muestra tanto los datos que predicen las redes y los datos reales ocurridos durante el primer semestre del 2016 y se observa claramente que los errores son mínimos.

Tabla 3: Predicción de las RNA y Datos reales del primer semestre del 2016 (tsm y velocidad de los vientos)

	Predicciónes de las RNA modelos 1 y 2					Datos reales				
	Temperaturas superficiales del mar				Velocidad	Temperaturas superficiales del mar				Velocidad
	Niño 1+2	Niño 3	Niño 4	Niño 3.4	vientos	Niño 1+2	Niño 3	Niño 4	Niño 3.4	vientos
ENE	24.87	27.83	29.81	29.01	6.29	26.21	28.13	29.46	28.95	6.00
FEB	27.86	27.72	29.45	28.80	7.58	27.29	28.40	29.40	28.90	9.00
MAR	26.89	28.84	29.42	28.96	6.68	27.54	28.69	29.42	28.86	7.80
ABR	25.73	28.17	29.48	29.01	-0.11	25.97	28.63	29.44	28.96	2.50
MAY	25.86	28.30	29.54	28.85	4.32	25.05	27.81	29.51	28.60	1.40
JUN	24.57	25.43	29.56	28.65	-1.23	23.73	26.83	29.35	27.83	0.00

La segunda fase se inicia recolectando los datos del error cuadrático medio de todas las instancias con cuatro repeticiones del modelo 3; esta recogida de información tomó aproximadamente 90 minutos en concluirse y el análisis de varianza con disposición factorial muestra que los factores número de neuronas en la capa oculta 1 y número de neuronas en la capa oculta 2, tienen influencia altamente significativa en el error cuadrático, sin embargo, el factor número de épocas resulta ser indiferente en el error cuadrático medio y esto se debe a que se consigue un error muy pequeño del orden de los centésimos o menos a partir de 150 épocas. En el análisis de la interacciones se observa que únicamente hay alta significación cuando interactúan solo dos factores estos son: número de neuronas en la capa oculta 1 y número de neuronas en la capa oculta 2; sin embargo cuando interactúan separadamente los factores 1 y 2 con el factor número de épocas no se observa influencia significativa en el error cuadrático medio; finalmente la interacción de los tres factores tampoco muestran influencia en el error cuadrático medio lo que significa que el factor número de épocas no influye en los resultados debido a que se consigue errores muy pequeños con pocas épocas de manera que aun cuando siga iterando el algoritmo de aprendizaje, las mejoras logradas no son de gran magnitud que provoquen un cambio en los resultados del error cuadrático medio. El coeficiente de variabilidad fue de 1.2022%, ver Tabla 4.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 4: Análisis de varianza del modelo 3, en disposición factorial de 3x3

Factores de variación	Gl	SC	CM	Fc	SIG
Tratamientos	26	0.000609			
A	2	0.000119	0.000059	4.926776	**
B	2	0.000185	0.000093	7.694270	**
C	2	0.000009	0.000004	0.360847	
AXB	4	0.000256	0.000064	5.315783	**
AXC	4	0.000008	0.000002	0.173238	
BxC	4	0.000015	0.000004	0.309941	
AXBXC	8	0.000017	0.000002	0.180646	
ERROR	81	0.000974	0.000012		
TOTAL	107	0.001583			
		CV =	**1.2022%**		

Con respecto al análisis de Duncan en Tabla 5, se observa que el primer factor, número de neuronas en la capa oculta 1, con 4 y 8 neuronas tienen mejores resultados y se comportan estadísticamente iguales; en el segundo factor, número de neuronas en la capa oculta 2, con 14 y 21 se lograron mejores resultados comportándose estadísticamente iguales y en relación al factor número de épocas pues se puede decir que todos los niveles de épocas son estadísticamente iguales, lo cual confirma lo que el análisis de varianza advierte; con respecto a las interacciones todas se comportan estadísticamente iguales con excepción de 10x7x150, 10x7x200 y 10x7x250, que tienen un error mayor al resto, sin embargo la interacción que numéricamente alcanzó el menor error cuadrático medio con 0.000003 es **10x14x250** y es la red que se selecciona para modelar las precipitaciones y en consecuencia predecir el FEN.

Tabla 5: Análisis de Duncan del cuadrado medio del error de la precipitación; con nivel de significación de 0.05 y 81 grados de libertad del error. CV = 1.2022%

	Nº de Neuronas (CO1)			Interacciones								
	4	8	12	4x7x150	4x7x200	4x7x250	4x14x150	4x14x200	4x14x250	4x21x150	4x21x200	4x21x250
mse	0.000377	0.000149	0.002476	0.001273	0.000538	0.000457	0.000089	0.000065	0.000059	0.000417	0.000349	0.000143
calif.	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	Nº de Neuronas (CO2)											
	7	14	21	7x7x150	7x7x200	7x7x250	7x14x150	7x14x200	7x14x250	7x21x150	7x21x200	7x21x250
mse	0.002851	0.000036	0.000114	0.000495	0.000346	0.000345	0.000045	0.000023	0.000023	0.000026	0.000018	0.000017
calif.	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	Nº épocas											
	150	200	250	10x7x150	10x7x200	10x7x250	10x14x150	10x14x200	10x14x250	10x21x150	10x21x200	10x21x250
mse	0.0014	0.00082	0.00078	0.01022	0.005996	0.005996	0.000009	0.000005	0.000003	0.000041	0.000011	0.000009
calif.	a	a	a	b	ab	ab	a	a	a	a	a	a

CO1: Capa oculta 1, CO2: Capa oculta 2

La red del tercer modelo se caracteriza por tener 5 neuronas en la capa de entrada, que corresponden a las variables de los modelos 1 y 2, de la primera fase; 10 neuronas en la primera capa oculta, 14 neuronas en la segunda capa oculta y una neurona en la capa de salida que es la precipitación; se utilizó los 444 patrones de los cuales 312 se utilizaron para el entrenamiento de la red, 66 patrones para prueba y 66 patrones para la validación; el algoritmo de entrenamiento fue *Levenberg-Marquardt.* Asimismo, se realizó escalamiento de todos los datos entre -1 y 1 y el comportamiento de las salidas de ésta red siguen muy de cerca los datos históricos reales de las precipitaciones conforme se puede apreciar en la gráfica de la Figura 4, en la cual el error cuadrático medio del entrenamiento de todos los 444 patrones es de 0.000037909 y un error porcentual medio absoluto de 0.2492; sobre esta gráfica se puede comentar que acierta correctamente los Niños calificados como extraordinarios, sin embargo, ampliando la gráfica se pueden observar que existen algunos errores de precisión en precipitaciones inferiores a 40mm. En la Figura 5, se observa el comportamiento de aprendizaje de esta red neuronal con un error cuadrático medio de 0.000012787 en los datos de validación y se presentó en la época 246.

ISBN 978-607-8242-11-5

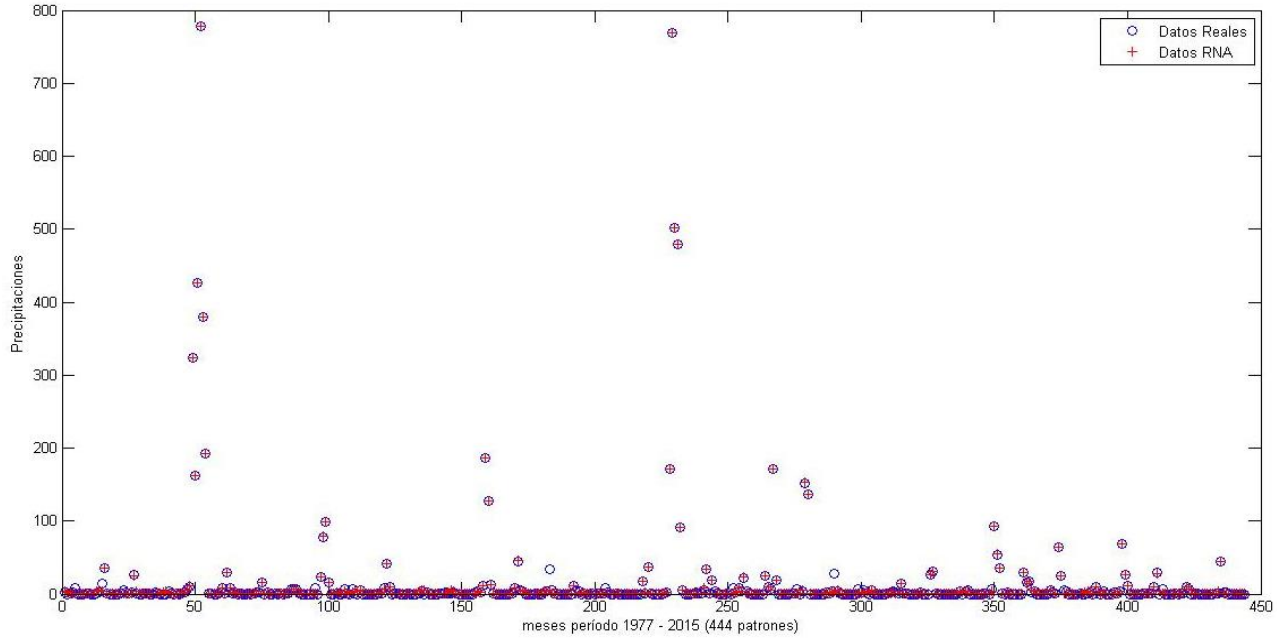


Figura 4: Gráfica de las precipitaciones de datos reales y pronosticados por la red

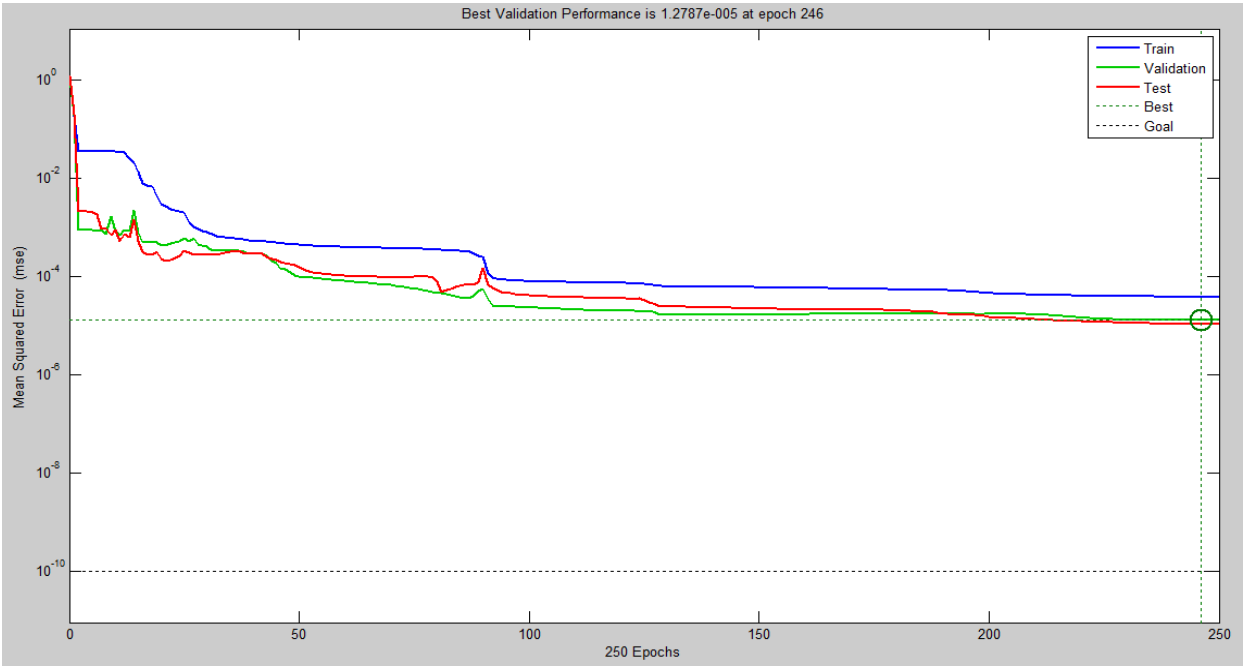


Figura 5: Gráfica del comportamiento del aprendizaje de red neuronal modelo 3, seleccionado

Haciendo un análisis extensivo seccionando las precipitaciones en clases de diferente rango podemos observar tabla en la Tabla 6, que las salidas de la red son muy precisas con respecto a las salidas deseadas (targets) tanto en la media de cada clase como en la desviación estándar, sin embargo, en las fronteras de las clases 1 y 2 hay un error en el reconocimiento por parte de la RNA.

Tabla 6: comportamiento agrupando las precipitaciones en 5 clases entre RNA vs datos Reales

Clasificación de la Precipitación	Salida RNA			Salida Deseada (targets)		
	Nº de datos	Media	DesvEst.	Nº de datos	Media	DesvEst
00 – 30	414	2.1963	4.8942	413	2.3363	5.1784
30.001 – 83	12	47.4832	15.0414	13	46.3000	14.7583
83.001 – 200	11	143.9221	35.5116	11	143.7818	35.5053
200.001 – 425	2	351.9555	27.4385	2	351.9500	27.4500
425.001 – a+	5	591.1693	150.9784	5	591.2800	151.0210

ISBN 978-607-8242-11-5

PREDICCIÓN DEL FEN PARA EL PRIMER SEMESTRE DEL 2016

1) Utilizando la RNA 10x14x250 y el Modelo matemático de Winter

Utilizando las predicciones de las redes neuronales de los modelos 1 y 2, según la tabla 3 de la primera fase, se hace la predicción del FEN utilizando la red neuronal artificial seleccionada en el modelo 3, para el primer semestre del año 2016, los resultados se muestran en la Tabla 7, en donde además se hace una comparación con el modelo matemático de Winter usando los datos transformados entre -1 y 1; se observa que entre los datos de precipitaciones reales transformados con los datos de la RNA también transformados, el error medio cuadrático de la predicción es de 0.00110 y el error porcentual medio absoluto de 2.21%; estos indicadores son mejores que los que proporciona el modelo matemático de Winters.

Tabla 7: Predicción de la RNA con los datos reales y contrastación con el modelo de Winter año 2016

	Datos reales		Predicción de la RNA		ECM	MAPE	Predicción WINTER	ECM	MAPE
	Normal	Transf.	Normal	Transf.					
ENE	0.8	-0.99794	0.00058	-0.99999	0.00000	0.20%	0.0000	0.0000	0.21%
FEB	52	-0.86639	23.3899	-0.93990	0.00540	8.48%	0.3561	0.0176	15.32%
MAR	82	-0.78931	95.6169	-0.75432	0.00122	4.43%	80.4059	0.0000	0.52%
ABR	0	-1	0.37308	-0.99904	0.00000	0.10%	57.2984	0.0217	14.72%
MAY	0	-1	0.00860	-0.99997	0.00000	0.00%	18.2448	0.0022	4.69%
JUN	0	-1	0.09757	-0.99974	0.00000	0.03%	7.9373	0.0004	2.04%
				Promedio	**0.00110**	**2.21%**	**Promedio**	**0.0070**	**6.25%**
				RECM	**0.03324**		**RECM**	**0.0837**	

2) Utilizando una RNA como reconocimiento de Patrones

Utilizando la clasificación de la tabla 6, se construyó la RNA, como reconocimiento de patrones con cinco neuronas en la capa de entrada, 3 neuronas en la capa oculta y 5 neuronas en la capa de salida, correspondientes a cada una de las clases siguientes:1 sin Niño, 2 Niño débil, 3 Niño moderado, 4 Niño fuerte y 5 Niño extraordinario; los resultados muestran un error en el reconocimiento de patrones del orden de 95.49% es decir de los 444 patrones la red a logrado reconocer 424; sin embargo, en la predicción del primer semestre del 2016 acertó el 100%. El comportamiento del aprendizaje se puede apreciar en la Figura 6, donde se observa que error mínimo cuadrático medio alcanzado fue 0.2687 en la predicción del FEN.

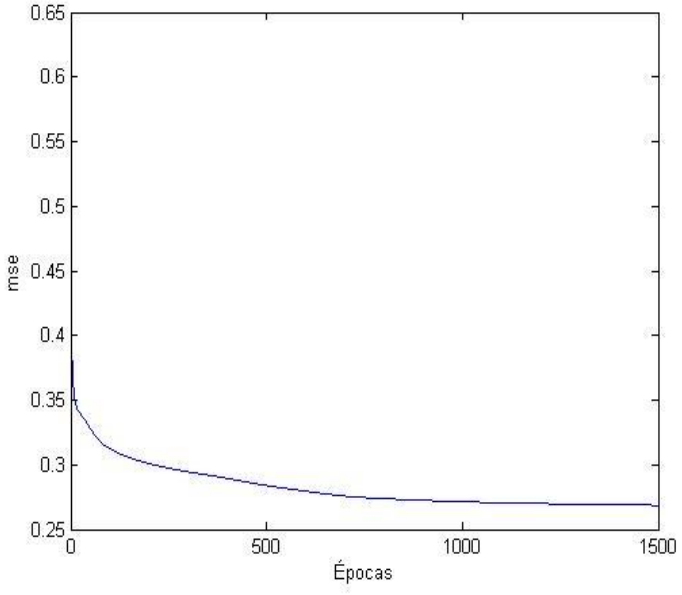
Datos reales y clasificados 1er semestre 2016:

0.8 52 82 0 0 0
1 2 2 1 1 1

Datos clasificados por la RNA Como reconocimiento de patrones

1 2 2 1 1 1
100% de acierto

Predicción del FEN para el 1er semestre del 2016



Comportamiento del mse en el aprendizaje de la RNA como reconocimiento de patrones

Figura 6: predicción de la RNA como reconocimiento de patrones y comportamiento del "mse"

ISBN 978-607-8242-11-5

Conclusiones

De acuerdo a los resultados se afirma las siguientes conclusiones: 1) Los modelos seleccionados de RNA como series temporales propuestos en la primera fase y su tratamiento en la segunda fase logró identificar a la RNA 10x14x250 como la que mejor predice el FEN en Piura con seis meses de anticipación y con un alto grado de precisión lográndose un mse de 0.000037909 y un mape de 0.2492% durante el aprendizaje de todos los patrones y un mse de 0.00110 y un mape de 2.21% en la predicción; 2) La RNA 5x3x5 como reconocimiento de patrones con un 95.49% de acierto logró predecir el 100% de las precipitaciones del primer semestre 2016 alcanzando un mínimo error cuadrático medio en el aprendizaje de 0.2687; 3) Se verificó que los resultados en condiciones normales tanto de los datos reales como de los datos de predicción de la RNA 10x14x250, redondeados a cero decimales (1, 52, 82, 0, 0, 0 y 0, 23, 96, 0 0 0) tienen pequeñas diferencias sin embargo estas variaciones en términos de impacto del FEN, no son perceptibles; 4) Las temperaturas superficiales del mar en las zonas calificadas como Niño tienen en el año un comportamiento simétrico con una distribución de frecuencias aproximadamente uniforme y la velocidad de los vientos en el año tienen una distribución asimétrica con una marcada disminución de su frecuencia conforme avanza los meses de enero hasta junio haciéndose negativa en los meses de agosto a septiembre para comenzar a subir de octubre a diciembre. 5) todas las variables tienen una alta correlación con la precipitación en Piura excepto la temperatura superficial del mar de la zona Niño 4. Se sugiere ampliar la investigación para incluir todas las estaciones meteorológicas del Departamento de Piura.

Referencias Bibliográficas

[1] Abhishek, K., Singh, M. P., Ghosh, S., &Anand, A. (2012). Weather forecasting model using Artificial Neural Network. ProcediaTechnology, 4, 311-318.

[2] Baawain, M. S., Nour, M. H., El-Din, A. G., & El-Din, M. G. (2005). El Niño southern-oscillation prediction using southern oscillation index and Niño 3 as onset indicators: Application of artificial neural networks. Journal of EnvironmentalEngineering and Science, 4(2), 113-121.

[3] Kemper, N., Ochoa, L., Rojas, I. (2013). "Modelo Neuronal para la Estimación de la Radiación Global Horaria en la República Mexicana". Proceedings de la 12va. Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática, International Institute of Informatics and Systemics, Orlando, Florida, EUA, julio 2013, pp.270-275, ISBN: 978-1-936338-82-5.

[4] Litta, A. J., Idicula, S. M., &Naveen Francis, C. (2012). Artificial Neural Network Model for the Prediction of Thunderstorms over Kolkata. International Journal of ComputerApplications, 50(11), 50-55.

[5] More, M. (2006). Determinación de parámetros atmosféricos frente a un período de sequía y su correlación con los valores normales de la atmosfera. Revista Científica Universalia. Universidad Nacional de Piura- Perú.

[6] More, M. (2007). Detección de anomalías atmosféricas y oceanográficas en eventos El Niño, Años: 2011-2012. Paita. Revista Científica Universalia. Universidad Nacional de Piura- Perú.

[7] More, M. (2012). Determinación de parámetros atmosféricos y oceanográficos: En un período de niño débil y otro extraordinario con relación a los valores normales de la atmósfera. Editorial Académica Española. Berlín-Alemania.

[8] Olaiya, F., & Adeyemo, A. B. (2012). Application of data mining techniques in weather prediction and climate change studies. International Journal of InformationEngineering and Electronic Business (IJIEEB), 4(1), 51.

[9] Ovando, G., Bocco, M., & Sayago, S. (2005). Redes neuronales para modelar predicción de heladas. Agricultura Técnica, 65(1), 65-73.

[10] Paras, S. M., Kumar, A., & Chandra, M. (2009). A feature based neural network model for weather forecasting. International Journal of ComputationalIntelligence, 4(3).

[11] Prada-Sarmiento, F., & Obregón-Neira, N. (2009). Forecasting of monthly streamflows based on artificial neural networks. Journal of HydrologicEngineering, 14(12), 1390-1395.

[12] Salini Calderón, G. (2010). Pronosticando el índice ENSO varios pasos en adelante mediante técnicas de modelamiento no lineal. Ingeniare. Revista chilena de Ingeniería, 18(3), 326-334.

[13] Vargas, E., Pomar, C., & Neira, C. (2012). Predicción de caudales de ríos aplicando el modelo neurodifuso anfis y redes neuronales. Sistemas, cibernética e informática. 9(1), 28-35.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Comparación de Atributos Contextuales utilizando Técnicas de Agrupamiento para Apoyar la Integración de Procesos de Negocio

Jorge E. Giraldo[1,2], Demetrio A. Ovalle[1], Flavia M. Santoro[3],
(1) Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión, Grupo de Investigación GIDIA, Medellín-Colombia
(2) Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid Facultad de Ingeniería, Medellín-Colombia.
(3) Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: jegiraldo@elpoli.edu.co, jegiraldp@unal.edu.co, dovalle@unal.edu.co, flavia.santoro@uniriotec.br

Resumen

El objetivo de este artículo es proponer un mecanismo de comparación de atributos contextuales sobre modelos de procesos de negocio utilizando técnicas de agrupamiento. La comparación se basa en análisis sintáctico y semántico de los procesos, tanto de sus elementos como de la información que se relaciona con el dominio de ejecución. La metodología utilizada por el mecanismo de comparación de atributos contextuales utiliza la técnica de agrupamiento k-means soportado por un módulo inteligente que interactúa con una plataforma orientada a servicios Web, con el fin de seleccionar los procesos más relevantes. La validación tuvo en cuenta la información contextual. Se puede concluir que el uso de técnicas de agrupamiento aplicadas en la comparación de procesos reduce la ambigüedad en la identificación de alertas contextuales y de esta forma mejora la integración de los procesos de negocio involucrados.

Palabras clave: integración de procesos de negocio, atributos contextuales, técnicas de agrupamiento, modelo sensible al contexto.

Contextual Attributes Comparison based on Clustering Techniques to support Business Process Integration

Abstract

The aim of this paper is to propose a contextual attributes matching system of business process models using grouping techniques. The matching is based on syntactic and semantic analysis, both are related to the domain of execution. The methodology used by the contextual attribute matching system uses the k-means grouping technique supported by an intelligent module that interacts with a Web services architecture, in order to select the most relevant processes. The validation considered contextual information. It can be concluded that the use of clustering techniques applied in process matching reduces the ambiguity in the identification of contextual alerts and in this way improves the integration of the business processes involved.

Keywords: business process integration, contextual attributes, clustering techniques, context-aware model.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La Integración de Procesos de negocio tiene sus antecedentes en conceptos tales como Integración de Aplicaciones (EAI – Enterprise Application Integration) donde se busca es conectar aplicaciones y/o módulos de sistemas corporativos por medio de tecnologías de intercambio de datos y arquitectura orientadas a servicios (Manouvrier y Ménard, 2010).

Esta integración tradicional, busca principalmente generar puntos de conexión y pasarelas de datos con el fin de lograr la unidad de varios módulos, sin embargo, la integración a nivel de funciones y roles queda un poco rezagada, debido a la carencia de conexión con los procesos propios delas organizaciones, representada en su mapa de procesos (Raut y Basavaraja, 2003).
Con el aumento de la capacidad de procesamiento y las transacciones, la computación centrada en procesos (PAIS – Process Aware Information System) cobra importancia, ya que permite integrar además de las tecnologías, los flujos de información desde un punto de vista de actividades, roles y dominios de ejecución (Dumas et. al, 2005). Por lo tanto, representar la integración en términos de procesos garantiza la definición de una secuencia de actividades llevadas a cabo por roles de una empresa o institución, con el fin de alcanzar resultados de negocio, gestionando información relacionada directamente con su cadena de valor (Dumas et. al, 2013), (Benedict, et.al, 2013).

Por tanto, la integración de procesos de negocio (BPI - Business Process Integration) se enfoca principalmente en la generación de nuevos modelos de procesos a partir de una colección de ellos, conocidas como variantes (La Rosa et. al, 2017). La integración busca consolidar en varios procesos en uno solo, con el fin de realizar actividades de mantenimiento, actualización y mejoramiento. El proceso generado en la integración puede reemplazar una o varias instancias, sin embargo, no siempre esto es posible, debido a la especialidad del dominio de ejecución.

Algunos trabajos relacionados con métodos de integración son, Morrison, et. al, (2009), que plantean de manera general las fases que comprenden un método para la integración de procesos, estas son: (1) Fase de Comparación: que busca seleccionar los procesos propios de un dominio específico; (2) Fase de Integración: es donde se fusionan los procesos seleccionados, el mayor reto es conservar sus características generales y específicas, por último, (3) Fase de Regresión, que busca mediante la simulación y análisis de bitácoras de ejecución, la viabilidad de la integración.

Así mismo, están las aproximaciones basadas en integración de aplicaciones, que consideran: (1) Fase de Modularización: donde se generan los módulos independientes de la plataforma de ejecución, (2) Fase de implementación: donde se construyen de servicios tipo pasarela para la extracción de información, y (3) Fase de Integración: se realiza la coordinación servicios con base en la definición de flujos de trabajo. Estas aproximaciones buscan la integración entre la gestión por procesos y la arquitectura orientada a servicios (Chudnovskyy, et, al. 2011).

Por último, existen enfoques conversacionales (Steinau, et. al, 2017), donde su concepto principal es la coordinación de mensajes entre los procesos conocido como coreografía (Weske, 2010). Se caracterizan por las siguientes fases: (1) Fase de Definición de objetivo: se declara el estado final y se define el plan de acciones a seguir, (2) Fase Identificación: se realiza una selección de los procesos a interactuar (3) Fase de Coordinación: se genera una descripción de la coordinación con que puede ser almacenada en colecciones, por último, (4) Fase Ejecución: Se valida el protocolo de coordinación definido, con el fin de validar su futura investigación.

Cada uno de los enfoques metódicos expuestos, generan como resultado una descripción de lo que se desea obtener después de la integración, ya sea un protocolo de comunicación, como un nuevo proceso generado. Sin embargo, existen algunos elementos adicionales que deben ser considerados, como lo son: los escenarios donde se integran los procesos (Schubert y Legner, 2011) y la información contextual relacionada (Schonewille y Bouwman, 2012)

Con base en lo anterior un aporte en este documento es presentar un método de integración de procesos de negocio que tenga en cuenta la información contextual relacionada, consta de las siguientes fases: (1) Fase de definición de objetivo, (2) Fase de Búsqueda y selección de procesos, (3) Fase de Integración y Regresión y (4) Fase de Propagación y Ejecución. Esta última fase indica el sentido de la integración, el cual gira en torno a la actualización de variantes a partir cambios generados en un modelo de referencia.

Por lo tanto, cada uno de los procesos contiene atributos, como son: el número de actividades, número de roles, cantidad de variantes, modelo de referencia asociado, dominio de ejecución, tipos de recursos

 ISBN 978-607-8242-11-5

asociados e información relevante para la empresa. Con esta información es posible comparar los procesos mediante medidas de similitud, para ello las técnicas de agrupamiento permiten la ubicación de términos en conjunto con características específicas (Sajja y Akerkar, 2012).

El elemento principal del método son los escenarios de integración, los cuales son de tipo organizacional y operacional. Una visión general del método Cada uno de estos escenarios se formaliza mediante situaciones contextuales. Para la selección y alineación de los procesos se propone una aproximación basada en la medida de similitud de comportamiento de procesos (Dong et. al, 2014) complementado con técnicas de agrupamiento.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera: A continuación, se describe el método propuesto, continúa con la definición de atributos contextuales sobre las fases del método. Luego se presenta la técnica de agrupamiento empleada y como se aplica en el método propuesto. Por último, se describe la validación de la aproximación aplicada a un caso de estudio, donde se diseña una arquitectura distribuida que le da soporte, dando paso a conclusiones y trabajo futuro.

MÉTODO DE INTEGRACIÓN DE PROCESOS PROPUESTO

El método propuesto busca que en cada una de las fases se tenga en cuenta información contextual relacionada con escenarios de integración. El método consta de fases secuenciales con mecanismos de iteraciones, que permiten la adaptación del mismo a las situaciones que se presenten.

La Figura 1, presenta una vista general del método propuesto. Se observa que entre las 2 primeras fases, es posibles realizar iteraciones con el fin de obtener resultados adaptables al contexto, así como entre las 2 últimas fases. De manera transversal se ubican los aspectos contextuales para tener en cuenta, así como los escenarios de integración; de esta manera el método garantiza flexibilidad en la propagación de actualizaciones, a partir de la sensibilidad a las situaciones contextuales que se presentan.

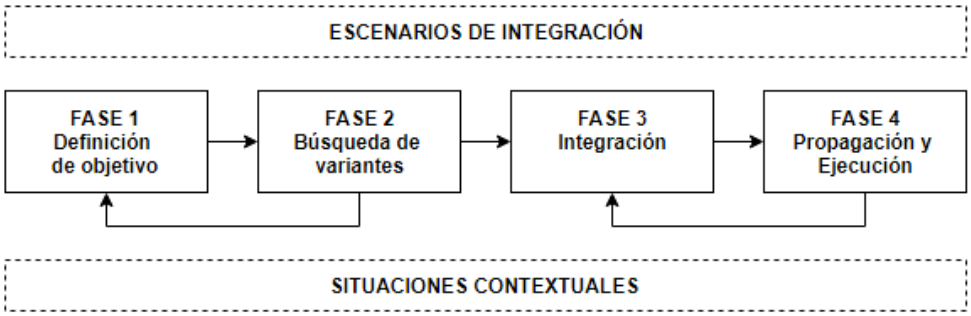


Fig. 1: Método de integración propuesto

Fase 1. Definición Objetivo de integración: Para realizar la integración, es necesario plasmar claramente el proceso que se quiere obtener, para ello es necesario incluir el listado de roles, actividades, eventos asociados, restricciones tecnológicas y el orden de integración.

Fase 2. Búsqueda de variantes: Se realizan una búsqueda de variantes apropiados para la integración. La búsqueda se basa en medidas de similitud y empleando técnicas de agrupamiento. Es posible redefinir los pesos de la descripción del objetivo de integración, por ello existe relación hacia la Fase 1.

Fase 3. Integración: Para la integración se debe tener en cuenta la agregación y la regresión. La primera realiza una fusión de datos de los elementos a partir de relaciones comunes. Y la determina la cercanía del resultado obtenido con las variantes.

Fase 4. Propagación y ejecución: La propagación emplea un enfoque basado en verificación de restricciones. Luego de aplicadas las actualizaciones se ejecutan para determinar el rendimiento y compararlo con los procesos originales.

Escenarios de Integración. Los escenarios están ligados directamente con la información organizacional y operacional de los procesos. La primera se relaciona directamente el organigrama, garantizando que roles y funciones propias de los cargos sean consistentes a la hora de integrar, por su parte la información

 ISBN 978-607-8242-11-5

operacional tiene en cuenta los aspectos de implementación, tales como: integración de datos, de vistas y lógica de negocio.

Atributos contextuales: En cada uno de los niveles de integración, se presentan situaciones que pueden ser afectadas por el contexto, en la Tabla 1 se presenta aquellas consideraciones contextuales posibles para cada una de las fases del método de integración. Los atributos surgen a partir de la información de cada uno de los procesos, por ejemplo su estructura y su comportamiento.

Tabla 1: Consideraciones contextuales según escenarios de integración y fases

Escenario	*Ci- Consideraciones Contextuales en la integración*	*Fase del método*
Operacional (Físico)	C1: Competencias y disponibilidad de los participantes.	Fase 1
	C2: Entorno geográfico de ejecución	Fase 1
	C3: Eventos asociados a la creación de la variante	Fase 2
	C4: Representación del dominio y variantes	Fase 1 – Fase 2
Organizacional (Lógico)	C5: Identificación de alertas creadas en el nivel físico	Fase 2 – Fase 3
	C6: Priorización de variantes	Fase 3
	C7: Razonamiento basado en similitud.	Fase 3 – Fase 4
	C8: Ejecución de la integración	Fase 4

Para el caso de los procesos de negocio, cada una de las consideraciones contextuales tiene un vínculo con sus atributos, ya sea en sus actividades, roles, flujo de información y/o restricciones propias de cada negocio y dominio de ejecución. De esta manera al analizar cada uno de los atributos es posible realizar comparación entre los procesos y por medio de medidas de similitud determinar afinidades y por ende aplicar técnicas de agrupamiento.

La siguiente sección presenta la aplicación de las técnicas de agrupamiento, específicamente el algoritmo K-Means (MacQueen, 1967) que busca principalmente la ubicación de elementos de una colección en grupos con características en común, para el caso de la integración, determina aquellos procesos apropiados para su inclusión.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE AGRUPAMIENTO EN LA INTEGRACIÓN DE PROCESOS

Las técnicas de agrupamiento se emplean en la Fase 2 del método propuesto (*Búsqueda de variantes),* con el fin de encontrar dentro de una colección de variantes de procesos, aquellas que se relacionan con un modelo de referencia. Una vez identificado las variantes a partir del dominio de aplicación e identificación básica, se procede al ordenamiento de estas, por medio de su agrupamiento por valores de similitud.

En la Figura 2, se observa como después de seleccionar el grupo inicial, se aplica un filtro estructural y luego uno semántico, por último, de aplica un filtro contextual, que básicamente evalúa las situaciones presentes en cada uno de los procesos. Los enfoques de agrupamiento ayudan a la identificación de patrones de comportamiento, con el fin de evaluar el rendimiento del proceso al momento de actualizar sus cambios.

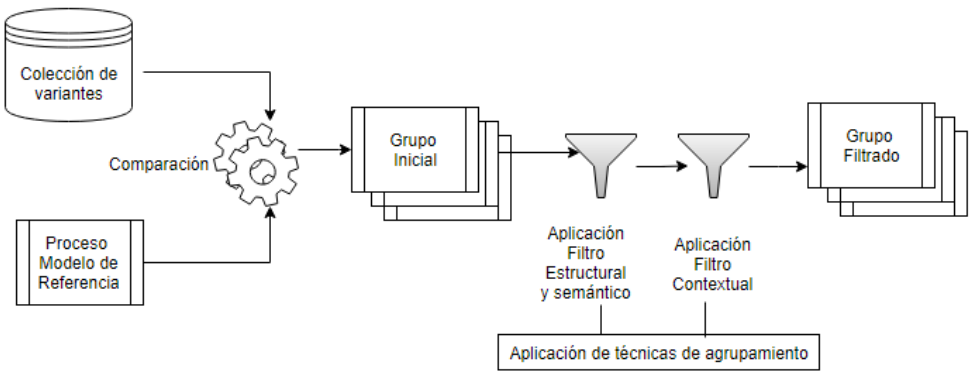


Fig. 2: Técnicas de agrupamiento y la integración de procesos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Algoritmo de agrupamiento K-Means: Hace parte de las técnicas de aprendizaje de máquina, junto con el descubrimiento de patrones. El algoritmo k-means tiene su origen en la minería de datos, donde se busca generar grupos a partir de centros de aglomeración. Para la determinación de los grupos de define una medida de similitud, que puede ser definida por medio de heurísticas.

Para el caso de los procesos de negocio y con base en la revisión dada por van Dongen et. al, (2013), se definieron las medidas de similitud siguientes:

Similitud Estructural. Considera el número de componentes identificados en el modelo del proceso. Tiene en cuenta el número de actividades, estructural de control, actores, transiciones y su log de ejecución.

Similitud Semántica. Su cálculo se centra la equivalencia de los procesos, desde la pertenencia al mismo dominio conceptual, así como su secuencia lógica y los elementos que diferencian un proceso de otro.

Básicamente el algoritmo de agrupamiento k-means, aplicado a la integración funciona como se presenta en la Figura 3.

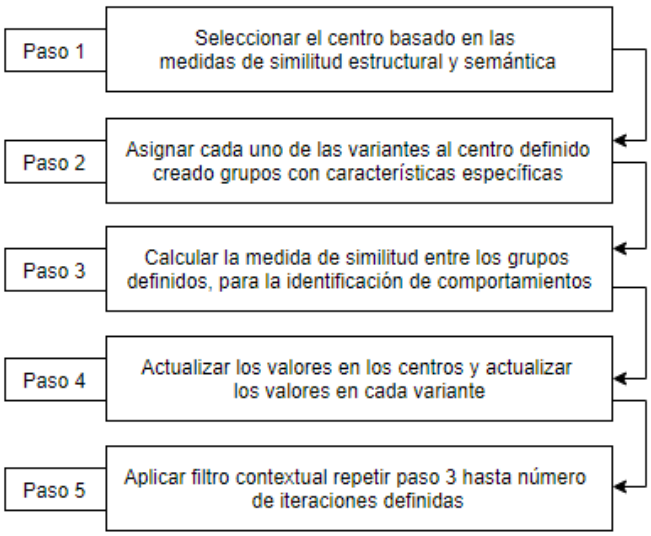


Fig. 3: Algoritmo k-mean en la integración de procesos

SISTEMA DE COMPARACIÓN DE ATRIBUTOS CONTEXTUALES PROPUESTO

El sistema propuesto para la comparación inteligente de procesos de negocio se compone de los siguientes elementos:

Sistema de representación: Se presentan los procesos de negocio, variantes de proceso y objetivo de integración. La representación abstracta de un proceso de negocio se conoce como modelo de procesos (Zhiqiang, Remco y Dijkman, 2012), la cual puede servir para la generación de instancias del mismo. Como apoyo se construyó una ontología de dominio y una ontología de procesos sensibles al contexto.

Modelo de contexto**:** Está compuesto por situaciones sobre elementos contextuales con información asociada a restricciones. Con base en el trabajo realizado en (Carvalho, 2015), se propone la representación de situaciones basadas en restricciones.

Situación 1 - “Dado un evento de adición – Ev(add) – sobre un elemento contextual eCtx y se satisface la restricción organizacional sobre un elemento de dominio, entonces se presenta una situación que existe prioridad contextual en dicha situación”.

Situación 2 - A diferencia de la situación 1, se basa en un evento de tipo eliminación – Ev(del).

Situación 3 - “Dado un evento de adición – Ev(add) – sobre un Elemento Contextual cual satisface la restricción operacional, concepto asociado al dominio, entonces se confirma que existe prioridad contextual en dicha situación”

ISBN 978-607-8242-11-5

Situación 4 - A diferencia de la situación 3, se basa en un evento de tipo eliminación – Ev(del).

Procedimiento de comparación**:** A partir del uso de las métricas de similitud semántica y estructural se considera que, 2 procesos tienen un alto grado de similitud, cuando los valores son iguales a 1 (probabilidad de 100%). La Figura 4 presenta el pseudocódigo de la comparación.

```
inferencia():

    cargar_objetivo_integracion(modelo_ref)
    analizarCambios(objetivoIntegracion);
    variantes[]=recuperar_variantes();

    comparacion():
        para cada v en variantes[]:
            sim_Sintactica(modeloRef, vi);
            sim_Semantica(modeloRef, vi);
            calcularSimilitudTotal();
            grupos=agrupar();
    fin comparacion

    aplicarContexto(situaciones[], grupos)
    si(analizarResultados()<-ok):
        generarReporteDetallado(grupos);
    sino:comparacion();

fin inferencia()
```

Fig. 4: Procedimiento de comparación.

Sistema Multi-agente: Los agentes facilitan la ejecución de funciones de manera remota y distribuida, facilitando así su integración con los servicios web. Se definieron los siguientes agentes: Agente Ontológico, Agente Gestor, Agente Buscador y Agente Usuario.

Capa basada en servicios web: Con el fin de dar un soporte funcional la consulta y razonamiento sobre el repositorio de ontologías, se propone un sistema basado en servicios web, el cual se compone de los siguientes servicios:

- Servicio Web de gestión de procesos: Encargado de la representación de los procesos en el lenguaje XPDL y su gestión por medio de reportes especializados.

- Servicio Web de caracterización: Este servicio se encarga se calificar cada uno de los procesos con el fin que pueda ser utilizado por el procedimiento de comparación.

- Servicio Web ontológico: Permite enviar consultas a las distintas ontologías diseñadas. Sus respuestas están basadas en formatos SOAP (Simple Object Access Protocol).

VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE COMPARACIÓN BASADO EN AGRUPAMIENTO

El sistema de comparación de validó aplicado a cuatro casos de estudios, para los cuales se definió una colección de variantes asociadas. Estas variantes describen suceso en procesos que generaron la creación de una nueva estructura. En la Tabla # 2, se condensa la información de la descripción de cada proceso.

Tabla 2: Atributos susceptibles al contexto en cada proceso

Nombre	*Participantes*	*actividades*	*gateways*	*transiciones*	*variantes*	*Instancias*
Acreditación en Calidad	3	13	2	13	5	50
Admisión Universitaria	2	13	2	14	4	150
Producción de Café	2	13	2	14	7	100
Diseño de Currículos	3	10	1	10	3	25

Para analizar el comportamiento del proceso, se procedió a generar registros de 100 ejecuciones; tomando como elemento principal la probabilidad de ejecución de un flujo determinado. El flujo está dado en términos de la transición entre cada una de las actividades (se incluyen las estructuras de control). Cada una de las ejecuciones varía la probabilidad de ejecución de cada uno de los flujos.

ISBN 978-607-8242-11-5

La Figura 5, presenta un ejemplo de probabilidad de ejecución de los flujos de un proceso, es así que al volver dependiente la probabilidad con variables del contexto, es posible generar situaciones que generen ejecuciones diferentes para el proceso; en la figura se indica que la actividad A3 tiene una probabilidad de 80% ya que la estructura de control y sus datos se lo permiten.

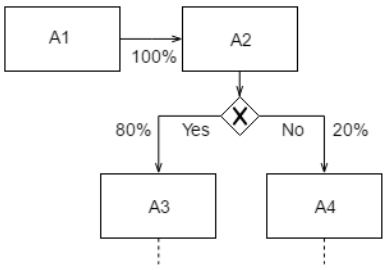


Fig. 5: Estructura de generación de registro de ejecuciones

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 presenta la agrupación de los procesos después de las ejecuciones e iteraciones respectivas. Se resalta la existencia de proceso identificado cuando cambia de grupo, sin embargo, sigue conservando valores cercanos hacia el otro grupo. La nomenclatura indica el valor tomado y el grupo al cual pertenece, separados por un guíon.

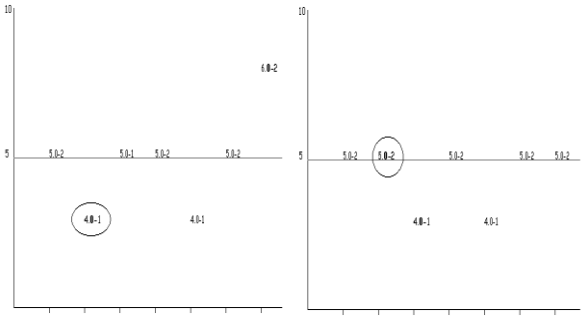


Fig. 6: Agrupamiento de procesos

Lo anterior indica la necesidad de la intervención subjetiva del usuario del sistema, para tomar la decisión si se aplica o no un cambio sobre dicho proceso, teniendo en cuenta posibles situaciones o información que aún el sistema contenga

CONCLUSIONES

El mecanismo propuesto y validado, permite demostrar que un razonamiento basado en situaciones contextuales reduce el número de variantes susceptibles a la integración. De esta manera al propagar cambios desde un modelo de referencia es posible que las variantes no vean afectado su rendimiento en la ejecución.

El uso de técnicas de agrupamiento permite la identificación de patrones de comportamiento que indican la viabilidad de aplicar o no los cambios provenientes de un modelo de referencia. Mediante la identificación de alteraciones en su rendimiento, es posible reversar cambios aplicados a las variantes. Así mismo, considerando aspectos semánticos garantiza un soporte conceptual. Por su parte los factores estructurales se enfocan en el ajuste al dominio de ejecución.

Sin embargo, se deben fortalecer aspectos como: la evaluación de la pertinencia en la recuperación de variantes a partir de la aplicación del filtro contextual, para ello se deben explorar otros enfoques de recuperación de procesos. Así ampliar el espectro de datos, como por ejemplo toma de datos en tiempo real, a partir de secuencias.

ISBN 978-607-8242-11-5

AGRADECIMIENTOS. La investigación presentada en este artículo es un resultado parcial de la tesis de doctorado de Jorge E. Giraldo Plaza titulada: “Método de integración inteligente de procesos de negocio sensible y adaptado al contexto” apoyada académicamente por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, El politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y La Universidad Federal del Estado de Rio de Janeiro de Brasil.

REFERENCIAS

Benedict, T., Bilodeau, N., Vitkus, P., Powell, E., Morris, D., Scarsig, M., ... & Fuller, M. (2013). BPM CBOK Version 3.0: guide to the business process management common body of knowledge. ABPMP International/Createspace.

Carvalho, J., F. Santoro y K. Revoredo, “*A method to infer the need to update situations in business process adaptation*”, Computers in Industry, Volume 71, Pages 128-143, ISSN 0166-3615 (2015).

Chudnovskyy, O., Gebhardt, H., Weinhold, F., & Gaedke, M. (2011). Business Process Integration using Telco Mashups. Procedia Computer Science, 5, 677-680.

Dong, Z., Wen, L., Huang, H., & Wang, J. (2014, October). Cfs: A behavioral similarity algorithm for process models based on complete firing sequences. In OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems" (pp. 202-219). Springer, Berlin, Heidelberg.

Dumas, M., Van der Aalst, W. M., & Ter Hofstede, A. H. (2005). Process-aware information systems: bridging people and software through process technology. John Wiley & Sons.

Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J y Reijers, H. “Fundamentals of Business Process Management”. Primera edición. Editorial Springer (2013).

MacQueen, J. (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations, Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium On Mathematical Statistics and Probabilities, 1, 281-296.

Manouvrier, B., & Ménard, L. (2010). Application Integration: EAI B2B BPM and SOA (Vol. 130). John Wiley & Sons.

Morrison, E., A. Menzies, G. Koliadis y A. K. Ghose, “*Business Process Integration: Method and Analysis”*. In Proc. Sixth Asia-Pacific Conference on Conceptual Modelling, APCCM (2009).

La Rosa, M., Van Der Aalst, W., Dumas, M. and Milani, F. Business Process Variability Modeling: A Survey. ACM Comput. Surv. 50, 1, Article 2 (March 2017), 45 pages. DOI: https://doi.org/10.1145/3041957

Raut, A., & Basavaraja, A. (2003, October). Enterprise business process integration. In TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region (Vol. 4, pp. 1549-1553). IEEE.

Sajja, P. S., & Akerkar, R. (2012). Intelligent technologies for Web applications. CRC Press.

Schonewille, J. P., & Bouwman, W. A. G. A. (2012, January). Contextual aspects in enterprise integration. In System Science (HICSS), 2012 45th Hawaii International Conference on (pp. 4672-4681). IEEE.

Schubert, P., & Legner, C. (2011). B2B integration in global supply chains: An identification of technical integration scenarios. The Journal of Strategic Information Systems, 20(3), 250-267.

Steinau, Sebastian and Künzle, Vera and Andrews, Kevin and Reichert, Manfred (2017) Coordinating Business Processes Using Semantic Relationships. In: 19th IEEE Conference on Business Informatics (CBI 2017), July 2017, Thessaloniki, Greece.

van Dongen, B., Dijkman, R., & Mendling, J. (2013). Measuring similarity between business process models. In Seminal Contributions to Information Systems Engineering (pp. 405-419). Springer Berlin Heidelberg.

Weske, M. (2010). Business process management: concepts, languages, architectures. Springer Publishing Company, Incorporated.

Zhiqiang Y., Remco M. y Dijkman M. (2012) Business process model repositories - Framework and survey. Information & Software Technology, 2012.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo de Interfaz Adaptativa basada en Perfiles de Usuario y Ontologías para Recomendación de Objetos de Aprendizaje

Thomás Quiroz, Oscar M. Salazar, Demetrio A. Ovalle
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión, Grupo de Investigación GIDIA, Medellín-Colombia ({tquirozv,omsalazaro,dovalle}@unal.edu.co)

Resumen

El objetivo de este artículo es proponer un modelo de interfaz gráfica que se adapte a las preferencias cognitivas de los usuarios y sea capaz de recomendar objetos de aprendizaje (OAs). Las metodologías utilizadas incluyen a la metodología Methontology la cual permite representar los conocimientos del dominio a partir de ontologías. Adicionalmente, la metodología Prometheus es utilizada para el diseño del sistema multi-agente de recomendación de OAs. La funcionalidad adaptativa consiste en distribuir los paneles que componen la interfaz según el usuario específico que esté interactuando con el sistema. La realización de esta distribución se basa en las características y preferencias de cada usuario, las cuales están almacenadas en el perfil del usuario. La validación del modelo de interfaz propuesto fue realizada mediante la aplicación de las siguientes métricas: 1) el rendimiento del sistema, (2) la experiencia de usuario, (3) la usabilidad (4) la persistencia a la sobrecarga, entre otras, aplicadas sobre varios casos de estudio. Los resultados obtenidos evidencian las bondades de utilizar agentes inteligentes, ontologías y perfiles de usuario para construir interfaces de usuario adaptativas.

Palabras clave: Interfaces de usuario adaptativas, ontologías, GUI, sistemas multi-agente, sistemas de recomendación.

Adaptive Graphical User Interface based on User Profile and Ontologies to Recommend Learning Objetcs

Abstract

The aim of this paper is to propose a graphical interface model that adapts to the user cognitive preferences and is able to recommend learning objects (LOs). The methodologies used include the Methontology methodology, which allows representing the knowledge of the domain based on ontologies. In addition, the Prometheus methodology is used for designing the LOs multi-agent recommendation system. The adaptive functionality consists of distributing the panels that make up the interface according to the particular user interacting with the system. The panel distribution is performed based on the characteristics and preferences of each user, which are stored in the user profile. The validation of the proposed user interface model was performed by applying the following metrics: 1) system performance, (2) user experience, (3) usability (4) overload persistence, among others, applied on several case studies. The results show the benefits of using intelligent agents, ontologies, and user profiles to construct adaptive user interfaces.

Keywords: Adaptive graphical user interface, ontologies, GUI, Multiagent systems, recommender systems

INTRODUCCIÓN

Gracias a internet se ha facilitado el acceso a grandes volúmenes de información lo cual crea un problema para las personas que están en la búsqueda de contenido educativo debido a que la mayoría de la información disponible no tiene la estructura adecuada para su correcta asimilación. Como una posible solución a este problema surgen los Objetos de Aprendizaje (OAs), los cuales poseen unas características llamadas metadatos cuya función es describir en detalle y explicar la naturaleza de cada objeto. Entre los estándares más conocidos está el IEEE-LOM (Learning Technology Standards Committee, 2002) el cual describe los metadatos del objeto en varias subcategorías tales como requisitos técnicos, características pedagógicas, ciclo de vida, anotaciones (uso pedagógico del OA), clasificación, entre otros.

Debido a la gran cantidad de objetos educativos que existen en repositorios o federaciones de OAs, es muy difícil encontrar un OA que se adecue perfectamente a los estilos de aprendizaje de las personas que lo requieren, dado que es complejo especificar completamente los criterios de búsqueda cuando se quiere acceder a un OA (Wang & Wu, 2011); los OAs no tienen el mismo efecto en toda la población debido a que cada objeto posee uno o varios estilos de aprendizaje diferentes, tales como Activo/Reflexivo, Sensitivo/Intuitivo, Inductivo/Deductivo, Visual/Verbal, Secuencial/Global (Felder & Silverman, 1988).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Por todo lo anterior, existen sistemas de recomendación de OAs, con la finalidad de mejorar el acceso a los objetos correctos; todo esto mediante la búsqueda en repositorios y en federaciones de OAs, identificando los recursos más adecuados según el perfil de cada usuario (Tipo de aprendizaje, características del estudiante y preferencias en general) que está realizando la búsqueda (Rodríguez, 2013) (Sanjuán et al., 2009). Por los anteriores motivos integrar una interfaz que facilite la adaptación del usuario al sistema de recomendación de OAs es muy importante ya que mejora y posibilita el acceso al conocimiento.

Los sistemas multi-agente están constituidos por varias entidades (agentes), las cuales poseen una cantidad de autonomía e inteligencia suficiente como para realizar tareas específicas con poca o ninguna supervisión humana. Este tipo de sistemas autónomos se utilizan para solucionar problemas donde se requieren que varios entes trabajen individualmente y en conjunto para lograr una meta en común (Salazar, 2015). Según Wooldridge (2009) los agentes poseen dos importantes capacidades a saber: a) Acciones autónomas, lo cual implica decidir por sí mismos qué tareas necesitan hacer y en qué orden realizarlo; b) Capacidad de interacción, es decir no simplemente el intercambio de datos entre los agentes, si no la actividad social (cooperación, coordinación, negociación). Los sistemas multi-agente pueden ser utilizados para realizar la comunicación entre una interfaz gráfica de usuario (GUI) inteligente y un sistema de recomendación de OAs.

Las GUI, por su parte, han evolucionado desde interfaces eminentemente textuales a interfaces más complejas de tipo multimodal (integrando diversas formas de interacción) obteniendo como resultado que la interacción entre el ser humano y la maquina se facilite. Es importante en este ámbito explicar la diferencia entre adaptabilidad y adaptatividad en las GUI de usuario; una GUI adaptable es en la cual el usuario realiza los cambios para adecuar la interfaz a sus gustos y preferencias. Por el contrario, en una GUI adaptativa el sistema es el encargado de realizar los cambios necesarios en la interfaz con base en el perfil del usuario.

Las ontologías se pueden definir como la representación formal de un dominio en específico, con la cual es posible representar las entidades del dominio y las relaciones entre estas, en el caso de las GUI pueden ser utilizadas para comprender la interacción entre estas y los usuarios (OWL, 2016).

ANTECEDENTES

Los trabajos que se presentan a continuación coinciden en la necesidad de crear e implementar una GUI adaptativa la cual mejore la interacción entre el humano y la máquina y así lograr un mejor uso del sistema.

Park et al. (2007) investigan como validar la efectividad de los menús adaptativos y adaptables, para esto se estudian 3 tipos de menús, un menú adaptable, un menú adaptativo separando la posición y el último es un menú adaptativo el cual resalta las opciones del menú. Del estudio se concluye que la opción preferida por los usuarios es el menú adaptable dado que es eficiente y tiene las opciones que son preferidas por los usuarios ya que son ellos quienes realizaron los cambios. Letsu-Dake & Ntuen (2009) evalúan el impacto de las interfaces adaptativas en sistemas complejos, en los cuales el usuario vigila un proceso industrial y se deben mantener en rangos óptimos múltiples variables dentro del sistema, una interfaz adaptativa ADI (por sus siglas en inglés para *Adaptive Interface*) fue provista a los usuarios para monitorear el proceso. Para evaluar el efecto de la ADI se contrastó el desempeño de los usuarios que utilizaron esta interfaz contra otros usuarios que usaron una interfaz normal NADI (No ADI), al comparar la tasa de detección de fallas en ambos se pudo observar que los usuarios que utilizaron ADI tenían una tasa de detección y corrección de errores mayor a la de los usuarios que utilizaron NADI.

Jorritsma et al. (2015) estudian el efecto de una interfaz adaptativa en un entorno de trabajo, en este caso en un laboratorio médico donde la función de la GUI es visualizar imágenes de radiología (PACS). La función adaptable del sistema consiste en una pestaña llamada "*My tab*" ubicada en la barra de herramientas y un menú desplegable cuando se oprime el botón derecho del mouse. La funcionalidad de estas opciones es agregar las opciones del menú que el usuario utiliza comúnmente y de esa forma poder acceder a ellas más rápidamente. Ghédira et al. (2002) desarrollan una aplicación web con una interfaz adaptativa diseñada para revisar exámenes médicos de cardiología. La interfaz monitorea el uso que le dan los usuarios y de esta forma es capaz de realizar su adaptación, la cual consiste en crear un enlace genérico ("*Generic link*") con todas las opciones más utilizadas por dicho usuario. De esta forma el usuario se ahorra el tiempo que tendría que invertir en navegar por el menú de la aplicación.

Ravi et al. (2015) proponen una interfaz adaptativa para un curso online masivo y abierto (MOOC), cuya función es cambiar las opciones del menú disponible para los profesores que crean cursos en la plataforma. Los profesores son categorizados en los siguientes 4 grupos: (1) Usuario experto, (2) Usuario con buen

 ISBN 978-607-8242-11-5

conocimiento, (3) Usuario con conocimientos intermitentes y (4) usuario novato. Según el tipo de usuario que sea la interfaz se adapta para mostrar mayor o menor cantidad de opciones del menú.

Shakshuki et al. (2015) proponen un SMA con el fin de recolectar información del estado de la salud de los pacientes; a esta información pueden acceder tanto los doctores como los pacientes. La funcionalidad adaptativa de este sistema consiste en cambiar la tonalidad de los colores facilitando de esta forma la visualización del contenido por parte de personas con problemas visuales tales como visión borrosa, daltonismo, entre otros. Park & Han (2011) tratan de unificar los conceptos de adaptatividad y adaptabilidad en una interfaz gráfica de usuario, para validar esto crearon 4 interfaces diferentes y se midió para cada interfaz: (1) el tiempo de adaptación del sistema, (2) el tiempo que se demoraron los usuarios para encontrar una opción específica, (3) la eficiencia percibida y (4) las preferencias sobre las interfaces. Se puede concluir que: a) La adaptabilidad es más apropiada que la adaptatividad cuando se requiere robustez en las variaciones; b) El usuario debe ser capaz de controlar la adaptatividad para proteger su privacidad.

DESARROLLO DEL MODELO

La GUI desarrollada en este modelo (ver figura 1) se basa en agentes, los cuales son los encargados de realizar las adaptaciones de la interfaz (e.g. cambiando la posición y/o los tamaños de los paneles que posee la interfaz) teniendo en cuenta los datos almacenados en el perfil de cada usuario.

La interfaz está compuesta de cinco paneles, cada panel tiene una función única que se describe a continuación:

1. Panel de Menú: En este panel se agrupan las diferentes opciones de menú para realizar algunas tareas como: Buscar OA o desplegar un OA recomendado.
2. Panel de búsqueda: La función de este panel es realizar búsquedas simples de OAs.
3. Panel de contenido: Este panel está enfocado en mostrar los OAs que el usuario ha seleccionado.
4. Panel de notas: Este panel fue diseñado para que el estudiante pueda tomar apuntes de lo que se ha aprendido mientras estudia el contenido de los OAs.
5. Panel de repositorios: La función de este panel es permitir un acceso rápido a diferentes repositorios, permitiendo a los estudiantes acceso a otros OAs que no hay en el sistema.

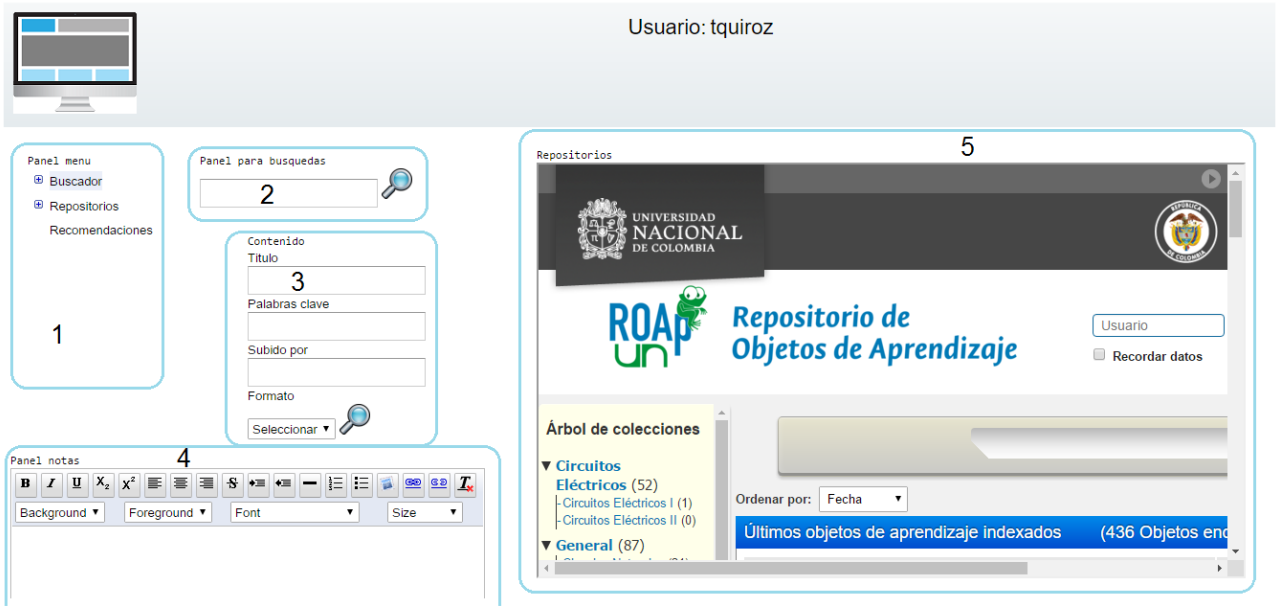


Fig. 1. GUI del modelo propuesto. Tomada de (Quiroz, 2017)

Los perfiles de usuario son creados a partir de un grupo de información específica de una persona que permiten definir los gustos y preferencias del usuario. De esta forma se puede predecir sus intenciones (Alaoui et al., 2015). La base para la recomendación de OAs, es el perfil del usuario, el cual contiene las características personales, preferencias, gustos, historial de búsquedas, estilo de aprendizaje entre otros. Para poder organizar toda esta información es necesario tener un modelo de perfil de usuario. El perfil de usuario consta de los siguientes 5 elementos:

- Datos personales

ISBN 978-607-8242-11-5

- Estilo de aprendizaje
- Historial
- GUI
- Preferencias

Estos datos del perfil de usuario son capturados cuando una persona entra por primera vez al sistema, debe de llenar unos campos con información personal y responder un cuestionario con el fin de obtener los datos del estilo de aprendizaje de la persona, todo esto para poder crear su usuario dentro del sistema.

Las ontologías proporcionan una gama de herramientas que permiten representar el conocimiento (Salazar, 2015), en este caso es utilizada para poder inferir cual es la distribución propicia de páneles en la GUI para un usuario específico. La metodología seleccionada para crear la ontología fue Methontology (Fernández-López et al, 1997), la cual proporciona las guías para el desarrollo e implementación de la ontología a través de las siguientes etapas: (1) fase de especificación, (2) fase de conceptualización, (3) fase de formalización, (4) fase de implementación y (5) fase de mantenimiento.

La figura 2 muestra la ontología generada a partir del conocimiento identificado durante el desarrollo de las fases mencionadas anteriormente, a través de un lenguaje formal, en este caso se utilizó OWL (http://www.w3.org/TR/owl-features/) mediante la herramienta Protégé (Protegé, 2016).

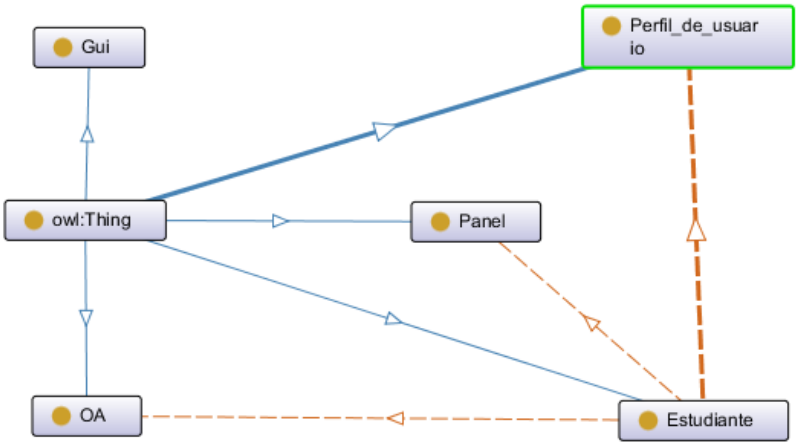


Fig. 2. Ontología generada a partir de Protégé. Tomada de (Quiroz, 2017)

Los sistemas de recomendación (SR) de OAs ayudan a los usuarios a encontrar recursos educativos adicionales y al mismo tiempo relevantes la búsqueda que se está realizando (Park et al., 2012). En entornos de e-learning los SR tienen la función de resolver el problema de la sobrecarga de información al mostrarle al usuario otros OAs que se adecuen a sus necesidades (Sanjuán et al., 2009). El SR del modelo propuesto tiene en cuenta todos los perfiles de los usuarios que existen en el sistema con base en esto es posible entregar más y mejores recomendaciones. Lo anterior es posible gracias a que el sistema de recomendación del modelo creado posee 3 tipos diferentes de filtrado:

1. Filtrado colaborativo: Las recomendaciones basadas en este tipo de filtrado, entregan OAs que otros usuarios con un perfil similar al del usuario activo han visualizado.
2. Filtrado basado en conocimiento: Este tipo de filtrado hace recomendaciones basándose en OAs similares a los que el usuario seleccionó en el pasado.
3. Filtrado basado en contenido: Este tipo de recomendación está basado en el perfil del usuario, basándose en el estilo de aprendizaje del usuario que realiza la búsqueda.

Para diseñar el SMA se utilizó la metodología Prometheus (Padgham et al., 2005) la cual está basada en el paradigma orientado a agentes y para el desarrollo del SMA se utilizó la herramienta Prometheus Design Tool (PDT) (Lin et al. 2008).

La figura 3 presenta el diseño general del SMA, generado por la herramienta PDT, en donde se observa el flujo de información y el actor “Estudiante” a partir del cual se activa la ejecución del sistema.

ISBN 978-607-8242-11-5

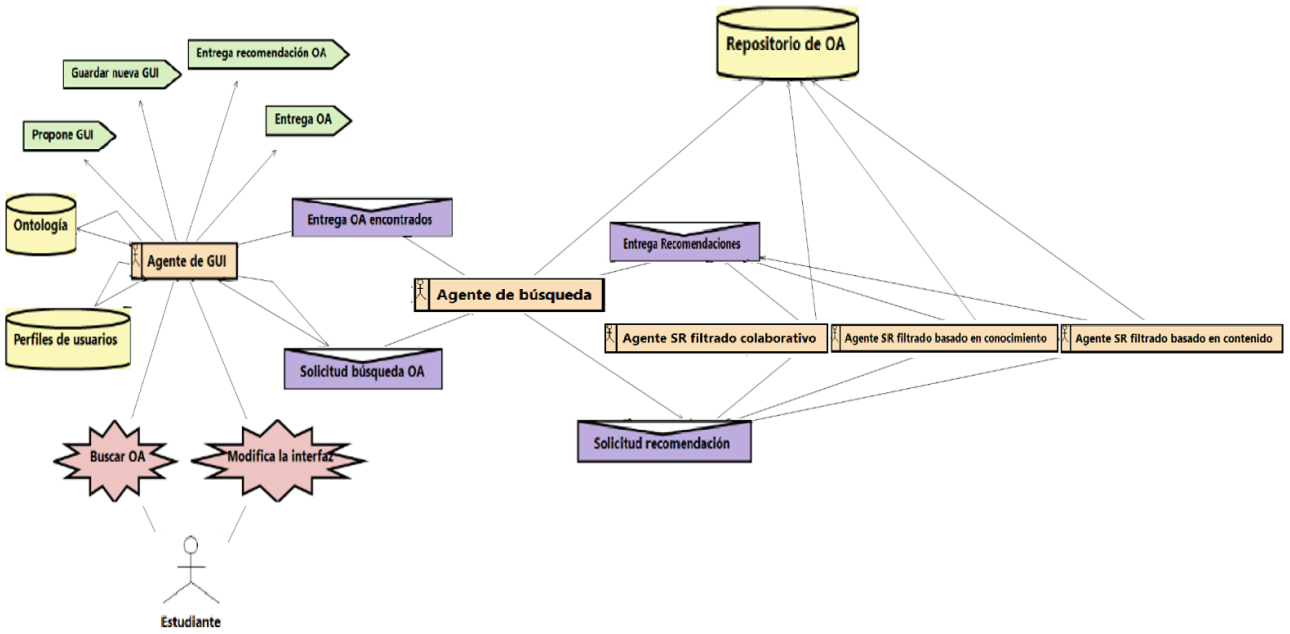


Fig. 3. Vista general del SMA. Tomada de (Quiroz, 2017).

El SMA diseñado lo componen varios agentes, cada uno de ellos posee una función específica dentro del sistema. A continuación, se describen los 5 agentes:

1. Agente de GUI: Este agente tiene como funcionalidad guardar los cambios que el usuario activo en el sistema realiza sobre la GUI. Adicionalmente, realiza la adaptación de la GUI cuando el usuario selecciona un OA y finalmente, notifica al agente de búsqueda cuando el usuario realiza una búsqueda.
2. Agente de búsqueda: Este agente se encarga de realizar la búsqueda de los OAs que el usuario ingresa en la barra de búsquedas. Adicionalmente, notifica a los agentes de SR de la búsqueda realizada, para que estos puedan entregar las recomendaciones pertinentes.
3. Agente SR Filtrado Colaborativo: Este agente entrega las recomendaciones basadas en filtrado colaborativo.
4. Agente SR Filtrado Conocimiento: Este agente entrega las recomendaciones basadas en filtrado por conocimiento.
5. Agente SR Filtrado Contenido: Este agente entrega las recomendaciones basadas en filtrado por contenido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La validación del modelo se llevó a cabo mediante la implementación de un prototipo al que se le evaluó su desempeño a través de métricas con el fin de validar las características más importantes del sistema. Las seis métricas consideradas son las siguientes:

a) Rendimiento del sistema.
b) Experiencia del usuario con respecto a las recomendaciones de GUI.
c) Experiencia del usuario con respecto a las recomendaciones de OAs.
d) Comportamiento del prototipo en los navegadores.
e) Usabilidad.
f) Grado de resistencia a la sobrecarga.

Validación de la Métrica “Rendimiento del sistema”

Para aplicar la métrica del rendimiento del sistema se tomó como muestra inicial el tiempo que cada usuario invirtió en modificar la interfaz inicial del sistema según sus preferencias, los datos obtenidos fueron los siguientes: (1) promedio 76.5 seg, (2) mínimo 21 seg y (3) máximo 154 seg.

Luego se les pidió a 12 usuarios que no contaban con la funcionalidad adaptativa del sistema, modificar la interfaz inicial del sistema, los resultados obtenidos por este grupo fueron los siguientes: El promedio del tiempo empleado en la modificación de la interfaz gráfica fue de 65.9 segundos, con un valor mínimo de 3 segundos y un valor máximo de 170 segundos. A continuación, se realizó el mismo ejercicio con 16 usuarios los cuales si tenían la funcionalidad adaptativa del sistema y los datos obtenidos fueron los siguientes: El

ISBN 978-607-8242-11-5

promedio del tiempo empleado en la modificación de la interfaz gráfica fue de 14.3 segundos, con un valor mínimo de 0 segundos y un valor máximo de 71 segundos.

Se puede concluir que la métrica de rendimiento produce resultados satisfactorios ya que para la mayoría de los formatos de los OAs seleccionados los usuarios aceptaron la distribución que el sistema propone, además se logra disminuir los tiempos de modificación de la GUI (característica de adaptabilidad) por parte de aquellos usuarios que no aceptaron la recomendación ofrecida por la interfaz adaptativa.

Validación Métrica "Experiencia del usuario con respecto a las recomendaciones de GUI"
Para validar esta métrica se tomaron datos de usuarios que utilizaron el sistema sin la funcionalidad adaptativa y con esta, estos datos se dividieron según el tipo de formato del OA que se estaba visualizando y se obtuvo la tabla1, que se muestra a continuación:

Tabla 1**:** Porcentaje de aceptación de las distribuciones propuestas. Tomada de (Quiroz, 2017).

Formato	Porcentaje de aceptación
Video	56.3%
PDF	62.5%
Imagen	87.5%

Al analizar los resultados se puede concluir que la función adaptativa del sistema logra disminuir los tiempos que se invierten en la modificación de la interfaz por parte de los usuarios. Lo anterior debido a que la interfaz adaptativa realizó propuestas de distribución de los páneles, basado en el histórico de distribuciones realizadas por los usuarios y otros usuarios con un perfil de usuario similar.

Validación Métrica "Experiencia del usuario con respecto a las recomendaciones de OAs"
La validación de esta métrica se realizó mediante 2 pruebas: (1) se realizó a los usuarios una encuesta de percepción y (2) con 20 OAs de 4 temáticas diferentes se validó si el sistema entregaba el número de recomendaciones correcta.

En la figura 4 se pueden observar los resultados de la encuesta realizada, Las respuestas de la encuesta tenían un valor de 1 a 5, siendo 1 la peor calificación y 5 la mejor.

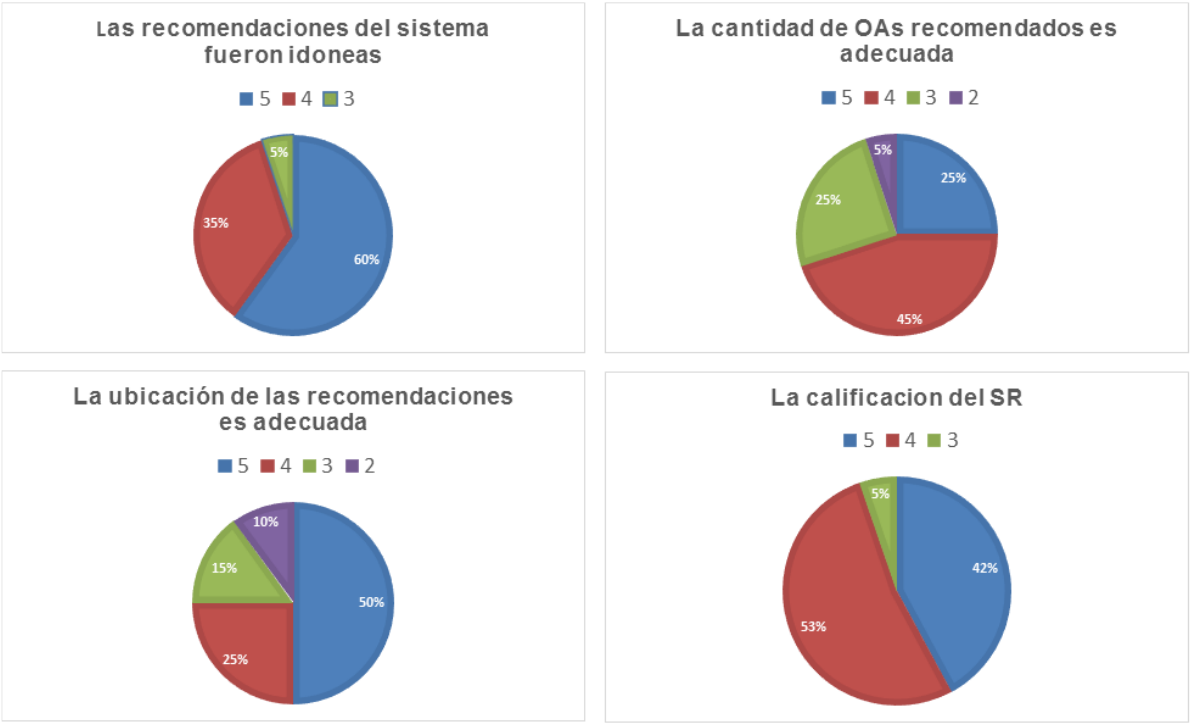


Fig. 4. Encuesta sobre OAs recomendados por el SR. Tomada de (Quiroz, 2017).

La tabla 2 presenta los resultados de las recomendaciones realizadas por el SR y cuál es el porcentaje de acierto del sistema.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 2**:** Porcentaje de acierto del SR en las recomendaciones. Tomada de (Quiroz, 2017).

Categoría	OAs recomendados	OAs que se debieron de recomendar	Porcentaje de acierto
1	3	6	50%
2	6	8	75%
3	2	2	100%
4	3	5	60%

Se puede concluir según los resultados de la tabla 2 que las recomendaciones del SR por los diferentes filtrados (Colaborativo, Conocimiento y contenido) tienen un alto porcentaje de acierto.

Validación métrica de comportamiento del prototipo en los navegadores
El prototipo realizado se validó en 4 diferentes exploradores, con la intención de verificar si todos los componentes se visualizan correctamente, también se verificó que todas las características funcionaran correctamente. En la tabla 3 se puede observar todos los criterios con los que se realizó la evaluación del sistema en los navegadores.

Tabla 3: Validación del sistema en los navegadores. Tomada de (Quiroz, 2017).

Funcionalidad	Chrome	Firefox	Edge	Safari
¿Se visualiza correctamente todos los elementos de la GUI?	SI	NO	SI	SI
¿La funcionalidad adaptable de la GUI funciona correctamente?	SI	SI	SI	SI
¿La funcionalidad adaptativa de la GUI funciona correctamente?	SI	SI	SI	SI
¿Los OAs con formato video se visualizan correctamente?	NO	SI	NO	NO
¿Los OAs con formato PDF se visualizan correctamente?	SI	SI	NO	SI
¿Los OAs con formato imagen se visualizan correctamente?	Si	SI	NO	SI

Los resultados de esta evaluación fueron bastante positivos dado que en todos los navegadores la funcionalidad adaptativa y adaptable del prototipo funcionó correctamente. Además, la mayoría de los formatos con los que se realizaron los casos de prueba se visualizan correctamente en todos los exploradores, en el caso del formato video en los navegadores Chrome y Safari, se descarga el archivo del video al computador del usuario por lo cual el video no se visualiza mediante el prototipo; en el caso del navegador Edge al tratar de visualizar el video aparece un error en el panel de contenido y tampoco se descarga el video.

En la visualización de los componentes, el único navegador que presenta algún defecto es Firefox ya que este no muestra el icono que aparece en la esquina superior izquierda en la mayoría de las pantallas.

Validación métrica de usabilidad
Para validar la métrica de Usabilidad de la Interfaz se le preguntó a los usuarios del sistema sobre 4 de los páneles que componen la interfaz a saber: Menú, Notas, Búsquedas y Repositorio (No se preguntó por el

 ISBN 978-607-8242-11-5

panel de contenido), las respuestas de la encuesta tenían un valor de 1 a 5, siendo 1 la peor calificación y 5 la mejor. En la figura 5 se pueden observar los resultados de la encuesta.

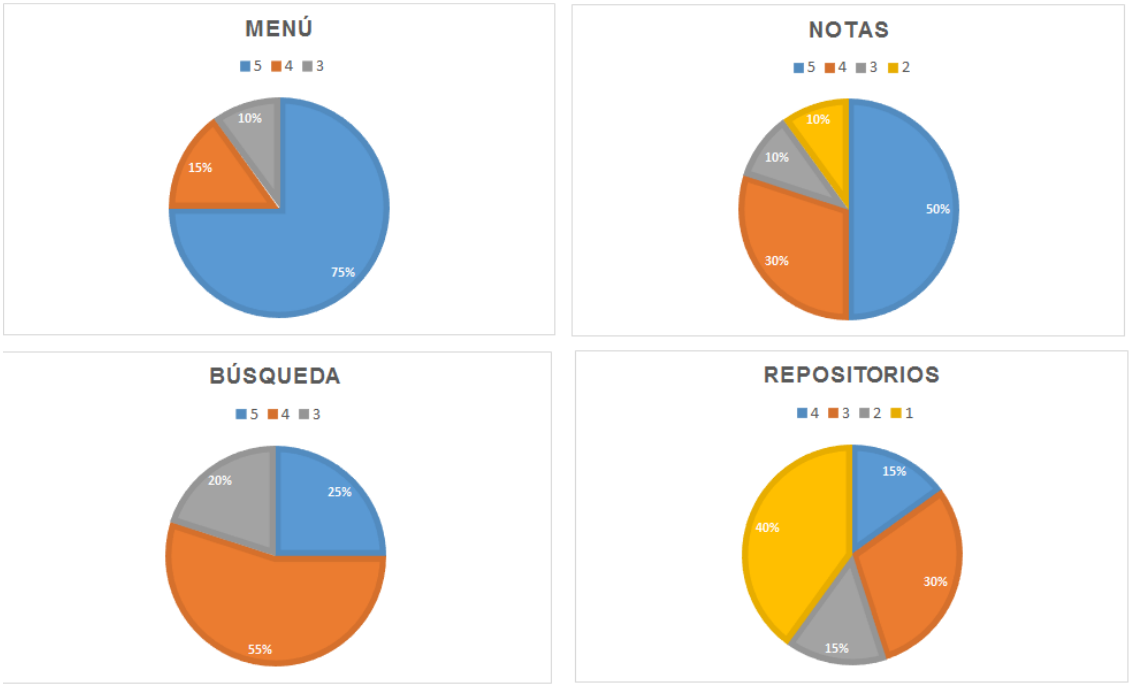


Fig. 5. Encuesta sobre los paneles de la GUI. Tomada de (Quiroz, 2017).

De los datos obtenidos se puede observar que la mayoría de los paneles fueron útiles para los participantes exceptuando el panel de repositorios, el cual solo tuvo un 45% de aceptación; los usuarios expresaron que sería más usable el prototipo si la función del panel de repositorio fuera integrado al panel de contenido.

Validación métrica grado de resistencia a la sobrecarga
Para realizar la validación de esta métrica se obtuvo el promedio de respuesta del sistema el cual fue de 0.17 segundos entre OAs con formato video, imagen y PDF, a continuación, se realizó una prueba de estrés de 1000 peticiones. La figura 6 presenta los tiempos de respuesta del sistema al seleccionar un OA.

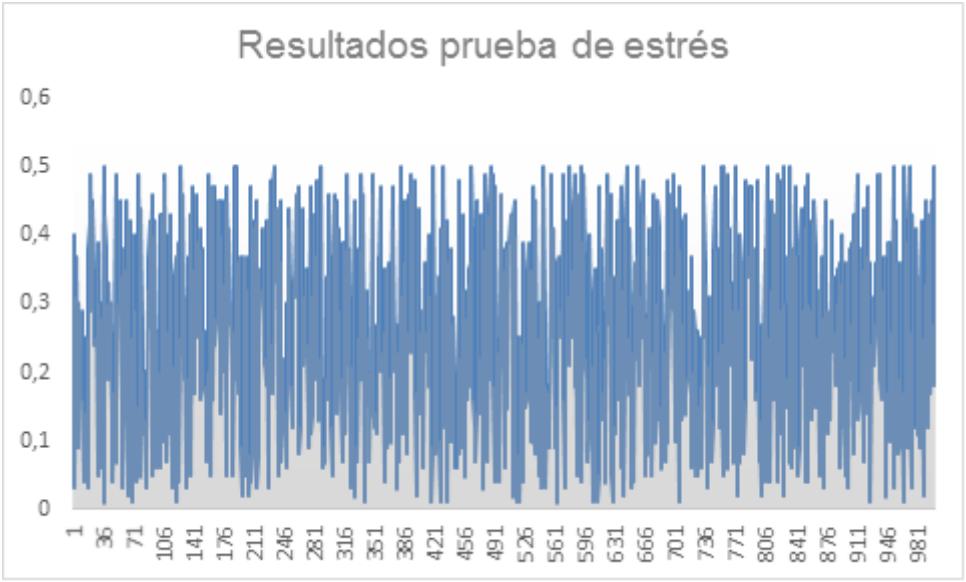


Fig. 2. Tiempos de respuesta al seleccionar un OA. Tomada de (Quiroz, 2017).

De los datos obtenidos de la prueba se puede concluir que el grado de resistencia a la sobrecarga del sistema es muy buena, ya que el valor máximo de respuesta es de 0.5 segundos a pesar del gran número de peticiones realizadas.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

El modelo de interfaz adaptativa propuesto aporta al problema de la sobrecarga de recursos educativos que existen en los repositorios o federaciones de OAs, ya que está en la capacidad de recomendar OAs apropiados, los cuales se adecuan a las características del usuario (i.e. el estilo de aprendizaje). Adicionalmente, la interfaz adaptativa aporta elementos de adaptabilidad al otorgar una flexibilidad al usuario en la visualización de contenidos (Cambios en tamaño y posición de los páneles).
A continuación, se listan algunos de los resultados obtenidos en el proceso de validación del prototipo implementado:

- Las recomendaciones inferidas por parte de la ontología para la distribución de la GUI son aceptadas por los usuarios en la mayoría de los casos.
- Los casos en los cuales los usuarios no aceptan la recomendación de la interfaz adaptativa, se evidenció una reducción en el tiempo para realizar la modificación en la GUI.
- Las recomendaciones del SR por los diferentes filtrados (Colaborativo, Conocimiento y contenido) tienen un alto porcentaje de acierto.
- La visualización y funcionamiento del prototipo en los diferentes navegadores (Chrome, Firefox, Edge y Safari) fue satisfactoria, pues en la mayoría de estos se visualizan los componentes de la GUI correctamente, además de que su funcionamiento es adecuado.
- La prueba de estrés realizada sobre el sistema, demuestra la capacidad de soportar una gran carga sin un impacto significativo en el tiempo de respuesta de las peticiones.

Los resultados obtenidos a partir de la validación del prototipo implementado demuestran que este tipo de sistemas son viables y se pueden aplicar a entornos de e-learning, aumentando de esta manera el interés de los estudiantes en encontrar nuevos recursos que amplíen su conocimiento. Finalmente, se evidencian las bondades de utilizar agentes inteligentes, ontologías y perfiles de usuario para construir interfaces de usuario adaptativas.

AGRADECIMIENTOS

La investigación presentada en este artículo fue financiada parcialmente por la beca de Jóvenes investigadores de COLCIENCIAS, otorgada a Thomas Quiroz a través de la Convocatoria 760 “Convocatoria Nacional de Jóvenes Investigadores e Innovadores 2015”.

REFERENCIAS

Alaoui, S., Idrissi, Y. E. B. E., & Ajhoun, R. Building rich user profile based on intentional perspective. Procedia Computer Science, 73, 342-349 (2015).

Felder, R. M., & Silverman, L. K. Learning and teaching styles in engineering education. Engineering education, 78(7), 674-681 (1998).

Ghédira, C., Maret, P., Fayn, J., & Rubel, P. Adaptive user interface customization through browsing knowledge capitalization. International Journal of Medical …, 68, 219–228 (2002).

Jorritsma, W., Cnossen, F., & van Ooijen, P. M. Adaptive support for user interface customization: a study in radiology. International Journal of Human-Computer Studies, 77, 1-9 (2015).

Learning Technology Standards Committee. IEEE Standard for Learning Object Metadata.Institute of Electrical and ElectronicsEngineers, New York (2002).

Letsu-Dake, E., & Ntuen, C. A. A case study of experimental evaluation of adaptive interfaces. International Journal of Industrial Ergonomics, 40(1), 34–40. doi: 10.1016/j.ergon.2009.10.002 8 (2009).

Lin, P., Thangarajah, J., & Winikoff, M. The Prometheus Design Tool (PDT) supports the structured design of intelligent agent systems. In Proceedings of the 23rd national conference on Artificial intelligence - Volume 3 (pp. 1884–1885). Chicago: AAAI Press (2008).

OWL *Web Ontology Language-Overview*, http://www.w3.org/TR/owl2-overview/ Acceso: 12 de diciembre (2016).

Padgham, L., Thangarajah, J., and Winikoff, M.: “Tool support for agent development using the Prometheus methodology”. IEEE Fifth International Conference on Quality Software - QSIC (2005).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Park, J., Han, S. H., Park, Y. S., & Cho, Y. Adaptable versus adaptive menus on the desktop: Performance and user satisfaction. International Journal of Industrial Ergonomics, 37(8), 675–684. doi: 10.1016/j.ergon.2007.04.006 (2007).

Park, J., & Han, S. H. Complementary menus: Combining adaptable and adaptive approaches for menu interface. International Journal of Industrial Ergonomics, 41(3), 305–316. doi: 10.1016/j.ergon.2011.01.010 (2011).

Park, D. H., Kim, H. K., Choi, I. Y., & Kim, J. K. A literature review and classification of recommender systems research. Expert Systems with Applications, 39(11), 10059-10072 (2012).

Protegé. Ontology Tool, http://protege.stanford.edu/. Acceso: 12 de diciembre (2016).

Quiroz, T. Modelo de interfaz adaptativa para recomendación de objetos de aprendizaje basado en perfiles de usuario, agentes inteligentes y ontologías. Tesis de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín (2017).

Ravi, R., Kumar, A., Bijlani, K., & Sharika, T. R. Self-Adaptive Interface for Comprehensive Authoring. Procedia Computer Science, 58, 158-164 (2015).

Rodríguez, P. Modelo de recomendación adaptativa de objetos de aprendizaje en el marco de una federación de repositorios, apoyado en agentes inteligentes y perfiles de usuario. Tesis de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín (2013).

Salazar, O. Modelo de Sistema Multi-Agente ubicuo adaptativo y sensible al contexto para ofrecer recomendaciones personalizadas de recursos educativos basado en ontologías. Tesis de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín (2015).

Sanjuán, O., Torres, E., Castán, H., Gonzalez, R., Pelayo, C., & Rodriguez, L. Viabilidad de la aplicación de Sistemas de Recomendación a entornos de e-learning. Universidad de Oviedo, España (2009).

Shakshuki, E. M., Reid, M., & Sheltami, T. R. Dynamic Healthcare Interface for Patients. Procedia Computer Science, 63, 356-365 (2015).

Wang, S. L., & Wu, C. Y. (2011). Application of context-aware and personalized recommendation to implement an adaptive ubiquitous learning system. Expert Systems with Applications 38 pp.10831–10838 8 (2011).

Wooldridge, M., *An introduction to multi-agent systems*. Second edition, Wiley Publishers. United Kingdom, (2009).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis y origen de las concentraciones de TSP y PM_{10} en minería de carbón a cielo abierto usando gráficos polares

Roberto E. Rojano[1,2], Heli Arregoces[1,2], Luis Angulo[1,2] y Gloria Restrepo[1]

(1) Universidad de La Guajira, facultad de ingeniería, grupo de investigación, GISA, Km 5 vía a Maicao, Riohacha, Colombia
(2) Universidad de Antioquia, facultad de ingeniería, departamento de ingeniería química, grupo PFA. Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia. e-mail: rrojano@uniguajira.edu.co

RESUMEN

Se presenta un análisis de calidad del aire con respecto a las concentraciones de partículas suspendidas totales (TSP, por sus siglas en ingles) y material particulado con diámetro menor a 10 µm (PM_{10}) en una de las minas de carbón más grandes del mundo en Cerrejón Colombia. Se exploró y caracterizó la variabilidad temporal y espacial de la concentración atmosférica de TSP y PM_{10} alrededor del área industrial durante el periodo 2012-2016. Se analizaron las concentraciones de contaminantes en el área y se evaluó la calidad de aire de la zona con respecto a niveles umbrales establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia y la Organización Mundial de la Salud. Los resultados mostraron que existe un ciclo estacional con mayores niveles de concentración de partículas en la primera mitad de cada año entre los meses de Marzo y Agosto. El promedio de las concentraciones ambientales para todas las estaciones en estudio entre los años 2012-2016, fue de 86 μgm^{-3} ($CI_{95\%}$ 84-88 μgm^{-3}) y 34 μgm^{-3} **(**$CI_{95\%}$ 33-35 μgm^{-3}), para TSP y PM_{10}, respectivamente. Las condiciones meteorológicas asociadas con los valores máximos de las concentraciones de TSP y PM_{10}, fueron vientos con velocidad mayor a 2 ms^{-1} y con dirección predominante NNE - NEE, indicando que las emisiones provenientes de las actividades mineras, son transportadas por el viento hacia las estaciones de monitoreo y de esta forma contribuyen sustancialmente a la concentración de PM_{10} y TSP, registrado en la atmósfera de la zona. Las gráficas polares y el análisis de función de probabilidad condicional (CPF) determinaron que los que los aportes de material particulado TSP y PM_{10}, se relaciona directamente, con las actividades mineras desarrolladas en los pit de explotación, mostrando un comportamiento coherente, entre los niveles máximos de los promedios de TSP y PM_{10} y la ubicación de los pits de operación.

Palabras clave: Material particulado; minería a cielo abierto; variaciones temporales y espaciales; gráficos polares

Analysis and origin of TSP and PM_{10} concentrations in open-pit coal mining using polar plots.

Abstract

An air quality analysis of total suspended particulate (TSP) and particulate matter with a diameter of less than 10 µm (PM_{10}) is presented in one of the world's largest coal mines in Cerrejón Colombia. It explores and characterizes the temporal and spatial variability of the atmospheric concentration of TSP and PM_{10} around the industrial area during the period 2012-2016. Meteorological parameters and potential long range transport properties are also evaluated. The concentrations of pollutants in the area are analyzed and the air quality of the area is evaluated with respect to threshold levels established by the Ministry of Environment and Sustainable Development of Colombia and the World Health Organization. The results show a seasonal cycle with higher levels of particle concentration in the first half of each year between March and August. The mean environmental concentration for all stations under study in the period 2012-2016, was of 86 μgm^{-3} ($CI_{95\%}$ 84-88 μgm^{-3}) and 34 μgm^{-3} **(**$CI_{95\%}$ 33-35 μgm^{-3}) for PTS and PM_{10}, respectively. The meteorological conditions associated with the highest concentrations of TSP and PM_{10} were winds with a velocity greater than 2 ms-1 and with predominant direction of NNE-NEE, indicating that the emissions from the mining activities are transported by the wind to the monitoring stations and in this way contributing substantially to the concentration of PM_{10} and TSP recorded in the atmosphere of the zone. The polar graphs and the conditional probability function (CPF) analysis determined that the contributions of particulate material TSP and PM_{10} are directly related to the mining activities developed in the exploitation pit. A consistent behavior was observed, between the maximum levels of the TSP and PM_{10} averages and the location of the operation pits.

Keywords: Particulate matter; open pit mining; Temporal and spatial variations; polar plots

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El carbón en la actualidad suministra el 25% de la energía primaria consumida en el mundo, solo por detrás del petróleo. Además, es de las primeras fuentes de energía eléctrica, con el 40% de producción mundial. Algunos de sus más importantes usos corresponden a la generación de electricidad, la producción de acero y la fabricación de cemento. Colombia es el primer productor de carbón de América Latina y el octavo del mundo (BP, 2016). Es el único país latinoamericano en los veinte primeros productores. Sus reservas medidas son de 7.063,6 Mt, ubicadas principalmente en la Costa Atlántica, norte de Colombia, donde se ubica el departamento de La Guajira. En el departamento de La Guajira se genera aproximadamente el 39% de la producción nacional de carbón y es donde se ubica una de las 10 minas a cielo abierto más grandes del mundo, llamada La Mina Cerrejón (UPME, 2016). La mina el Cerrejón, tiene una reservas de 3694,91 Mt, correspondiente al 56,77% del total de la reservas de Colombia (Monroy et al., 2014; UPME, 2012). Tiene actualmente una superficie aproximada de 800 km^2, con una capacidad extractiva de 30-32 millones de toneladas de carbón al año, lo que representa aproximadamente el 41% del total de las exportaciones colombianas (Cerrejón, 2011). Las grandes minas a cielo abierto como el Cerrejón, requieren que se elimine la capa de tierra, rocas y vegetación que cubre las costuras de carbón. Esto da lugar a la emisión de contaminantes y partículas (PM) a la atmósfera, que pueden producirse por las perturbaciones de la tierra por explosivos y la erosión eólica. Además, también son importantes las emisiones de la producción y procesamiento de carbón, como el polvo de transporte y el escape de diesel de los equipos de minería y transporte. La extracción de carbón a cielo abierto involucra actividades de manipulación de material tierra o carbón (CMRI, 1999). Todas las operaciones que impliquen movimientos de tierra o carbón o la exposición de las superficies erosionables, generan emisión de material particulado (USEPA, 2007). El material aerotransportado ha sido identificado como la principal fuente de contaminación del aire en la zona de influencia de las extracciones, especialmente las partículas suspendidas totales (TSP) y las partículas menores de 10 micras (PM_{10}) (Ghose y Majee, 2000; Watson, Chow, y Pace, 2000). La emisión de este tipo contaminante ha sido de interés en el contexto científico por el efecto nocivo a la salud. La exposición de la salud humana a los contaminantes particulados ha sido investigada extensivamente y asociada con excesos en la morbilidad y mortalidad (Brunekreef, 2002; Pope y Dockery, 2006; Cheng, et al., 2013; Shi et al., 2015). Se han realizados estudios en poblaciones con proximidad a áreas de minería de carbón a cielo abierto mostrando coincidencias entre su proximidad a la actividad industrial y elevadas tasas de mortalidad de la población (Hendryx, 2015; Hendryx y Zullig, 2009). Inclusive, un estudio reciente mostró la incidencia del cáncer de pulmón y la mortalidad con la proximidad a una mina de carbón. Sin embargo, los investigadores sugirieron más estudios a nivel de exposiciones individual entre los efectos ambientales de la minería de carbón y los resultados del cáncer (Mueller et al., 2015). De esto se determina la importancia de identificar las fuentes de emisiones de partículas locales y distantes. La literatura reporta mucha información de técnicas para identificar fuentes de contaminación. Por ejemplo, los modelos de receptor es una técnica importante en la gestión de la contaminación del aire para identificar aportes (Hopke, 2010; Uria-Tellaetxe y Carslaw, 2014; Watson y Chow, 2015). Entre otras técnicas, hay un método utilizado para la identificación de las fuentes de contaminación, teniendo claro la ubicación de las estaciones de monitoreo y las condiciones meteorológicas de la zona. Este método utiliza la velocidad del viento local y los datos de dirección para identificar las direcciones posibles de ubicación de las fuentes locales. De hecho, la relación de la dirección y velocidad del viento con la concentración de los contaminantes atmosféricos y la utilización de herramientas gráficas, tales como la rosa de los vientos, la rosa de contaminantes y los gráfico polar, ayudan a identificar aportes de fuentes cercanas. Toro et al. (2014) y García y Rojas (2016), determinaron la procedencia de los contaminantes del aire registrados por una red de monitoreo como acciones de prevención y control de la contaminación de material particulado en las ciudades de Santiago y Bogotá, respectivamente. Este estudio tiene como objetivos identificar las fuentes principales de contaminación de particulas PM_{10} en la zona de influencia de la mina el Cerrejón usando función de probabilidad condicional.
Los gráficos polares fueron utilizados ampliamente para investigar las relaciones de pares de contaminantes y como herramienta para separar fuentes y procesos contaminantes (Grange et al., 2016). Estas graficas han demostrado ser útiles para obtener rápidamente una impresión gráfica de fuentes potenciales que influyen en un lugar y usan la técnica de suavizamiento estadístico para mostrar una superficie continua (Carslaw, 2015; Carslaw et al., 2006).

METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio

El yacimiento de carbón el Cerrejón (11° 5' 2"N; 72° 40' 31"W, ver Figura 1) es una mina a cielo abierto ubicada en el departamento de La Guajira, al noreste de Colombia, muy cerca de la frontera con Venezuela, entre los municipios de Albania, Hatonuevo y Barrancas, a una distancia de 150 km de la costa, a 100 km de Riohacha, capital del departamento de La Guajira, a 290 km de la ciudad vacacional de Santa Marta y a 400 km de la ciudad industrial de Barranquilla. La población total del departamento de La Guajira no supera

 ISBN 978-607-8242-11-5

los 900.000 habitantes. Alrededor del yacimiento carbonífero habitan 59.089 personas, de los cuales el 34% son indígenas. El 70% de dicha población, se ubica a menos de 10 km del yacimiento. Los depósitos de carbón se localizan en un área aproximada de 80.000 hectáreas. El carbón aparece a diferentes profundidades, buzamientos y con estructuras muy dispares como consecuencia de la geología de la zona. El techo de las capas superiores de carbón puede variar entre 10 y 50 metros, y su espesor entre varios centímetros y casi la decena de metros. La profundidad máxima a la que se está extrayendo carbón en Cerrejón es a 200 metros bajo la cota 0. La operación minera alcanzó una producción de carbón de 33,4 millones de toneladas (Mt) durante 2015. Para el 2016 bajo a 32 Mt debido a cierre de algunos tajo, por la influencia del fenómeno El Niño (Cerrejón, 2016). La mina tiene aprobados planes de expansión para aumentar la producción a 42 Mt en 2017 (Cerrejón, 2011). La operación se desarrolla en 6 tajos de explotación denominadas, de norte a sur: La Puente pit (LPUp), Tabaco pit (TABp), Patilla pit (PATp), Comunero pit (COMp), 100 pit (100p) y Oreganal pit (OREp).

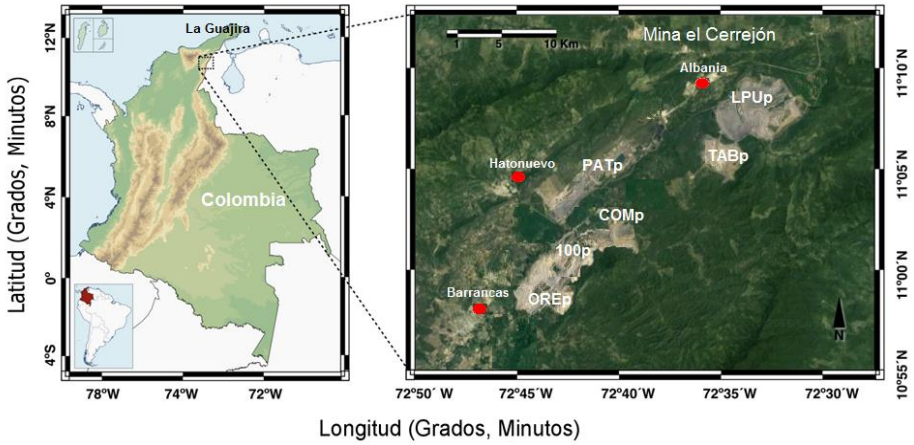


Fig. 1: Localización geográfica de la mina de carbón Cerrejón y las estaciones de monitoreo en La Guajira, región del Caribe de Colombia. (Panel izquierdo: modificado de Mapa de Colombia (orografía) .svg Wikipedia, https://goo.gl/Wg6TzI, consultado 2016-03-02; panel del rigth: fuente google tierra v7.1.5.1557, 2016-03- 02, DigitalGlobe 2016. http://www.earth.google.com, consultado el 2017-03-10).

La topografía del terreno es caracterizada por ser una llanura aluvial en la cuenca del río Ranchería, entre los sistemas montañosos de la serranía de Perijá en el este y la Sierra Nevada de Santa Marta en el oeste. El clima está fuertemente influenciado por la proximidad a los sistemas montañosos de la serranía de Perijá y Sierra Nevada de Santa Marta. Las temperaturas varían entre los rangos de 13 a 36°C, con temperatura media anual de 30°C (Rojano, Arregocés, Angulo, y Restrepo, 2016). El viento oscila entre 2.53 y 6.04 m/s con una media anual de 3.11 m/s. Los principales vientos de la mina de Cerrejón provienen del NE son de baja frecuencia. La pluviometría asciende 489 mm anuales, con un promedio de 72 días de lluvia y alta humedad relativa entre 39 a 93 (media anual del 70%). La Guajira es de clima cálido catalogada como la zona más seca de Colombia. Las lluvias son escasas y mal distribuidas. Las precipitaciones se distribuyen según un pronunciado patrón bimodal, con una estación lluviosa de cuatro meses, de septiembre a diciembre. Posteriormente, se presenta una temporada de sequía de enero a abril por la presencia de los vientos alisios con fuerte intensidad predominando del noreste. A causa de un debilitamiento de los vientos se presentan precipitaciones y corresponde a la segunda estación húmeda en el mes de mayo. Presentándose luego, la segunda temporada de sequía entre los meses de junio a agosto (CIOH, 2010; Ramírez y del Valle, 2012).

Concentraciones de partículas y datos meteorológicos

Las variables meteorológicas (temperatura, precipitaciones, velocidad y dirección del viento) y las concentraciones ambientales de TSP y PM_{10} utilizados en el análisis se obtuvieron de las estaciones de la Red de Calidad del Aire Cerrejón. La Tabla 1 muestra la localización de las estaciones de monitoreo y los parámetros medidos en cada una de ellas. Las estaciones seleccionadas están localizadas en la zona norte: estación Sol y Sombra (SS); zona centro: estación Patilla (PT) y estación Provincial (PV) y zona sur: estación Barranca (BR) y estación Las Casitas (LC) del yacimiento el Cerrejón. Las estaciones de muestreo utilizadas en el estudio, su ubicación geográfica y las variables medidas se presentan en la Figura 2. Los sitios SS y BR representan las estaciones de fondo viento arriba y viento abajo (según los vientos prevalecientes), útiles para determinar el flujo de contaminantes, dentro y fuera de la zona de estudio. Los sitios PT, PV y LC representan las estaciones de las actividades industriales desarrolladas en la actividad minera. Adicionalmente, los sitios PV y LC, incluyendo otras actividades realizadas por los habitantes ubicados en zonas adyacentes a estas estaciones. Las estaciones PT y SS, no tienen sensores

 ISBN 978-607-8242-11-5

meteorológicos, por lo que fue necesario estimar las variables velocidad del viento, la dirección del viento y temperatura. La estimación, se realizó con el modelo meteorológico CALMET del CALPUFF, usando la metodología explicada por Scire et al. (2000).

Tabla 1: Ubicación y elevación de la red meteorológica del Cerrejón utilizada en esta investigación.

ID	Estaciones	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)	Variables medidas
SS*	Sol y Sombra	11.143	-72.519	117	TPS, $PM_{10,}$ T, vv y dv
PT*	Patilla	11.050	-72.671	115	TPS, PM_{10}, T, vv y dv
PV	Provincial	11.022	-72.742	156	TPS, PM_{10}, T, P, vv y dv
BR	Barrancas	10.960	-72.780	150	TPS, PM_{10}, T, P, vv y dv
LC	Las Casitas	10.955	-72.741	162	TPS, PM_{10}, T, P, vv y dv

T: temperatura; P: precipitaciones vv: velocidad del viento; dv: dirección del viento.
* Variables estimadas por modelación meteorológica.

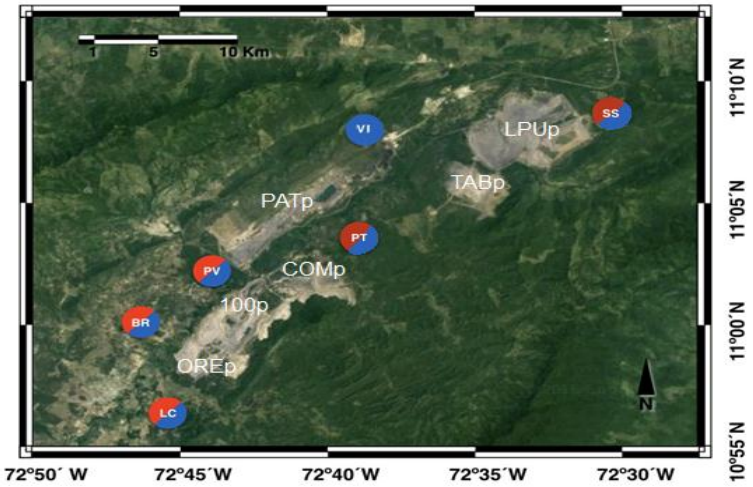


Fig. 2: Localización geográfica de la mina de carbón del Cerrejón y de las estaciones de monitoreo. ID estaciones BA es Barrancas; LC es Las Casitas; PT es Patilla; PV es Provincial y SS es Sol y sombra.

El muestreo de TSP y PM_{10} se realizó en cinco estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de cerrejón. Las estaciones se localizan en la zona norte (Estación SS: Sol y Sombra), zona centro (Estación PT: Patilla y Estación Provincial PV:) y zona sur (Estación BR: Barranca y Estación LC: Las Casitas) del yacimiento el Cerrejón. La concentración de material particulado TSP y PM_{10} se determinó por el método gravimétrico con muestreador de alto volumen, procedimiento establecido en el Reference Method of the CFR (Code of Federal Regulations) (Appendix B to Part 50 for TSP and Appendix J to Part 50 for PM_{10}). Se empleó equipos Hi-Vol para TSP y PM_{10} de la Marca Tisch Environmental, modelo TE-6070 para PM_{10} y modelo TE-5170 para TSP. Se utilizaron filtros de cuarzo (Whatman tamaño de 8 por 10 pulgadas, tamaño de poro de 2 µm) para el muestreo de TSP y PM_{10}.

Análisis de los datos meteorológicos y de concentraciones TSP y PM_{10}

Los datos disponibles se tabularon en una hoja de cálculo (MS-Excel® 2016 para Windows, Microsoft Corporation, Redmond, WA, EE.UU.). El análisis estadístico descriptivo se realizó utilizando el mismo software (MS-Excel © 2011) con la herramienta de tablas dinámicas. Además, se utilizó el software de código abierto R (RCoreTeam, 2016. Lenguaje y medio ambiente para la informática estadística, R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria) con el entorno de desarrollo integrado RStudio para R (RStudio Boston, MA. Http://www.rstudio.org/) y el paquete de herramientas para el análisis de la calidad del aire en R llamado OpenAir (Carslaw, 2015; Carslaw y Ropkins, 2012). El análisis de la rosa del viento se realizó utilizando la opción polarPlot (Carslaw y Beevers, 2013). Para el cálculo se tomaran las concentraciones diarias de PM_{10} en cada estación y se le asignaron su correspondiente dirección de viento diario. Como la dirección y velocidad del viento esta en forma horaria, se hizo necesario expresar estos parámetros meteorológicos en promedios diarios. Estos promedios se calculan obteniendo los componentes del viento $(\vec{u}, \vec{v})$ y aplicando la formula citada por Grange (2014). El CPF para cada estación se calculo utilizando el paquete openair del software estadístico R, con la función percentileRose (Uria-Tellaetxe y Carslaw, 2014).

ISBN 978-607-8242-11-5

Resultados y discusión

Meteorología

La Tabla 2, presenta un resumen estadístico de los parámetros meteorológicos en las cinco estaciones, con datos obtenidos con sensores (PV, BR y LC) y datos estimados, con modelos meteorológicos (PT y SS). La velocidad del viento, observada en promedio para las estaciones de PV, BR y CA, fue de 3 ms^{-1} ($CI_{95\%}$: 1-5 ms^{-1}). Los mayores promedios de velocidad del viento, se presentaron en la estación LC, con promedio de 3.4 ms^{-1} en el año 2015. La dirección del viento predominante en las tres estaciones con sensores y en las dos estaciones con parámetros estimados, fue ENE y NE, seguida de la dirección E y NNE. En todas las estaciones se presentaron direcciones SE, con menor probabilidad, indicando arrastre de contaminantes de las poblaciones a las estaciones. La Figura 3, muestra las frecuencias de dirección de viento y variación de la velocidad del viento para todas las estaciones, periodo 2012 – 2016. Los resultados del estudio de la temperatura, registraron comportamientos similares en las estaciones PV, BR y CA, con promedios de 20,39, °C, 29,01 °C y 29,69 °C, respectivamente. La máxima temperatura se presentó en PT (36,82 °C) y el valor mínimo se registró en LC (13,30 °C). El promedio general para las estaciones de PV BR y CA se centra en un valor de 29 ºC ($CI_{95\%}$: 27-32). La temperatura se caracterizó por ser caliente, desde abril a septiembre, y otra menos caliente, durante la otra mitad del año, desde octubre a marzo. Las temperaturas medias anuales, son por lo general mayores de 27ºC. Los períodos calientes corresponden a las estaciones secas y los periodos fríos corresponden a las estaciones lluviosas. En general, los resultados son consistentes y aceptables para el área de estudio. Las estaciones de PV, BR y LC, presentaron promedios mensuales de 2,38, 2,44 y 2,41 mm, respectivamente. Se registraron 77 días de lluvia en promedio, en las cinco estaciones, en el período de estudio. El año 2015 presentó el promedio más bajo, con 13 días de lluvia. El máximo registro diario se presentó en BR (110 mm) y el registro mínimo se registró en LC (0,1 mm). El promedio general para las estaciones, de PV BR y CA, se centra en un valor de 1,89 mm ($CI_{95\%}$: 1,69-2,10). El comportamiento bianual del máximo de lluvias en octubre y noviembre y los mínimos de enero y febrero, son asociados con la mayor actividad (intensidad) del Chorro del Chocó, al igual que para en el resto del Colombia. No se registraron tendencias estadísticamente significativas en velocidad del viento, temperatura y precipitaciones en las estaciones PV, BR y LC, en el periodo 2012 - 2016. Sin embargo, si se presentó tendencia baja positiva en la humedad relativa, en las estaciones BR y LC. Los cambios de tendencias que se presentan en estas variables, son inducidos por la topografía y la climatología. Para este caso, son influenciados por el clima, en la relación océano – continente, al encontrarse esta zona en el Caribe colombiano.

Tabla 2: Resumen estadístico de los parámetros meteorológicos en la mina el Cerrejón.

	Temperatura (°C)				Humedad relativa (%)			
Station	Mean	StDev	Min	Max	Mean	StDev	Min	Max
SS	28.22	2.80	12.80	34.80				
PT	29.82	2.01	13.25	36.82				
PV	29,23	1,83	12.80	34.80	59.15	10,23	18.00	96.33
BR	28.89	1.72	25.13	33.17	64,75	10.68	38.66	92.18
LC	29.69	1,97	13.25	36.82	64,01	10.80	18.00	96.20
	Precipitación (mm)				ws (m/s)			
Station	Mean	StDev	Min	Max	Mean	StDev	Min	Max
SS	1.60	7.64	4.56	119.20	2.66	0.95	0.30	5.39
PT	1.50	6.66	1.23	76.60	2.54	0.96	0.18	6.04
PV	1.84	7,61	1.10	76.60	2,89	1.11	0.00	5.71
BR	1.93	7,73	3.45	110.30	2.83	1.02	0.00	5.24
LC	1.85	7.56	2.67	107.20	3.06	1.11	0.00	5.71

Las variables estudiadas en las tres estaciones, presentan una buena correlación. Por lo tanto, los resultados de las variables meteorológicas en el período, de estudio son representativo del clima de la zona y son coherentes, en comparación con los resultados de estudios anteriores, pero, desde una óptica nacional (Mesa et al., 2000; Pabón-Caicedo y Eslava-Ramírez, 2001).

Concentraciones anuales de TSP y PM_{10}

ISBN 978-607-8242-11-5

La Figura 4, muestra la distribución de las concentraciones TSP y PM_{10}, en las cinco estaciones, entre el periodo 2012 a 2016. Los gráficos boxplot, muestran la mediana (línea media de la caja), el intervalo de confianza (superior e inferior del 95%), el cuartil superior (25%) y el inferior (75%), la distribución de los promedios y los valores máximos y mínimos, de cada estación.

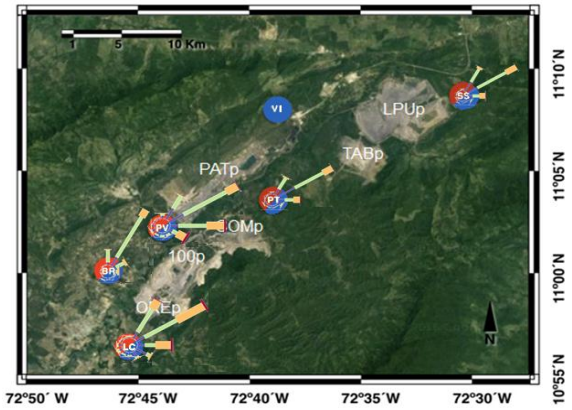


Fig. 3: Rosa de dirección de viento para cada una de las estaciones, periodo 2012 - 2016, zona minera el Cerrejón. Las columnas de la figura, se trazan en coordenadas polares

Las estaciones BR, PT, PV y LC, presentan una distribución similar, observándose mayor dispersión en la estación PV y LC, para el material particulado TSP y en la estación LC para PM_{10}. La estación SS, presenta los menores valores en la distribución, lo cual es coherente con la posición que ocupa en la geografía del área minera. Esta estación, se encuentra viento arriba de las operaciones industriales. La media fue mayor que la mediana, en todas las estaciones. Lo indica el hecho, que el conjunto de datos se sesgan a la derecha, por la ocurrencia de emisiones significativas y constantes. De igual manera, no se observa gran número de valores anómalos en los boxplots (puntos fuera de la línea de bigotes). Esto indica concentraciones de TSP y PM_{10} con un comportamiento constante, coherente la fuente que lo está emitiendo.

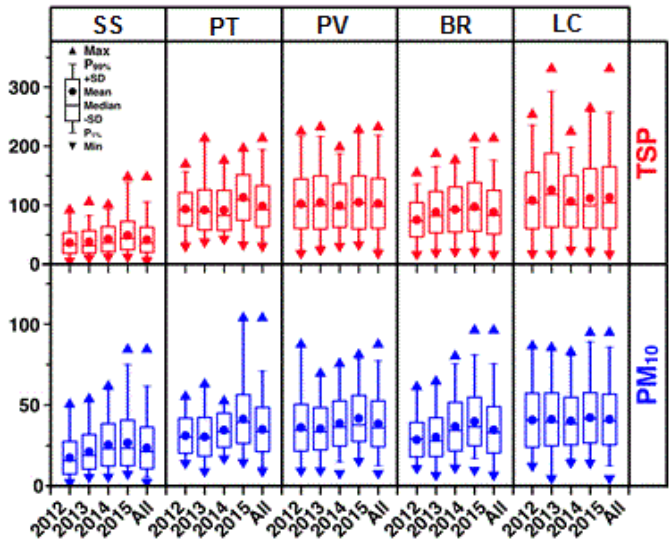


Fig. 4: Boxplot de las concentraciones TSP y PM_{10} en las cinco estaciones. Periodo 2012 - 2016. Las cajas muestran la mediana (línea media de la caja) el intervalo de confianza (superior e inferior del 95%), el cuartil superior (25%) y el inferior (75%).

La estación LC tiene los mayores niveles de TSP y PM_{10}, seguido de la estación PV y PT. Estas estaciones, están en el corazón de las actividades mineras. Se puede apreciar qué zonas están bajo la influencia de estas actividades. Diferente comportamiento se aprecia con los valores mínimos; esta distribución se solapa con los valores de la estación SS, indicando la presencia de fuentes de emisión diferentes, que afectan a la estación SS. Se puede apreciar la similar distribución de TSP y PM_{10} para la estación SS; esta distribución está en el rango de 0 a 50 $\mu g/m^3$ lo que indica que gran porcentaje del TSP corresponde a PM_{10}, observándose que fuentes diferentes a las actividades mineras, hacen aportes a la estación SS.

ISBN 978-607-8242-11-5

Se puede observar que la concentración de TSP es mayor a la de PM_{10} en todas las estaciones. Así mismo se aprecia que existe un ciclo anual con mayores concentraciones en el primer semestre de cada año. Es posible establecer, que en promedio, para todas las estaciones en estudio entre 2012-2016, la concentración ambiental es de 86 μgm^{-3} ($CI_{95\%}$ 84-88 μgm^{-3}) y 34 μgm^{-3} ($CI_{95\%}$ 33-35 μgm^{-3}) para TSP y PM_{10}, respectivamente. Se evidencia que las concentraciones de TSP son mayores a las de PM_{10}, en 2.5 veces. Un análisis ANOVA, mostró que las concentraciones de TSP y PM_{10} son estadísticamente diferentes a un 95% de intervalo de confidencia (p-value < 0.05). En el caso de PTS las mayores concentraciones se registran en la estación de LC (111 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 106-115 μgm^{-3}) seguido por PV (100 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 96-103 μgm^{-3}), PT (95 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 91-98 μgm^{-3}), BR (87 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 84-90 μgm^{-3}), y las menores concentraciones, se observan en la estación SS (41 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 40-43 μgm^{-3}). En el caso de PM_{10}, las mayores concentraciones se observan en LC (41 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 40-42 μgm^{-3}), seguido con menores concentraciones por las estaciones de PV (38 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 37-39 μgm^{-3}), BR (35 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 33-36 μgm^{-3}), PT (34 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 32-36 μgm^{-3}) y SS (23 μgm^{-3}; $CI_{95\%}$ 22-24 μgm^{-3}). En lo que respecta a la variabilidad interanual de las concentraciones anuales, tanto para TSP como para PM_{10}, un análisis ANOVA mostró que no existe diferencia estadísticamente significativa a un 95% de intervalo de confidencia (p-valor > 0.05).

Efectos de las variables meteorológicas

La Tabla 3, muestra el coeficiente de correlación de Pearson entre TSP, PM_{10} y las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento). Se encontró una correlación negativa entre TSP, PM_{10}, con la humedad relativa y las precipitaciones. Los coeficientes de correlación para la humedad relativa, varían en un rango de entre -0,044 a -0,323 y -0,088 a -0,210 para TSP y PM_{10}, respectivamente. En el caso de las precipitaciones, los coeficientes varían entre -0,191 a -0,248 y -0,138 a -0,186 para TSP y PM_{10}, respectivamente. En el caso de la temperatura tanto para TSP y PM_{10}, la correlación es positiva y tiene una variación que va entre 0,162 a 0,200 y 0,152 a 0,334, respectivamente. Se cree que estas correlaciones se deben, a los efectos de la humedad relativa/precipitaciones y de la temperatura, en la remoción por deposición húmeda por lluvia y deposición seca, obtenida por rocío.

Tabla 3: Análisis de correlación de Pearson entre el TSP, PM_{10} vs temperatura (T), humedad relativa (HR) precipitaciones (lluvia) y velocidad de viento, para cada estación en estudio en el período comprendido entre los años 2012-2016. (BR: Barrancas, LC: Las Casitas y PV: Provincial

	Variables meteorológicas			
	T	HR	Precipitaciones	Velocidad del viento
Estaciones	°C	%	mm	m/s
	TSP			
BR	0.200	-0.323	-0.223	0.620
LC	0.162	-0.132	-0.191	0.356
PV	0.173	-0.044	-0.248	0.512
	PM_{10}			
BR	0.334	-0.210	-0.155	0.344
LC	0.289	-0.168	-0.138	0.219
PV	0.152	-0.088	-0.186	0.453

Al analizar la correlación entre la velocidad del viento y las concentraciones de TSP y PM_{10}, vemos que existe una correlación positiva que varía entre 0,356 a 0,620 y 0.219 a 0,453, respectivamente. La velocidad del viento es importante en el estudio de las concentraciones de partículas, ya que es el factor principal que determina el transporte y dispersión de las partículas, a las diferentes zonas. Las TSP y PM_{10}, pueden ser dispersadas a mayor velocidad de vientos. Las correlaciones observadas con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, con partículas atmosféricas, han sido reportadas por otros investigadores.

Cumplimiento de la norma nacional e internacional

La Tabla 4, contiene las estadísticas descriptivas de los conjuntos de datos PM_{10} y TSP, que también incluyeron el número de días en que estas concentraciones superaron el límite de la guía de WHO y La norma colombiana para promedios diarios y anuales.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 4: Promedios anuales de material particulado PM_{10} y TSP en cada estación

			TSP		
Año	BR	LC	PT	PV	SS
2012	75.32	107.93	93.31	102.35	36.14
2013	88.02	125.34	92.02	104.57	37.87
2014	92.73	106.52	91.35	99.16	42.63
2015	97.03	111.34	112.94	104.72	48.75
2016	81.15	102.46	83.64	88.29	41.67
			PM_{10}		
2012	28.57	40.63	31.01	36.01	17.82
2013	30.13	41.15	30.33	35.28	21.07
2014	36.67	40.12	30.32	38.66	25.37
2015	39.78	42.12	41.10	41.71	26.59
2016	35.25	40.80	34.79	36.75	22.83

La Tabla 4, muestra que los niveles de TSP (100 µg/m^3), de la norma colombiana se superan en la estación LC, todos los años (2012 - 2016), en la estación PT en el año 2015 y en la estación PV los años 2012, 2013 y 2015. Los mayores promedios anuales se alcanzaron en el año 2015, donde tres estaciones superaron la norma anual. Para el material particulado PM_{10}, el análisis estadístico de promedios muestra que no fueron superados el nivel diario (300 µg/m^3) y el nivel anual (150 µg/m^3). Todos los promedios en las estaciones BR, LC, PT, PV, superan el nivel anual (20 µg/m^3) de la guía de la Organización Mundial de la Salud (GDL-WHO), en el periodo 2012 -2016. Comparando los resultados, con el promedio diario de la OMS (20 µg/m^3), el análisis muestra excedencia del 13%, 25%, 11%, 20% y el 4% en la estaciones BR, LC, PT, PV y SS, respectivamente.

Análisis del origen de TSP y PM_{10}

La Figura 5, muestra, el gráfico polar bivariado para las concentraciones medias de TSP y PM_{10}, para los sitios en estudio que cuentan con información meteorológica, con sensores de velocidad y dirección del viento. La opción polarPlot, en Openair, se utilizó para graficar esta información. Se observan altas concentraciones de TSP y PM_{10} en condiciones de viento mayores a 2 m/s, con viento predominante desde el NEE, NNE, NE y E, para las estaciones de PV, BR y LC, respectivamente.

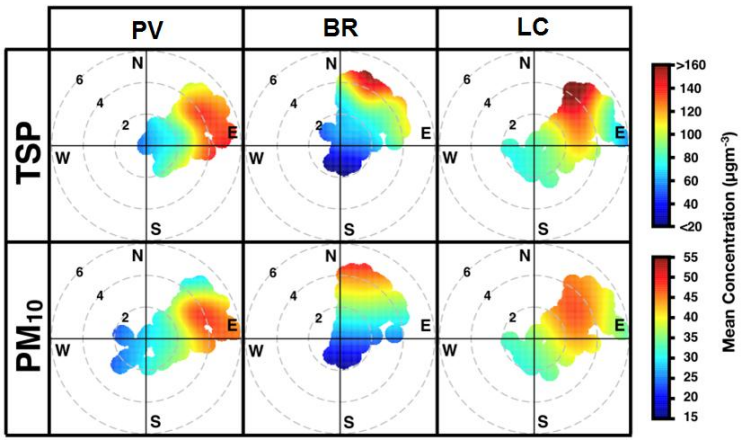


Fig. 5: Diagrama polar bivariante de las concentraciones de PM_{10} y TSP (µg/m^3), en la mina de El Cerrejón en el período 2012 - 2016 (BR: Barrancas, LC: Las Casitas; PT: Patilla).

La estación LC, que registro las valores más alto de TSP y PM10, muestra aporte desde las direcciones NNE, NE y E, entre velocidades del viento 2 a 5 m/s, para los dos contaminantes. Los máximos promedios, se observan en la dirección NE. Este aporte se relaciona con las actividades mineras de los pits cercanos: PATp, 100p y OREp. Por lo general, estas actividades de emisión de material particulado en los pit, se relaciona con: vías de acarreos, cargue de carbón y material estéril y las emisiones desde tubo de escape de los vehículos. Menores son los promedios cuando la dirección es E. En esta dirección, el aporte se

ISBN 978-607-8242-11-5

relaciona, solo con las actividades del tajo COMp. Los rangos de velocidad del viento indican aporte de fuente local. La estación BR, muestra aporte desde las direcciones NNE y NE, entre velocidades del viento 4 a 5 m/s, para los dos contaminantes. Este aporte se relaciona directamente, con las actividades mineras del pit PATp, ubicado al nornordeste de la estación y aporte menor de pit 100p, ubicado al noreste de la estación. La estación PV, muestra aporte desde las direcciones NE y E, entre velocidades del viento 2 a 5 m/s, para los dos contaminantes. Este aporte se relaciona directamente, con las actividades mineras del pit PATp, ubicado al noreste de la estación y aporte menor de pit COMp, ubicado al este de la estación. La Figura 5, muestra un comportamiento coherente, entre los niveles máximos de los promedios de TSP y PM_{10} y la ubicación de los pits de operación.

La Figura 6, muestra el gráfico polar bivariado, para las concentraciones medias de TSP y PM_{10}, para los sitios en estudio, donde no hay sensores y la información meteorológica de velocidad y dirección del viento, fueron estimadas con el modelo CALMET. Se observaron altas concentraciones de TSP y PM_{10}, en condiciones de viento mayores a 2 m/s para la estación PT. Esto indica, al igual que en otras estaciones, que las emisiones, son desde fuentes cercanas. La estación SS registra bajas concentraciones de TSP y PM_{10}, cuando se registran vientos del NE mayores a 3 m/s, lo cual sugiere una influencia no significativa de fuentes regionales viento arriba, de la actividad minera.

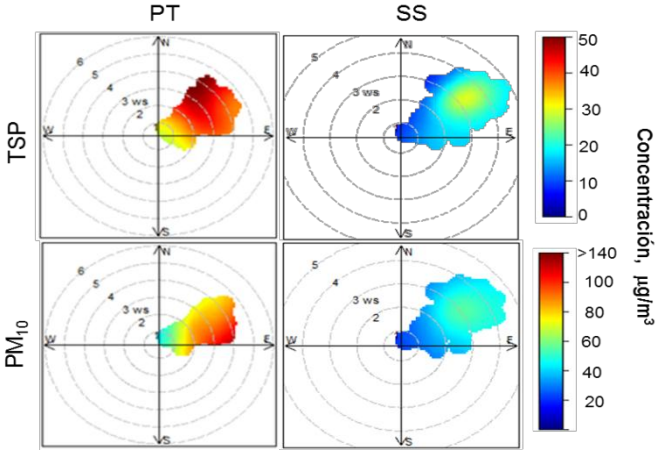


Fig. 6: Diagrama polar bivariante de las concentraciones de PM10 y TSP ($\mu g/m^3$) en la mina de El Cerrejón en el período 2012 - 2016 (PT: Tatilla, SS: Sol y sombra).

La estación PT está influenciada por las actividades mineras de los tajos LPUp y TABp (ver Figura 15). A las condiciones de vientos estimadas en esta estación, también hay alta probabilidad que el aporte de TSP y PM_{10} se origine, en los tajos ubicados más al norte de la mina. Investigaciones, han demostrado que las partículas tienen la mayor concentración cuando están cerca de las fuentes. Para el caso específico de las minas a cielo abierto, la de mayor impacto son las comunidades adyacentes a la explotación (Aneja et al., 2012; Chaulya, 2004).

CONCLUSIONES

La distribución anual de las concentraciones medias mensuales de partículas gruesas TSP y PM_{10}, en la mina el Cerrejón es bimodal, con el pico más alto en abril y el segundo más alto en diciembre. La igualdad en el comportamiento entre los picos en cuanto a las concentraciones de TSP y PM_{10}, indica que las emisiones de polvo son de fuentes similares y locales, debido a que la difusión de partículas gruesas, depende principalmente, de la emisión de fuentes locales. Esta conclusión se apoya en el hecho de que la velocidad del viento que más predomina es del NE y sus promedios son relativamente bajos; de esta manera se reduce la difusión del viento y las partículas gruesas, se distribuyen localmente. El efecto de las diferentes variables meteorológicas sobre las concentraciones de TSP y PM_{10}, son claramente diferentes y muestran variaciones anuales claras. De todos los elementos meteorológicos estudiados, la velocidad del viento se correlaciona particularmente bien con las concentraciones de material grueso. Tres de las cinco 5 estaciones, mostraron tendencias hacia el aumento de las concentraciones de $PM_{10.}$ Estos resultados pueden servir de aviso para el desarrollo de estrategias en orden, para evitar el incremento progresivo de las concentraciones, que pudieran llevar a posibles impactos negativos en los ecosistemas y/o salud de las personas, a futuro. Los promedios anuales de TSP superan los límites anuales permisibles de la norma colombiana en la estación LC, en todos los años del periodo de estudio, en la estación PT en el año 2015 y en la estación PV los años 2012, 2013 y 2015. Los mayores promedios anuales se alcanzaron en el año 2015, donde tres estaciones superaron la norma anual. Para el material particulado PM_{10} no fueron superados los niveles diario y anual de la norma colombiana. Todos los promedios en las estaciones BR,

ISBN 978-607-8242-11-5

LC, PT, PV, superan el nivel anual de la guía de la Organización Mundial de la Salud (WHO), en el periodo 2012 - 2016. El análisis de PM10 también muestra excedencia del promedio diario de la Organización Mundial de la Salud en la estaciones BR, LC, PT, PV y SS. Los aportes de material particulado TSP y PM_{10}, se relaciona directamente, con las actividades mineras desarrolladas en los pit de explotación, mostrando un comportamiento coherente, entre los niveles máximos de los promedios de TSP y PM_{10} y la ubicación de los pits de operación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al convenio Colciencias-Cerrejón, 1115-524-30465, por el financiamiento del proyecto. También agradecemos el apoyo logístico de la Universidad de Antioquia, la Universidad de La Guajira y la Universidad popular del Cesar. Los donantes no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio, la recolección y análisis de datos, la decisión de publicar o la preparación del manuscrito.

REFERENCIAS

Bert Brunekreef, S. T. H. "*Air pollution and health"*. The Lancet, 360(7002), 1233-1242. http://doi.org/10.1016/s0140-6736(02)11274-8. (2002).

Carslaw, D. "*The openair manual open-source tools for analysing air pollution data*". 2015 David C. Carslaw. London. Retrieved from http://www.openair-project.org. (2015).

Carslaw, D. C., y S.D. Beevers, "*Characterising and understanding emission sources using bivariate polar plots and k-means clustering*", Environmental Modelling and Software, 40, 325–329. http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.005. (2013).

Carslaw, D. C., S. D. Beevers, K. Ropkins, y M.C. Bell, "*Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport*", Atmospheric Environment, 40(28), 5424-5434 (2006).

Carslaw, D. C., y K. Ropkins, "*Openair - An r package for air quality data analysis*". Environmental Modelling and Software, 27-28, 52-61 (2012).

Cerrejón. "*Proyecto de Expansión Iiwo'uyaa*". Bogota. Retrieved from http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa.aspx. (2011).

Cerrejón. "*Reunion de trabajo Proyecto Colciencias – Cerrejón*". Cerrejón. (2016).

Cheng, Z., J. Jiang, O. Fajardo, S. Wang, y J. Hao, "*Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011)*". Atmospheric Environment, 65, 186-194 (2013).

CIOH. "*Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano: Riohacha*". Cartagena de Indias. Retrieved from http://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/Climatologia Riohacha. (2010).

Ghose, M. K., y S. R. Majee, "*Assessment of dust generation due to opencast coal mining – an indian case study*". Environmental Monitoring and Assessment, 61, 255-263 (2000).

Grange, S. K, "*Technical note : Averaging wind speeds and directions Technical note : New Zealand*". http://doi.org/10.13140/RG.2.1.3349.2006. (2014).

Grange, S. K., A. C. Lewis, y D. C. Carslaw, "*Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics*". Atmospheric Environment, 145, 128-134 (2016).

Hendryx, M, "*The public health impacts of surface coal mining*". The Extractive Industries and Society, 2, 820-826 (2015).

Hendryx, M., y K. J. Zullig, "*Higher coronary heart disease and heart attack morbidity in Appalachian coal mining regions*". Preventive Medicine, 49(5), 355-9 (2009).

Hopke, P. K. "*The Application of Receptor Modeling to Air Quality Data*". (2010).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Mesa, O., G. Poveda, J. I. Vélez, J. F. Mejía, C. D. Hoyos, R. Mantilla y M. I. Montoya, M. I. "*Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia*". XIV seminario nacional de hidráulica e hidrología distribución. pp. 1-9 (2000).

Monroy, Á. C., S. C. Castillo, L. C. Niño, L. M. Ríos, S. A. Aramburo, R. S. Quintero, y E. U. Larsen, "*Simulación y evaluación del impacto de estrategias en el desarrollo del sector minero 2014 – 2032*", pp. 128 (2014).

Mueller, G. S., A. L. Clayton, W. E. Zahnd, K. M. Hollenbeck, M. E. Barrow, W. D. Jenkins, y D. R. Ruez, "*Geospatial analysis of Cancer risk and residential proximity to coal mines in Illinois"*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 120, 155-162 (2015).

Pabón-Caicedo, J. D., y J. A. Eslava-Ramírez, "*Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia*". Meteorología Colombiana, 4, 47-59 (2001).

Pope, C. A., y D. W. Dockery, "*Health Effects of Fine Particulate Air Pollution : Lines that Connect*". Air & Waste Manage. Association, 56(6), 709-742 (2006).

Ramírez, J. A., y J. I. Del Valle, "*Local and global climate signals from tree rings of Parkinsonia praecox in La Guajira*", Colombia. International Journal of Climatology, 32(7), 1077-1088 (2012).

Rojano, R., H. Arregocés, L. Angulo y G. Restrepo, G. "*PM10 emissions due to storage in coal piles in a mining industrial area*". Transactions on Ecology and The Environment, 207, 87-97 (2016).

Shi, L., A. Zanobetti, I. Kloog, B. A. Coull, P. Koutrakis, S. J. Melly y J. D. Schwartz, "*Low-Concentration PM and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effects in a Population-Based Study*". Environmental Health Perspectives, 124(1), 45-62 (2016).

Unidad de Planeación Minero energética, UPME, "*La Cadena del Carbón*": Imprenta Nacional de Colombia. (O. D. Iglesias, Ed.). Bogota D.C, pp. 80 (2012).

Unidad de Planeación Minero energética, UPME. (2016). Producción Oficial de Minerales en Colombia. Revisada: Enero 26, 2017, desde: http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta_Series.aspx?idModulo=4&tipoSerie=121&grupo=371.
Uria-Tellaetxe, I., y D. C. Carslaw, "*Conditional bivariate probability functions for source identification*". Environmental Modelling and Software, 59, 1-9. (2014).

USEPA. "*Air emissions*". Revisada Julio 13, 2016, from https://www.epa.gov/energy/learn-about-energy-and-environment#clean_energy, (2007).

Watson, J. G., y J. C. Chow, "*Receptor Models and Measurements for Identifying and Quantifying Air Pollution Sources. In Introduction to Environmental Forensics*", Third Edit, pp. 677-706). San Diego, San Francisco: Elsevier Ltd, (2015).

Watson, J. G., J. C. Chow y T. G. Pace, "*Fugitive dust emissions:* Air Pollution Engineering Manual". W. T. Davis (Ed.), pp. 117-135. New York: John Wiley & Sons (2000).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Simulación Dinámica de Presas en Cascada

Miguel Rossano[1], Marlene Pérez & Tania Rodríguez
(1) Gerencia de Sistemas Avanzados de Capacitación y Simulación, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Reforma 113 Palmira, Cuernavaca Morelos México
e-mail: rossano@iie.org.mx

Resumen

Se presenta un sistema de simulación dinámica para la generación de condiciones de operación de un conjunto de presas (plantas hidroeléctricas) en cascada. Estas presas tienen diferentes capacidades de almacenamiento y de generación eléctrica. El sistema permite representar las condiciones físicas del sistema hidrológico y su dinámica; así como representar el estado actual e histórico del sistema y ensayar diferentes propuestas de operación. El sistema está basado en un modelo matemático de principios básicos configurado con parámetros físicos, condiciones iniciales y variables en la frontera.

Las entradas de agua en un embalse dependen principalmente de las aportaciones del sistema para la adecuada planificación y operación del embalse (Kote, 2008). Estas aportaciones se deben a los escurrimientos originados por lluvias en la cuenca, o en el caso de tener una presa o cuerpo de agua aguas arriba de los escurrimientos de este.

Las presas juegan un papel importante en el control de los flujos para el funcionamiento adecuado del sistema (Wang et al, 2012). Hay que recordad que la operación de las presas en cascada se considera como un proceso en serie (Zhao y Zhao, 2014) para el sistema analizado, por lo que las entradas de una presa dependen de la salida de la presa anterior y de la aportación por cuenca propia de la presa, generando con esto cadenas hidrológicas dependientes de otras presas del sistema, lo que hace más difícil el control de los flujos (Rosero et al, 2013). El punto principal de este trabajo es considerar las diferentes características físicas de las presas de un sistema hidroeléctrico en cascada, donde se observa que las capacidades de los embalses son diferentes, considerando dos presas grandes y dos pequeñas, lo que aumenta la complejidad del sistema debido a que los flujos de salida de los grandes embalses serán los de entrada de los pequeños, donde se tiene riesgo de llenado o vaciamiento súbitos (Jiang et al, 2014).

El sistema permite tener un gran detalle en la representación del sistema hídrico, la gestión del agua, así como la tasa de retraso de los flujos transferidos de un embalse a otro. También con el sistema se pudo representar el protocolo actual con el que se operan los embalses y se presentan un par de nuevas propuestas para la operación óptima de los flujos del conjunto de hidroeléctricas (Jacoby y Kowalik, 1974).

El Simulador incluye variables estocásticas para las aportaciones por cuenca (Sauhats et al, 2014).

Palabras Clave: Embalses en cascada, Sistema Hidroeléctrico, Simulación de Presas

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las entradas de agua en un embalse dependen principalmente de las aportaciones de la cuenca en que se encuentra y/ó de aportaciones de embalses aguas arriba (Kote, 2008). Estas aportaciones se deben a los escurrimientos originados por lluvias en la cuenca, o en el caso de tener una presa o cuerpo de agua aguas arriba de los escurrimientos de este.

Las presas juegan un papel importante en el control de los flujos en una cuenca (Wang et al, 2012). Ya que acumulan el agua y permiten su escurrimiento gestionado.

Para el sistema analizado hay que recordar que la operación de las presas en cascada se considera como un proceso en serie (Zhao y Zhao, 2014) , debido a que la entrada de una presa depende de la salida de la presa anterior y de la aportación por cuenca propia de la presa, generando con esto cadenas hidrológicas dependientes de otras presas del sistema, lo que hace más complejo la gestión de flujos (Rosero et al, 2013).

El punto principal de este trabajo es considerar las diferentes características físicas de las presas de un sistema hidroeléctrico en cascada (Tabla 1), donde se observa que las capacidades de los embalses son diferentes.

Permitiendo considerar diferentes configuraciones, en el caso particular presentado en este estudio, se han considerado dos presas grandes y dos pequeñas en serie, lo que aumenta la complejidad del sistema debido a que los flujos de salida de los grandes embalses serán los de entrada de los pequeños, donde se tiene riesgo de desborde o vaciamiento súbito.

Para determinar el nivel adecuado de agua en el embalse es necesario establecer límites para una fecha en específico, a estos límites se les denomina curva guía [(Jacoby y Kowalik, 1974), (Sauhats et al, 2014)]. La curva guía es el método que determina el nivel adecuado de agua en la cuenca en función del tiempo (Jacoby y Kowalik, 1974). En sistema considera las curvas guía de dos de los embalses (Presa 1 y Presa 3) y para la Presa 2 y se 3 se toma como referencia de nivel del agua al factor denominado NAMO que es el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias.

Tabla 1. Datos Generales de un Sistema Hidroeléctrico en Cascada, para un año dado.

Presa	*% del volumen total de la Cuenca al NAMO*	*% del Escurrimiento total de la cuenca*	*% de la Generación Energía del Sistema*
Presa 1	57.91%	47.90%	18.04%
Presa 2	0.93%	12.88%	46.10%
Presa 3	40.93%	25.04%	26.72%
Presa 4	0.23%	14.18%	9.14%

Es importante señalar la gran diferencia de volumen entre las presas 1 y 3 contra las presas 2 y 4, llevando esta diferencia a gobernar el sistema bajo dos premisas principales.

- Las presas 1 y 3 funcionan como almacenadoras de agua y reguladoras del flujo de agua del sistema.
- Las presas 2 y 4 su función básica es la generación de electricidad.

ISBN 978-607-8242-11-5

MODELO

El sistema se basa en un modelo matemático que tiene como origen el balance de continuidad y las características físicas de cada uno de los embalses.

Aplicando el balance de masa para la presa i donde se consideran las entradas y las salidas como se puede observar en la figura 1.

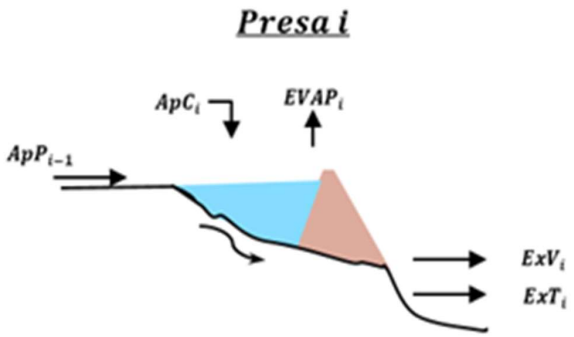


Figura 1. Balance de volumen para una Presa i.

$$\frac{dV_i}{dt} = ApC_i + ApP_{i-1} - EVAP_I - ExT_i \quad (1)$$

Donde:

ApC_i= Aportación cuenca propia *i*;

ApP_{i-1}= Aportación presa anterior *i-1;*

$EVAP_i$ = Evaporación presa *i;*

ExV_i = Extracción por vertedor *i;*

ExT_i = Extracción por turbina *i;*

V_i = Volumen presa *i*;

dV_i/dt = Derivada del volumen en la presa *i;*

Las restricciones del modelo dependerán de los datos físicos de sistema y sus límites de operación, además se consideran variables estocásticas las aportaciones por cuenca propia.

En la ecuación 1 se presenta el balance, considerando todas las entradas y salidas del embalse.

El modelo desarrollado para cuatro presas interconectadas entre sí (sistema en cascada) como se muestra en la figura 2.

ISBN 978-607-8242-11-5

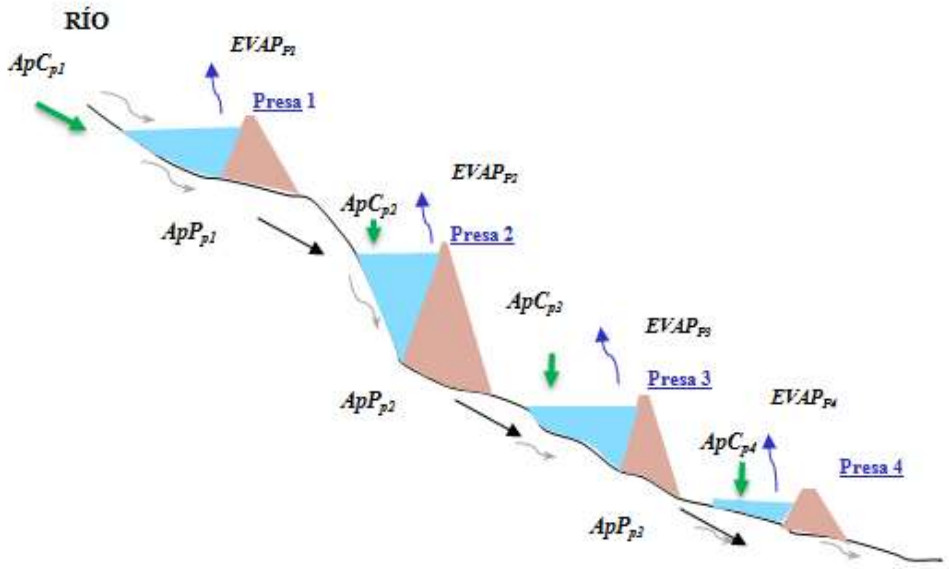


Figura 2. Sistema hidroeléctrico en cascada.

El balance de masa de cada una de las presas del sistema analizado es el siguiente:

Balance Presa 1:

$$\frac{dV_{p1}}{dt} = ApC_{p1} - EVAP_{p1} - ExV_{p1} - ExT_{p1} \quad (2)$$

Balance Presa 2:

$$\frac{dV_{p2}}{dt} = ApP_{p1} + ApC_{p2} - EVAP_{p2} - ExV_{p2} - ExT_{p2} \quad (3)$$

Balance Presa 3:

$$\frac{dV_{p3}}{dt} = ApP_{p2} + ApC_{p3} - EVAP_{p3} - ExV_{p3} - ExT_{p3} \quad (4)$$

Balance Presa 4:

$$\frac{dV_{p4}}{dt} = ApP_{p3} + ApC_{p4} - EVAP_{p4} - ExV_{p4} - ExT_{p4} \quad (5)$$

Donde:

$$ExT_{P1} = ApP_{P1} \quad (6)$$

$$ExT_{P2} = ApP_{P2} \quad (7)$$

$$ExT_{P3} = ApP_{P4} \quad (8)$$

Un punto a destacar es que la última presa es la de menor capacidad y es la que recibe los flujos de todas las presas anteriores del sistema.

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de las pruebas de este modelo se tomaron los datos históricos de escurrimientos entre las presas para las aportaciones por cuenca propia a los embalses (figura 3).

Para escenarios a futuro se prevé usar el enfoque de los escurrimientos como una variable estocástica (aleatoria) asociada a la predicción las entradas de agua al sistema proveniente de las lluvias pronosticadas (Sauhats et al, 2015).

Los datos históricos de operación, se clasificaron usando nueve escenarios diferentes, correspondientes a cada uno de los últimos años registrados, en lo que se identifican las aportaciones de las cuencas, los volúmenes turbinados, el agua desfogada por vertedores y la generación eléctrica correspondiente a cada una de las presas. Con respecto a los datos propuestos prototípicos de años característicos; con los que el personal operativo gestiona la la operación del sistema, se usó en los mismos términos que lo usa el personal operador del sistema, siendo este un conjunto de tres tipos de escenarios seco, medio y húmedo, los cuales a su vez se analizan con tres diferentes grados de intensidad, como se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Escenarios.

Escenarios Principales	*Húmedo (H)*			*Medio (M)*			*Seco (S)*		
Grados de Intensidad:	Húmedo (H)	Medio (M)	Seco (S)	Húmedo (H)	Medio (M)	Seco (S)	Húmedo (H)	Medio (M)	Seco (S)
Escenario	**1. H-H**	**2. H-M**	**3. H-S**	**4. M-H**	**5. M-M**	**6. M-S**	**7. S-H**	**8. S-M**	**9. S-S**

Según los datos presentados en la Figura 3., se puede observar que en el año 2012 disminuyeron las aportaciones al sistema en la Presa principal (Presa 1) que es la que inicia con el proceso secuencial de las aportaciones, esto debido a las escasas lluvias para ese año ubicándose en el escenario Medio – Seco. En este trabajo se analiza los fenómenos ocurridos durante ese año.

Cada una de las condiciones analizadas históricas y prototípicas propuestas se pudo representar en el sistema.

Se muestra una de estas pruebas, donde se presenta la evolución del nivel en cada una de las presas a través del escenario histórico del año 2012, considerado este año como un típico de operación media.

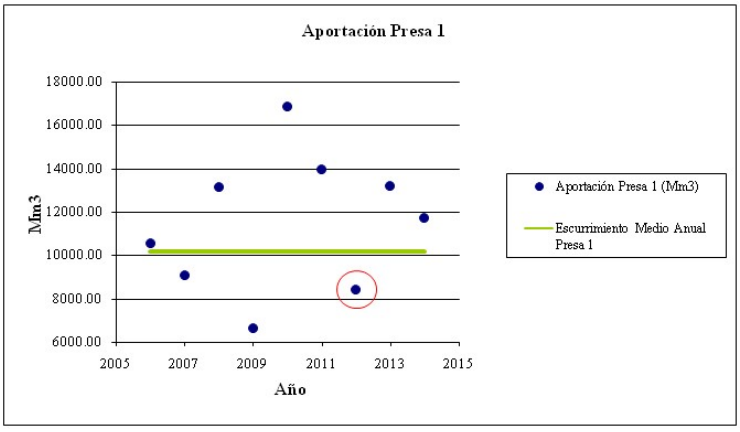


Figura 3. Aportaciones Presa 1.

Dentro de los datos históricos del año 2012 este se considerada un año con lluvias medias tendiendo a escasa, por el año se presenta nivel por debajo de los escurrimientos medios promedio anuales presentados en la figura 3.
Se presentan los resultados de la simulación en con un periodo de un año, donde se puede observar que los niveles de la presa (línea verde) estuvieron por debajo de la curva guía (línea rosa) en las presas 1 y 3 donde estas presas se operan siguiendo una curva guía.

ISBN 978-607-8242-11-5

Para las presas 2 y 4 por debajo del NAMO (línea roja) el comportamiento es el esperado para lluvias escasas (figuras 4-7)

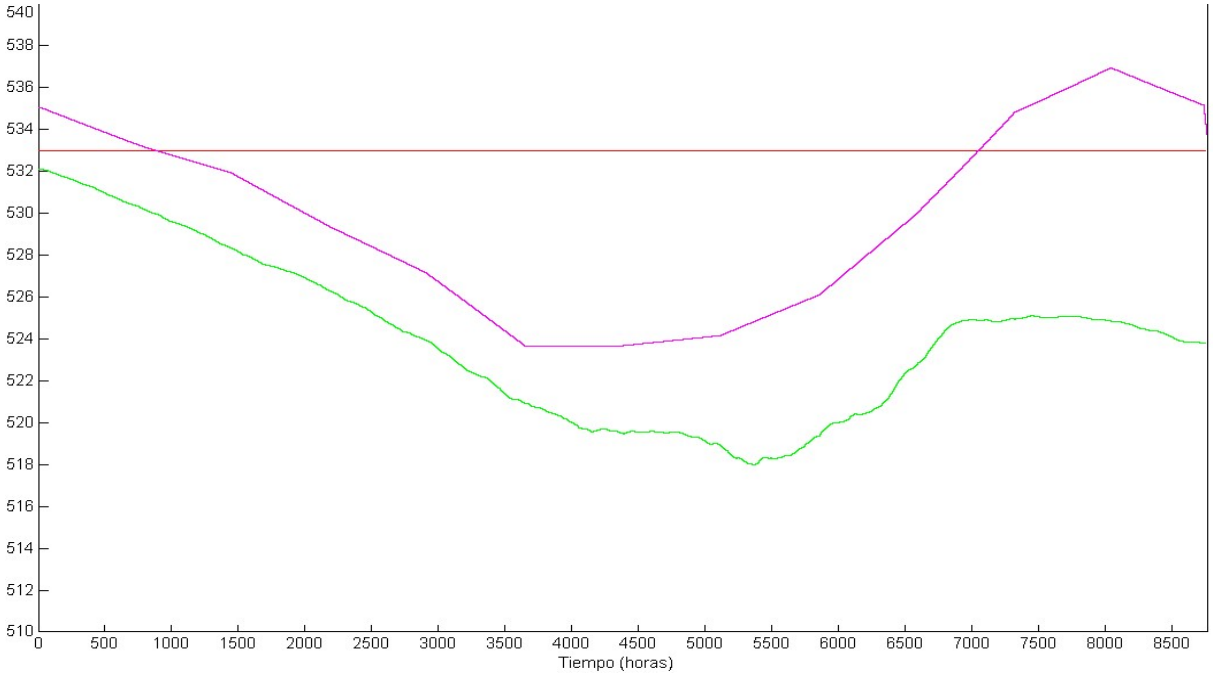


Figura 4. Nivel Presa 1 para el año 2012

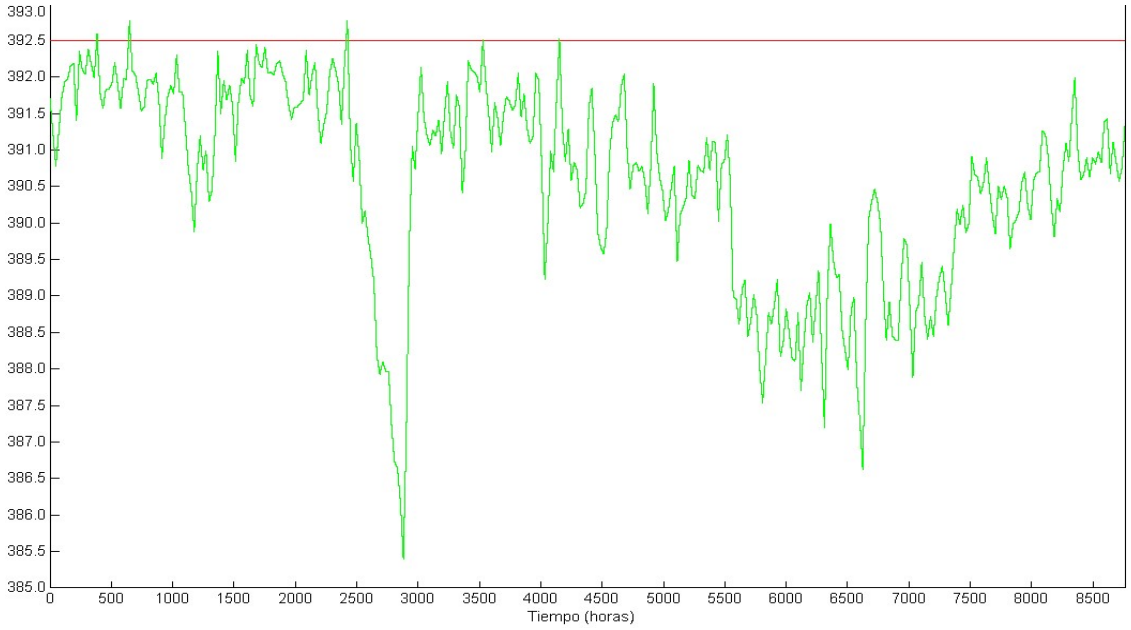


Figura 5. Nivel Presa 2 para el año 2012

ISBN 978-607-8242-11-5

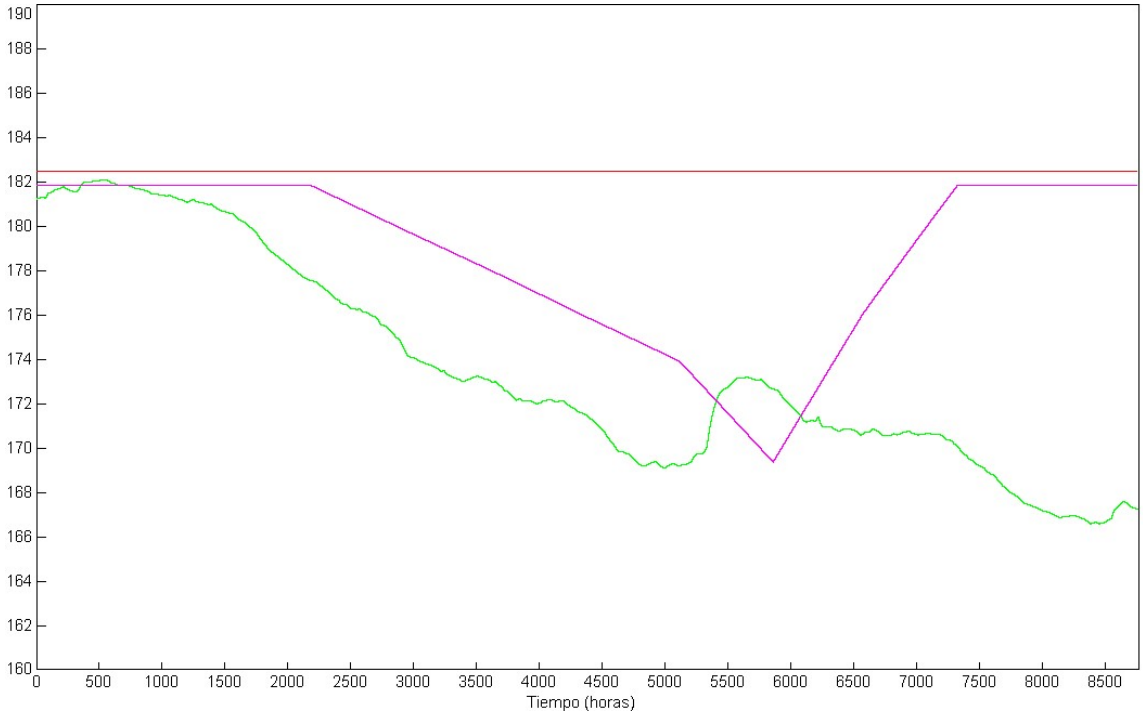


Figura 6. Nivel Presa 3 para el año 2012

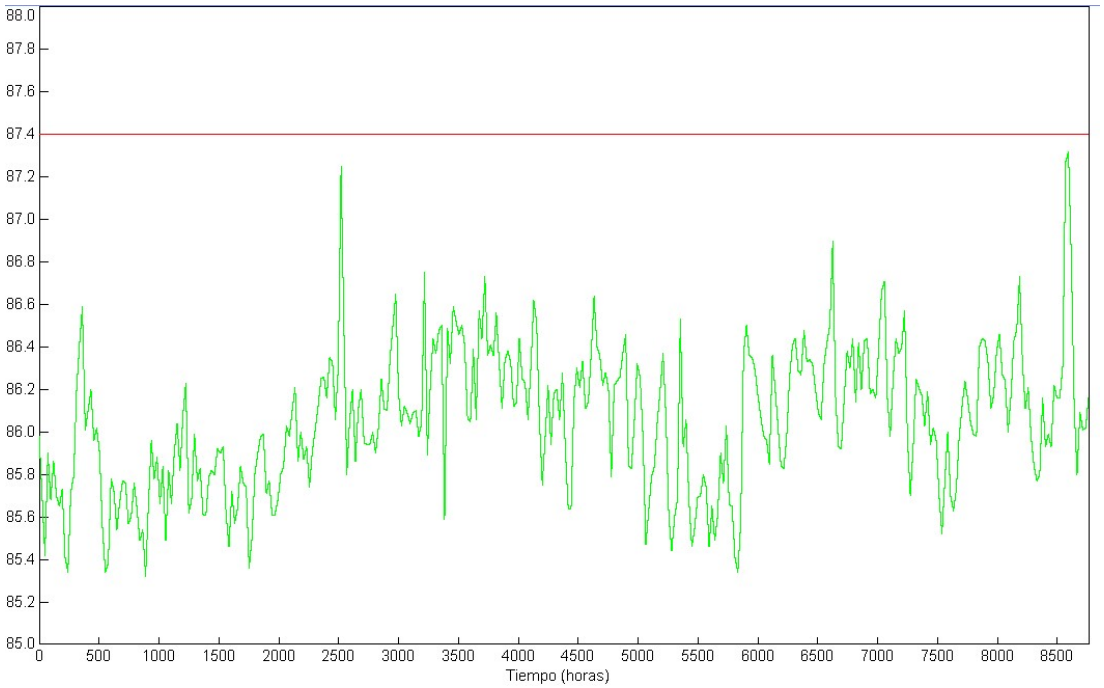


Figura 7. Nivel Presa 4 para el año 2012

Con este conjunto de escenarios se pudieron probar diferentes esquemas de manejo del sistema, así como de la gestión del agua para la producción eléctrica y/o otros fines.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

El sistema de simulación dinámica presentado permite tener un gran detalle en la gestión y seguimiento del sistema hídrico, permite su análisis temporal, así como evaluar la tasa de retraso de los flujos transferidos de un embalse a otro. También con el sistema se pude representar el protocolo actual con el que se operan los embalses y se pueden evaluar nuevas propuestas para la operación óptima de los flujos del conjunto de hidroeléctricas.

Como trabajo a futuro se espera añadir el costo de producción de electricidad al conjunto de variables estocásticas del sistema y con esto estar de posibilidades de representar el sistema en cuanto a la energía generada y su relación con los costos de producción.

REFERENCIAS

Zhao, T., Zhao, J, *"Optimizing Operations of Water Supply Reservoir: The Role of Constrains",* Mathematical Problems in Engineering. . 1–15, (2014)

Wang, F.X., Wang, L.,Zhou, H.C., Valeriano, O.C.S., Koike, T., Li, W.L., *"Ensemble hydrological prediction-based real-time optimization of a multiobjective reservoir during flood season in a semiarid basin with global numerical weather predictions",* Water Resources Research, 48(7), 1-21, (2012)

Rosero, N., Ramirez, J.M., Martinez, J.J., *"Minimization of water losses for optimal hydroelectric power generation",* 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) Platanias- Chanias, Crete, Greece, June 25-28, (2013)

Kote, A., Jothiprakash, V., *"Reservoir Inflow Prediction Using Time Lagged Recurrent Neural Networks "*, First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. IEEE Computer Society. 618-623, (2008)

Jacoby, S.L.S. , Kowalik, J..S. *"Optimal of flows in multi-reservoir hydro-power systems",* Mathematical Models in Hydrology. Preoceedings of the Warsaw Symposium, Poland July 1974, Vol 2.1028-1039, (1974)

Jiang, Z., Ji, C., Sun C., Wang, L. Zhang Y., *"Total output operation chart optimization of cascade reservoirs"*, Energy Conversion and Management.Vol. 88. 296-306, (2014)

Sauhats, A., Varfolomejeva, R., Pretrichenko, R., Kcajevs, J., *"A Stochastic Approach to Hydroelectric Power Generation Planning in an Electricity Market"*, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on, Issue Date: 10-13 June 2015, (2015)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Reactive Optimal Power Flow with Stochastic Parameter solved via Method of Lagrangian Modified Barrier Function

Yussef Guardia Ismael Acle [1] and Francisco Damasceno Freitas[1]
(1) Department of Electrical Engineering, University of Brasilia, Brasilia-DF, Brazil. CEP: 70910-900
E-mail: yussef.acle@gmail.com; ffreitas@ene.unb.br

Abstract

The Lagrangian Modified Barrier Function (LMBF) method is a very efficient technique to find local optimum on the reactive Optimal Power Flow Problem (OPF). The method depends on auxiliary variables and modified logarithmic barrier to deal with inequalities in the OPF. In this sense, a specific Lagrangian function with only equality constraints is associated to the OPF. A set of nonlinear equations is generated, when first order necessary optimal conditions on this Lagrangian function are applied. Then the OPF is solved by an adaptation of Newton's method. The traditional approach on the OPF considers deterministic conditions by using the LMBF method. In this paper we propose to apply the LMBF method taking into account uncertainty of a transmission line parameter. Specifically, a susceptance of a known branch admittance between two buses is selected to vary randomly. The parameter has normal distribution with mean value -10 pu and a standard deviation simulated for reaching a confidence interval of 99.9%. The voltage magnitude of the buses and the reactive power injected at a given bus are evaluated considering upper and lower bounds. As a consequence, 8 inequality constraints on the OPF are required. To demonstrate the performance of the technique, experiments are carried out on a 3-bus power system model. Simulation results in terms of tables and plots illustrate the results for the proposed application methodology of the work.

Keywords: Reactive Optimal Power Flow, Method of Lagrangian Modified Barrier Function, Optimization with Stochastic Parameter, Normal Distribution Estimation, Parameter Confidence Interval

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

The Optimal Power Flow (OPF) problem has been addressed in several nonlinear programming (NLP) studies in order to optimize allocation of resources and enhance electrical system operation. A specific similar problem is the Optimal Reactive Power Flow (ORPF), where the decision variables are directly involved in reactive power control analysis (Sousa, 2006).

In order to tackle NLP optimization and satisfy all equality and inequality constraints, several strategies and approaches were developed, such as the use of barriers, penalties, Lagrangian functions, etc. Compared to classical barriers, modified barrier methods (Polyak, 1992) have important advantages, as their finite convergence allows solutions on feasible region boundaries, and they are smooth and finite in a neighborhood of the optimum.

As presented in (Sousa, 2006), the Lagrangian Modified Barrier Function (LMBF) method combines the best qualities of modified barrier and primal-dual interior point methods. LMBF depends on auxiliary variables and modified logarithmic barrier to deal with inequalities in the ORPF. In this sense, all original inequality constraints are transformed into equalities and a specific Lagrangian function is associated to the ORPF. A set of nonlinear equations is generated, when first order necessary optimal conditions (Güler, 2010) are applied on this Lagrangian function. Then the ORPF is solved by an adaptation of Newton's method. The effectiveness of the LMBF on solving the ORPF on deterministic constant power demand conditions was verified in (Sousa, 2006). Also in (Murari et al., 2014), the method was adopted for controlling the power injected into a system by wind farm.

We propose to apply the LMBF method on the same electrical test system presented in (Sousa, 2006). However, a stochastic parameter (Hsu, 1997) from the network is introduced and its impact on the system performance is evaluated. Specifically, a susceptance b_{23} of a known branch admittance between two buses is selected to vary randomly. The parameter has normal distribution with mean value -10 pu and a standard deviation simulated for a confidence interval of 99.9%. The voltage magnitude of the buses and the reactive power injected at bus 2 all have upper and lower bounds, which impose 8 inequality constraints on the OPF. The main motivation is justified since random variation of electrical quantities is a concern mainly due to the insertion of mixed sources in modern power systems, such as wind penetration in the distribution networks (Saíz-Marín & Lobato, 2012). In the formulation problem of this work, the active power losses in the system presented in (Kundur, 1994) are assumed as objective function. To verify the performance of the methodology, some experiments are assessed in a 3-bus test system. With this goal, several numerical tests were performed under different and stressed demand conditions. The Lagrangian gradient infinity norm was used as stop criterion for convergence.

METHOD OF LAGRANGIAN MODIFIED BARRIER FUNCTION (LMBF)

The main idea in using barriers in optimization problems is to initially solve an alternative problem as it was unrestricted, because the barrier, if properly set, does not allow violation of constraints. Then, the effect of the presence of the barrier itself diminishes as its parameters are updated, leading to the original problem approximate solution.

Let $f_c(x)$ be a scalar cost (objective) function, with x a column vector of N decision variables. Also, let $h_i(x)$ and $g_j(x)$ be the i-th of N_{eq} equality constraints and the j-th of N_{ineq} inequality constraints, respectively. The original NLP problem is stated as:

$$\text{Minimize } f_c(x), \text{ subject to} \quad \begin{cases} h_i(x) = 0, i = 1,\ldots,N_{eq} \\ B_{2j} \le g_j(x) \le B_{2j-1}, \quad j = 1,\ldots,0.5\times N_{ineq} \end{cases} \tag{1}$$

where $B = [B_1,\ldots,B_{ineq}]^T$ is an array of N_{ineq} bounds, where odd and even entries stand for upper and lower bounds, respectively.

After the modification of problem (1) consisting of addition of N_{ineq} slack variables from a column array s, the problem is rewritten as (Sousa, 2006):

 ISBN 978-607-8242-11-5

$$\text{Minimize } f_c(x), \text{ subject to}$$
$$\begin{cases} h_i(x) = 0, i = 1,\ldots,N_{eq} \\ g_j(x) - B_j - (-1)^k s_j = 0, \quad j = 1,\ldots,N_{ineq} \\ s_k \geq 0, \quad k = 1,\ldots,N_{ineq} \end{cases} \tag{2}$$

In (2), index *k* odd means inequality related only to upper limits, while even is for lower limits. The LMBF technique was implemented with logarithmic Frisch modified barrier (Polyak, 1992). For instance, if $s_1 \geq 0$, then $\ln(\mu - s_1 + 1) \geq 0$, where $\mu > 0$ is the barrier parameter. Applying the method proposed in (Polyak, 1992), the system (2) is transformed into the problem:

$$\text{Minimize } f_c(x), \text{ subject to}$$
$$\begin{cases} h_i(x) = 0, i = 1,\ldots,N_{eq} \\ g_j(x) - B_j - (-1)^k s_j = 0, \quad j = 1,\ldots,N_{ineq} \\ \mu \ln\left(\mu^{-1} s_k + 1\right) \geq 0, \quad k = 1,\ldots,N_{ineq} \end{cases} \tag{3}$$

A modified barrier Lagrangian is associated with (3) as follows:

$$L(x,\lambda,s,\pi) = f_c(x) + \mu \sum_{i=1}^{N_{ineq}} u_i \ln(\mu^{-1} s_i + 1) + \sum_{j=1}^{N_{eq}} \lambda_j h_j + \sum_{k=1}^{N_{ineq}} \pi_k (g_k(x) - B_k - (-1)^k s_k) \tag{4}$$

where λ_j, π_k are entries of column vectors of the original equality constraints Lagrange multipliers and transformed inequality constraints Lagrange multipliers, respectively. In this implementation, only one barrier parameter, μ, is used, but N_{ineq} different parameters could be used in (4). The term u_i is the *i*-th element of the vector u of barrier Lagrange multipliers, artificially created with the barrier.

Once the Lagrangian function in (4) is established, optimal first order necessary conditions are applied on it (Güler, 2010), generating a set of nonlinear equations:

$$\nabla \mathrm{L}(\mathrm{x},\lambda,\mathrm{s},\pi) = \frac{\partial L}{\partial d} = \mathbf{0} \in R^{(N+N_{eq}+2N_{ineq})} \tag{5}$$

where $d = [x^T, \lambda^T, s^T, \pi^T]^T$ is a direction search vector. Notice that no derivative of *L* with respect to *u* is taken, as it is updated with a separate rule.

The equations in (5) with derivatives with respect to the original decision variables *x* represent the optimality of the problem regarding those variables. The equations involved in the differentiation of *λ* and *π* are related to the original equality constraints in (1) and the transformed inequality constraints in (2), respectively. Also, the equations with the derivatives with respect to *s* are involved with the modified logarithmic barrier. They must be satisfied in order to eliminate the effect of the presence of the barrier in the ORPF, and also to find the original problem (1) approximate solution.

Newton's method (Kundur, 1994) is used to solve (5). With this aim, at each iteration γ, the Hessian matrix defined by $W = \partial \nabla L / \partial d$ must be calculated. We need to solve the linear system $W \times \Delta d = -\nabla L(x,\lambda,s,\pi)$, where $\Delta d = [\Delta x^T, \Delta \lambda^T, \Delta s^T, \Delta \pi^T]^T$ is an array of increments that is calculated to update *d*. However, its use is not straightforward as considered for the traditional Newton's method. Then, few adaptations are required. Actually, the update is of the form (Sousa, 2006):

$$\begin{aligned} x^{(\gamma+1)} &= x^{(\gamma)} + \alpha_p \Delta x^{(\gamma)} \\ s^{(\gamma+1)} &= s^{(\gamma)} + \alpha_p \Delta s^{(\gamma)} \\ \lambda^{(\gamma+1)} &= \lambda^{(\gamma)} + \alpha_d \Delta \lambda^{(\gamma)} \\ \pi^{(\gamma+1)} &= \pi^{(\gamma)} + \alpha_d \Delta \pi^{(\gamma)} \end{aligned} \tag{6}$$

where α_p and α_d are the primal and dual step sizes used in the update. They must be properly selected in order to avoid the occurrence of $s_i < 0$ or $(-1)^i \pi_i < 0$, $i = 1,\ldots,N_{ineq}$. The barrier parameter is updated as (Sousa, 2006):

 ISBN 978-607-8242-11-5

$$\begin{aligned} \mu^{(\gamma+1)} &= \mu^{(\gamma)}\left(1-\frac{\rho}{\sqrt{N_{ineq}}}\right) \\ \rho &= \max_{s_j>0}\left(\frac{1}{\mu^{-1}s_j+1}\right), j=1,\ldots,N_{ineq} \end{aligned} \tag{7}$$

The barrier Lagrange multipliers *u* are updated as follows (Polyak, 1992):

$$u^{(\gamma+1)} = u^{(\gamma)}\frac{u^{(\gamma)}\mu^{(\gamma+1)}}{s^{(\gamma+1)}+\mu^{(\gamma+1)}} \tag{8}$$

The first iteration of Newton's method can start with an unfeasible solution, but must be initialized with $s>-\mu$ (Sousa, 2006). The stop criterion used was based on the Lagrangian Gradient Precision (LGP) required for convergence. In this case, the infinity norm $||\nabla L(x,\lambda,s,\pi)||_\infty \le LGP$. Also, it is possible to constrain the process to a fixed maximum number of iterations (M_{maxit}).

The adoption to use the term $||\nabla L(x,\lambda,s,\pi)||_\infty$ in the stop criterion not only meet optimality equations, but also simultaneously guarantees that: all bounds are fulfilled; equality constraints (in the case of ORPF, the traditional power flow equations (Kundur, 1994)) are satisfied; and the original problem (1) has been solved.

ELECTRICAL TEST SYSTEM WITH STOCHASTIC PARAMETER

This section presents the development involving the modeling of a stochastic parameter in the network of an electrical system. It was established a confidence interval (CI) of 99.9% for the transmission line susceptance, for an accuracy ranging from -9 to -11 pu. Here, the accuracy of 2 pu was defined as the length of the confidence interval, i.e. if $[b, a]=[-11, -9]$ is the CI, then $a-b=2$, or ± 1 pu from the mean value of -10 pu. All computations in this section consider only zero mean Normal Probability Density Function (PDF), (Meyer, 1970). However, it is possible to extend the problem to also include nonzero mean by carrying out a variable transformation as $\hat{x}=x-\mu$. Let $\mathcal{N}(0,\sigma^2)$ be a Normal probability distribution function given by the PDF:

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\,e^{-x^2/2\sigma^2} \tag{9}$$

The CI for Normal PDF consists in the mean centered interval whose area under the PDF curve is equal to at least the confidence required percentage, i.e. 99.9%. For instance, considering the CI defined by [-w, w], then we need to solve the following problem for w:

$$\int_{-w}^{w} f(x)\,dx = 0.999 \tag{10}$$

Since that the global area under a PDF function has unitary value and by using the respective Cumulative Distribution Function (CDF) *F(x)*, equation (10) can be rewritten as:

$$F(-w)-F(w)=0.999 \tag{11}$$

The Normal CDF $\mathcal{N}(\mu,\sigma^2)$ can be writen as

$$F(x)=0.5+0.5\cdot\left[1+\mathrm{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right] \tag{12}$$

where erf is the error function defined by:

$$\mathrm{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt \tag{13}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

To obtain the inverse CDF, the following expression is used (Meyer, 1970)

$$w = \mu + \sigma\sqrt{2}\cdot \mathrm{erf}^{-1}(|2\,F(w)-1|) \tag{14}$$

Scaling the distribution by the factor $1/\sigma$, a normalized distribution similar to $\mathcal{N}(0,1)$ is obtained. This procedure is equivalent to fix $\sigma = 1$ in the previous expressions. The computation in Matlab is assessed directly by the function `erf` and its inverse function, `erfinv`. As a result, an interval from -9 to -11 pu must contain 3.2905 standard deviations (from the mean value of -10 pu). This gives a standard deviation 0.3039 pu. Therefore, the random variable in this work is described by $\mathcal{N}\left(-10,\ 0.3039^2\right)$.

Considering the Normal distribution, we employed some properties related to the expectation and variance, regarding addition and product of a random variable by a scalar. Hence, the following transformed equation is obtained:

$$\mathcal{N}(a,b) = \frac{a\sqrt{d} - c\sqrt{b}}{\sqrt{d}} + \sqrt{\frac{b}{d}}\ \mathcal{N}(c,d) \tag{15}$$

In this work, the random variable described by a Normal function $\mathcal{N}(a,\ b) = \mathcal{N}\left(-10,\ 0.3039^2\right)$ was obtained from the standard Normal function $\mathcal{N}(c,d) = \mathcal{N}(0,1)$. Then, from (15), it results

$$\mathcal{N}(a,b) = a + \sqrt{b}\ \mathcal{N}(0,1) \tag{16}$$

By using (16) with $\mathcal{N}\left(-10,\ 0.3039^2\right)$, the following result can be computed .

$$\mathcal{N}\left(-10,0.3039^2\right) = -10 + 0.3039\ \mathcal{N}(0,1) = -10 + 0.3039\ \text{randn} \tag{17}$$

where `randn` is a script used in Matlab, meaning generation of values with distribution Normal $\mathcal{N}(0,1)$.

The expression (17) was used to generate the random parameter values adopted in the numerical tests in this work. Only one uncertain parameter is considered, the susceptance b_{23} of series branch admittance between buses 2 and 3 of a 3-bus electrical test system (Sousa, 2006), whose diagram is presented in Figure 1.

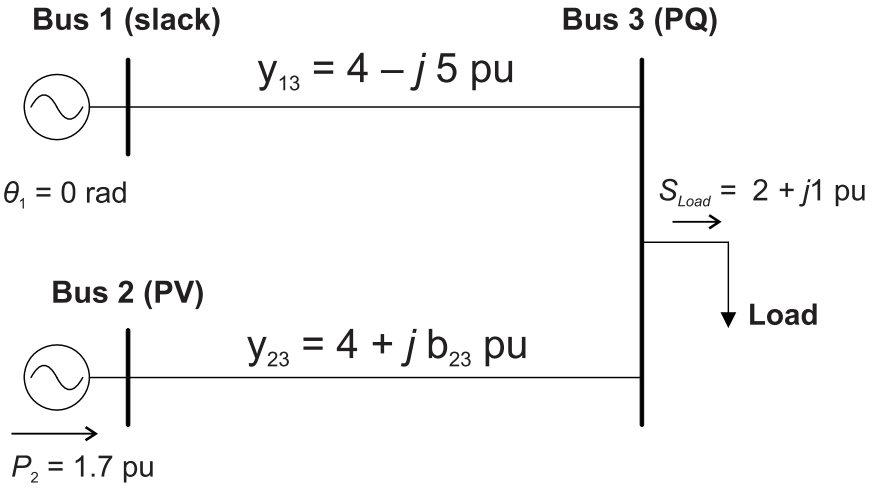


Fig. 1: Electrical test system diagram

ISBN 978-607-8242-11-5

TESTS AND RESULTS

Several computational simulations are proposed for verifying the influence of the stochastic parameter. The goal is to compute the optimal reactive power flow in a 3-bus power system (see Figure 1) which has a transmission line whose susceptance has an uncertain value. The solution of this ORPF implicates finding voltages (magnitudes V_1, V_2, V_3 and their phase angles) at all three buses, as well as finding injected reactive power at bus 2 (Q_2), while minimizing the cost function (active power losses in the system) and obeying all constraints defined by traditional power flow equations (Kundur, 1994), bounds inequalities and barrier modeling. In order to obtain a representative number of process realizations, 10^7 samples are used in the computational simulations. For each sample, the LMBF method is used, with a precision for stop criterion of $||\nabla L(x,\lambda,s,\pi)||_\infty \leq LGP = 10^{-10}$.

Two possible scenarios are investigated with relation to the operational behavior of the system. In a first scenario, the bounds are set to allow free excursion of voltage magnitudes V_2 and V_3 without hitting their bounds, except for V_1. In a second scenario, the voltage magnitude V_2 is adjusted to reach its upper bound for some values of b_{23}. Table 1 presents the scenarios of bounds studied in this work. The scenario 1 is the one that presents broader limits.

Table 1. Feasible intervals for different cases studied in this work

Scenario	Bound	V_1	V_2	V_3	Q_2
1	Lower	0.95	0.95	1.00	-99.99
	Upper	1.08	1.20	1.05	99.99
2	Lower	0.95	0.95	0.90	-1.30
	Upper	1.05	1.10	1.05	1.00

Table 2 includes statistical indices calculated for all buses voltage magnitudes and reactive power injection at bus 2, for both scenarios. For each quantity, the sample mean (μ) and covariance (σ^2) are calculated, considering all 10^7 samples. The correlation coefficient is used to compare the estimated PDF from the normalized histogram and the theoretical Normal distribution $\mathcal{N}(\mu,\sigma^2)$. The theoretical PDFs were built from inserting sample mean values and sample standard deviations from Table 2 in equation (9), whereas approximated PDFs were acquired by normalizing the histogram envelopes by their curve area calculated from trapezoidal rule.

Table 2: statistical indices related to numerical results for two scenarios

	Quantity	Sample Mean value (pu)	Sample Standard Deviation (pu)	Correlation Coeff. (%)
Scenario 1	b_{23}	-10.000	3.0396×10^{-1}	99.999
	V_1	1.0800	7.0644×10^{-10}	89.810
	V_2	1.1545	2.7557×10^{-3}	99.920
	V_3	1.0237	1.2553×10^{-3}	99.879
	Quantity	Sample Mean value (pu)	Sample Standard Deviation (pu)	Correlation Coeff. (%)
Scenario 2	b_{23}	-10.000	3.0397×10^{-1}	99.999
	V_1	1.0500	1.2629×10^{-9}	22.697
	V_2	1.0990	1.5183×10^{-3}	13.174
	V_3	0.9730	2.3429×10^{-3}	83.435

Figures 1 to 6 present results to scenario 1, while Figures 7 to 10 are related to scenario 2.

Figure 2 illustrates the histograms for the susceptance b_{23} and V_1 for scenario 1. Histogram of V_2 and comparison of theoretical and approximated PDFs of V_2 for scenario 1 are included in Figure 3, while histogram of V_3 and comparison of theoretical and approximated PDFs of V_3 for scenario 1 are presented in Figure 4. With the exception of V_1, that remains locked at its upper bound, all the quantities present a stochastic behavior similar to b_{23}, and their distribution functions curves are very close to normal distributions, as can be seen from comparison of theoretical and approximated PDFs in Figs. 3 and 4, and also from Table 2, where the correlation coefficients for V_2 and V_3 are almost 100%.

ISBN 978-607-8242-11-5

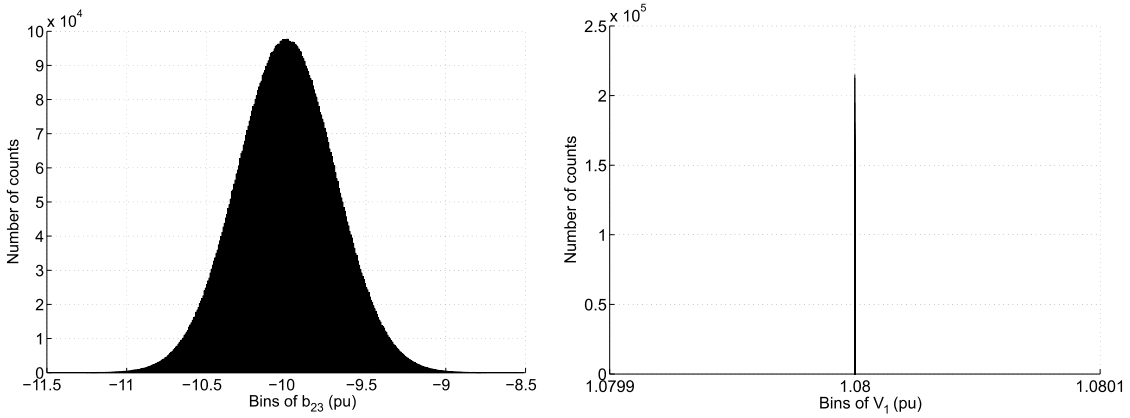


Fig. 2: Histograms of b_{23} and V_1 for scenario 1

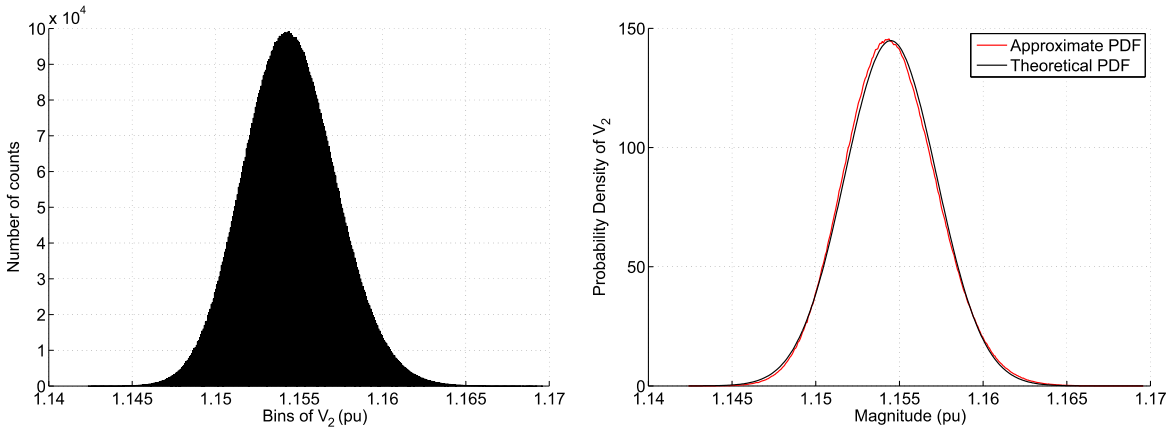


Fig. 3: Histogram of V_2 and comparison of theoretical and approximated PDFs of V_2 for scenario 1

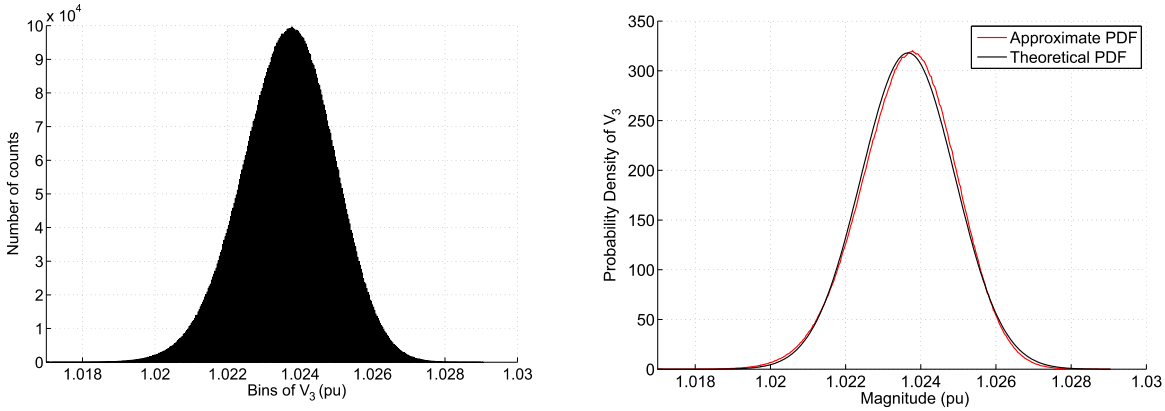


Fig. 4: Histogram of V_3 and comparison of theoretical and approximated PDFs of V_3 for scenario 1

With the purpose of further investigating the reasons of stochastic behavior presented for V_2 and V_3, the parameter susceptance b_{23} is varied from -8.5 pu to -11.5 pu, and the evolution of solutions from the LMBF for all buses voltage magnitudes and injection of reactive power at bus 2, Q_2 ,are registered for scenario 1. Figure 5 shows these results. All quantities but V_1, that remains at its upper bound due to the problem restrictions, presented some resemblance of functional dependence of b_{23}. While Q_2 curve might be nonlinear, the curves for V_2 and V_3 behave in an almost linear dependence of b_{23}. The broad bounds defined for scenario 1 (see Table 1) allowed wide excursion for the quantities as b_{23} was changing. This

ISBN 978-607-8242-11-5

may explain how the stochastic behavior in the normal distribution of b_{23} was transferred to V_2 and V_3, with proper scaling factor related to the slope of the curves in Fig.5.

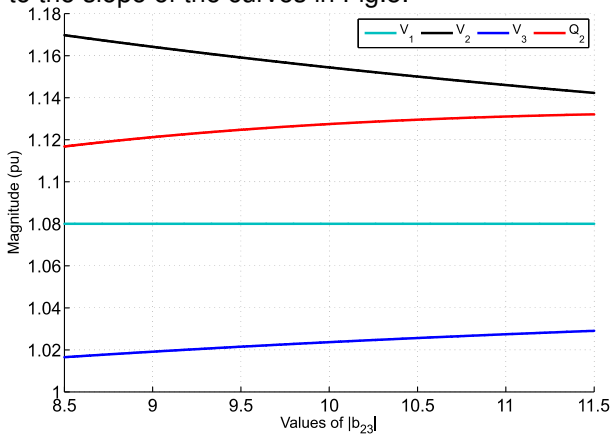


Fig. 5: Voltages and Q_2 magnitudes as function of b_{23} for scenario 1

The reason to use 10^7 samples for each scenario may become explicit in Figure 6, which illustrates the mean value evolution of stochastic parameter b_{23} and voltage magnitudes V_2 and V_3 according to the number of samples used. It can be verified that around the use of 10^4 samples the process starts to stabilize and truly represent the process realizations of a normally distributed random variable.

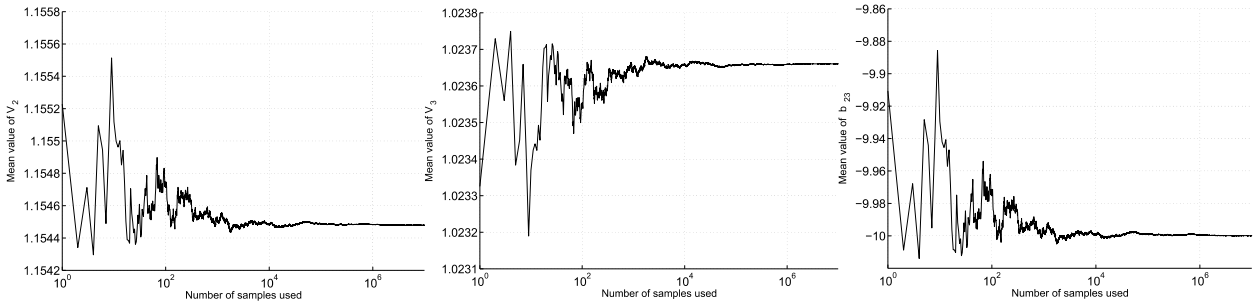


Fig. 6: Sample evolution of b_{23}, V_2 and V_3 for scenario 1

Figure 7 illustrates the histograms for the susceptance b_{23} and V_1 for scenario 2. Histogram of V_2 and comparison of theoretical and approximated PDFs of V_2 for scenario 2 are included in Figure 8 (presented in logarithmic scale for better visualization), while histogram of V_3 and comparison of theoretical and approximated PDFs of V_3 for scenario 2 are presented in Figure 9. In distinction of the results for scenario 1, while V_1 remains locked at its upper bound, the stochastic behavior of normally distributed b_{23} is neither transferred to V_2 nor to V_3 for scenario 2. Table 2 also confirms this observation, as V_2 and V_3 have poor correlation to the theoretical normal PDF. Actually, in both curves in Fig. 8 and 9 there seems to be a breakpoint where the magnitudes V_2 and V_3 behave as generated from different distributions.

ISBN 978-607-8242-11-5

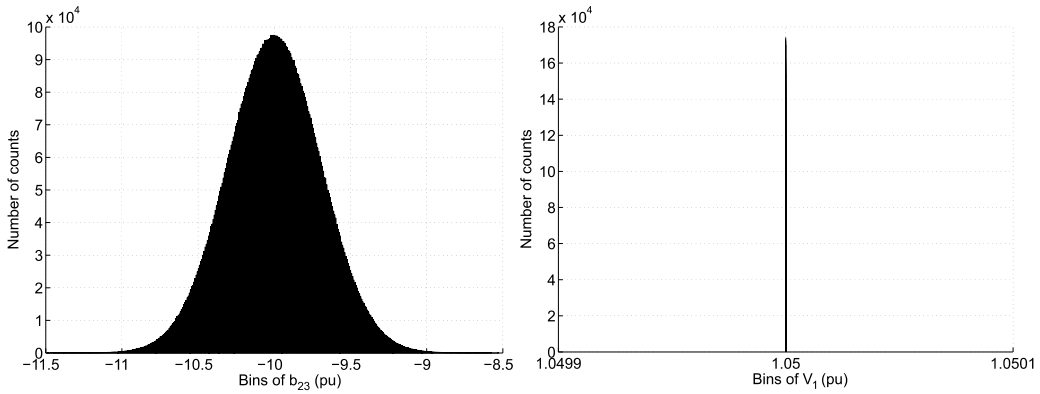


Fig. 7: Histograms of b_{23} and V_1 for scenario 2

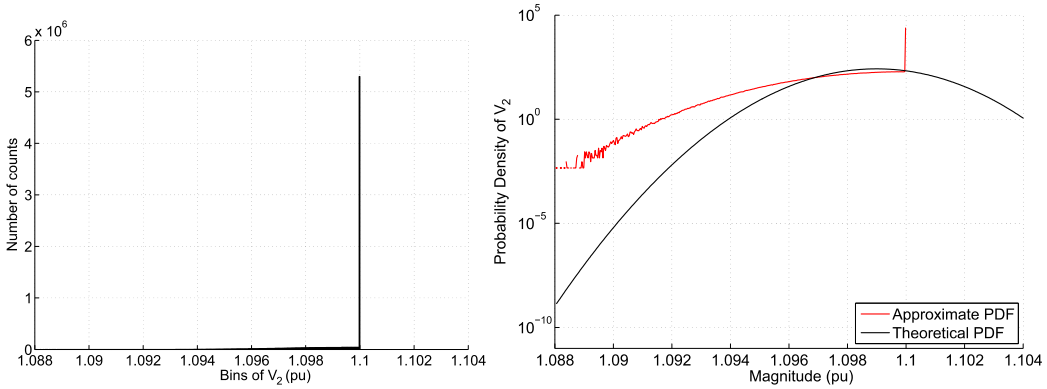


Fig. 8: Histogram of V_2 and comparison of theoretical and approx. PDFs of V_2 for scenario 2

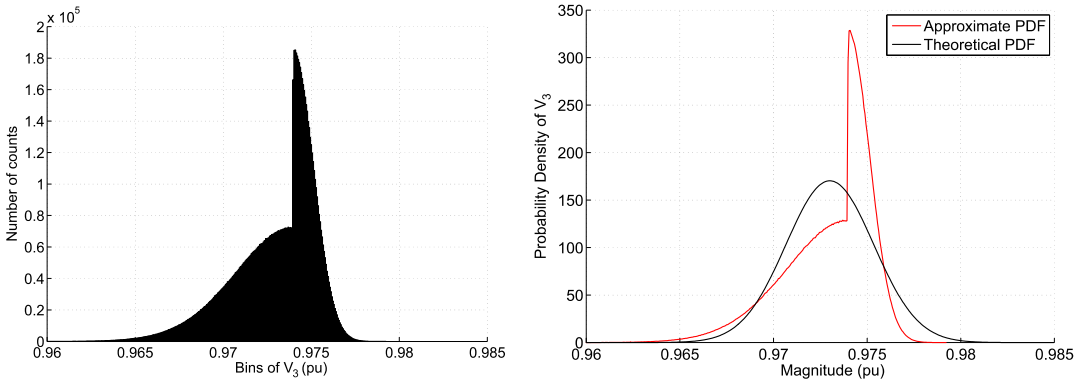


Fig. 9: Histogram of V_3 and comparison of theoretical and approx. PDFs of V_3 for scenario 2

Similarly to the investigations in scenario 1, the parameter susceptance b_{23} is varied from -8.5 pu to -11.5 pu, and the evolution of solutions from the LMBF for all buses voltage magnitudes and injection of reactive power at bus 2, Q_2, are registered for scenario 2, as shown in Figure 10. While V_1 remained at its upper bound due to the problem restrictions, it can be observed that Q_2 reached its maximum bound for b_{23} around -10 pu and remained there for increasing values of $|b_{23}|$. In other words, the inequality constraint bound for reactive power injection at bus 2 became active. As a consequence of this, the curves of V_2 and V_3 changed their slopes abruptly at this breakpoint. The narrower bounds defined for scenario 2 (see Table 1), specially for limiting Q_2, caused this steep change of V_2 and V_3 dependences with parameter b_{23}, thus transferring the stochastic parameter behavior to V_2 and V_3 in two parts (values of b_{23} lower and higher than the breakpoint) with different scaling factors, as seen in Fig. 8 and 9.

ISBN 978-607-8242-11-5

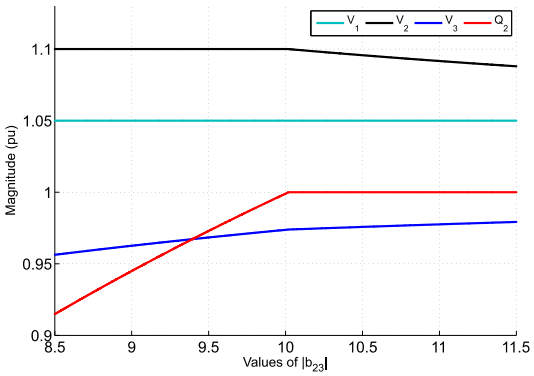


Fig. 10: Voltages and Q_2 magnitudes as function of b_{23} for scenario 2

CONCLUSIONS

This paper investigated the application of the the Lagrangian modified barrier function method on the voltage control problem for a stochastic power system model. With this aim, an optimal reactive power flow is formulated. The Lagrangian gradient infinity norm was used as stop criterion for convergence. An uncertain parameter was considered and statistical studies were carried out. Specifically, a transmission line susceptance b_{23} of a known branch admittance between two buses is selected to vary randomly. The parameter was evaluated taking into account a Normal distribution with mean value -10 pu and a standard deviation simulated for a confidence interval of 99.9%. The voltage magnitude of the buses and the reactive power injected at bus 2 were modeled with upper and lower bounds. These constraints require 8 inequality constraints on the OPF.

The results were obtained from experiments carried out on a 3-bus power system model, for two possible scenario of bounds. While in scenario 1 both voltage magnitudes at buses 2 and 3 essentially maintained the parameter b_{23} stochastic behavior, in scenario 2 some active inequalities constraints significantly affected voltage solutions distributions. In the formulation problem, the active power losses in the system (Kundur, 1994) were assumed as objective function. The analysis can be extended to investigate the behavior of the objective function and voltage phase angles. These results justify studies considering random variations of electrical quantities. Therefore, such a problem is a concern mainly due to the insertion of mixed sources in modern power systems, such as wind penetration in the distribution networks (Saíz-Marín & Lobato, 2012).

REFERENCES

Güler, O.; "*Foundations of Optimization*", Graduate Texts in Mathematics, Springer, New York, NY, USA (2010).

Hsu, H.; "*Probability, random variables, & random processes"*, Schaum outlines, McGraw-HILL, (1997).

Kundur, P.; "*Power System Stability and Control".* McGraw-Hill Inc, New York, USA (1994).

Meyer, P. L.; "*Introductory Probability and Statistical Applications"*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company Inc., USA (1970).

Murari, L. L., Tabares, H. G., Vargas, G. A. L. Belati, E. A, Sousa, V. A., Salles, M. B. C.; Sguarezi Filho, A. J.; "*Study of transmission system with wind power control and optimal reactive power flow*". Przeglad Elektrotechniczny, R. 90, NR 7 (2014), pp. 88-93.

Polyak, R. A.; "*Modified barrier functions*", Mathematical Programming, v. 54 (1992), n.2, pp. 177-222.

Saíz-Marín, E., Lobato, E.; "*Optimal voltage control by wind farms in distribution networks using regression techniques"*. Przeglad Elektrotechniczny, R. 88, NR 1a (2012), pp. 117-121.

Sousa, V. A.; "*Resolution of Reactive Optimal Power Flow Problem Via Method of Lagrangian Modified Barrier Function*", Ph.D. Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (2006).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Schedule Modeling and Expert Knowledge Elicitation Using Graphs Applicated to a Multiple Fermenter System

Paula A. Toselli[1], Ernesto C. Martinez[2], Luis A. Toselli[1] y Romina A. Beltrán[1]
(1) Grupo de Investigación en Simulación para Ing. Qca., Fac. Reg. V. María, Univ. Tecnológica Nacional, Av. Universidad 450, X5900HLR Villa María, Cba., Rep. Argentina.
(2) INGAR – CONICET, Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional.
e-mail: ptoselli@frvm.utn.edu.ar

Abstract

Knowledge elicitation about repairs and adjustments in a production schedule is necessary to handle on-line modifications to a schedule and use this information to create heuristics and acquire knowledge about the expert good practices to repair schedules and to react to undesirable disruptive events. In this work, a representation based on graphs is presented to model industrial schedules. A computational tool is made to gather attributes and characteristics that achieve pre-established production goals about schedule information systematically. The developed prototype allows creating scheduling models of Batch-type industrial production. he presented case of study in about a plant that consists in six industrial fermenters of 450 m3 volume each one operating in batch mode, time-lagged, allowing to feed with fermented must, with two units per day, a bioethanol distillery which operates continuously.

This paper proposes a new modeling methodology using graphs that results in a prototype implementation that automates the model generation and the elicitation of knowledge for rescheduling. Concepts and definitions required to understand graphs, model languages and transformations were studied. These concepts were implemented to model, transform metamodels and develop a prototype that allows to automatize the schedule representation and to elicitate expert domain knowledge gained by trial-and-error experience in dealing with abnormal events and unplanned disturbances. The model developed allows to demonstrate the use and advantages of the Implementation of the methodology presented.

Keywords: schedule, modeling, knowledge elicitation, graphs, fermenter system.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

Production systems, during their life cycle, rest on carrying out monitoring and control tasks to deal with unexpected events and uncertainty that are faced by adjusting production schedules. In this context, rescheduling knowledge is applied by experts in the production system domain are working on, to change and adjust the schedule applying corrective measures using their own experience (MacCarthy, 2001).

Knowledge used by an expert to fix disruptive events is scarce, so it must be elicited, modeled and stored to be used later in similar states of a production schedule. In order to extract human expert knowledge, it is necessary to generate tools, develop heuristics and gather repair-based information systematically.
At present, scheduling of industrial production process is carried out through different methodologies and manual or informatics tools. As representative examples (Giudici, 1997), the critical path diagram, PERT and the most popular option, Gantt Diagram can be mentioned (Gonzáles Fernández, 2003).

In order to elicitate expert knowledge, these types of diagrams are not rich enough to provide data and information for rescheduling. Besides, tracing changes made to a given schedule is not amenable. The following points can be added (Gracia Ramos, 2008):

- Some schedules might be excessively complex to be represented using the mentioned diagrams.
- Gantt Diagram representation depicts only the time period where a set of tasks must be completed, but critical information like the number of resources needed for each task as well precedence and synchronization constraints are not explicitly modeled.
- During schedule execution, environmental conditions change and modifications have to be represented. If a Gantt Diagram is used, edition must be frequent and simple. In practice, these changes are difficult to implement as the planning problem complexity increases.
- Some data are not taken into account, for example costs and resource sharing constraints.

This works proposes representing schedules based on graphs to model synchronization/precedence constraints, considering adjustments and modifications (re-scheduling) along with schedule attributes that offer deeper and richer details which are lost in previous approaches. Besides, the proposed approach readily allows expert user knowledge elicitation. Furthermore, using graphs to represent the dynamic of schedule states allows easy visualization of changes and discovers heuristics and repair rules using distance algorithms, weight functions, and others. Besides, some additional advantages are: representing compound resources easily, adding attributes and other complementary data.

Graphs enable the entire schedule or some part of it to be displayed focusing, for example, on repaired points, meaning those planned tasks forced to be modified in view of a disruptive event. Finally, schedule changes are quick and simple to do which makes room to pinpoint modifications needed to reach a re-schedule state and the traceability of any change made along the way.

In order to convert schedule data into graph elements so to generate the corresponding representation it is necessary to map models validating the transformation from a schedule element to a graph one. Also, two abstraction levels are used to represent different types of data in the schedule state. To validate the proposal, a prototype was developed to transform production schedule data into a graph model. Furthermore, the prototype presents some additional functionality like schedule states seen in a repair sequence and expert user knowledge elicitation. To carry out the mentioned transformation, the QVT methodology is implemented. To automatize the tasks involved in elicitation and modeling tasks, the prototype performance is presented and detailed.

Finally, the developed prototype allows creating scheduling models of Batch-type industrial production. The prototype has been designed to allow tracking of the sequence of changes made to an original schedule to achieve a given goal. The prototype favors user knowledge elicitation which highlights that graph-based representations have many advantages regarding schedule visualization, task changes and re-scheduling as well as details about schedule state sequences, resources and tasks involved. To exemplify schedule modeling using graphs and the functioning of the prototype, a more complex case study is considered. The presented case of study in about a plant that consists in six industrial fermenters of 450 m3 volume each one operating in batch mode, time-lagged, allowing to feed with fermented must, with two units per day, a bioethanol distillery which operates continuously. The productions steps and average operating times in hours are: a) washing (1 h.), b) sterilization (1 h.) c) partial filling (5 h.), d) filling, sowing and start of fermentation (2 h.), e) final filling and fermentation f) vi) development of fermentation (48 h.) and g) final fermentation and discharge (12 h.).

ISBN 978-607-8242-11-5

FUNDAMENTALS

To develop this paper, several tools that constituted the theoretical frame of the presented proposal were employed, including Knowledge Elicitation, Graphs, Unified Modeling Language (UML) and Query, Views & Transformations (QVT).

Knowledge elicitation.

The process of collect from a human expert as source of knowledge, information that is relevant is called knowledge elicitation. Through direct interactions with the expert, knowledge from the expert domain can be elicitated. Using a set of techniques and methods knowledge elicitation can be made (Ford, 1998). Elicitation, representation and transmission of knowledge are very important activities that can be automatized. As a result, systems can emulate the experts experience and used as support in decision making.

Currently, many private and public sectors systems depend on an expert that control and manage all operations involved and related tasks. Often, this expert ends up being the only one that can operate the system. This poses a real problem if the human expert is absent. Domain experts used to be the key in the knowledge elicitation process; multiple types of knowledge are often involved and human expertise has different roles in the system. The types of knowledge are (Shadbolt, 2015):

- Domain Knowledge: describes the concepts and elements in the domain and relations between them.
- Inference Knowledge: This is knowledge about how the components of expertise are to be organized and used in the overall system.
- Task Knowledge: also, called procedural knowledge, this is knowledge concerned with goals, sub-goals, tasks and sub-tasks.
- Strategic Knowledge: This is information that monitors and controls the overall problem solving process.

Knowledge elicitation allows the expert know-how to be modeled and emulated by a prototype.

Graph Theory– Concepts and definitions.

A graph can be defined as a set of nodes or vertices (v) and a set of edges (A). The existence of the edges between different nodes allows the generation of binary relationships (Wagner de García, 2010). Given an infinite or finite set L of node and edge labels it can be defined a graph such as a tuple $g = (V, E, \mu, v)$ where:

- V is the node sets,
- E is the edge sets,
- $u : V -> L$ node labeling function and
- $v : E -> L$ edge labeling function.

A graph may have different classifications (Gracia Ramos, 2008):

- Directed: when the pair of edges are sorted.
- Undirected: when the pair of edges are not sorted.
- Rated: when the edges contain some value (weight, length long, others)
- Labeled: when each edge and node has its own label
- Unlabeled: it is a special case in which the same label is used on all the nodes and edges.

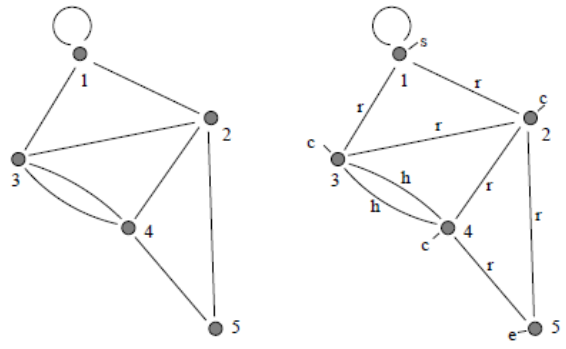


Fig. 1: Graph Representations

ISBN 978-607-8242-11-5

In this paper directed and labeled graphs are used to represent the state of a schedule. In figure 1, a generic example of this kind of diagram is shown. A standard set of operations can be applied to graph nodes or edges. The mentioned sets of operations are defined as (Ford, 1998):

- Node substitution (u -> v)
- Node eliminations (u -> ε)
- Node insertion (ε -> v)

These operations allow changes to be made in graph structures. Following the modifications, an execution trace of changes that is useful in debugging a rescheduling process among graphs can be made (Giudici, 1997).

UML - Unified Modeling Language.

The Unified Modeling Language (UML) is a graphic language that allows visualizing, specifying, constructing and documenting each part of the software development process. UML offers a way of shaping conceptual terms such as business processes, system functions, and particular objects of a determined language, database schemes and re-utilizable software components. The mentioned graphic language defines a notation and a metamodel. The first one is the graphic material by which the models, the model language syntax, are observed. The metamodel is a diagram that defines this notation (Fowller, 1999).

There are several types of diagrams in UML to model software. In this paper, the chosen ones are Class Diagrams. This kind of diagrams represents the system components by the class and relationships between them. They are static diagrams that represent classes, with its attributes and methods, and the static relationships without showing the methods that are invoked between them.

A metamodel can be defined as a UML description on UML, that is to say, is a model from a model (Rumbaugh, 2006). Occasionally, a mapping model is made when there is two metamodels and is necessary to convert one into another. The goal is to transform each object from a class (of the original model) to a similar object of the class into a destination model. To carry out the mapping between the classes of a UML diagram, the Query, Views, Transformations (QVT) methodology is used and is explained on the following section.

Metamodels Transformation - Query, Views, Transformations (QVT).

Formally, a metamodel is a model that specifies the language concepts, the relations between them and the structural rules that restrict the possible elements or the valid models in it. On the other hand, a metaclass is a class whose instances are also classes, i.e. as the objects are classes instances, the classes are instances of a metaclass (Ariste, 2015).

It is important to take into account the information of the metamodels to carry out the transformation between models. These describe the representations of each model element and define the restrictions that must be enforced in a model transformation. When talking about a transformation, we are making reference to the process of converting a model into another in the same system. Transformation is a process based on a set of rules, which defines the mechanisms of transforming an original model into a new one (Hebach, 2006).
Transformations allows to:

- Identify a metaclass of the original model element.
- Transform the mentioned metaclass into the final model element.
- Keep the consistency of the established rules in the original model.

The process of model transformation is based on comparing vis-à-vis if all the defined relations are verified. For those relations who are not verified, the mentioned process tries to carry out by inserting, eliminating or modifying the final model (Favre, 2010).

QVT (Query, View, Transformations).

The transformations are classified as relation and mapping. The first ones specify multi directional transformations. They do not create or modify models, but they can check the consistency among two or more related models. While mapping, transforms elements from a domain into the elements of another domain (Barendrecht, 2010). QVT allows carrying out transformations among models whose languages are defined in MOF (Meta Object Facility) using the following elements:

 ISBN 978-607-8242-11-5

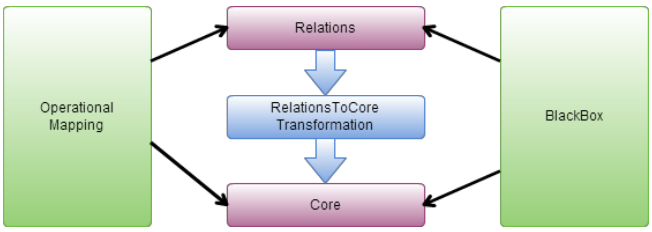


Fig. 3: Relations among QVT metamodels

- Query: is an expression tested on a given model that has as a result one or more instances of types.
- View: is a model that is completely derived from another model. They are more general than Query. They tend to be read-only entities.
- Transformation: generates a final model from an original one. The relations specify the transformations while mapping implements them. QVT structure to transform models and elements relationships are shown in figure 3.

SCHEDULE MODELING USING GRAPHS

Production planification and control activities can be considered as means to reduce the uncertainty and deal with disturbances that invalidate assumptions made. The steps to create a task schedule, generally, are:

- Project analyzing
- Tasks and resources identification
- A work plan creation
- Assessment of results

Schedule models generate knowledge and allow the development of strategies to reach expected production goals (Gonzalez Riesco, 2016). Within the modern tools to represent schedules, Gantt Diagrams are one of the most popular options due to its simplicity and widespread use (Verdoy, 2006). It is important to note that expert knowledge, which is formed and acquired by constant learning and professional experiences on creating schedules and modifications to reach production goals, is not represented, extracted or stored in Gantt diagrams. Neither domain, task or strategic knowledge is represented with these diagrams, in consequence several data and information is missed. However, graph can elicitate this knowledge as is explained next.

To schedule modeling using graphs, the mentioned definition and concept in section 2 were applied. To model schedules as graphs, the UML methodology is first used, applying the object-oriented Paradigm (Musier, 1989). To represent schedule data as graph elements, it is necessary to convert each production schedule element to the corresponding one in the graph. As both the schedule and graph domain are modeled using UML, it is possible to make a direct transformation between these metamodels using QVT. The transformation process is explained in more detail in the sections below.

Models Transformation.

To begin with, a metamodel design is needed to transform models. Model-Oriented Objects (MOO) was chosen in the design process and it is implemented using UML. MOO was selected as the modeling tool since structural representation of objects as well as dynamic and functional behavior of requirement is allowed. Besides, it can be used several abstraction levels and natural language is an important characteristic of this methodology (Coleman, 1984).

In this paper, a class diagram was modeled with two domains that represent the schedule and the corresponding graph respectively (Djedjigo, 2015). Once design is finished, the original and the transformed domain are determined and selected. This means that, if model A is chosen as the original one, transformations are made in such manner that it is equivalent to model B (transformed model).

ISBN 978-607-8242-11-5

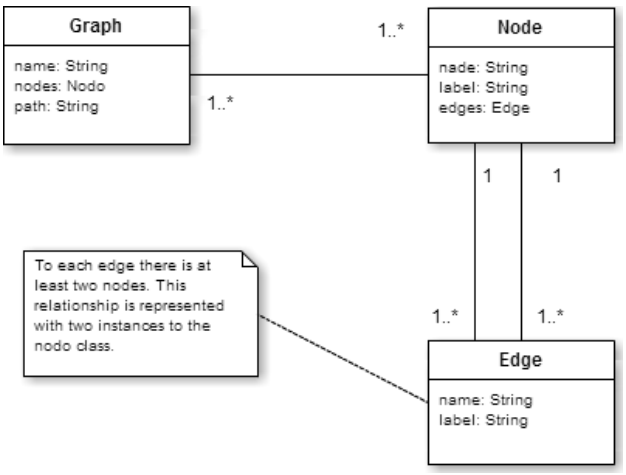


Fig. 4: UML Graph model.

The graph model domain is shown in Figure 4. Each Graph and its elements, node and edges, are represented in three classes. Relations in a graph are the objects combination from these classes.

Two abstraction levels were established for the metamodels:

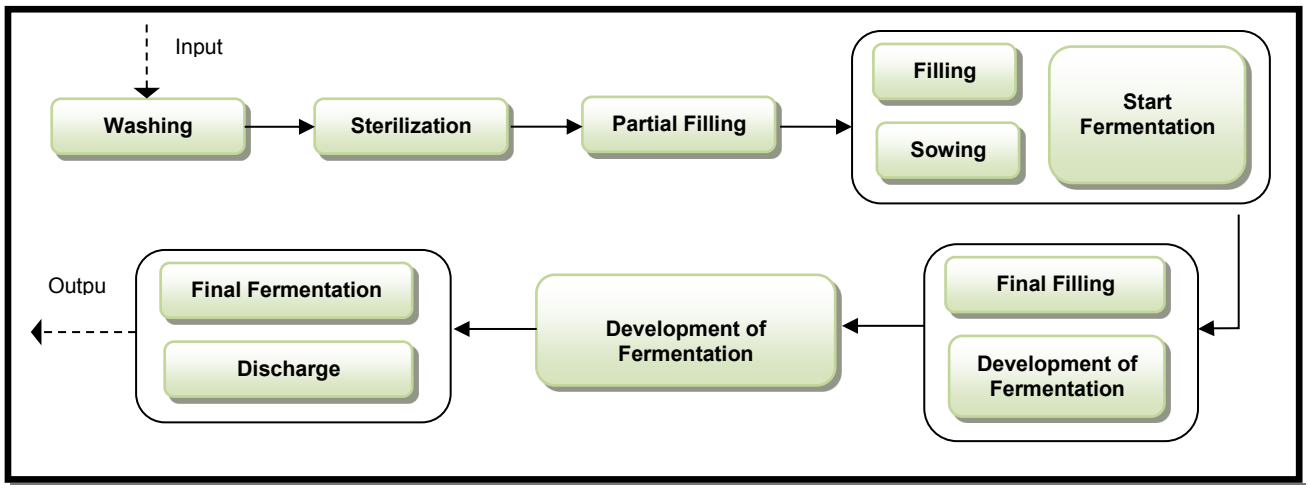
- In the first one, schedule elements are represented using nodes, edges, labels and relationships among them.
- In the second abstraction level, for each schedule element modeled as a graph object, characteristics and attributes are detailed. This allows storing important information about schedule and its states.

The goal is to transform, an action formally called mapping, each element from schedule domain to an equivalent one of graph domain. Mapping is made using the concepts and definitions presented in section 2. A summary table is made from the mapped information and details about which element of the schedule domain corresponds to the one on the graph domain and which characteristics or attributes are needed to store the elicited knowledge.

For implementing QVT, four top-relation types were developed. Top-relations must be always executed. Each relation specify which variable in each domain are mapped directly and which ones has to be adapted to be truly equivalent in the transformed domain, like it was explained in previous sections. QVT was selected since mapping can be automatized and used to validate and justify the modeling needed to convert the schedule information, in any state, to a graph model that provide more understanding and details, all in the same diagram (Hebach, 2006).

CASE STUDY

To exemplify schedule modeling using graphs and the functioning of the prototype, a more complex case study is considered. The presented case of study in about a plant that consists in six industrial fermenters of 450 m3 volume each one operating in batch mode, time-lagged, allowing to feed with fermented must, with two units per day, a bioethanol distillery which operates continuously.



ISBN 978-607-8242-11-5

Fig. 5: Fermenter System

The productions steps and average operating times in hours are (fig. 5):

a. Washing (1 h.),
b. Sterilization (1 h.)
c. Partial filling (5 h.),
d. Filling, sowing and start of fermentation (2 h.),
e. Final filling and fermentation
f. Development of fermentation (48 h.)
g. Final fermentation and discharge (12 h.)

Schedule representation using graphs - Prototype developed.

To evaluate the proposed modeling approach, a prototype was developed to automatize graph modeling and schedule information elicitation from an industrial process. The prototype was implemented in Netbeans IDE 8.0 (Java) and the database using PostgresSQL. To demonstrate the functionality of the prototype, schedules in the case study mentioned were used (Palombarini, 2014). State schedule data and human expert knowledge are the inputs to the prototype (fig. 6). A state is a specific situation of the schedule, similar to a photograph describing how the schedule elements are in a determined place and time.

Multiple and different changes can be necessary to do on the schedule state, representing updating data for a task in the schedule, add production items, generate a solution to a disruptive event, etc. This activity of goal-directed changes to the schedule state is called re-scheduling. To determine which changes must be made, expert knowledge is needed. The know-how to make the best repair is provided by the human expert as another input to be use in future re-schedules. State, batch, resource and task attributes are data input of the prototype among with the user expertise. The schedule state is composed of this information and is provided from the industrial environment in which it is immersed. User expertise is elicitated from the know-how in schedule repairs made by the human expert. To reach more generality, for each step or element basic attributes are represented, however the following data is required: specify if it is the first state or a modification of some other and similar one, select the previous state to create traceability and chose state first tasks to reference the starting point of graph analysis.

One or more state schedules can be added modified or eliminated from the prototype. Generally, schedule state modifications are not random. The human expert, mostly, has the experience to the best repair made. This knowledge is an input of the prototype to be stored and used to the changes made in schedule repairs. Besides, schedule states can be stored and queried, having also access to the change traces on the basis of this information. Once the schedule state is registered, classes and objects of original model are created by the prototype, and the model is mapped into a graph schedule (graph domain) by the implementation of QVT methods like it was explained in previous sections.

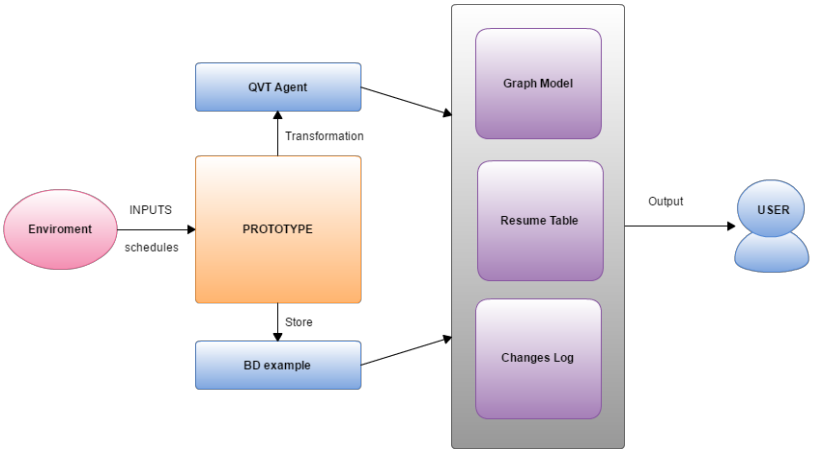


Fig. 6: Prototype schema

A modification to the actual schedule state is often necessary done as a result of a disruptive event, resource conflict or failure, and arrival of a new high-priority order. A new schedule state is generated and human expert decides by own expertise which changes are made on it. These modifications are stored in the prototype,

ISBN 978-607-8242-11-5

representing each state obtained in a sequence of changes makes possible to compare information and trace the sequence of schedule states in the path to a goal, analyzing how the expert human reaches solutions to several problems that appear at the shop-floor level. Also, for each state modification, a detail of them are stored to create a change log.

Information stored in the change logs and the resulting traces of schedule states obtained are used to elicitate expert knowledge on schedule problem resolutions that is lost in other simpler diagrams such as Gantt diagrams. Heuristics and learning rules are created based on that stored knowledge and can be incorporated in a cognitive system using these systematic procedures to calculate state schedule similarities and graph distances (Otterlo, 2009).

As can be seen in the following figure, the schedule of the fermenter system is represented using a graph. To a better visualization, the image only shows the process of one fermenter. In the complete schedule all the fermentation process is include to analyze the expert knowledge used to organize the resources and tasks, and how can it fix it in case of a disruptive event. Furthermore, as was explained, each node has attributes as: processing time, yeast hydration, additional yeast, fermentation filling that can be seen in the second abstraction mode. Finally, some task can be composed by several subtask as rh1-test1, rc1-tcll2, rc1-tcll3 but the advantage of this representation is that this kinds of task can be shown as only one task giving a better understanding of the schedule and, however, no losing information in the representation.

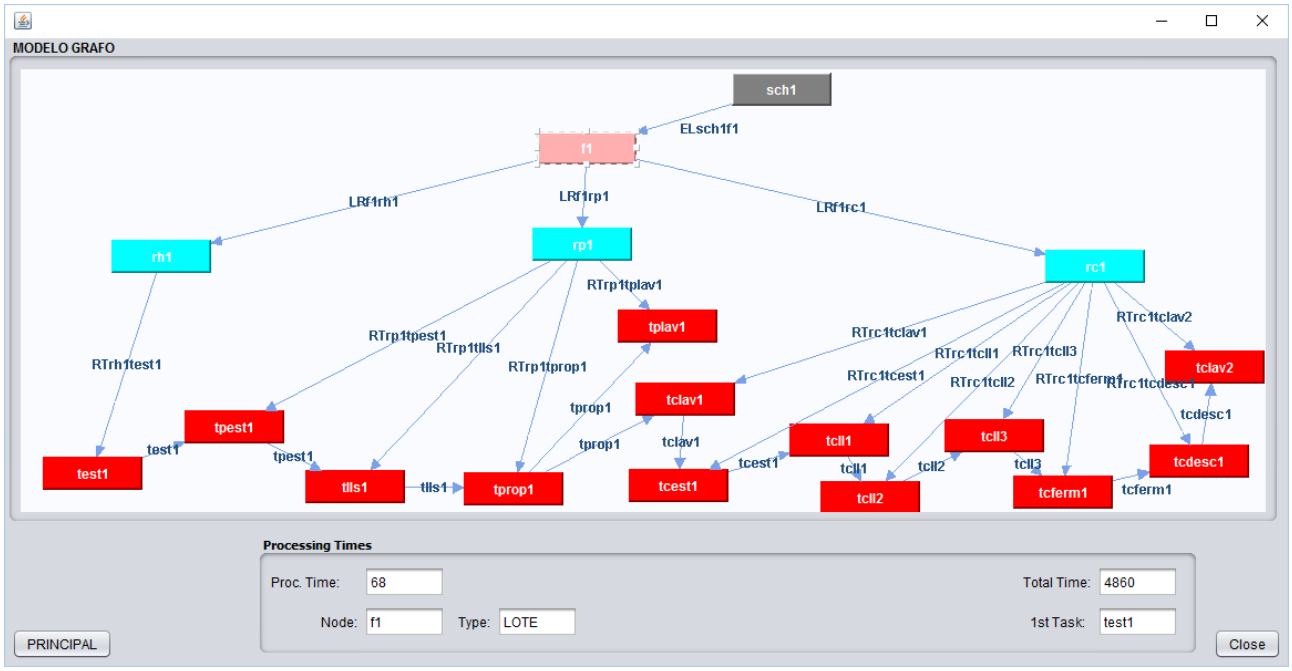


Fig. 7: Graph Schedule

The graph model, as can be seen in figure 7, presents a more informative representation than alternative tools to observe schedule states, batches, resources and tasks along with their name and precedence and execution relationships. Resource groups, model relations and task executions are discriminated by using different colors. Also, the first abstraction level information is observed in the graph diagram as was explained in previous sections. The schedule graph specifies element data obtained by steering over each node and resorting to the information stored in the second abstraction level.

CONCLUDING REMARKS

This paper proposes a new modeling methodology using graphs that results in a prototype implementation that automates the model generation and the elicitation of knowledge for rescheduling. This proposal emerges of the need to satisfy the earlier limitations mentioned about current tools and representation methodologies to model production schedules. Be aware that current tools do not allow capturing expert human knowledge to address re-scheduling problems.

In the first place, concepts and definitions required to understand graphs, model languages and transformations were studied. Secondly, the mentioned concepts were implemented to model, transform metamodels and

ISBN 978-607-8242-11-5

develop a prototype that allows to automatize the schedule representation and to elicitate expert domain knowledge gained by trial-and-error experience in dealing with abnormal events and unplanned disturbances. Finally, a case study of a multiple fermenter system is presented to demonstrate the use and advantages of the modeling and implementation of the methodology presented in this paper.

FUTURE WORK

Knowledge elicitation and production schedules modeling, along with the developed prototype, serve as a base of future works with Inverse Reinforcement Learning (IRL) (Levine, 2011). Future developments will use learning algorithms where distances among schedules are need as input data. The proposal of this paper, using graph modeling is a fundamental advantage to quantify distances since exist several options of algorithms to calculate them. Finally, the proposed approach provides the foundations to future distance edition calculations and human expert knowledge modeling that will be used for automated learning in artificial cognitive systems.

REFERENCES

B. MacCarthy y J. Wilson, *Human Performance in Planning and Scheduling*, London: Taylor & Francis, 2001.
Giudici y Bris Luch, *Introducción a la teoría de grafos*, Venezuela: Ediciones de la Universidad de Bolivar, 1997.
F. González Fernández*, Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*, Madrid: Editorial FC, 2003.
M. Gracia Ramos, M. Lopez-Jurado González, M. Yagüez Insa y J. Meringó Lindahl, *Guía práctica de economía de la empresa I: empresa y entorno (Teoría y ejercicios)*, Barcelona: Universidad de Barcelona, 2008.
D. Ford y J. Sterman, *Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models System Dynamic Review*, vol. 14, nº 4, pp. 309-340, 1998.
N. Shadbolt y P. Smart, *Knowledge Elicitation: Methods, Tools and Techniques*, Florida: J. R. Wilson & S. Sharples, 2015.
G. Wagner de García y A. Barredo*, Introducción a la teoría de grafos*, Armenia: Ediciones Elizcom, 2010.
M. Fowller y K. Scott, UML gota a gota, Méjico: Addison Wesley, 1999.
J. Rumbaugh, I. Jacobson y G. Booch, *El lenguaje de modelado unificado - Manual de referencia*, Madrid: Addison Wesley - Pearson, 2006.
C. Ariste, J. Ponisio, N. Leopoldo y R. Giandini, *Diseñando transformaciones de modelos CIM/PIM: desde un enfoque de negocios hacia un enforque de sistemas*, 2015.
M. Hebach, *MDA with QVT*, Presentation Boreland Together, 2006.
L. Favre, *Model driven architectures for reverse engineering technologies: strategic directions and system evolution*, de Engineering Science Referencia - IGI Global, 2010.
P. Barendrecht, *Modeling transformations using QVT operational mappings*, Eindhoven: University of Technology, 2010.
M. Djedjigo, D. Maurad y P. Mokan*, Aspect-Oriented security hardening of UML design models*, Switzerland: Springer, 2015.
M. González Riesco, *Gestión de la producción: cómo planificar y controlar la producción industrial*, Vigo: Ideas Propias, 2016.
J. Verdoy y E. al*., Manual de control estadístico de calidad: teoría y aplicaciones*, España: Universitat Jaume, 2006.
J. Palombarini, *Un enfoque cognitivo a la reparación automática de planes y schedules integrando aprendizaje por refuerzos con abstracciones lógicas y relacionales*, Santa Fe, 2014.
R. Musier y L. Evans, *An approximate method for the production scheduling of industrial batch processes with parallel units*, Computers and chemical engineering, nº 13, p. 229, 1989.
D. Coleman, *Object-oriented development - The fusion method*, Michigan: Prentice Hall, 1994.
Van Otterlo, *The Logic Of Adaptive Behavior: knowledge representation and algorithms for adaptative sequential decision making under uncertainty in first-order and relational domains*, Amsterdam: IOS Press, 2009.
S. Levine, Z. Popović y V. Koltun, *Nonlinear inverse reinforcement learning with gaussian processes*, de Advances in neural information processing systems 24 (NIPS), 2011.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Evaluación del Rendimiento de un Sistema de Fermentación por Simulación para Diferentes Demandas de Enfriamiento

Luis A. Toselli, Romina A. Beltrán y Paula A. Toselli
(1) Grupo de Investigación en Simulación para Ing. Qca., Fac. Reg. V. María, Univ. Tecnológica Nacional.
Av. Universidad 450, X5900HLR Villa María, Cba., Rep. Argentina.
e-mail: toselli_l@frvm.utn.edu.ar

Resumen

A efectos de maximizar su rendimiento, se ha analizado el comportamiento de un sistema de fermentación de una planta de bioetanol que trabaja con sacarificación y fermentación simultánea para mostos de alta concentración de sólidos. Se dispone de seis fermentadores de 450 m^3 cada uno, operando en modo batch, desfasados en el tiempo. Aun cuando el proceso responde claramente a un sistema multivariable, dada la condición limitante que posee el control de la temperatura para optimizar el accionar de las levaduras, el proceso resulta acotado por la capacidad del sistema de refrigeración. La simulación se realizó utilizando un software de desarrollo propio, SSEF V1.0, que permite evaluar demandas energéticas parciales de cada fermentador y total del proceso frente a la capacidad de respuesta del sistema de enfriamiento. Considerando la interrelación existente entre sus principales variables se analizaron dieciséis escenarios de operación determinándose las condiciones de máxima producción de etanol en cada caso, constatándose la validez del modelo frente a situaciones reales de proceso.

Palabras clave: Sistema de fermentación, simulación, enfriamiento, producción de bioetanol

Evaluation of the Performance of a Simulation Fermentation System for Different Demand of Cooling

Abstract

In order to maximize the performance, the behavior of a fermentation system of a bioethanol plant that works with scarification and simultaneous fermentation for high concentration solids has been analyzed. There are six fermenters of 450 m^3 each one, operating in batch mode, time-lagged. Even though the process clearly responds to a multivariate system, given the limiting condition of temperature control to optimize yeast action, the process is limited by the capacity of the cooling system. The simulation was carried out using a software development for this purpose, called SSEF V1.0, which allows evaluating partial energetic demands in each fermenter and the total of the process against the capacity of response of the cooling system. Considering the interrelation between its main variables, sixteen operating scenarios were analyzed, determining the conditions of maximum ethanol production in each case, confirming the benefits of the model in relation to real process situations.

Keywords: system fermentation, simulation, cooling, bioethanol production,

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Modelos matemáticos sencillos que describen el comportamiento de las fermentaciones que se desarrollan en modo batch han sido tratados en la literatura científica (Zhang, 2009). En líneas generales éstos pueden ser definidos a partir de un sistema de ecuaciones basadas en una ecuación clásica de crecimiento limitado por la concentración de un sustrato específico (Monod ,1949). Esto demuestra que, si la concentración de un nutriente esencial varía mientras que las de todos los otros componentes del medio se mantienen casi constantes, la tasa de crecimiento cambia típicamente en una forma hiperbólica con ese nutriente considerado. Puntualmente un modelo de estas características es descrito por las ecuaciones 1 a 4:

$$\mu = \left(\frac{\mu_{max} S}{K_s + S}\right) \quad \text{(Ec. 1)}$$

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{\mu_{max} S}{K_s + S}\right).X \quad \text{(Ec. 2)}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_{X/S}}\left(\frac{\mu_{max} S}{K_s + S}\right).X \quad \text{(Ec. 3)}$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{Y_{P/S}}\left(\frac{\mu_{max} S}{K_s + S}\right).X \quad \text{(Ec. 4)}$$

En donde μ corresponde a la velocidad de crecimiento de la población de levaduras, X representa su concentración, S es la concentración del sustrato (azúcar) y P la del producto (etanol), K_s es la denominada constante de saturación o de Monod, en tanto que $Y_{X/S}$ e $Y_{P/S}$, son coeficientes de rendimiento promedio de biomasa-sustrato y de producto- sustrato, respectivamente.

Sin embargo, el proceso de fermentación de etanol resulta mucho más complejo y demanda ecuaciones adicionales para manejar condiciones con múltiple sustrato o múltiple producto, además debería considerarse, entre otras cuestiones, los efectos inhibitorios por alta concentración de azúcares o de alcohol. Así, por ejemplo, para un fermentador batch que opere en modo de sacarificación y fermentación simultánea, requeriría de un modelo que considere la ecuación de Michaelis-Menten para describir la reacción enzimática de conversión de dextrinas a azúcares fermentables. (Devantier et al., 2005; Thatipamala et al., 1992).

Como caso de estudio se ha analizado el comportamiento de una planta industrial que produce bioetanol mediante el proceso de molienda seca de maíz y dispone de múltiples fermentadores que operan en modo batch pero desfasados en el tiempo. El proceso en cuestión utiliza la modalidad de sacarificación y fermentación simultánea (SSF) para mostos con alta concentración de sólidos (Begea et al, 2010).

El volumen de información disponible de un sistema real actualmente en operación permitió realizar un pormenorizado monitoreo de variables propias de la preparación del mosto a fermentar tales como: contenido de almidón del cereal, granulometría de molienda, dosificación de enzimas, temperatura de licuefacción, pH, concentración de sólidos de partida, entre otras. Paralelamente se pudo controlar durante todo el proceso hasta su conversión a mosto fermentado los cambios de otras variables específicas como: recuento de levaduras, evolución de la conversión del almidón a dextrinas y azúcares fermentables, además del pH, temperatura y el incremento de concentraciones de etanol, glicerol y de los ácidos láctico y acético como indicadores indirectos de una eventual contaminación por proliferación de bacterias en el medio. (Stambury et al., 2003).

MODELO DE COMPORTAMIENTO TERMICO DEL SISTEMA

Del análisis realizado se ha observado la importancia dominante que posee el control de la temperatura de fermentación para optimizar el comportamiento de las levaduras, maximizando el rendimiento en etanol (Aros et al., 2011; Kelsall and Lyons, 2003; Mavituna and Sinclair, 2008; Meredith J., 2003). Sobre dicho control inciden contextos estacionales de mayor cambio térmico en el agua de refrigeración del circuito de torres de enfriamiento (temporadas de invierno y verano), operación con y sin retorno de backstillage a los fermentadores (hasta un máximo de 30 % de las vinazas producidas, lo cual implica variación de un 3 % de sólidos no fermentables, que inciden en el calor total liberado). Finalmente, cada condición antes mencionada fue evaluada con y sin el efecto de una carga térmica ambiental (calor transferido de y hacia los fermentadores por convección-radiación a través de techo y superficie), y para los intercambiadores de enfriamiento externo de cada tanque con y sin considerar los efectos de ensuciamiento (fouling) en ambos lados, mosto y agua, en recirculación.

ISBN 978-607-8242-11-5

El modelo considera: i) capacidad de enfriamiento total disponible ii) calor generado por fermentación y iii) calor adicional incorporado como carga térmica o disipado al medio, de acuerdo a condiciones externas (estacionales) debidas, principalmente, a su localización física en la planta. El primer ítem contempla la disponibilidad de agua de refrigeración que se recircula a través del sistema de torres, las cuales varían su capacidad operativa básicamente en función de condiciones estacionales.

El calor se genera a diferentes velocidades durante el tiempo total de proceso (aproximadamente 60 horas) de acuerdo a la cinética de fermentación y a las condiciones de operación (ej: alta concentración de sólidos totales en el mosto, con porcentajes que pueden variar entre un 25 % mínimo y 35 % máximo, además de las restantes variables ya citadas) y produce una elevación de la temperatura del mosto, debiendo ser enfriado por recirculación en un intercambiador de calor externo que, refrigerado por agua de proceso, regula la condición térmica de cada fermentador. Del análisis de datos reales disponibles de múltiples fermentadores evaluados operando bajo distintas condiciones, es posible estimar el calor liberado de manera indirecta, a partir del análisis de la velocidad de generación de productos de fermentación, en particular del etanol, dado que la presencia de los otros subproductos es minoritaria. A partir de esta información se ha propuesto una función de tipo:

$$Q_{ferm} = Q_t \left(\frac{at}{(b+ct^2)}\right) \quad \text{(Ec. 5)}$$

Donde Q_{ferm} esta expresado en kcal/h y representa la evolución del calor liberado en un fermentador en el tiempo, Q_t dado en kcal es el calor total generado en el mismo y t el tiempo en h, en tanto que a, b y c son constantes cuyos valores son: 0,01; 0,5099 y 0,02102, respectivamente; las cuales fueron determinadas mediante análisis de regresión a partir de los valores reales de proceso.

El calor que cada equipo incorporaría como una carga térmica adicional a través de su superficie de acuerdo a las condiciones ambientales, dada su localización física en el exterior de la planta, es contemplado en el modelo y puede ser considerado o no por el usuario, cuando se desarrolla la simulación. Para una temperatura en la superficie de los fermentadores superior a la del mosto, la carga adicional, es obtenida de la ecuación:

$$Q_a = h_c A \Delta t \quad \text{(Ec. 6)}$$

En donde Q_a es la carga calórica expresada en kcal/h, Δt es la diferencia de temperaturas entre la superficie del equipo y el mosto de fermentación en ºC, A el área en m^2 y h_c es un coeficiente superficial de transferencia que contempla los efectos combinados de convección - radiación expresado en kcal/h m^2 ºC.

Cuando, por condiciones ambientales, se trabaja a una temperatura de entorno que resulta inferior a la de fermentación, el calor que se disipa a través de la superficie externa del mismo es obtenido a partir de la ecuación:

$$Q_d = h_d A \Delta t \quad \text{(Ec. 7)}$$

En donde Q_d es dicho calor expresado en kcal/h, Δt es la diferencia de temperatura entre la pared del equipo y del medio, A el área en m^2 y h_d es un coeficiente de convección expresado en kcal/h m^2 ºC. Los valores de los coeficientes han sido establecidos para rangos de temperaturas de superficie comprendidas entre 32 y 60 ºC y de temperatura ambiente en el rango de 0 y 32 ºC. En ambos casos se ha despreciado la resistencia a la transferencia correspondiente a la pared del tanque.

El modelo se implementó utilizando Java Development Kit 1.7, específicamente Netbeans 7.3 como entorno de desarrollo, y para el almacenamiento de los datos históricos se usó Postgre Sql 9.0. El software Simulación del Sistema de Enfriamiento de Fermentación (SSEF v1.0) desarrollado cuenta con interfaces intuitivas que hacen sencillo su uso. La carga de datos al sistema se muestra en las figuras 1 y 2. En la 3 se presenta la evolución de la demanda de caudal de agua de enfriamiento total y por fermentador, en el tiempo.

La aplicación del simulador permitió evaluar distintas estrategias de operación, analizando opciones de mayor o menor complejidad para su implementación y/o impacto en el rendimiento del proceso. Como ejemplo se cita: definir un límite operativo para la concentración de sólidos totales al que resulte conveniente ajustar el mosto para ser fermentado. Esto implicaría regular la disponibilidad de almidón a hidrolizar, reducir la producción total de azúcares fermentables y, por ende, ajustar el calor total que será liberado en la fermentación con una reducción controlada en la producción de etanol evitando así superar la capacidad máxima del sistema de enfriamiento. Esta opción, en principio menos atractiva, sin embargo resultará más favorable que afrontar las pérdidas de producción asociadas a la caídas de rendimiento de los fermentadores

 ISBN 978-607-8242-11-5

por daños irreversibles y/o muerte de las levaduras debido a incrementos de temperaturas que resultan incontrolables para el sistema, especialmente en aquellos períodos en donde se reduce la eficiencia de las torres por problemas operativos y/o de mantenimiento, o bien debido a dificultades propias de bajo rendimiento en condiciones ambientales desfavorables por altas temperaturas estacionales.

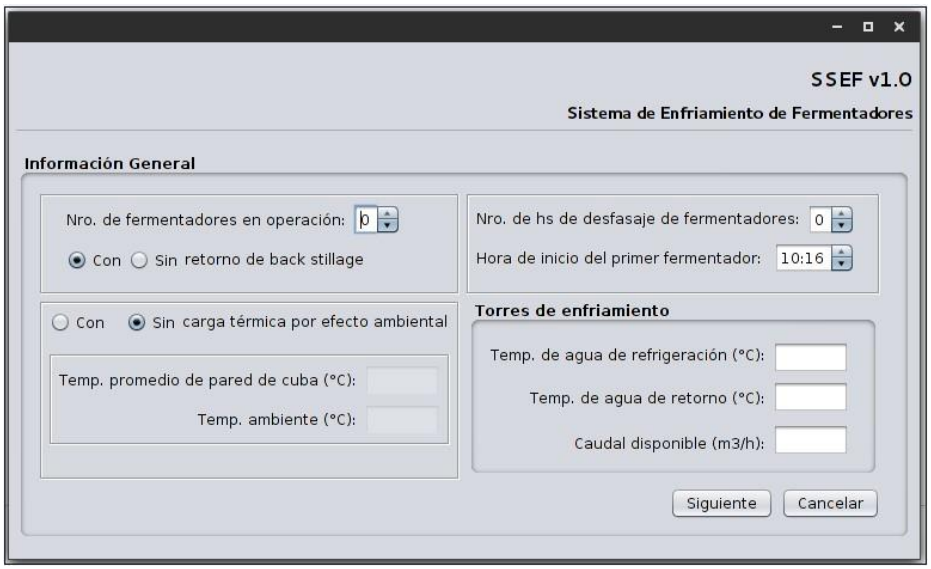


Fig. 1: Ingreso de datos con información general del sistema

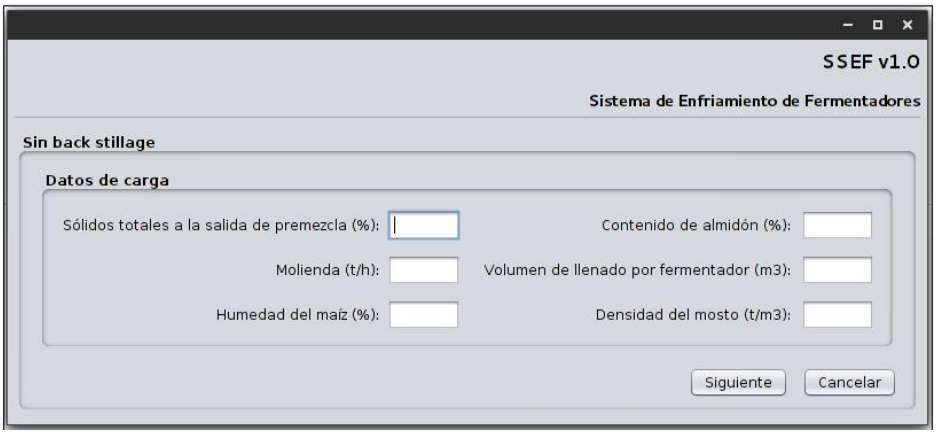


Fig. 2: Ingreso de datos con parámetros de carga del fermentador

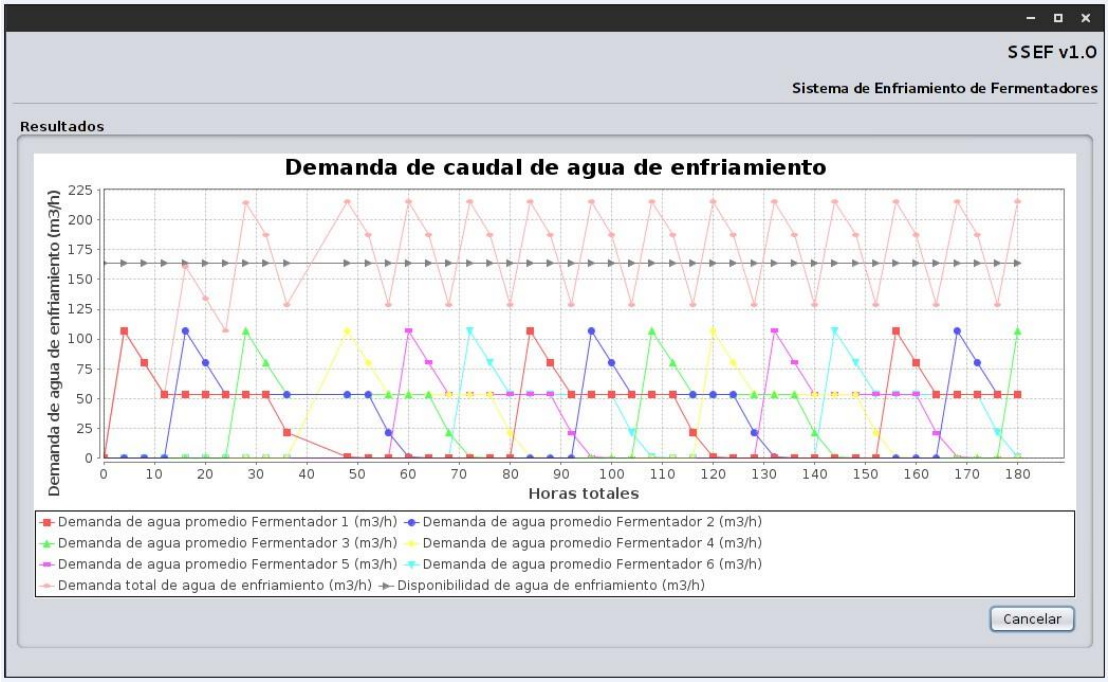


Fig. 3: Presentación de resultados en modo gráfico

ISBN 978-607-8242-11-5

Diferentes escenarios de trabajo fueron analizados con la información disponible y considerando valores promedio de las condiciones ambientales obteniéndose resultados predictivos que sirven para determinar los límites operativos del proceso, bajo situaciones estacionarias (verano e invierno) de máxima exigencia, contando así de una herramienta válida para la toma de decisiones.

DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE ENFRIAMIENTO.

El sistema real evaluado dispone de un total de siete fermentadores semejantes, de una capacidad de 450 m^3 cada uno, cuya geometría corresponde a una sección cilíndrica de 7 m de diámetro y 11,25 m de altura, unida a un fondo cónico en el cual se localiza la descarga. La operación de los mismos se realiza en modo batch empleándose solo seis de ellos en forma secuencial, mientras que el séptimo queda disponible para acoplar las etapas de proceso actuando como un pulmón de alimentación entre la fermentación con operación discontinua y la destilería que trabaja en modo estacionario. En la figura 4 se muestra un diagrama de flujo del sistema de fermentación que puede trabajar tanto en modo continuo como discontinuo.

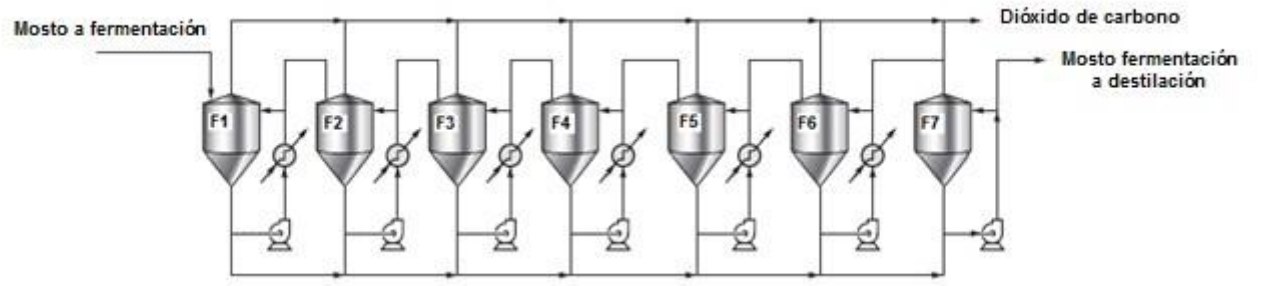


Fig. 4: Esquema del sistema de fermentación.

La carga total por fermentador es de 410 m^3 de mosto, alcanzando éste una altura aproximada de 10 m. Para su llenado se necesita un tiempo máximo de 12 horas, por lo que se trabaja a razón de dos tanques diarios. La fermentación propiamente dicha, tiene una duración prevista de 60 horas, en las cuales se mantiene en operación el sistema de enfriamiento a efectos de remover el calor generado. Debido a que su velocidad de producción no es constante, el caudal de agua es reducido en forma gradual en cada equipo luego de las primeras 24 horas y después de alcanzarse el pico de conversión de alcohol con máxima liberación de energía. Durante toda la operación es necesario controlar la temperatura del fermentador y la del agua de salida que retorna a las torres de enfriamiento.

El sistema de refrigeración dispone con un caudal máximo de recirculación de 250 m^3/h, que se distribuye por bombeo a través de los intercambiadores instalado en cada uno de los fermentadores, los cuales al actuar desfasados en el tiempo tendrán la necesidad de remover cargas térmicas diferentes, en tanto que la demanda global del sistema también será cíclicamente variable. Así el mosto es extraído de manera continua desde el fondo de cada unidad y derivado al equipo de termotransferencia a efectos de remover el calor, recirculando el mosto frío al tanque en su sección superior.

Se propusieron diferentes escenarios de operación analizando: i) la incidencia de la variación de sólidos totales en un rango comprendido entre 25 y 35 % $^p/_p$, ii) la influencia de una eventual recirculación de vinazas ligeras, backstillage, para un máximo de 30 % $^p/_p$ de vinazas respecto del total de agua adicionada en la premezcla con un valor promedio de 10 % de sólidos no fermentables, iii) el efecto cuantitativo del calor adicional incorporado o disipado al medio por factores externos de acuerdo con condiciones estacionales, iiii) considerando que el sistema de intercambio presenta una diferencia de rendimiento por efectos de fouling. Finalmente, se evaluaron los rendimientos de producción para todos los casos citados .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando un rendimiento aproximado del 90 % en base al almidón total disponible (fermentable), se muestran los resultados que podrian esperarse para cada caso. En las figuras 5 y 6 se observan los requerimientos máximos de agua de refrigeración vs. el contenido de sólidos totales para los fermentadores operando a ciclo desfasado, luego de desarrollarse las respectivas simulaciones para los distintos escenarios considerados para la condición de verano e invierno, respectivamente. Con una línea horizontal de caudal constante se indica el valor de máxima circulación de agua disponible en las torres de enfriamiento.

ISBN 978-607-8242-11-5

Puede observarse, que la intersección entre ésta y las restantes curvas de demanda determinan el máximo tenor de sólidos admisibles para cada situación. Valores superiores a los establecidos implicarían que existen tiempos de operación en donde la demanda de enfriamiento supera la respuesta del sistema, generando una acumulación de calor que elevará la temperatura de los fermentadores.

De esta manera se han determinado los límites para cada escenario evaluado que, de ser superados, llevarían de manera progresiva a condiciones de estrés térmico desfavorables para las levaduras lo que se traduce en una reducción en la producción de alcohol.

Se observan las limitaciones del sistema para responder en la temporada estival, por lo tanto se muestra en la tabla 1 un detalle cuantitativo de la producción esperable de etanol por fermentador para cada caso considerando.

En tanto que el sistema de refrigeración puede responder a todas las exigencias en temporada de invierno en invierno, con excepción de una única condición muy desfavorable como es la de menor eficiencia de enfriamiento (fouling) combinada con el máximo requerimiento de calor por fermentación para el límite superior de concentración de sólidos totales (aproximadamente igual al 35 %).

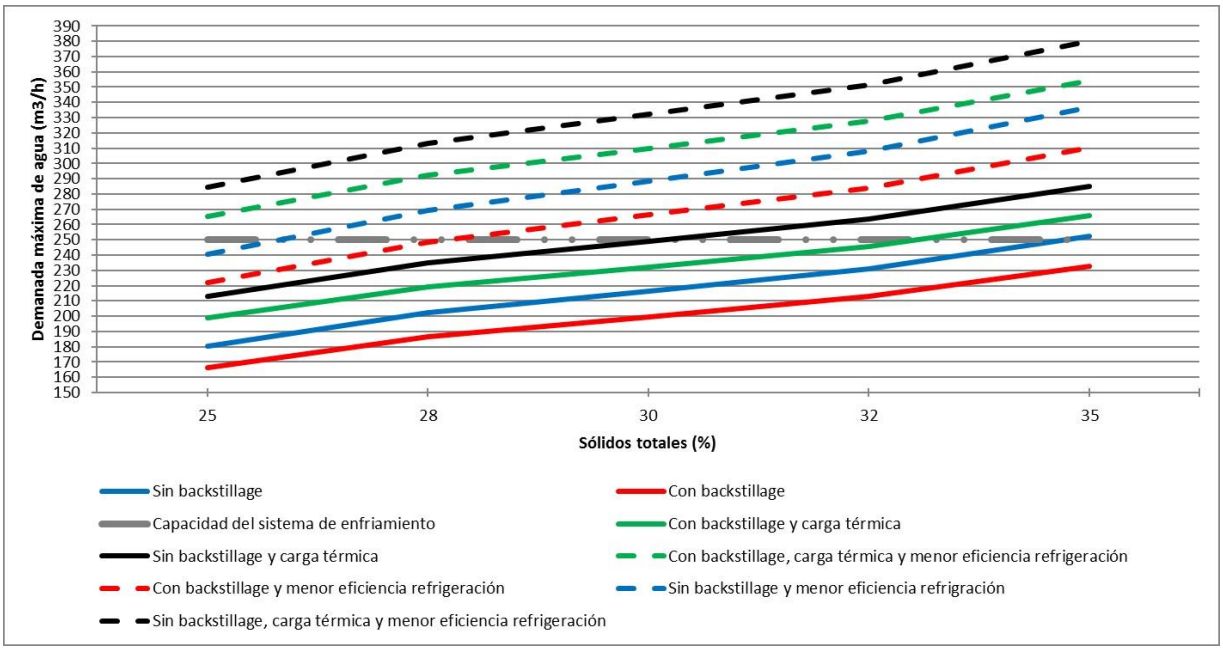


Fig. 5: Demanda de refrigeración para los distintos escenarios en condiciones estacionales de verano

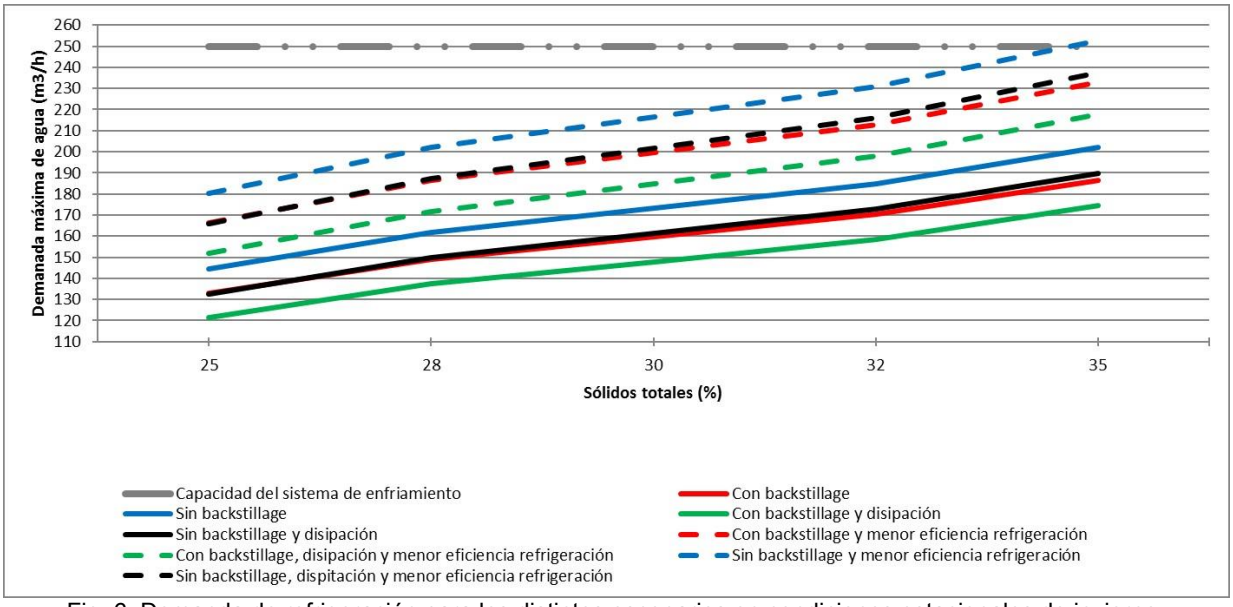


Fig. 6: Demanda de refrigeración para los distintos escenarios en condiciones estacionales de invierno.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Resultados esperables para cada condición de verano evaluada.

Escenarios de demanda de refrigeración	Máximo contenido de sólidos totales	Producción de etanol (m^3 por fermentador)
Con backstillage	> 35 %	63,5
Sin backstillage	< 35 %	68,9
Con backstillage y carga térmica	32 %	58,1
Sin backstillage y carga térmica	30 %	59,0
Con backstillage y menor eficiencia de refrigeración	28 %	50,8
Sin backstillage y menor eficiencia de refrigeración	26 %	51,1
Con backstillage, carga térmica y menor eficiencia de refrigeración	< 25 %	< 45,4
Sin backstillage, carga térmica y menor eficiencia refrigeración	> 25 %	< 49,2

CONCLUSIONES

Del estudio realizado se puede concluir que: 1) Los datos teóricos obtenidos se han podido comparar frente a datos reales, observando que los mismos resultan representativos del sistema. 2) para los casos con y sin agregado de backstillage las variaciones de energía por efectos ambientales representan ~1 % del calor de fermentación para ambas condiciones estacionales. 3) el sistema de refrigeración posee una capacidad operativa que resulta limitante durante la temporada de verano, debiendo considerarse opciones técnico-económicas y alternativas de inversión para superar este déficit. 4) dado que para los procesos fermentativos VHG (Very High Gravity) resulta una exigencia inherente operar con el máximo tenor de sólidos posibles se ha encontrado que el máximo admisible para verano estaría acotado al 30 % sin recirculación de backstillage y 32 % de sólidos totales cuando hay recirculación y se obtendrían producciones muy semejantes, del orden de 58 - 59 de m^3 de alcohol por fermentador. 5) existe una amplia variedad de opciones intermedias que podrían ser exploradas a voluntad del usuario a efectos de encontrar otras condiciones menos rigurosas que garanticen la posibilidad de trabajar sin exponer el sistema de refrigeración a sobrecargas innecesarias. 6) es posible obtener las condiciones bajo las cuales se debería trabajar cuando el sistema de enfriamiento no se encuentre completamente operativo, planificando regímenes de marcha de la planta mientras se realizan reparaciones de equipos y/o mantenimiento de torres de refrigeración.

REFERENCIAS

Aros N., M. Cifuentes y J. Mardones; "*Modelación, Simulación y Control de Procesos de Fermentación"*, Ingeniare: 19, 210-218 (2011).

Begea M., G. Bâldea, C. Cîmpeanu, C. Stoicescu, P. Begea, *"Utilization of Last Generation Enzymes for Industrial Use in Orden to Obtain Bioethanol from Locally Available Agricultural Renewable Resource"*, Romanian Agricultural Research: 27, 155-160 (2010).

Devantier, R., S. Pedersen y L. Olsson, *"Characterization of Very High Gravity Ethanol Fermentation of Corn Mash: Effects of Glucoamylase Dosage, Pre-saccharificacion and Yeast Strain"*, Microbiology and Biotechnology: 68, 622-629 (2005).

Kelsall D. R. and T. P. Lyons; *"Practical Management of Yeast: Conversion of Sugars to Ethanol"*, The Alcohol Textbook, 4th edition, pp 120-133, Nottingham University Press: UK. (2003).

Mavituna F. y Sinclair C. G.; *"Modelling the Kinetics of Biological Activity in Fermentation Systems"*, Practical Fermentation Technology, Editor John Wiley & Sons Ltd, pp 167 – 230, UK (2008).

Meredith J.; *"Understanding energy use and energy users in contemporary ethanol plants"*, The Alcohol Textbook, 4th edition, pp 355-361, Nottingham University Press: UK. (2003).

Monod J.; *"The Growth of Bacterial Culture"*, Annual Review Microbiology: 1, 371-394 (1949).

Stambury P.F., Whitaker A. y Hall J.J.; *"Microbial Kinetics Growth"*, Principles of Fermentation Technology, 2nd edition, pp 13 – 31, Elsevier Science. USA (2003).

Thatipamala, R., Rohani, S. y Hill G., *"Effects of High Product and Substrate Inhibitions on the Kinetics and Biomass and Products Yields During Ethanol Batch Fermentation"*, Biotechnology and Bioengineering: 40, 289-297 (1992).

Zhang, Z.; *"Batch Fermentation and Fermentor Design"*, The Alcohol Textbook, 5th edition, 229-257, Nottingham University Press, UK (2009).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Determinación de Coeficientes de Actividad de Depósitos Evaporíticos Andinos. Aplicación del Modelo de Pitzer

Ingrid Garcés[1] y José Valderrama[2]
(1) Univ. de Antofagasta, Dpto. de Ing. Química y Procesos Minerales, Campus Coloso, Antofagasta
ingrid.garces@uantof.cl
(2) Univ. De La Serena, Dpto. de Ingeniería Mecánica. Benavente 980, La Serena

Resumen

Se aplica el modelo de interacción iónico desarrollado por Pitzer a las salmueras naturales del Salar de Loyoques. Este salar ubicado en el Altiplano de la Región de Antofagasta-Chile, a 4430 metros sobre el nivel del mar, es una cuenca cerrada de unos 80 km^2, donde convergen las aguas caídas sobre su hoya hidrográfica que alcanza unos 749 km^2. La principal característica del salar es que presenta en su centro una boratera con niveles explotables de ulexita, un borato doble de sodio y calcio. Las solubilidades de los minerales en lagos salinos y coeficientes de actividad se pueden calcular a partir de consideraciones termodinámicas, haciendo uso del código de especiación PHRQPITZ. En este contexto, el objetivo del trabajo fue evaluar los coeficientes de actividad y la secuencia mineralógica de las salmueras de dicho salar. Los resultados indican que las aguas del salar de Loyoques muestran una considerable variedad tanto en la composición iónica, como en su concentración pero son levemente alcalinas y corresponden al tipo Na-Cl-SO_4.

Palabras clave: coeficientes de actividad; depósitos andinos; modelo de Pitzer; PHRQPITZ

Determination of Activity Coefficient of Evaporitic Andean Deposits Application of Pitzer`s Model

Abstract

The ionic interaction model developed by Pitzer is applied to determine activity coefficient of the evaporitic Andean deposits known as Salar de Loyoques, in northern Chile. This salar is located in the Altiplano zone of the region of Antofagasta-Chile, at 4430 meters above sea level, and it is a closed basin of about 80 km^2, in which get together the rain waters of the whole hidroigraphic basin, covering around 749 km^2. The main characteristic of the salar is that in its center it has a borax deposit with exploitable levels of ulexita, a double borate of sodium and calcium. The solubilities of the minerals and the activity coefficients were calculated based on thermodynamics fundamentals using the software PHRQPITZ. In this context, the objective of this work was to evaluate the activity coefficients and the mineralogical sequence of the salar brines. The results indicate that the waters of the Loyoques salar show considerable variations both in their composition and their concentration but are slightly alkaline, and belong to the type Na-Cl-SO_4.

Keywords: activity coefficients; andean deposits; Pitzer´s model; PHRQPITZ

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCION

El Salar de Loyoques (o Quisquiro) se ubica en el Altiplano de la región de Antofagasta entre las latitudes extremas 23º07' y 23º30' latitud sur y las longitudes 67º10' y 67º30'oeste, a 4.430 m.s.n.m. Este depósito salino es una cuenca cerrada de unos 80 km^2, donde convergen las aguas caídas sobre su hoya hidrográfica que alcanza unos 749 km^2, es un salar tipo playa con pocas lagunas superficiales de extensión variable (alrededor de 5 km^2) y una napa de salmuera de unos decímetros de profundidad, con la principal característica de presentar en su centro una boratera con niveles explotables de ulexita, un borato doble de sodio y calcio (Garcés y López, 2012).

Los principales aportes superficiales son el río Salado por el sur, el cual nace en las vegas Ojos del Salado y por el norte el estero Loyoques, además de tres quebradas por el poniente (de norte a sur) Quebrada de Agua Escondida, Quebrada de Taina y Quebrada de Quisquiro. En cuanto a su evaporación, la escorrentía (afluente al salar) es de 3500 l/s. La evaporación superficial de las aguas desde el suelo es muy alta variando entre 1.500 a 2.500 mm/año. La precipitación anual media en los 4.000 m.s.n.m. varía entre 200 a 300 mm, lo cual explica, que al comparar con la evaporación, se tiene una alta aridez. Los años lluviosos pueden tener hasta tres veces las precipitaciones de un año seco. En el caso específico del Salar de Loyoques, la máxima temperatura media diaria oscila entre 10º y 20 ºC, mientras que, la temperatura media mínima está a unos pocos grados bajo 0º (D.G.A., 1987). Los vientos en el altiplano siguen un patrón, que por lo general es en las mañanas de escasa intensidad con orientación norte, mientras que por las tardes comienzan de moderada a alta intensidad, con orientación oeste a este.

MODELIZACIÓN GEOQUÍMICA

El Salar de Loyoques (o Quisquiro) se ubica en el Altiplano de la región de Antofagasta entre las latitudes extremas 23º07' y 23º30' latitud sur y las longitudes 67º10' y 67º30'oeste, a 4.430 m.s.n.m. Este depósito salino es una cuenca cerrada de unos 80 km^2, donde convergen las aguas caídas sobre su hoya hidrográfica que alcanza unos 749 km^2, es un salar tipo playa con pocas lagunas superficiales de extensión variable (alrededor de 5 km^2) y una napa de salmuera de unos decímetros de profundidad, con la principal característica de presentar en su centro una boratera con niveles explotables de ulexita, un borato doble de sodio y calcio (Garcés y López, 2012).

Los principales aportes superficiales son el río Salado por el sur, el cual nace en las vegas Ojos del Salado y por el norte el estero Loyoques, además de tres quebradas por el poniente (de norte a sur) Quebrada de Agua Escondida, Quebrada de Taina y Quebrada de Quisquiro. En cuanto a su evaporación, la escorrentía (afluente al salar) es de 3500 l/s. La evaporación superficial de las aguas desde el suelo es muy alta variando entre 1.500 a 2.500 mm/año. La precipitación anual media en los 4.000 m.s.n.m. varía entre 200 a 300 mm, lo cual explica, que al comparar con la evaporación, se tiene una alta aridez. Los años lluviosos pueden tener hasta tres veces las precipitaciones de un año seco. En el caso específico del Salar de Loyoques, la máxima temperatura media diaria oscila entre 10º y 20 ºC, mientras que, la temperatura media mínima está a unos pocos grados bajo 0º (D.G.A., 1987). Los vientos en el altiplano siguen un patrón, que por lo general es en las mañanas de escasa intensidad con orientación norte, mientras Se basa en la aplicación de principios fisicoquímicos al estudio e interpretación de sistemas hidrogeoquímicos, y su uso actual abarca prácticamente todos los campos donde existen interacciones agua-roca (hidroquímica superficial y subterránea, hidrotermalismo, edafología).

En procesos de separación de salmueras naturales, las sales que cristalizan en un determinado sistema, requieren del conocimiento del equilibrio sólido-líquido de dicho sistema, lo que a su vez requiere del conocimiento de los coeficientes de actividad de los electrolitos presentes en dichas salmueras. El código utilizado para los cálculos de coeficientes de actividades de las salmueras estudiadas, es el PHRQPITZ, el cual incorpora y amplía a rangos de temperatura de 0° a 60°C con la aproximación de Pitzer y la parametrización realizada por Harvie y colaboradores (1984) para el sistema Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO_4-OH-HCO_3-CO_3-CO_2-H_2O. Los códigos están sujetos al cumplimiento de condiciones de equilibrio químico y de conservación de masa y/o de carga. Estas condiciones se traducen en una serie de ecuaciones de gobierno en las que resulta fundamental el conocimiento de las actividades de las especies presentes. Este software calcula las actividades iónicas individuales a partir de los datos analíticos de concentración, basado en el Método de Interacción Específica. Posteriormente, evalúa el grado de saturación de las soluciones respecto a las fases minerales de interés y compara los productos de actividad iónica (P.A.I.) obtenidos frente a las constantes de equilibrio (Keq) correspondientes a dichos minerales, por medio del índice de saturación (I.S.) mediante la expresión:

$$I.S. = \log (P.A.I./ Keq) \quad (1)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

En esta ecuación, P.A.I. representa el producto de actividad iónica y Keq la constante de equilibrio correspondiente. Si el índice de saturación muestra valor cero significa que la solución está en equilibrio respecto a esa fase; por otra parte, valores positivos o negativos del I.S. determinan una situación de sobresaturación o subsaturación, respectivamente, cuya magnitud es función directa del valor absoluto de dicha cantidad. La solubilidad de un mineral en el equilibrio puede ser representado como:

$$Xa\ Yb\ nH_2O \rightleftarrows a\ X^{b+} + b\ Y^{a-} + n\ H_20 \quad (2)$$

Si el producto de solubilidad de un mineral se define como (Ksp, $XaYb{\bullet}nH_2O$) y se considera como la actividad en fase sólida igual a 1, entonces

$$Ksp_{,\ XaYbn\ H2O} = a^{a}_{X} \cdot a^{b}_{Y}\ \ a^{n}_{H2O} = (m_{x,\ sat} \cdot \gamma_X)^{a}\ (m_{Y,sat} \cdot \gamma_Y)^{b} \cdot a^{n}_{H2O} \quad (3)$$

Donde m x,sat y m Y,sat son las concentraciones molales del catión y anión respectivamente, en la fase líquida saturada con respecto a la fase sólida. Para el caso específico, por ejemplo el yeso, la ec. 2 es:

$$Ca_2SO_4\ 2H_2O \rightleftarrows Ca^{+2} + SO_4^{-2} + 2\ H_20 \quad (4)$$

El producto de solubilidad del yeso ($Kps,Ca_2SO_4{\bullet}2H_2O$) en función de la actividad es:

$$Kps = (a_{Ca++} \cdot a_{SO4--} \cdot a^2_{H2O}) / a_{CaSO4\ 2H2O} \quad (5)$$

La actividad de la fase sólida (mineral) está definida como igual a 1 ($aCaSO_4{\bullet}2H_2O = 1$), donde la ecuación 6 se transforma en:

$$Kps = (m_{Ca++} \cdot \gamma_{Ca++})\ (m_{SO4--}\ \gamma_{SO4--}) \cdot a^2_{H2O} \quad (6)$$

Esta ecuación puede ser reescrita como:

$$Kps = Kps^{*}.\ \gamma_{Ca++} \cdot \gamma_{SO4--} \quad (7)$$

Donde Kps* es el producto de solubilidad estequiométrico, $Kps^* = (m_{Ca++}\ ^*m_{SO4--})$

Es así como en el equilibrio, el producto de solubilidad depende del producto termodinámico y estequiométrico. El coeficiente de actividad (γ) y la solubilidad dependen de varios factores, entre los que destacan, la fuerza iónica. Ahora bien, como los coeficientes de actividad disminuyen con la fuerza iónica del medio, el valor de Kps deberá aumentar en función de la fuerza iónica (FI), ya que la constante de solubilidad termodinámica no varía. Este aumento de la constante estequiométrica (Kps) se traduce en un aumento de la solubilidad, como se puede deducir de la ecuación 7 y que se conoce con el nombre de efecto salino. La evaluación del estado de saturación de las soluciones frente a las fases minerales seleccionadas se ha llevado a cabo calculando los índices de saturación. Las constantes de equilibrio empleadas en los cálculos de saturación son las que aparecen en la base de datos del código utilizado.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Las aguas colectadas en el salar se recogieron en botellas de polietileno de 1 litro, previamente rotuladas y ubicadas geográficamente con GPS. En terreno se midieron temperatura, pH, salinidad y conductividad eléctrica. El pHmetro y la conductancia se calibran periódicamente con soluciones tampón. La Tabla 1 presenta los datos tomados en terreno. Durante el transporte al laboratorio, estas se mantuvieron refrigeradas, al resguardo de la luz y selladas. En el laboratorio se determinaron los cationes (K, Na, Ca, Mg, Li y As) por espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer 2380), utilizando el protocolo estándar. Los cloruros por el método de Mohr, SO_4 por gravimetría con BaCl y análisis volumétrico (Cl, B_2O_3, CO_3, HCO_3).

La Tabla 1 presenta los resultados de estos análisis. La calidad de los datos analíticos se evaluó mediante el cálculo del porcentaje de error de balance de cargas, de acuerdo con la expresión de Ball y Nordstrom (1991).Paralelamente se tomaron muestras de costras salinas y sedimentos, los que previamente se secaron y analizaron su mineralogía con un difractómetro Absorción Atómica (Siemens, modelo D5000). El código de modelización geoquímico PHRQPITZ (Plummer et al., 1988) se utilizó para el cálculo de las actividades iónicas e índices de saturación, con el fin de evaluar la secuencia de minerales que controlan la evolución geoquímica de las salmueras. Este código es el más adecuado para el tratamiento de soluciones concentradas dadas sus características. Ejemplos de estudios similares Monnin y Schott, 1984; Pengsheng y Yan 2003, Wen Qi y Mianping Zheng 2007, López et al, 1999; Garcés y López 2007, Garcés y López 2012.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Composición química en meq/L de las muestras de agua tomadas en el Salar de Loyoques, en meq/l. El término n.d. significa no determinado.

Muestra	*Li*	*K*	*Na*	*Ca*	*Mg*	*Cl*	*SO_4*	*HCO_3*	*B_2O_3*	*As*	*F*
Q3E	0,10	0,87	13,70	6,34	0,91	6,49	11,40	3,77	9,25	10,06	0,09
Q4E	0,01	0,15	1,39	1,048	0,13	0,66	1,38	0,87	4,40	6,54	0,02
Q5E	1,37	11,25	120,8	14,72	10,95	124,3	84,25	2,34	14,91	163,84	0,50
Q6E	0,49	1,71	74,51	15,17	5,02	87,79	5,77	1,12	4,71	9,05	0,09
Q7E	0,35	0,72	39,10	12,13	2,22	49,73	4,04	0,74	4,39	6,78	0,05
Q8E	0,43	0,72	38,49	9,83	1,73	47,56	2,92	0,74	2,78	5,55	0,03
Q9E	1,50	2,45	105,48	39,82	7,32	137,6	8,92	2,18	9,34	16,40	0,03
Q10E	0,57	0,97	36,36	12,72	3,21	48,24	13,54	2,18	4,16	0,293	0,03
Q1-1N	n.d.	7,62	280,43	115,45	14,40	448,29	25,29	1,33	3,56	0,023	0,07
QU-2N	n.d.	1,56	81,30	1,40	3,42	91,62	5,35	n.d.	n.d.	0,01	0,04
Q2-1N	n.d.	37,67	2773,9	265,65	65,84	3042,6	52,65	4,67	21,7	0,19	0,43
Q3N	n.d.	0,24	4,96	1,80	0,15	1,89	4,17	1,41	0,19	0,02	0,07
Q4N	n.d.	0,102	1,74	0,90	0,05	0,82	1,46	0,39	0,14	0,02	0,02
Q5N	n.d.	14,12	197,43	30,5	8,49	163,55	94,83	1,92	2,20	0,24	0,1
Q6N	n.d.	0,64	50,82	9,25	1,81	60,11	3,44	5,20	0,47	0,01	0,73
Q7N	n.d.	0,36	36,15	9,5	2,18	44,74	2,27	0,33	0,50	0,02	0,03
Q8N	n.d.	0,36	37,65	8,95	1,67	35,66	2,63	0,39	0,46	0,01	0,03
Q9N	n.d.	1,89	81,64	22,71	4,58	100,5	9,17	0,64	7,68	0,01	0,03
Q10N	n.d.	9,03	474,52	35,70	32	592,16	10,33	1,25	28,67	0,007	0,05
LO-2N	n.d.	79,92	4451,3	403	255,6	5513,88	11,06	11,27	349,21	0,15	0,07

La fuerza iónica de estas aguas está comprendida entre 0.004 m a 3,65 m. Esta variable es relevante para comprender el enriquecimiento salino que ha lugar en estos depósitos. La descripción de composiciones iónicas y sus cambios temporales en los cuerpos de agua naturales cerrados permiten dar explicación del mecanismo de formación y el desarrollo de enriquecimiento de sus salmueras. El flujo de agua que ingresa a esta cuenca cerrada, muestra una considerable variabilidad, tanto en la composición iónica, como en su concentración. La entrada de agua en esta cuenca cerrada, bajo un clima árido, se somete a la concentración por evaporación dando lugar a la precipitación de una secuencia de minerales, cada uno selectivamente, y por lo tanto alterando su composición. La química de la salmuera final, depende principalmente de la composición inicial del agua de flujo de entrada y de la secuencia y cantidad de minerales que precipiten en las sucesivas etapas de la evolución del agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El código utilizado para los cálculos termodinámicos de las salmueras estudiadas del presente trabajo es el *PHRQPITZ*, el cual incorpora y amplía a rangos de temperatura de 0° a 60°C con la aproximación de Pitzer y la parametrización realizada por Harvie et al. (1984) para el sistema Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO_4-OH-HCO_3-CO_3-CO_2-H_2O. Los códigos están sujetos al cumplimiento de condiciones de equilibrio químico y de conservación de masa y/o de carga. Estas condiciones se traducen en una serie de ecuaciones en las que resulta fundamental el conocimiento de las actividades de las especies presentes. Este software calcula las actividades iónicas individuales a partir de los datos analíticos de concentración, basado en el Método de Interacción Específica. También evalúa el grado de saturación de las soluciones respecto a las fases minerales de interés y compara los productos de actividad iónica (PAI) obtenidos frente a las constantes de equilibrio (Keq) correspondientes a dichos minerales, por medio del índice de saturación (IS) mediante la expresión IS = log (PAI/ Keq), donde PAI, representa el producto de actividad iónica y Keq la constante de equilibrio correspondiente. Si el índice de saturación muestra valor cero significa que la solución está en equilibrio respecto a esa fase. Valores positivos o negativos del IS indican una situación de sobresaturación o subsaturación, respectivamente, cuya magnitud es función directa del valor absoluto de dicha cantidad. La Tabla 2 muestra los resultados de los índices de saturación de los principales minerales posibles de precipitar. Estos muestran que las aguas se encuentran casi en situación de equilibrio con la calcita y aragonito, siendo el mineral siguiente más próximo al equilibrio el yeso, pero aún lejos del equilibrio, principalmente por las bajas concentraciones en la que se encuentran estas aguas (0,004<F.I.< 3,65) (Fig. 1).

ISBN 978-607-8242-11-5

La variabilidad de la composición iónica, de las aguas del salar de Loyoques se representa en el diagrama de la figura 1. Los iones dominantes son $Na^{+} > S0_4^{-2} > Cl^{-}$ y en menor relación $K+ > HC0_3^{-} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > C0_3^{-2}$. Los puntos en el diagrama claramente indican predominio del Na frente al Ca, con una baja incidencia del Mg en que no supera el 10%. Las muestras presentan mayor variabilidad en cuanto a los aniones, existiendo un sector clorurado y otras sulfatadas-cloruradas. La presencia de HCO_3 se manifiesta sólo en las muestras Q3 y Q4 con más del 10%, y de igual forma se manifiestan tanto en verano como en primavera. De lo observado en la Fig. 1 se puede concluir que existe una elevada variabilidad de tipos químicos en las soluciones superficiales del salar. Para el cálculo de las condiciones físico-químicas se utilizó el código PHRQPITZ que permite calcular los coeficientes de actividad iónicos (γi) y el grado de saturación de las aguas. La figura 3 muestra la evolución de los coeficientes de actividad iónica de los cationes mayores en función de la fuerza iónica. A partir de estas gráficas podemos observar que se manifiestan de dos formas. El primer grupo, cuyos coeficientes de actividad disminuye hasta alcanzar un mínimo, para luego aumentar a medida que aumenta la fuerza iónica en la solución, son γNa^{+}, γMg^{++}, γCa^{++}, γCl^{-}. El segundo grupo lo constituyen los γK^{+}, γSO_4^{--}, γHCO_3^{-}, que disminuye el valor de sus coeficientes de actividad, a medida que la solución se concentra (en la figura 3 se representan con línea de tendencia).

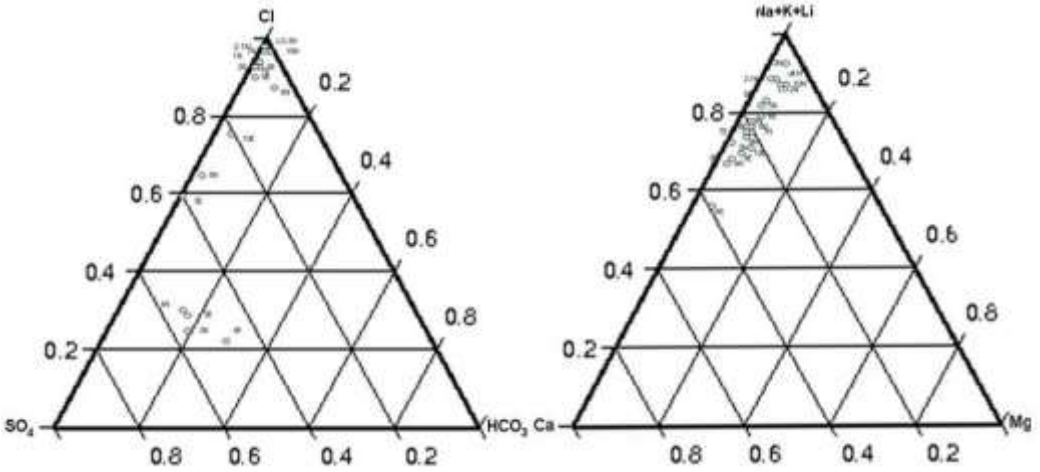


Fig. 1: Representación gráfica en diagrama triangular de las aguas del salar de Loyoques.

Los cálculos de equilibrio entre fases a partir de soluciones de electrolitos recobran importancia en el diseño y optimización de los procesos de separación de sales, a partir de salmueras naturales, siendo de interés industrial la aplicación de métodos de precipitación de sales a partir de sistemas multicomponentes. Estos muestran que todas las aguas están sobresaturadas en calcita (figura 2). El siguiente paso es considerar la alcalinidad. Si (alc) > 2 (Ca^{++}) en el agua inicial de flujo de entrada, entonces aumenta regularmente durante la evaporación, siempre y cuando sólo precipite la calcita. En otras palabras, el producto de actividad de los iones Ca^{++} en solución en relación a los iones CO_3^{-2} debe permanecer constante, a medida que la concentración aumenta. Si uno de los solutos aumenta, entonces el otro deberá disminuir. En nuestro caso, la distribución de toda el agua de entrada debe convertirse en salmueras ricas en carbonato. Sin embargo, la evolución del agua representada en el diagrama triangular (figura 1), es de tipo Na-Cl-SO_4 con pH inferior a 9. La explicación habitual para esta anomalía es la precipitación de Mg-silicatos (Hardie y Eugster, 1970).

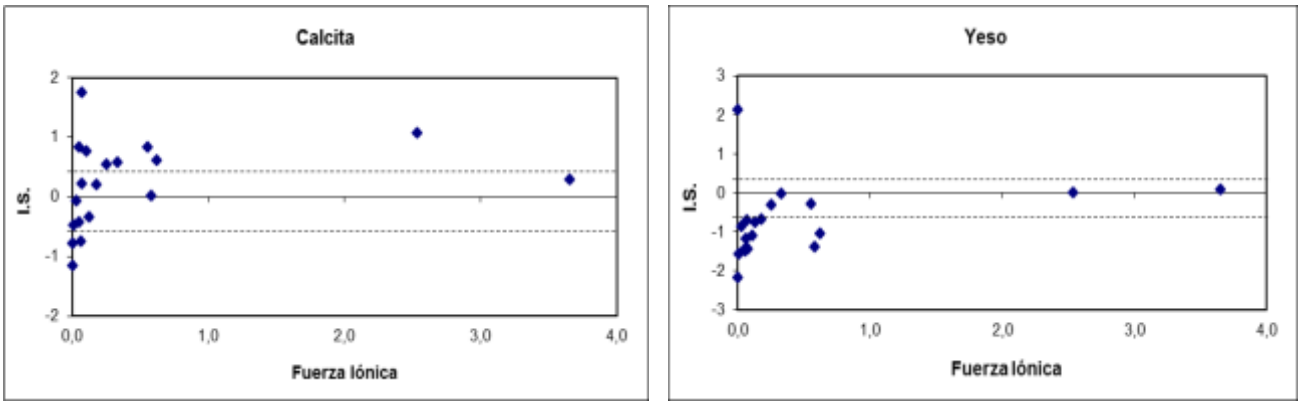


Fig. 2: Índices de Saturación de la calicita y yeso de las aguas del Salar de Loyoques

ISBN 978-607-8242-11-5

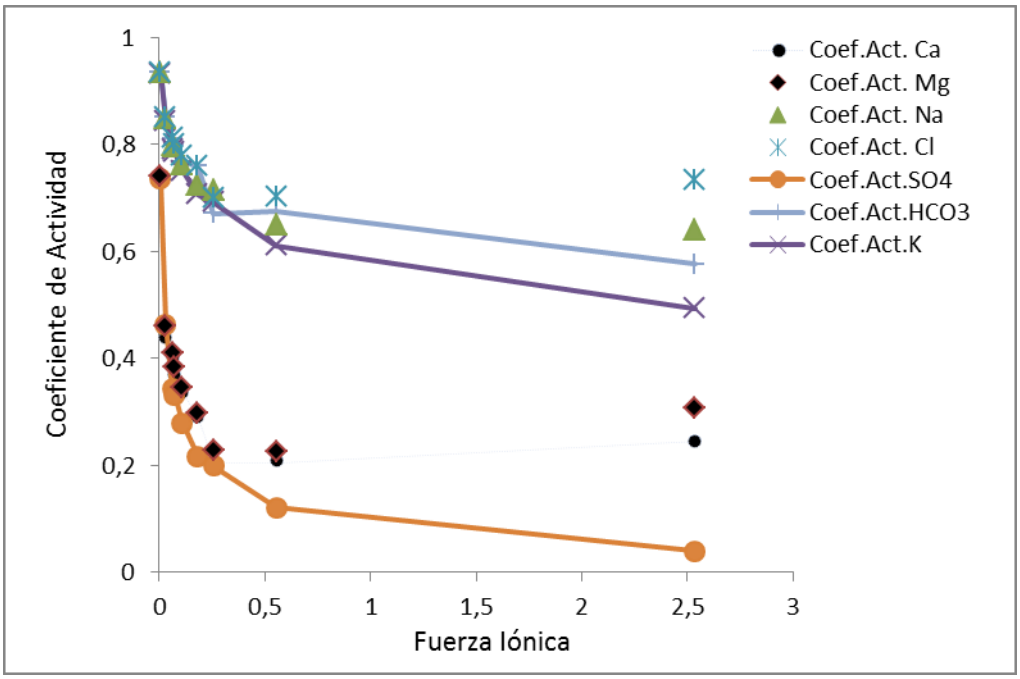


Fig. 3: Coeficientes de actividad iónicos en función de la fuerza iónica para aguas del Salar de Loyoques.

Tabla 2: Índices de Saturación de las fases minerales con mayor posibilidad de presentarse por precipitación de las aguas del salar de Loyoques.

Muestra	*I.S. anhidrita*	*I.S. aragonito*	*I.S. calcita*	*I.S. yeso*	*I.S. Magnesita*
Q1-1N	-0,53	0,63	0,83	-0,29	-0,29
Q1-2N	-0,16	0,87	1,06	-0,01	0,22
Q2-1N	-0,09	0,07	0,27	0,07	-0,59
Q3N	-1,83	-0,69	-0,50	-1,57	-1,88
Q4N	-2,38	-1,35	-1,17	-2,60	-2,60
Q5N	-0,29	0,37	0,57	-0,03	-0,30
Q6N	-1,65	1,55	1,74	-1,43	0,77
Q7N	-1,73	-1,0	-0,81	-1,48	-2,06
Q8N	-1,69	-0,69	-0,44	-1,45	-1,78
Q9N	-1,03	-0,55	-0,36	-0,77	-1,68
Q10N	-1,29	0,41	0,60	-1,05	-0,05
Q3E	-1,07	-0,28	-0,09	-0,85	-1,49
Q4E	-2,38	-0,98	-0,79	-2,13	-2,32
Q5E	-0,52	0,34	0,52	-0,32	-0,11
Q6E	-1,26	0,56	0,74	-1,1	-0,24
Q7E	-1,37	-0,95	-0,76	-1,19	-2,03
Q8E	-1,59	-0,19	-0,002	-1,39	-1,30
Q9E	-0,92	0,01	0,19	-0,68	-1,15
Q10E	-0,93	0,01	0,20	-0,70	-0,98

Estos resultados sugieren que la distribución de las aguas de entrada debe convertirse en alcalina, pero que en realidad son salmueras neutras. Esto induce a que las aguas evaporíticas siguen dos vías de evolución. Si durante el proceso evaporativo se enriquecen de carbonatos, llegando a ser una salmuera alcalina de carbonato de sodio, presentarán pH mayor a 10. La otra vía es cuando las aguas de aporte presentan más calcio que carbonato, de tal forma que la solución se concentra en calcio produciendo salmueras neutras con pH menor a 9, como lo es en nuestro caso. Por lo tanto, la relación fundamental si (alc) > 2 ((Ca^{++}) + 2 (Mg^{++})) no depende de la naturaleza del anión débil - ácido asociado a Ca y Mg durante la concentración por evaporación. Otra explicación de los datos es la existencia de un exceso de sulfato de origen. En este

ISBN 978-607-8242-11-5

modelo, el azufre adicional se pone en las aguas del acuífero donde se oxida a sulfato y elimina los minerales de sulfato. Si todo catión alcalino se elimina como sulfato de la cantidad de sulfato oxidado sería la diferencia entre la pérdida total de cationes alcalinos y pérdida aparente de sulfato. En la observación de la zona muy cerca de ella existe azufre nativo. Esta es transportada por los vientos. Estos procesos dan una reducción significativa de la alcalinidad.

CONCLUSIONES

Las aguas del salar de Loyoques son levemente alcalinas y corresponden al tipo Na-Cl-SO_4. Estas están claramente influenciadas por los contenidos de boro y arsénico cuyo origen es volcánico. Las aguas muestran una considerable variedad tanto en la composición iónica, como en su concentración. Las aguas que ingresan a esta cuenca cerrada, bajo un clima árido, se someten a la concentración por evaporación dando lugar a precipitación de calcita y presentando sólo algunas muestras próximas al equilibrio con yeso y magnesita.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a sus respectivas instituciones (Universidad de Antofagasta y Universidad de La Serena) por el apoyo prestado para la realización de este trabajo. JOV agradece también al Centro de Información Tecnológica de La Serena-Chile.

REFERENCIAS

Ball, J.W. y Nordstrom, D.K., 1991, User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters: U.S. Geological Survey Open-File Report 91-183,189 p. (1991)

D.G.A. Balance Hidrológico Nacional. Dirección General de Aguas, DGA, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Telecomunicaciones. Gobierno de Chile, MOP. 24 p. (1987)

Garcés, I. y López, P. Antecedentes Hidroquímicos del Salar de Aguas Calientes I (Chile). Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N° 62, 91-102 (2012)

Garcés, I. y López P. Origin of borate deposit of Salar de Surire saline system. Acta con comité editor 4th International Limnogeology Congress (ILIC2007), Barcelona. España. (2007)

Hardie, L.A. y Eugster, H.P. The evolution of closed-basin brines. Mineralogical Society of America Special Paper 3: 273–290 (1970)

Harvie, C.E.; Moller, N.; Weare, J.H.. The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO_4-OH-HCO_3-CO_3-CO_2-H_2O system to high ionic strengths at 25ºC. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 48 (4), 723-751 (1984)

López P., Auque L, Garcés I. y Chong G. Características Geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras del Salar de Llamará, Chile. Revista de la Sociedad Geológica de Chile, 26 (1), 89-108, (1999)

Monnin, C. y J. Schott; Determination of the solubility products of sodium carbonate minerals and an application to trona deposition in Lake Magadi (Kenya). Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(3), 571-581 (1984).

Pengsheng, S., y Y. Yan; Thermodynamics and phase diagram of the salt lake brine system at 298.15 K: V. Model for the system Li^+, Na^+, K^+, Mg^{+2} /Cl−, SO_4^{-2}, H_2O and its applications. Calphad, 27(4), 343-352 (2003)

Pitzer, K. Activity coefficients in Electrolyte Solutions.(2ª ed). Cap. 3, CRC Press, Boca Ratón. (1991).

Plummer,L.N., D. L. Parkhurst, G. W. Fleming y S. A., Dunkle; Computer program incorporating Pitzer's equations for calculation of geochemical reactions in brines. Water-Resources Investigation Report. WRI 88-4153 (1988)

Wen Q. y M. Zheng; Simulation with Pitzer model of lake brine evolution of Zabuye salt lake, Tibetan plateau. Acta Geologica Sinica 81(12), 1734-1741 (2007)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Manejo de Google Cloud Tools en el desarrollo de sistemas de aprendizaje nativos Windows.

Juan C. Rodríguez[1], Manuel A. Guzmán[2], Israel Duran[3]

(1) Dpto. de Ingeniería en Sistemas Computacionales, e-mail: jurodriguez@itesi.edu.mx.
(2) Dpto. de Ingeniería en Sistemas Computacionales, e-mail: ulsos@hotmail.com.
(3) Dpto. de Ingeniería en Sistemas Computacionales, e-mail: isduran@itesi.edu.mx.
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), Carretera Irapuato Silao km. 12.5, Irapuato, Guanajuato, México (jurodriguez@itesi.edu.mx)

RESUMEN

Es indudable que, en los últimos años, el constante desarrollo de las TIC, ha permitido generar, organizar y difundir el conocimiento de una manera sencilla y bastante accesible para cualquier persona que tiene acceso a Internet. La nueva corriente educativa del M-Learning (Movile Learning, que proliferan en la forma de enseñar, generando una nueva mentalidad en los estudiantes y por consecuente nuevas necesidades, como, por ejemplo: Trabajo colaborativo, herramientas de prueba, libertad de aprendizaje (tiempo, espacio), reconocimiento de logros.
El presente artículo está basado en "Desarrollar un sistema LMS, gestor de aprendizaje nativo que permita realizar consultas en tiempo real de contenido en línea y/o ejercicios de lenguajes de programación y áreas de aplicación de la programación, para apoyar al estudiante en el aprendizaje significativo", realizándolo en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, para los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, tomando en cuenta que un LMS un software instalado en un servidor web que se emplea para administrar, distribuir y controlar las actividades de formación no presencial. Para este fin debe cumplir con 3 características fundamentales para estas plataformas, las cuales son: 1) Ser de acceso libre, 2) Permitir su uso de manera online y offline, 3) Generar una carga mínima de recursos para los usuarios y el administrador.
Concluyendo que con la implementación de esta plataforma se logró englobar un conjunto de conocimientos y competencias que le permitan a los estudiantes desarrollar sus habilidades meta-cognitivas (comprensión, organización, autoevaluación, pensamiento crítico, autoaprendizaje, etc.), a dicha plataforma se le asignarán funciones que permita facilitar a los usuarios involucrados la generación de grupos de debates, comunicación libre y acceso multiplataforma (dispositivos móviles y sistemas Unix/IOS); de manera sencilla, libre y gratuita.

Management of Google Cloud Tools in the development of native Windows learning systems.

ABSTRACT

Undoubtedly, in recent years, the constant development of ICT has allowed the generation, organization and dissemination of knowledge in a simple and accessible way for anyone who has access to the Internet. The new educational current of M-Learning (Movile Learning, which proliferate in the way of teaching, generating a new mentality in students and consequently new needs, such as: Collaborative work, test tools, freedom of learning , Space), recognition of achievements.
This article is based on "Develop an LMS system, a native learning manager that allows real-time queries of online content and / or exercises in programming languages and programming application areas, to support the student in learning Meaningful, "carried out at the Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, for students of the Computer Systems Engineering career, taking into account that an LMS software installed on a web server that is used to administer, distribute and control training activities no presential. To this end, it must fulfill 3 fundamental characteristics for these platforms, which are: 1) To be freely accessible, 2) To allow its use in an online and offline way, 3) To generate a minimum load of resources for the users and the administrator.
Concluding that with the implementation of this platform it was possible to include a set of knowledge and skills that allow students to develop their meta-cognitive skills (understanding, organization, self-evaluation, critical thinking, self-learning, etc.). Will assign functions that will allow the users involved to generate discussion groups, free communication and multiplatform access (mobile devices and Unix / IOS systems); In a simple, free and free way.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La evolución de las tecnologías de la información y la comunicación ha tenido un impacto trascendental en la educación, que se ha venido presentando a través del tiempo, la cual nos permite ofrecer mayor y mejor servicio a los usuarios, gracias a las comunicaciones inalámbricas, tele-presencia, difusión de datos, etc.

Los servicios de almacenamiento en nube, se puede acceder por diferentes medios, como un servicio web (web service), interfaz de programación de aplicaciones (API), interfaz de usuario (interfaz web) o alguna otra seleccionada por el cliente. Es un espacio educativo alojado en la web, conformada por un conjunto de herramientas informáticas o sistema de software que posibilitan la interacción didáctica. (Salinas, María Isabel. 2011).

Plataforma Virtual

Es un entorno informático en el que nos encontramos con muchas herramientas agrupadas y optimizadas para fines docentes. (Sebastián Díaz, 2009)

Son escenarios educativos diseñados de acuerdo a una metodología de acompañamiento a distancia. (Sofía Victoria, 2008)

Son una propuesta flexible, individualizada e interactiva, con el uso y combinación de diversos materiales, formatos y soportes de fácil e inmediata actualización. Weller, M. (2005).

Software

Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora. (Diccionario de la RAE)

Lenguajes de Programación

Un lenguaje de programación es un lenguaje formal diseñado para realizar procesos que pueden ser llevados a cabo por máquinas como las computadoras. Gómez, Omar. (2007).

EVA

Es un espacio educativo alojado en la web, conformada por un conjunto de herramientas informáticas o sistema de software que posibilitan la interacción didáctica. (Salinas, María Isabel. 2011)

LMS

Es un software instalado en un servidor web que se emplea para administrar, distribuir y controlar las actividades de formación no presencial (o aprendizaje electrónico) de una institución u organización. Wilson, Leslie B. (1993).

Funcionalidad de un LMS

- Entrega del contenido del curso.
- Registro y administración de Estudiantes.
- Gestión de prácticas (es decir, la programación, el seguimiento).
- Plan de Estudios y Certificación de Gestión.
- Habilidades y Competencias de Gestión.
- Análisis de la Diferencia de Habilidades.
- Plan de Desarrollo Individual (PDI).
- Informes.
- Gestión de Registro de Prácticas.
- Gestión de Recursos.
- Organizaciones Virtuales.
- Repositorio de documentos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Software Educativo

Un software educativo es un programa para ordenador creado con el fin de ser utilizado como medio didáctico, que pretende imitar la labor tutorial que realizan los profesores y presentan modelos de representación del conocimiento en consonancia con los procesos cognitivos que desarrollan los alumnos. (Marqués, 2009).

Cloud Storage

Es un modelo de almacenamiento de datos basado en redes de computadoras, ideado en los años 60´s, donde todos los datos están alojados en espacios de almacenamiento Virtualizado, por lo general aportados por terceros. Montaner, Joan; Orriols, Meritxell. (2010).

Visual Studio ("Community 2013")

Esta es la nueva versión de la IDE de desarrollo más completa de Microsoft Inc., es una nueva versión que permite la liberación de todas las funciones de una versión de paga sostenida por la comunidad de desarrolladores, pero gratuitamente, existen algunos lineamientos que se deben seguir al momento de publicar software con fines lucrativos, pero, en resumidas cuentas, esta es una versión Profesional de Visual Studio por un costo nulo de adquisición. Strauss, Dirk. (2016).

MODELO

El presente trabajo de investigación se enfoca en realizar una aplicación LMS porque actualmente los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, no tienen una plataforma de aprendizaje dedicada que les permita consultar, aplicar analizar o evaluar, sus habilidades ni capacidades de comprensión lógica y aplicativa de diferentes lenguajes de programación, siendo los lenguajes C, C++, C# y Java los lenguajes más comunes con lo que se programan en la institución, quedando fuera de la práctica algunos otros como: Ruby, Perl, Python, etc.

Otro punto a considerar es la falta de un sistema o programa de motivación para los usuarios involucrados en el proceso de aprendizaje, por ejemplo, el uso de "Badges" (medallas digitales); además, normalmente en este tipo de aplicativos no se cuenta con la complementación de los conocimientos sobre lenguajes de programación con contenidos fundamentales de áreas básicas de aplicación de los mismos conocimientos adquiridos, como pueden ser: Redes de Computadoras, Algoritmia, Bases de Datos, Etc.

Adicionalmente, en los aplicativos similares, la consulta en tiempo real de contenidos bibliográficos es escasa o nula, lo cual contraste enormemente con el ritmo exponencial de crecimiento que poseen los lenguajes de programación, los entornos de desarrollo, las tecnologías de la información, los frameworks.

El objetivo es desarrollar un sistema gestor que permita realizar consultas y realizar ejercicios de lenguajes de programación en áreas de aplicación, para apoyar al estudiante en el aprendizaje significativo.

Tomando en cuenta una plataforma gráfica de contenidos de aprendizaje, cuyos límites le permitan al usuario conocer la sintaxis de al menos 16 lenguajes de programación. Empleando los servicios de la nube, para almacenar y acceder de manera libre a todos los contenidos ofrecidos en la plataforma en tiempo real, generando un sistema más completo y amplio en contenidos y anular a la página web responsiva en línea que posee la plataforma, para así emplearla de manera directa en todos los sistemas operativos con entorno gráfico y dispositivos móviles con el uso de un navegador web.

Para determinar la mejor manera de abordar el problema y generar la solución planteada del LMS y seguimiento de controles se realizaron varias etapas de análisis como se muestra en la tabla [1] de actividades realizadas.

Tabla [1].- Descripción de actividades y etapas de desarrollo

SOFTWARE
Mostrar una interfaz legible y clara (Tener esquemas de colores constantes)
Trabajar con interfaces independientes y mutuamente excluyentes

ISBN 978-607-8242-11-5

Evitar la ambigüedad de ejecución (que se abran 2 o más ventanas de la misma instancia)
Reducir el consumo de recursos en contraste con la memoria que consumen los navegadores modernos
Concebir un modelo de consulta de recursos didácticos en tiempo real que a su vez permita su edición independiente de la ejecución de la aplicación (edición en tiempo real)

Sin olvidar que se toma como referencia el modelo incremental que concuerda con las etapas de desarrollo iterativo del Modelo RAD como se muestra en la figura [1], donde se requiere o generaliza el desarrollo de "prototipos falsos" y el desarrollo visual; de manera tal que se pueda enfocar cada nueva versión a una mejora tanto funcional como visual siempre con el uso de componentes reusables. Las etapas de desarrollo que describe el modelo RAD.

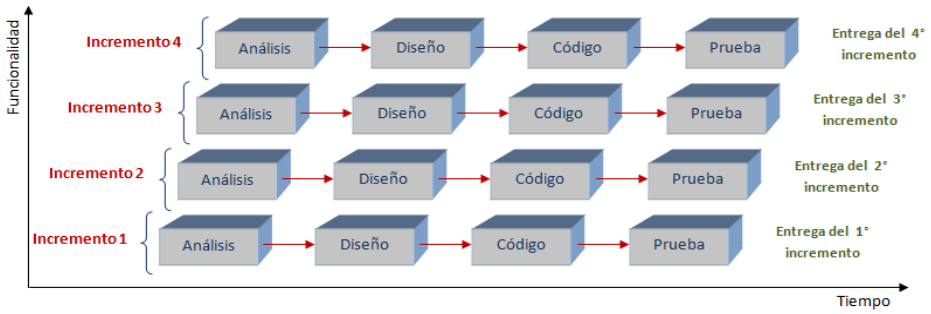


Figura [1].- Desarrollo de modelo incremental

Cabe mencionar que para el desarrollo del aplicativo no se diseñó un cronograma concreto donde las diferentes etapas del proceso se realizaban consecutivamente, como se puede apreciar en el modelo anterior porque se realizaron de 1 a 2 nuevos prototipos funcionales cada mes, mismos que incrementaban sus funciones, líneas de código y aspectos visuales, con el fin de cumplir con las condiciones óptimas de desempeño gráfico y funcional.

Durante la etapa de análisis de cada iteración se evaluaron 3 aspectos:

1. Desempeño
    a. Se evalúa la cantidad de memoria que ocupa la ejecución del aplicativo, los picos de memoria y la cantidad de espacio en disco que utiliza, además de la cantidad de cache que genera al abrir diferentes archivos constantemente.
2. Atractivo Visual
    a. Se presenta el aplicativo a diferentes jueces (hombre y mujeres) con el fin de buscar la mezcla de colores más atractiva y menos extravagante posible, donde se consiga una media grafica invitante para los diversos usuarios.
3. Funcionalidades
    a. Se numeran la cantidad de funciones que posee el aplicativo, se agenda la inclusión de nuevas y se revisa la facilidad con que cada una puede ser ejecutada en el menos número de clics y el menor tiempo.

Diseño

Para la etapa de diseño se implementan las observaciones hechas durante la etapa de análisis. Estas modificaciones se realizan en papel en el siguiente orden:

1. Modificación Visual Preliminar
2. Agregado de Función
3. Detallado de Código

ISBN 978-607-8242-11-5

a. Descripción del bloque (Comentarios)

4. Aprobación de Función
5. Descripción de Eventos Visuales (Mouse Over, Mouse Leave, Clic)
6. Revisión y Aprobación

Código

En esta etapa se traduce a líneas de código los bosquejos e ideas redactados en la etapa anterior, como ya se mencionó anteriormente, la cantidad de líneas de código se incrementa exponencialmente con cada nueva función, a esto cabe añadir el hecho de que el proceso de refactorización no puede ser realizado con la misma frecuencia que las iteraciones, ya que esto aumenta el tiempo de diseño y revisión de cada versión y a largo plazo provoca que el código sea inestable.

Prueba

Al final de cada proceso de desarrollo iterativo, el cual tiene un periodo de producción de entre 7 y 15 días, las pruebas de funcionalidad son efectuadas dentro del concepto de "Pruebas Alfa", donde el equipo de desarrollo prueba los diferentes escenarios de uso que el usuario podría generar para así descubrir errores de ejecución, fallas en el sistema, puntos de quiebre, etc.

RESULTADOS

La primera interfaz principal del aplicativo en su parte izquierda cuenta con iconos de concepto flat y sombreado interno rasterizados para las interfaces de acceso a las clases de los dieseis lenguajes de programación proyectados, como se muestra en la figura [2], y en la parte derecha contiene los temas del lenguaje seleccionado y la parte inferior se encuentra la función de OpenOffice, editor de código (Sublime Text) y abrir la interfaz de biblioteca.

Además, contiene los botones básicos de Cerrar, Minimizar y Ayuda; con el fin de cumplir con los parámetros fundamentales de una interfaz de usuario.

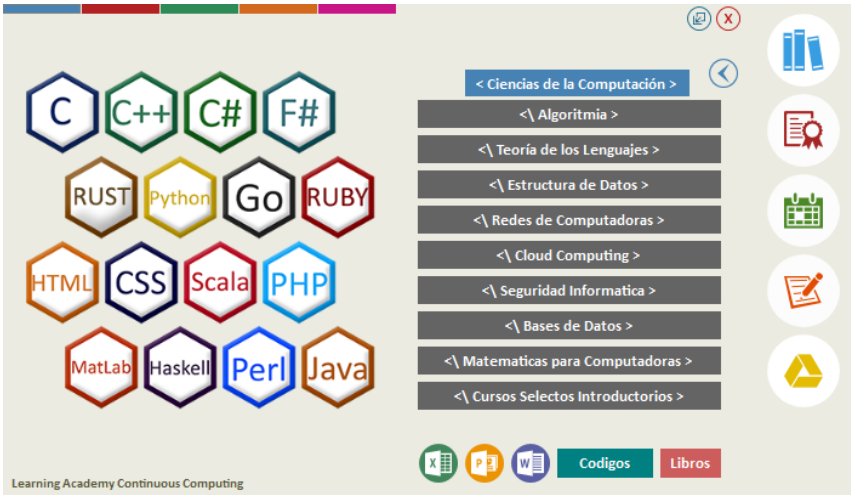


Figura [2].- Interfaz principal

La interfaz de lenguajes se modificó a fin de cumplir con la composición de colores antes mencionada, además, en lugar de emplear componentes de Visual Studio, de integraron iconos circulares para la referencia directa al número de clase que se abordaría con cada botón, y a su vez se agregó un "Combo Box" en la parte derecha para describir el título de dicha clase. Figura [3].

ISBN 978-607-8242-11-5



Figura [3].- Contenido de temas

En la figura [4], se presenta la pantalla de "Autoevaluaciones", la que consisten en archivos tipo "Formulario" de Google, las cuales pueden recabar información progresos de los usuarios que empleen el software, además este método de trabajo permitiría generar funciones nuevas y agregar nuevas motivaciones de trabajo a los usuarios.

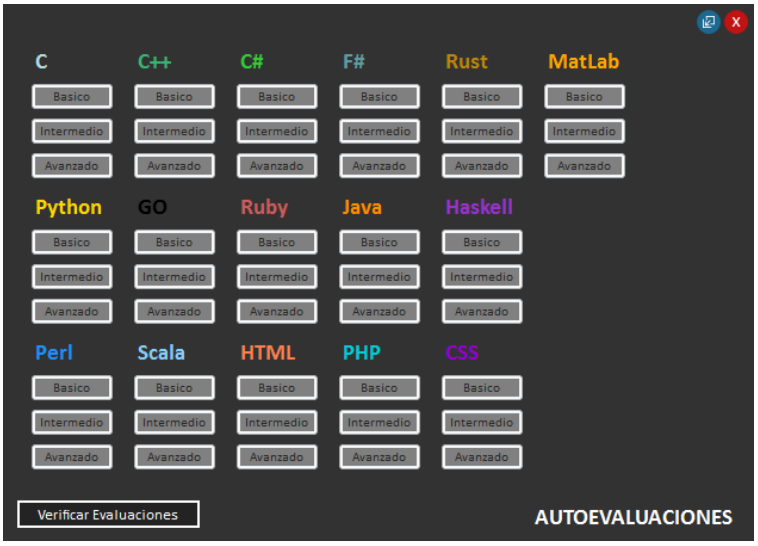


Figura [4].- Interfaz de evaluaciones

Para utilizar un video es necesario que este se encuentre en los servidores de Google, de manera que no se almacene en la carpeta de Drive, generando carga al espacio libre. Realizando un clic en "Descargar Editor" despliega la siguiente figura [5], la cual nos permite descargar libros y videos seleccionados.

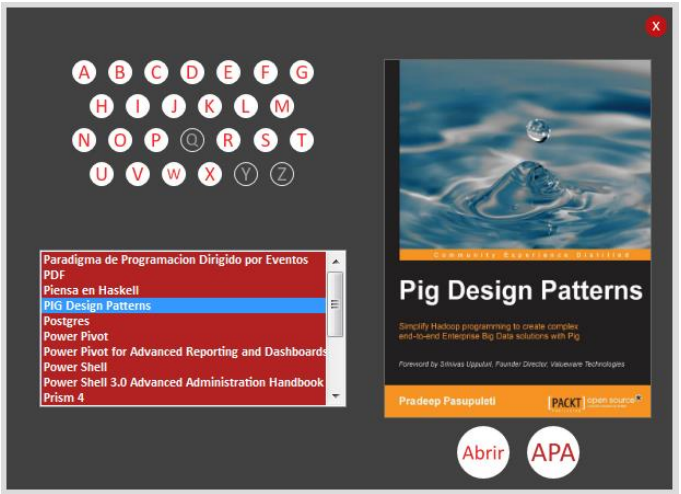


Figura [5].- Interfaz de biblioteca

ISBN 978-607-8242-11-5

Para logar concretar un stock de libros respetable, se buscaron las mejores alternativas de proveedores de bibliografías, sin embargo, de entre las muchas posibilidades, pocas estaban realmente enfocadas a los temas de desarrollo, programación y áreas a fines al rubro; finalmente se optó por 4 alternativas que se muestran en la figura [6], con su respectico porcentaje de aportación.

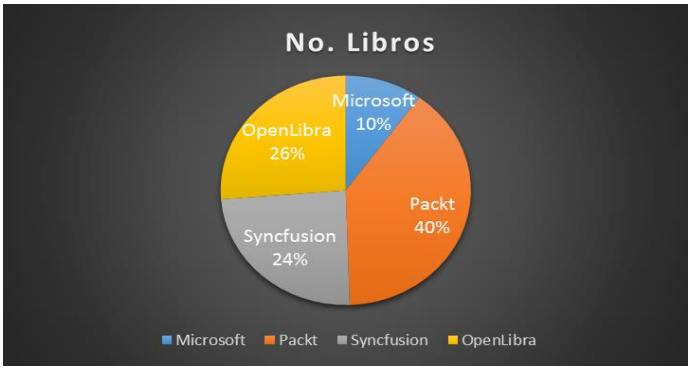


Figura [6].- Proveedores de libros

Para las pruebas de rendimiento en busca de mejorar los tiempos de carga, la generación de cache en sistema y reducir el uso de memoria del sistema en comparación a navegadores convencionales, se realizaron pruebas en diversos perfiles de equipos de cómputo.

Las pruebas consistieron en análisis del comportamiento del sistema, revisión de los tiempos de carga con diversas conexiones, monitoreo del uso de memoria, analizar la cantidad de líneas de código post-refactorización y analizar el FeedBack de los usuarios, esto último con el fin de concluir el grado de aceptación de una aplicación nativa con funciones online y la mejora de su uso en comparación con consultas de navegadores convencionales.

Prueba de Monitoreo de Memoria: en el gráfico de memoria de la figura [7]. La Memoria empleada contra Navegadores se puede percibir fácilmente la cantidad de megas que emplea la aplicación en una consulta única inicial. Cabe mencionar que mucha de esta memoria es cargada debido a los plugins que los navegadores utilizan para ejecutar componentes dinámicos, integrar parámetros de seguridad y otras funciones. Sin embargo, la carga inicial permite demostrar que el aplicativo nativo reduce los requisitos de carga y disminuye por consecuente los tiempos de ejecución de otros procesos.

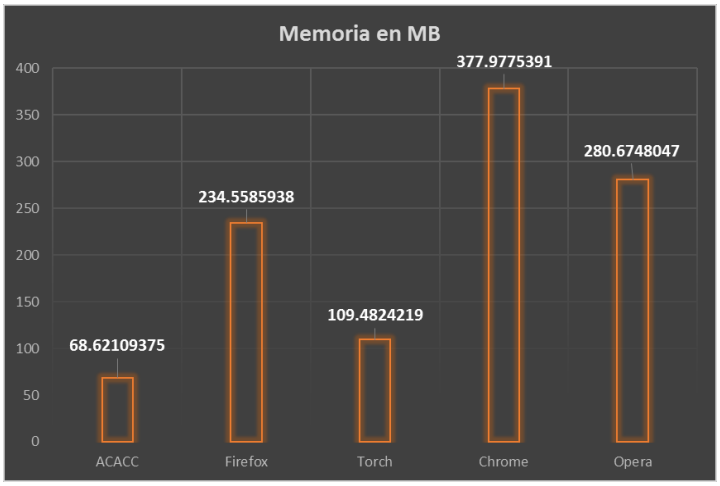


Figura [7].- Comparativa de uso de memoria promedio en MB, para la apertura single-thread de una presentación (clase individual) en un equipo.

ISBN 978-607-8242-11-5

Prueba de Tiempos de Carga: Para las pruebas de conexión y tiempo de carga se emplearon diversos entornos de conexión, mediante los cuales se obtuvieron los siguientes resultados. La gráfica (Figura [8]. Tiempo de Carga con Diferentes Conexiones)



Figura [8].- Tiempo de carga con diferentes conexiones.

Los tiempos de carga permiten mostrar el tiempo que un archivo tarda en procesarse completamente en el aplicativo, aunque esto pudiese considerarse una variable independiente de los parámetros a investigar, sirve bien como punto de referencia para futuros desarrollos en el proceso de ampliar los alcances del aplicativo.

Pruebas de Memoria en Perfiles de Equipo: según las características del equipo y el perfil, los parámetros de uso de memoria desde mínimo hasta máximo se muestran a continuación. Esto con el fin de mostrar la consistencia de requisitos de ejecución de la aplicación en diferentes entornos de hardware.

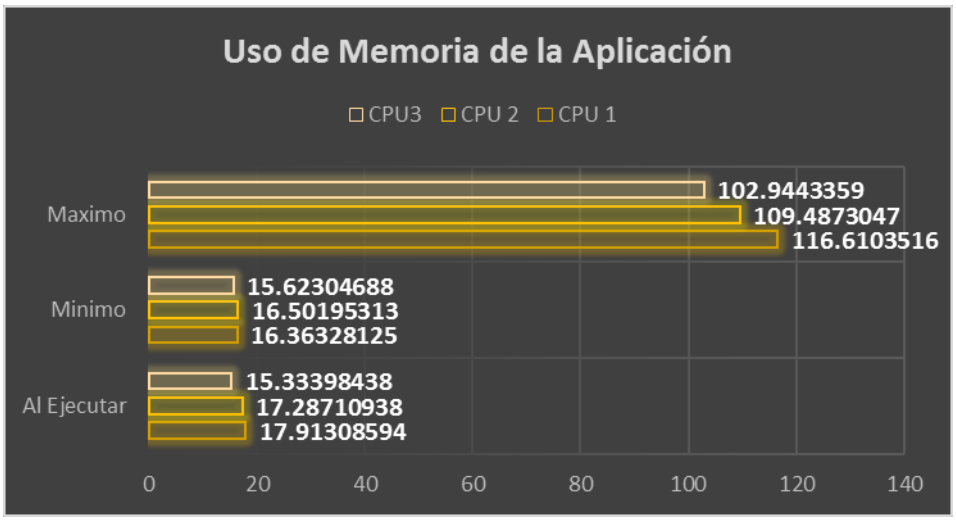


Figura [9].- Memoria de aplicación.

Proceso de Refactorización: Una vez terminado el desarrollo preliminar, se inicia con el periodo de Refactorización, este es un proceso de 7 etapas que permite mejorar y comprimir el código por medio de: reducción de sentencias de código, simplificación de funciones, optimización de llamadas y compactado de bloques completos en secuencias de clase.

En el gráfico siguiente figura [10] se presentan las 7 etapas del proceso y como el número de líneas fue disminuyendo. Además, puede apreciarse una comparativa, considerando un cierto porcentaje de líneas como comentarios, presentando al final un número tentativo de líneas que conforman el código útil final.

ISBN 978-607-8242-11-5

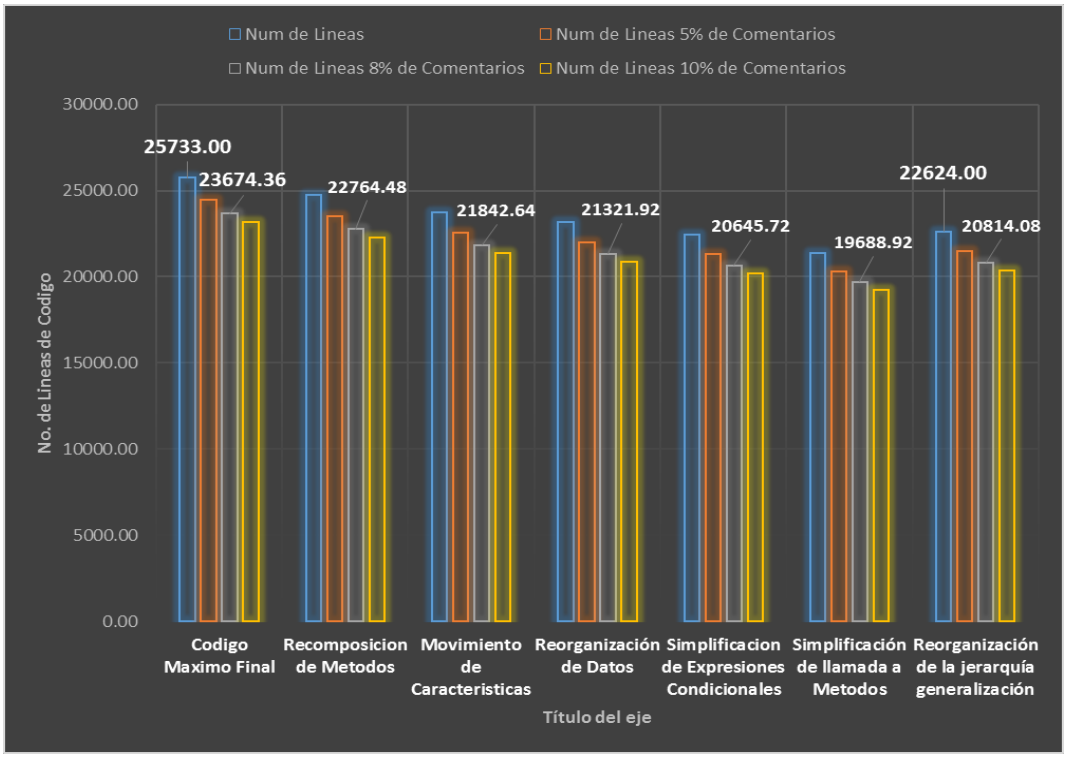


Figura [10].- Cantidad de líneas de código durante las etapas de refactorización, con comparativas de posibles 5, 8 y 10% de líneas de comentarios.

CONCLUSIONES

El tener una plataforma enfocada a la gestión y distribución de contenidos educativos para las carreras antes mencionadas en el ITESI se mejoró el desarrollo de las capacidades y las habilidades de los usuarios involucrados, generando una menor perdida de interés en el desarrollo profesional y una mejor interacción con el conocimiento, además de facilitar la administración y seguimiento llevado a cabo por los profesores y educadores.

El objetivo principal de este proyecto consistía en el desarrollo de un aplicativo usable y que generará un cambio integral en los estudiantes y sus métodos de estudio, demostrando a su vez que la integración de tecnologías de la información en el ámbito educativo es indispensable.

Basados en el desarrollo de trabajos multidisciplinarios como este, donde se integraron trabajos del área pedagógica, del área de desarrollo de software y de diseño gráfico, además de trabajar con conceptos de investigación en Interacción Humano-Máquina

Así mismo dentro de la creación e implementación de un aplicativo, podemos afirmar que el LMS disminuye el consumo de, Memoria empleada contra Navegadores y Refactorización.

Además, los niveles de aceptación e integración de la aplicación rebasan el 90% por parte de las pruebas de campo realizadas por los usuarios.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al ITESI, por brindarme la oportunidad de publicar las investigaciones y estudios realizados dentro de la institución. Al Gobierno del Estado de Guanajuato por permitirme los recursos necesarios y realizar la divulgación, comunicación pública este artículo.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

Booth, Joe. (2013). Visual Studio Add-Ins. Syncfusion, Inc.

Del Sole, Alessandro. (2014). Visual Studio 2013. Syncfusion, Inc.

Del Sole, Alessandro. (2015). Visual Studio 2015. Syncfusion, Inc.

Del Sole, Alessandro. (2016). Visual Studio Code. Syncfusion, Inc.

Gómez, Omar. (2007). Paradigma de Programación Dirigido por Eventos, Version 2.0.

Mayo, Joe. (2015). C# Succinctly. Syncfusion, Inc.

Montaner, Joan; Orriols, Meritxell. (2010). Escrituras Hipertextuales. UOC.

Ruiperez, Germán. (2003). Educación virtual y elearning (1ª ed.). Madrid: Fundación Auna.

Strauss, Dirk. (2016). C# Conde Contracts. Syncfusion, Inc.
Weller, M. (2005). Virtual Learning Environments: Using, choosing and developing your VLE. Londres: Routledge.

Wilson, Leslie B. (1993). Comparative Programming Languages, Second Edition. Addison-Wesley. p. 75. ISBN 0-201-56885-3.

CONTENIDO ONLINE

Moodle. ¿Qué es Moodle? (2011). Recuperado de: http://moodle.org/about/

Modelo Pedagógico de Cursos Online: https://drive.google.com/file/d/0B2GrzcO8_Q-YNjAyMjE5ZWUtYmU1ZS00MWUwLTg3OTYtOGJlMGM2YTJlZGQ0/view

Blakboard. Building a better education experience. (2011). Recuperado de: http://www.blackboard.com/

El entorno virtual de aprendizaje. (2010). Universia España. Recuperado de: http://profesores.universia.es/seccionEspecial.jsp?idEspecial=12&idSeccion=4227&title=ENTORNOVIRTUAL-ENSE%D1ANZA-APRENDIZAJE

Mentor, ¿Qué factores debo tomar en cuenta al momento de elegir un LMS? (2011). Recuperado de: http://www.mentor.mx/articulos/9-lms.html

Conceptos de desarrollo en HTML:
- http://www.w3schools.com/
- http://www.w3schools.com/html/html_editors.asp
- http://www.w3schools.com/tags/ref_urlencode.asp
- http://www.w3schools.com/html/html_basic.asp

Teorías de Desarrollo en C#: http://www.w3ii.com/es/csharp/csharp_interfaces.html

Componentes en C#: http://www.w3ii.com/es/csharp/csharp_preprocessor_directives.html

Repositorios de Desarrollo en C#: https://msdn.microsoft.com/es-es/default.aspx

Temas de “Eventos”:https://msdn.microsoft.com/es-mx/library/aa288460(v=vs.71).aspx

https://msdn.microsoft.com/es-es/library/system.windows.forms.webbrowser(v=vs.110).aspx

Temas de “Componentes”:
- https://msdn.microsoft.com/es-es/library/fc77hxyh(v=vs.120).aspx.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Dispersión de las Emisiones de PM_{10} de Canteras en Terrenos Complejos

Heli A. Arregoces[1], Yoma I. Mendoza[1] y Roberto E. Rojano[1]

(1) Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira. Km 5 vía a Maicao. Riohacha, Colombia. e-mail: harregoces@uniguajira.edu.co

Resumen

En este estudio se investigó las concentraciones de PM_{10} generadas por la cantera M-Cielo aplicando el modelo de dispersión Calpuff. Las emisiones se determinaron utilizando los factores de emisión de la EPA y los datos meteorológicos se obtuvieron de simulaciones del modelo diagnostico CALMET que introdujo datos del modelo regional pronostico MM5. El dominio de modelación fue de 22 km x 18 km con resolución de 100 metros para 10 capaz verticales (capa superior 500 km) que incluye la zona directa de la cantera, zona residenciales cercanas y característica topográfica del terreno. De los resultados se analiza que la dirección predominante del viento durante el día es NE, y se estiman que en radio menor de 10 km las contribuciones diarias de PM_{10} a la atmosfera por operaciones en cantera pueden alcanzar hasta 34.41 $\mu g/m^3$. La dirección del viento, las brisas marina y las condiciones topográficas determinan la dispersión del contaminante.

Palabras claves: Modelo de dispersión, cantera, meteorología y topografía, concentración, PM_{10}

Dispersion of PM10 Emissions of Quarries in Complex terrain

Abstract

In this study, we investigated the PM10 concentrations generated by the quarry M-Cielo by applying the CALPUFF dispersion model. Emissions were determined using emission factors of the EPA and meteorological data were obtained from simulations of the model diagnosis CALMET that introduced regional forecasting model MM5. The domain modeling was 22 km x 18 km with a resolution of 100 meters to 10 able vertical layers (top 500 km) which includes the area direct from the quarry nearby residential area, and topographical feature of the terrain. The results are analyzed that the prevailing wind direction during the day, and it is estimated that in radius of 10 km from the daily contributions of PM10 to the atmosphere by quarry operations can reach up to 34,41 μg/m3. The direction of the wind, marine breezes and topographic conditions determine the contaminant dispersion.

Keywords: dispersion model, quarry, meteorology and topography, concentration, PM10

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de la sociedad para el cumplimiento de las normas de calidad del aire que protegen a los residentes que viven cercanos a los centros industriales, implica el desarrollo de metodologías y herramientas de cálculo confiables que contribuyan a la toma de decisiones. Herramientas que permitan en corto tiempo hacer una descripción técnica de lo que está pasando y de lo que podría pasar, si las condiciones de terreno, meteorológicas o industriales cambian. Bajos estos preceptos, los modelos de dispersión atmosférica son una herramienta útil, ya que incorporan los últimos conocimientos sobre dinámica atmosférica y pueden predecir, con cierto grado de confianza, patrones de dispersión, transformaciones químicas y deposición de contaminantes, obteniendo así información rápida y confiable, del comportamiento y niveles de las concentraciones de contaminantes durante un cierto período de tiempo en una la atmósfera local(Holmes and Morawska, 2006). Los niveles de estos contaminantes son significativos cuando son originados en fuentes industriales. Por ejemplo, las operaciones de extracción de canteras y minería de superficie pueden causar una contaminación considerable del aire en partículas. Por su naturaleza, las emisiones significativas de las canteras y las minas de superficie son causadas por fuentes móviles que son difíciles de caracterizar individualmente y generalmente no se registran con precisión (Tartakovsky et al., 2016). Las operaciones de extracción en canteras pueden causar un efecto considerable a las concentraciones de PM_{10} en la atmosfera. Por su naturaleza, las emisiones en las canteras son causadas por fuentes fijas (planta de triturado, volquetas y cargadoras, voladuras, extracción de material) que son difíciles de caracterizar en tiempo y espacio de operación. Esto hace difícil determinar el impacto de las concentraciones fuera de los límites de operación y en zonas residenciales cercanas .

En este estudio se investigó los posibles impactos que genera las emisiones de material particulado PM_{10} fuera de los límites de operación de la cantera M-Cielo (W 72°38’00.4’’ y N 11°10’55.3’’) situada en área constituida por terreno elevados del flanco occidental de la Serranía del Perijá, zona rural de municipio de Albania, al norte de Colombia. Dentro de la cantera opera una planta de triturado y se realiza explotación de materiales que conduce al flujo continuo de vehículos pesados. La producción diaria de piedra triturada en la planta es de 205 ton/día (75000 ton//año), con 7 horas de trabajo diario 6 veces días a la semana.

Teniendo en cuenta lo planteado, y poder establecer el cumplimiento de las normativas de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera vigentes en Colombia: la Resolución 601 de 2006 (Calidad del aire o nivel de inmisión) este estudio propone la aplicación del modelo de dispersión CALPUFF (MacIntosh et al., 2010). Es importante resaltar que un modelo de dispersión describe mediante ecuaciones matemáticas los procesos físicos que gobiernan la dispersión atmosférica de partículas, gases o sustancias químicas dentro de la pluma (Ristic et al., 2015), y su propósito principal es calcular la concentración de contaminante emitido en un área (Arya, 1998; Turner, 1994). En la actualidad hay muchos reportes de investigaciones relacionadas con la aplicación de esta herramientas para medir el impacto que generan las fuentes al medio ambiente (Baroutian et al., 2006; Chen et al., 2010; Ghenai y Lin, 2006; Goodrich et al., 2007; Tsuang, 2003; Verma et al., 2013). Recientemente estudios epidemiológicos han mostrado que concentraciones ambientales combinadas con exposiciones prolongadas incrementa el riesgo de producir efectos en la salud e incluso la muerte (López, 2009). Resultados confiables para la toma de decisiones se han reportados sobre la aplicación de estas herramientas sobre canteras industriales (Silvester et al., 2009; Tartakovsky et al., 2013).

El modelo de dispersión CALPUFF es recomendados para estudios de dispersión detallada de largo alcance, es un modelo *puff* Gaussiano-Lagrangiano no estacionario de transporte y dispersión que acarrea emisión instantánea de una nube del contaminante (*puffs)* emitido de la fuente modelada (USEPA). Tiene la capacidad de calcular las concentraciones de varios contaminantes a diferentes alturas en una sola ejecución (Scire, et al., 2000). Aunque Calpuff es recomendado para calcular concentraciones en dominios superiores a 50 km puede ser utilizado para aplicaciones de campos cercanos en terrenos complejos (MacIntosh et al., 2010). Se hace necesario entonces la aplicación de este modelo para determinar las cantidades de contaminantes de material particulado PM_{10} emitido en el área de la cantera y que se distribuyen a la atmósfera por los procesos de transporte, transformación y remoción, hasta lograr llegar a receptores, dependiendo esto de las condiciones meteorológicas prevalecientes en la zona.

METODOLOGIA

ISBN 978-607-8242-11-5

Área de estudio

La cantera M-Cielo está situada en un área de terrenos elevados del flanco occidental de la Serranía del Perijá ubicada al norte de Colombia. La cantera se caracteriza por producción anual de 75000 toneladas de piedras triturada con 7 horas de trabajo diariamente durante 6 días a la semana. El pueblo más cercano a la cantera tiene por nombre Cuestecita y se encuentra situado en dirección Este a menos de 4 km de distancia. Al norte del complejo se extiende una bajiplanicie hasta el mar caribe (figura 1).

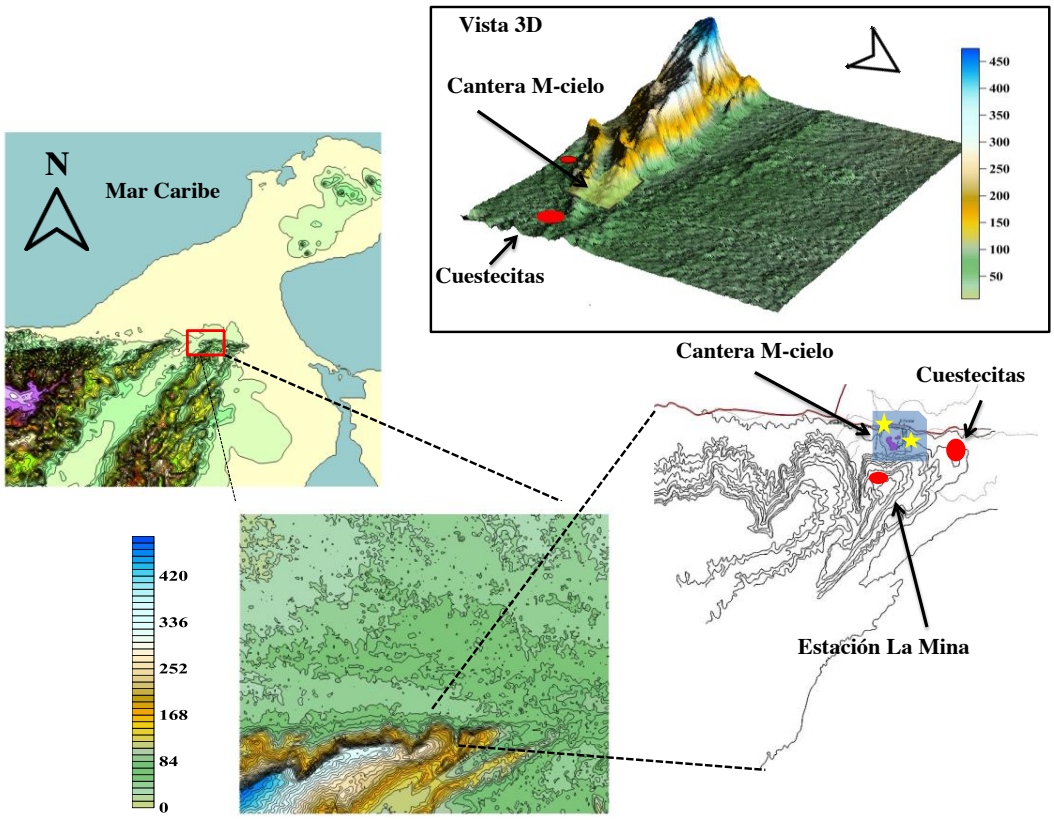


Fig 1. Ubicación de la cantera M-cielo, plano topográfico de la zona y vista 3D. El pueblo Cuestecitas (Círculos), Receptores (estrellas) y la estación meteorológica La Mina (Ovalo).

Topografía, Meteorología y Emisiones

El dominio de modelación fue de 22 km x 18 km con resolución de 100 metros para 10 capaz verticales (capa superior 500 km) que incluye la zona directa de la cantera, zona residenciales cercanas y característica topográfica relevantes del terreno (figura. 1). Para ejecutar el modelo de dispersión se utilizó datos de terreno de elevación digital ASTER que tiene una resolución de 1 arco-segundo (~30m) proporcionado las fluctuaciones topográficas que pueden afectar los diferentes fenómenos atmosféricos y el transporte de contaminantes (http://earthexplorer.usgs.gov/).

En este estudio, se utilizaron los registros meteorológicos de 5 días consecutivos del mes de Junio de 2016, debido a la disponibilidad y realización de muestreos de PM_{10} y la cuantificación directa de la tasa de actividad de las operaciones. Se obtuvieron datos meteorológicos horarios de la estación La mina ubicada a 5.18 km al suroeste de la cantera. Los registros de los parámetros meteorológicos horarios fueron para temperatura, precipitación, dirección y velocidad del viento. Por otro lado, perfiles verticales diarios y los datos en superficie de la presión barométrica, humedad relativa, nubosidad y altura de mezcla fueron obtenidos a través de simulaciones utilizando el modelo meteorológico diagnostico CALMET que introdujo

ISBN 978-607-8242-11-5

datos del modelo regional pronostico MM5 y registros obtenidos en la estación del aeropuerto Almirante Padilla ubicado a 40 km del epicentro del dominio de modelación (Scire et al., 2000).

Se determinaron las emisiones utilizando los factores de emisión establecidos en compendio AP-42 de la EPA para la operaciones de la planta de trituración, acarreos de materiales, cargue y descargue de volquetas, operación con buldócer y erosión eólica (USEPA, 1995). Todas las fuentes de emisión implicadas en las operaciones directas de la cantera no se consideraron constantes, se determinó su funcionamiento espacio temporal. Además, las emisiones por erosión eólica fueron simuladas acorde a las velocidades de los vientos. La calidad de los resultados producidos por los modelos depende de los datos de entrada y de la capacidad del modelo para representar razonablemente los procesos atmosféricos que dan lugar al transporte y dispersión de los contaminantes. Independientemente de su clasificación, los modelos requieren información meteorológica y de emisiones. (López, 2009)

El modelo

Se utilizó el modelo de dispersión Calpuff, es un modelo gaussiano no estacionario que contiene algoritmos para los efectos de terrenos complejos CALPUFF está diseñado para modelar la dispersión de gases y partículas variando espacial y temporalmente las condiciones meteorológicas, asimismo simula los procesos de dispersión, transformación y remoción de los contaminantes de aire durante su transporte. Tiene la capacidad de calcular las concentraciones de varios contaminantes a diferentes alturas en una sola ejecución(Scire et al., 2000). Ha sido recomendado por su resolución a nivel local en áreas donde las fluctuaciones y elevaciones del terreno causa efecto a la dispersión de los contaminantes (Ghannam and El-Fadel, 2013; MacIntosh et al., 2010). Los parámetros del modelo BIAS y TERRAD fueron modificados acorde a las características del sitio. El parámetro BIAS asigna pesos a los datos de superficie y al perfil vertical. A las 3 primeras capas se le dio el 100% de peso a los datos de superficie (BIAS=1) por estar la estación en cercanía a la cantera. Además, en estas capas la influencia del terreno sobre las variables atmosférica es directa. El parámetro TERRAD define el radio de influencia de las características del terreno, este valor se da en Km y es una función de la escala dominante del terreno. El valor utilizado fue 7 km, acorde con un análisis de la longitud escalar del terreno circundante descrito por Barclay et al. (2011).

El modelo fue calibrado a través de la medición en 2 receptores ubicados en el área de influencia directa de la cantera. La tabla 1 y la figura 1 muestran la identificación de los receptores y su ubicación. Las mediciones se realizaron utilizando 2 muestreadores de bajo volumen, de acuerdo con el método IO-2.2, ubicados en la zona de la planta trituradora y las oficinas. Los estadísticos utilizados para evaluar el rendimiento y representatividad del modelo para estimar concentraciones fueron: Sesgo, Error Cuadrático Medio Normalizado (ECMN), Sesgo Fraccional (SF) y Coeficiente de Correlación (r). Para determinar la fiabilidad del modelo se utilizó los criterios expuestos en Kumar et al.(2006) y Ahuja (1996).

Tabla 1. Receptores Ambientales

ID	Latitud Norte	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Observaciones
E1	11.180030°	-72.644813°	106	Estación ubicada en cercanía a la planta principal de triturado
E2	11.182529°	-72.645753°	96	Estación ubicada en la zona de oficinas

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta el análisis de los resultados de concentraciones de material particulado PM_{10} obtenidos mediante modelación empleando el modelo CALPUFF para los dos receptores seleccionados. La estadística básica de las concentraciones de MP_{10}, y la del rendimiento y representatividad del modelo calpufff se muestra en la tabla 2, como promedio de los 5 días de muestreo en los receptores del dominio de la modelación en el área de la cantera M-Cielo.

Tabla 2. Estadística y evaluación del modelo de dispersión de las concentraciones modeladas de PM_{10}

	Receptor 1	**Receptor 2**	**Aceptabilidad** (Ahuja, 1996; Kumar et al., 2006)	**Valor Perfecto**
Promedio (μg/m³)	54,201	46,870	-	-
Desviación estándar (μg/m³)	21,954	23,072	-	-
Mínimo (μg/m³)	27,437	13,642	-	-
Máximo (μg/m³)	83,124	68,930	-	-
Sesgo (μg/m³)	-13.02	-7.28	-	0
Error Cuadrático Medio Normalizado	0.49	0.23	≤ 0.5	0
Sesgo fraccional	0.27	0.17	$0.5 \leq x \leq +0.5$	0
Coeficiente de Correlación (r)	0.80	0.79	≥ 0.6	1

Como se observa en la tabla 2, las concentraciones de PM_{10} en la cantera M-Cielo variaron de 13,642 a 83,124 μg/m³. En la planta principal de triturado (receptor 1) se determinó una concentración promedio de PM_{10} 54,201 μg/m³ y la zona de oficina (receptor 2) de 46,870 μg/m³. Se puede expresar que la calidad del aire generada por emisiones de PM_{10} en el área de la cantera está representada por concentraciones promedio de 50,535 μg/m³; según Calderon y Sierra (2013) las concentraciones de material particulado pueden estar influenciadas por los fuertes vientos que producen la resuspensión de este contaminante

La tabla 2 Muestra los índices estadísticos para la evaluación del modelo. Los valores de correlación para los receptores son bastantes significativos, mostrado la fuerte dependencia del modelo de describir la variabilidad de las concentraciones de PM_{10}. Los resultados están enmarcados dentro de los criterios de aceptación de los modelos de dispersión de calidad de aire (Kumar et al., 2006; Ahuja S, 1996). El Error Cuadratico Medio Normalizado, indicador de varianza, es < 0.5 para las estimar las concentraciones diarias en los receptores, indicando que las concentraciones observadas y las estimadas están de acuerdo. El sesgo fraccional fue positivo para todos los receptores ambientales y se encuentra dentro del rango aceptado, indicando que los resultados estimados están próximos a los registros de monitoreo. El modelo tiende a subestimar las concentraciones. Los coeficientes de correlación son consistentemente altos para todos los receptores mostrando que la confiabilidad del modelo al estimar concentraciones diarias en la zona de influencia directa de la cantera. Los resultados muestran que el rendimiento de Calpuff para estimar concentraciones de PM_{10} en terrenos complejos con múltiples fuentes emisoras es satisfactorio.

La pendiente de la regresión lineal indica la estimación de las fuentes de PM_{10} incluidas en el modelo. Considerado la exactitud en los datos meteorológicos y geofísicos, la pendiente de regresión advierte de la inexactitud en el inventario de emisión (Huertas et al., 2012). Bajo este supuesto, el modelo muestra que las fuentes de emisiones fueron subestimadas. El modelo aporta alta confiabilidad en la estimación de la dispersión de los contaminantes y la variabilidad de las concentraciones. La constante de regresión lineal muestra los background de fondo resultado de la modelación. El mayor valor de background es para el receptor 2 con 29.36 $\mu g/m^3$, este valor considera directamente las emisiones de la vía pavimentada, ubicada a pocos metros, que no se incluyó en la modelación. Los background en receptores están considerandos las fuentes naturales, fuentes cercanas distintas a las que se están considerando o fuentes no identificables (figura 2).

Asimismo se presentan, las concentraciones de PM_{10} obtenidas dentro de la malla de modelación como mapa de contornos, que se construyó a partir de las estimaciones diarias de concentración en cada celda de la malla

ISBN 978-607-8242-11-5

que muestran la dispersión de PM_{10}, adicionalmente se incluye la ubicación de los receptores y la topografía de la región. Además Con el fin de identificar los vientos predominantes en el área de estudio y su influencia en el transporte y dispersión de los contaminantes, se graficaron las rosas de viento para cada día de muestreo (figura 3).

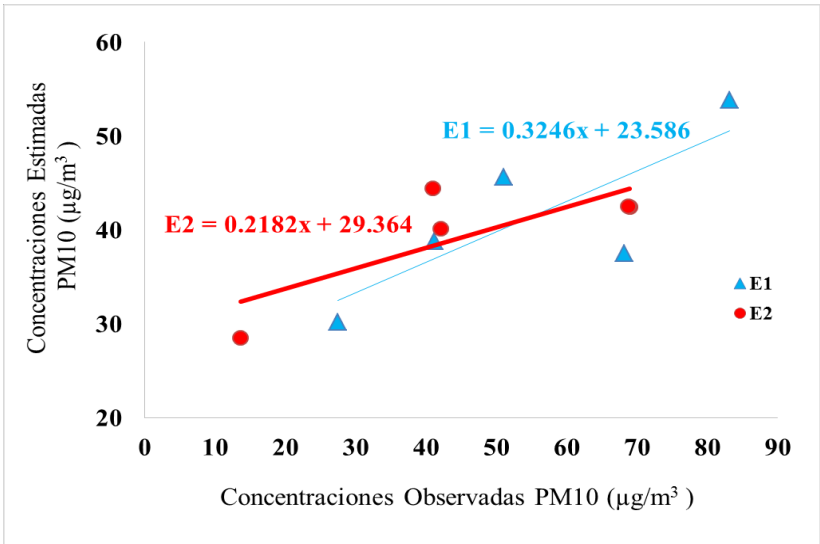
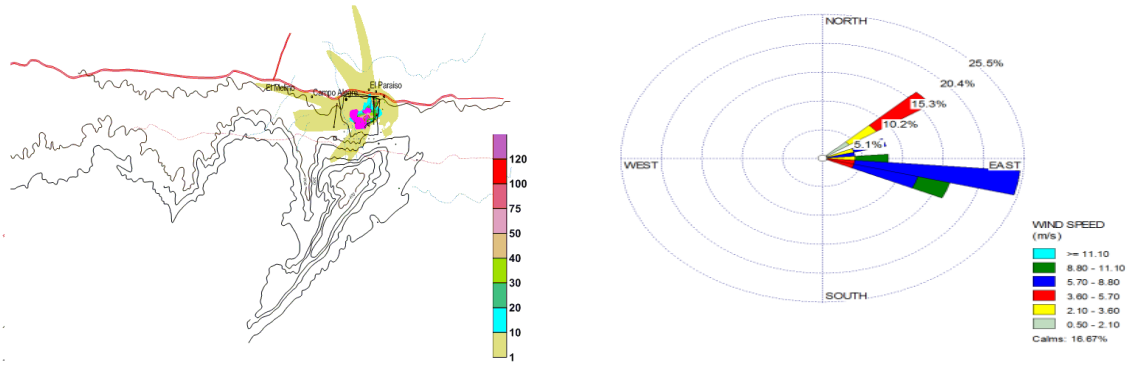


Fig. 2. Concentraciones de PM_{10} con el muestreador de bajo volumen y con la aplicación del modelo Calpuff en los dos receptores.

Del análisis comparativo de las rosas de viento se determina una tendencia frecuente de los vientos durante el día del NE, alcanzando velocidades superiores en horas nocturnas, con velocidades máximas de hasta 11 m/s. En el mapa de concentraciones promedio de PM_{10} se observa que la zona influenciada por las emisiones es toda el área de la cantera, las concentraciones más elevadas se encuentra ubicada en la planta principal de triturado (receptor 1) con concentraciones promedio de 75 µg/m^3, mientras que en el área de influencia indirecta las emisiones de material particulado no exceden los 34,41 µg/m^3 (en el radio de 10 Km.).



ISBN 978-607-8242-11-5

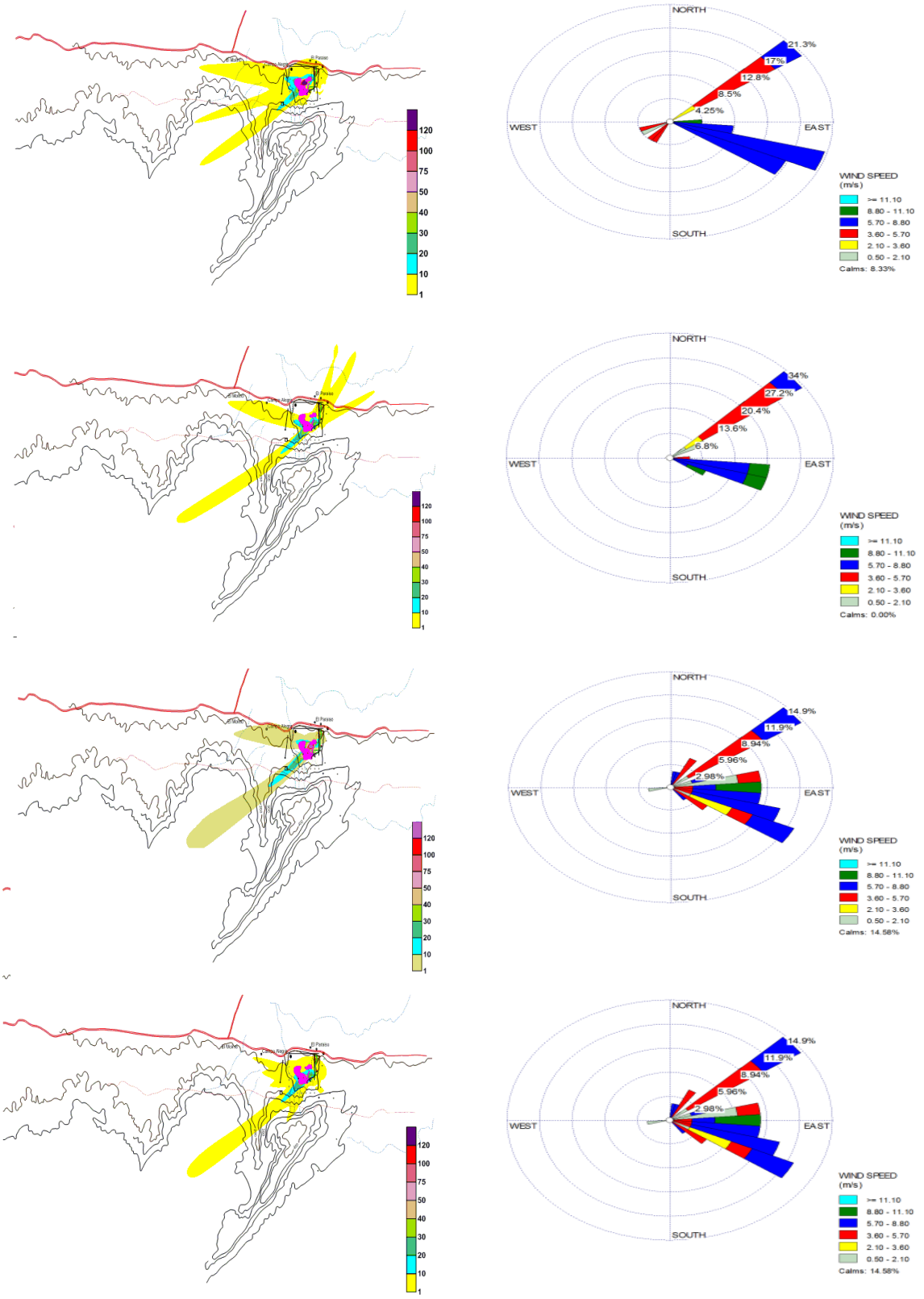


Fig. 3. Campos de concentraciones de PM_{10} modelados con Calpuff

ISBN 978-607-8242-11-5

Si analizamos la resolución 610 de 2010 en el Artículo 4, establece los Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio; para el PM_{10} establece un nivel de 100 $\mu g/m^3$ para 24 horas. Si comparamos la máxima concentración obtenida en el estudio de emisión podemos concluir que no se estaría violando el nivel máximo permisible y estaría en un 16,8 % menor que el estándar legal. Además, se tuvo en cuenta para el análisis de los resultados la concentración y el tiempo de exposición bajo los cuales se debe declarar por parte de las autoridades ambientales competentes colombiana los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia estipulado en el Artículo 10 de la anterior resolución, concluyendo que en los dos receptores estudiados y en todo el área de la cantera M-cielo las concentraciones de PM_{10} no superan los 300 $\mu g/m^3$ por lo que se encuentra en un nivel de Prevención Muy Bajo o simplemente no existe ningún nivel de Prevención.

Así mismo, al interpretar la calidad del aire de la zona utilizando el Índice de Calidad Ambiental reportado por REDEAIRE (Ministerio de salud, 1982), se concluye de manera general que en la zona de estudio predomina una categoría de calidad ambiental BUENA, debido a que las concentraciones registradas dentro del área no superaron los 100 $\mu g/m^3$ estipulados en esa legislación ambiental.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se pueden determinar las siguientes conclusiones: 1) La aplicación del modelo de dispersión CALPUFF junto con el modelo de meteorológico CALMET y la ejecución auxiliar del modelo MM5 permitió simular de manera satisfactoria la dispersión de los contaminantes atmosféricos PM_{10} en el área de la cantera; 2) La modelación permite observar que la concentración promedio de PM_{10} en un radio de 10 Km alcanza los 34,41 $\mu g/m^3$, lo que representa un aporte significativo de este contaminante en el área de estudio, sin embargo; las concentraciones estimadas no exceden los valores permisibles legales de Colombia; 3) Aunque la zona estudiada se encuentra en un nivel de prevención muy bajo y en una categoría de calidad de aire buena, es importante resaltar que el diámetro aerodinámico de la partículas menores a 10 micras liberadas en la cantera pueden influir significativamente salud de sus empleados y en el deterioro de la calidad del aire de la zona.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad de La Guajira por el financiamiento y apoyo para el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

Ahuja, S. Evaluation of MESOPUFF-II-Sox Transport and Deposition in the Great Lakes Region. University of Toledo. (1996).

Arya, S.P., “Air Pollution Meteorology and Dispersion”. North Carolina, USA. p.310. (1998).

Barclay, J., Scire, J. Generic Guidance and Optimum Model Settings for the CALPUFF Modeling System for Inclusion into the “Approved Methods for the Modeling and Assessments of Air Pollutants in NSW, Australia.” (2011).

Baroutian, S., Mohebbi, A., Goharrizi, A.S., “Measuring and modeling particulate dispersion: A case study of Kerman Cement Plant”. J. Hazard. Mater, 136, 468-474 (2006).

Calderon, O.J., Sierra, B.G., “Evaluación Informe programa de Monitoreo de la Calidad de Aire, Radiación térmica, Ruido Ambiental y modelación de la calidad del aire, Complejo Ballena en el Municipio de Manaure la Guajira”. Riohacha, Colombia. (2013).

Chen, C., Tsai, J., Chung, F., Kuo, S., Tseng, K., Kuo, P., Hsieh, L., Tsai, Y.I., “Simulation of PM 10 Source Apportionment at An Urban Site in Southern Taiwan by a Gaussian Trajectory Model”. World Acad. Sci. Eng. Technol. 4, 742-745. (2010).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Dmitry Tartakovsky, Eli Stern b, David M. Broday, Dispersion of TSP and PM10 emissions from quarries in complex terrain. Science of the Total Environment 542 (2016) 946–954

Ghannam, K., El-Fadel, M. Emissions characterization and regulatory compliance at an industrial complex: An integrated MM5/CALPUFF approach. Atmos. Environ. 69, 156–169. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.12.022. (2013).

Ghenai, C., Lin, C.X., "Dispersion modeling of {PM10} released during decontamination activities". J. Hazard. Mater. 132, 58-67. (2006).

Goodrich, L.B., Capareda, S., Powell, J., Student, G., "Quantification of Almond Sweeping Emission Reductions Through Changes In a Sweeper Operation, in: 2007", ASABE Annual International Meeting. Minneapolis. (2007).

Huertas, J. I., Huertas, M. E., Izquierdo, S., & González, E. D. (2012). Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. Journal of environmental management, 93(1), 121-129.

Kumar, A., Dixit, S., Varadarajan, C., Vijayan, A., Masuraha, A. Evaluation of the AERMOD dispersion model as a function of atmospheric stability for an urban area. Environ. Prog. 25, 141–151. doi:10.1002/ep.10129. (2006).

López, M. T. Aplicación del modelo de dispersión CALPUFF para la estimación de concentraciones del PM2.5. Universidad Autónoma De México. p.192. (2009).

MacIntosh, D.L., Stewart, J.H., Myatt, T. a., Sabato, J.E., Flowers, G.C., Brown, K.W Hlinka, D.J., Sullivan, D. a. Use of CALPUFF for exposure assessment in a near-field, complex terrain setting. Atmos. Environ. 44, 262–270. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.09.023. (2010).

Ristic, B., Gunatilaka, A., Gailis, R., "Achievable accuracy in Gaussian plume parameter estimation using a network of binary sensors", Inf. Fusion 25, 42-48. (2015).

Scire, J. S., Strimaitis, D. G., Yamartino, R. J. A user is Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5.0). Earth Tech, Inc., Concord, MA. (2000).

Sullivan, D. a. Use of CALPUFF for exposure assessment in a near-field, complex terrain setting. Atmos. Environ. 44, 262–270. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.09.023. (2010).

Tsuang, B.-J., "Quantification on the source/receptor relationship of primary pollutants and secondary aerosols by a Gaussian plume trajectory model: Part I—theory". Atmos. Environ. 37, 3981-3991. (2003).

Turner, D.B., "Workbook of Atmosphere Dispersion Estimates", 1st ed. Lewis publishers, Chapel Hill, North Carolina. (1994).

United States Environmental Protection Agency (USEPA); Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors (1995). Online. www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/

Verma, M., Sahu, P., Ahmed, S., Bhagoria, J.L., "Analysis of Wind Characteristics in And Around Open Cast Uranium Mine". Int. J. ChemTech Res, 5, 601-609. (2013).

 ISBN 978-607-8242-11-5

DYEDEM 1.0: Programa para el Diseño y Evaluación de Evaporadores de Efectos Múltiples

Pamela M. Pérez-Isaac[1] y Claudio G. Olivera-Fuentes[2]
(1) Coordinación de Ingeniería Química, Universidad Simón Bolívar, AP89000, Caracas 1080, Venezuela
(2) Grupo TADiP, Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia,
Universidad Simón Bolívar, AP89000, Caracas 1080, Venezuela
e-mail: claudio@usb.ve

Resumen

En este trabajo se presenta DYEDEM 1.0, una nueva aplicación basada en el algoritmo “MGLJK” (modified and generalized Lambert/Joye/Koko) desarrollado por Jancew-Cudier y Olivera-Fuentes (2005), programada sobre la base de Matlab®, pero compilada para ejecutarse en forma autónoma en cualquier ordenador con sistema operativo Windows®. La herramienta resuelve problemas de diseño (cálculo del área de intercambiadores para una concentración requerida del producto) y de evaluación (cálculo de la concentración del producto para intercambiadores de áreas conocidas) con un número cualquiera de efectos. Es aplicable a disoluciones acuosas de hidróxido de sodio, azúcar (jugo de caña), licor negro de pulpa de papel, salmuera (agua de mar), jugos de frutas (uva, naranja y piña) y leche, incorporando a tales fines las ecuaciones para estimación de las propiedades físico-químicas pertinentes: temperatura de ebullición, presión de vapor y entalpía del agua, elevación del punto de ebullición (EPE) y entalpía de las disoluciones. Los resultados son exportables a Excel®, y son consistentes con los reportados en casos tomados de la literatura.

Palabras clave: evaporadores de efectos múltiples, algoritmo lineal, hidróxido de sodio, azúcar, licor negro, salmuera, jugos de frutas, leche.

DYEDEM 1.0: Program for the Design and Rating of Multiple-Effect Evaporators

Abstract

This work presents DYEDEM 1.0, a new application based on the "MGLJK" (modified and generalized Lambert/Joye/Koko) algorithm developed by Jancew-Cudier and Olivera-Fuentes (2005), programmed on Matlab®, but compiled to run stand-alone on any Windows® based computer. The tool solves design (calculation of the heat exchange area for a given concentration of the product) and rating (calculation of the product concentration for known heat exchange areas) problems for any number of effects. It is applicable to aqueous solutions of sodium hydroxide, sugar (cane juice), black liquor from paper pulp, brine (seawater), fruit juices (grape, orange and pineapple) and milk, incorporating equations for estimating the relevant physicochemical properties: boiling temperature, vapor pressure and water enthalpy, boiling elevation (EPE) and enthalpy of the solutions. The results are exportable to Excel®, and are consistent with those reported in cases taken from literature.

Keywords: multiple effect evaporators, linear algorithm, sodium hydroxide, sugar, black liquor, brine, fruit juices, milk

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La operación unitaria conocida como evaporación consiste en la remoción por ebullición de un solvente volátil que forma parte de una disolución o suspensión relativamente diluida de un sólido no volátil. Los propósitos para su uso son diversos e incluyen la producción de concentrados, la eliminación de impurezas o contaminantes por cristalización selectiva, la concentración de una corriente previa a un proceso de secado, etc. En la gran mayoría de las aplicaciones industriales, el medio de calentamiento es vapor de agua de alta temperatura y presión, el solvente es agua y el producto valioso es el residuo no volátil o licor concentrado. La operación demanda un alto consumo energético, mayoritariamente para suministrar el calor de vaporización del solvente, y rara vez se lleva a cabo en un único cuerpo de evaporación. Antes bien, para mejorar la economía del proceso, se emplean dos o más evaporadores ("efectos") en serie que operan a presiones progresivamente menores, de forma que solo el primer efecto consume vapor de procedencia externa, y cada uno de los demás es calentado por los vapores del efecto que le precede. La invención de la operación en efectos múltiples se atribuye tradicionalmente a Rillieux en 1843 (American Chemical Society, 2002), aunque Badger (1928) hizo notar que el uso del mismo esquema está documentado en años anteriores.

El modelo matemático para evaporadores de múltiples efectos en estado estacionario involucra un sistema de ecuaciones no lineales que incluyen los balances de masa total, masa de soluto y energía, las relaciones de transferencia de calor, y la dependencia de las propiedades termodinámicas, tales como presiones de vapor y entalpías, con la temperatura y composición de las disoluciones. En la literatura se han propuesto diversos métodos para la resolución de estas ecuaciones, pero la mayoría de ellos poseen limitaciones en valor didáctico o en flexibilidad en cuanto a estrategias operacionales, como por ejemplo en la secuencia de flujo de los licores, donde cualquier cambio genera una completa modificación en el arreglo de las ecuaciones (Bhargava et al., 2008). El método tradicional ("papel y lápiz") de ensayo y error presentado en diversos textos de operaciones unitarias (Brown et al., 1950; Foust et al., 1980; McCabe et al., 1991; Geankoplis, 1993; Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2003) depende fuertemente del uso de heurísticas derivadas de la experiencia e intuición del diseñador, y es impráctico salvo para un número pequeño de efectos. El método de Newton-Raphson multivariable utilizado por Holland (1981) es computacionalmente eficiente, aunque complejo, y el autor realiza simplificaciones innecesarias en las propiedades termodinámicas.

Un avance notable fue logrado por Lambert et al. (1987), Koko & Joye (1987) y Joye & Koko (1988), quienes notaron que el sistema de ecuaciones es bilineal, es decir contiene productos de dos incógnitas (por ejemplo, flujo másico y entalpía de las corrientes). Con una selección adecuada de uno de los factores de cada producto como variable de ruptura (por ejemplo, entalpías), las ecuaciones se reducen a un sistema lineal que puede ser resuelto con técnicas estándares. El procedimiento es iterativo, y los autores propusieron que los estimados iniciales se obtuvieran suponiendo que todos los efectos generan la misma cantidad de vapor, aproximación típica del método tradicional de ensayo y error, pero improbable en la operación real. Además, consideraron solo trenes de evaporación con “alimentación hacia atrás” (flujo en contra-corriente de líquidos y vapores), reconociendo que el algoritmo debía ser reformulado para otros esquemas de operación.

Jancew-Cudier & Olivera-Fuentes (2005) modificaron y generalizaron el método de Lambert, Joye y Koko. Numerando, como es habitual, los efectos en el orden de avance de los vapores, escribieron las ecuaciones de balance y transferencia para el i-ésimo efecto, que recibe corrientes de licor diluido F_i y vapor de calentamiento V_{i-1}, y utiliza el calor Q_i cedido por dicho vapor en el intercambiador para producir solvente evaporado V_i y licor más concentrado L_i, como :

Balance de masa global: $F_i = L_i + V_i$ (1)

Balance de masa de soluto: $F_i \cdot X_{Fi} = L_i \cdot X_i$ (2)

Balance de entalpía: $Q_i = V_{i-1} \cdot \lambda_{i-1} = L_i \cdot h_i + V_i \cdot H_i - F_i \cdot h_{Fi}$ (3)

Transferencia de calor: $Q_i = U_i \cdot A_i \cdot (T_{i-1} - EPE_{i-1} - T_i)$ (4)

donde X es fracción másica de soluto, h y H son entalpías de líquido y vapor respectivamente, λ es la entalpía de vaporización del solvente, U es el coeficiente global de transferencia de calor y A es el área de intercambio. Estas ecuaciones suponen estado estacionario e incluyen el efecto de la elevación del punto de ebullición (EPE) de las disoluciones de sólidos no volátiles, consistente en que la temperatura de ebullición de la disolución es mayor que la del solvente puro, por lo cual el vapor es generado en el efecto $i-1$ a una temperatura mayor que aquella a la cual condensa en el efecto i. La única suposición adicional, implícita en la Ec. (3), es que los calores sensibles asociados al enfriamiento del vapor desde que entra al intercambiador hasta que empieza a condensar, y a cualquier posible subenfriamiento del condensado, son despreciables frente al calor latente. Esta aproximación, aunque no imprescindible, es también habitual en el modelado de evaporadores, ya que la ligera subestimación

 ISBN 978-607-8242-11-5

del calor cedido por el vapor actúa como factor de seguridad en el dimensionamiento de los equipos. Para simplificar el sistema, los autores notaron que las composiciones de líquido aparecen explícitamente solo en la ecuación (2), y las temperaturas de operación solo en la ecuación (4), de manera que ambos subsistemas de ecuaciones pueden desacoplarse del conjunto, y resolverse en forma directa (incluyendo los flujos de calor) una vez que las restantes incógnitas han sido evaluadas. Además, los flujos de vapor pueden reemplazarse en términos de los de líquidos a partir de la ecuación (1). La contribución principal, sin embargo, consistió en mostrar que, en la forma escrita, las ecuaciones son válidas para cualquier tipo de conexión entre los efectos, necesitando solo identificar de cuál efecto proviene (L) la corriente de entrada a cada efecto (F). Así por ejemplo, en "alimentación hacia adelante", $F_1 = W$ es la corriente de entrada al proceso, $L_N = S$ es el producto final, y de resto $F_i = L_{i-1}$, en tanto que en alimentación hacia atrás, $F_N = W$ es la corriente de entrada al proceso, $L_1 = S$ es el producto final, y de resto $F_i = L_{i+1}$). La generalización se expresa mediante una submatriz Booleana de conectividades, que equivale a las relaciones:

Alimentación: $F_{k(1)} = W$ (5)

Conexiones: $L_{k(m)} = F_{k(m+1)} \quad , \quad m = 1, \cdots, N-1$ (6)

Producto: $L_{k(N)} = S$ (7)

siendo $\{k(1), k(2), \cdots k(N)\}$ la numeración de los efectos en el orden de flujo de los licores, por ejemplo $\{2,3,1\}$ para un evaporador de triple efecto con alimentación mixta. La matriz linealizada se reduce así a solo las ecuaciones de balance de energía y de conectividad, y sus elementos son las entalpías de líquido, vapor y cambio de fase (submatriz de energía) y deltas de Kronecker (submatriz de conectividades). Los estimados iniciales de las entalpías se obtienen con el método de Esplugas y Mata (1981), basado en despreciar las $EPEs$ y suponer que el flujo de calor es igual en todos los efectos, lo que permite una solución algebraica directa de todo el sistema. Este "método Joye/Koko/Lambert modificado y generalizado" fue implementado para tres efectos en una hoja de cálculo de Excel®, y hasta para 20 efectos en una aplicación en una versión ya descontinuada de VisualBasic®, y en ambos casos solo para evaporación de disoluciones acuosas de hidróxido de sodio.

Muchos otros autores han reportado modelos para simulación de evaporadores de efectos múltiples, pero limitados a disoluciones y configuraciones de flujo específicas, y orientados mayormente al dimensionamiento de los equipos, como por ejemplo Ugrin y Urbicain (1999), Ettouney y El-Dessouky (1999), Tarricone y Bonnet (2001), Kaya y Sarac (2007), Ávalo y Varela (2008), Yanniotis (2008), Bhargava et al. (2008), Khademi et al. (2009), Jorge et al. (2010), Galatro et al. (2011), Khanam y Mohanty (2011), Kumar et al. (2013), Ruan et al. (2015), entre otros. Un tratamiento más amplio fue presentado por Irahola (2007), quien desarrolló una aplicación computacional que incluye además la evaluación económica del proceso; el autor ofrece pocos detalles sobre los algoritmos y procedimientos numéricos utilizados, y el programa no parece ser de libre acceso. Más recientemente, Alemán (2013) elaboró una hoja de cálculo en Excel® para dimensionar evaporadores para una variedad de disoluciones de importancia industrial, empleando el algoritmo tradicional de ensayo y error propuesto en los textos docentes; este desarrollo es propiedad de una firma de ingeniería y no está disponible abiertamente.

Salvo excepciones, tampoco los simuladores comerciales de procesos se prestan fácilmente para el análisis de plantas de evaporación, especialmente en cuanto se refiere a la industria de alimentos, debido principalmente a la carencia de modelos adaptados a las características operativas de tales procesos, y de modelos termodinámicos que describan las propiedades de los componentes y sus mezclas, tomando en cuenta la complejidad y las variaciones biológicas de los alimentos procesados. El uso de estos simuladores para la resolución de problemas de evaporadores requiere del usuario la adquisición o el desarrollo de los paquetes apropiados (VanAntwerp et al., 2009; Madoumier et al., 2015). La aparición en el mercado de algunos simuladores específicos para evaporación (Simprosys, ProcesSimO, ERI SYM) es un indicio del limitado desempeño de los simuladores de tipo más general para estos procesos (VanAntwerp et al., 2009).

En consideración a lo anterior, se presenta en este trabajo el programa DYEDEM 1.0 para diseño (cálculo del área de transferencia de calor para una concentración requerida del producto) y evaluación (cálculo de la composición del producto para evaporadores ya existentes) de evaporadores multiefecto. Esta herramienta ha sido elaborada en Matlab®, aprovechando sus rutinas internas de solución de sistemas de ecuaciones lineales, y compilada para que pueda ser ejecutada en cualquier computador con sistema operativo Windows®, aun si no tiene instalado dicho "software". DYEDEM 1.0 emplea el algoritmo propuesto por Jancew-Cudier y Olivera-Fuentes (2005), y permite modelar evaporadores sin restricción en el número de efectos ni en su esquema de interconexión. Incluye las correlaciones, desarrolladas para este fin o extraídas de la literatura, para manejar diversas disoluciones acuosas de interés industrial: hidróxido de sodio, licor negro del procesamiento de pulpa de papel, salmuera o agua de mar, jugo de caña de azúcar, leche y jugos de naranja, de uva y de piña.

 ISBN 978-607-8242-11-5

EL PROGRAMA DYEDEM 1.0

Interfaz gráfica de usuario

En la Figura 1 se muestra la ventana de ingreso de datos del problema. El usuario puede escoger entre el sistema internacional (ilustrado en la Figura 1) y el sistema anglosajón (Btu, lb, ft, psi, ^{o}R) de unidades, y debe especificar el número de efectos, la secuencia de flujo de líquidos, los coeficientes globales de transferencia de calor, la presión del último efecto, las condiciones del vapor de calentamiento alimentado al primer efecto (temperatura o presión), el flujo másico, la temperatura y la composición de la alimentación líquida al proceso. Adicionalmente, debe ingresar la concentración deseada del producto si el problema es de diseño, o el área de transferencia de calor si es de evaluación. En ambos tipos de problema, como es tradicional, se supone que el área es igual para todos los efectos. Se incluye la opción de resolver el problema excluyendo el efecto de las *EPEs*. Los resultados obtenidos, incluyendo flujos, temperaturas y composiciones de todas las corrientes intermedias, son exportados a una hoja de cálculo en Excel®.

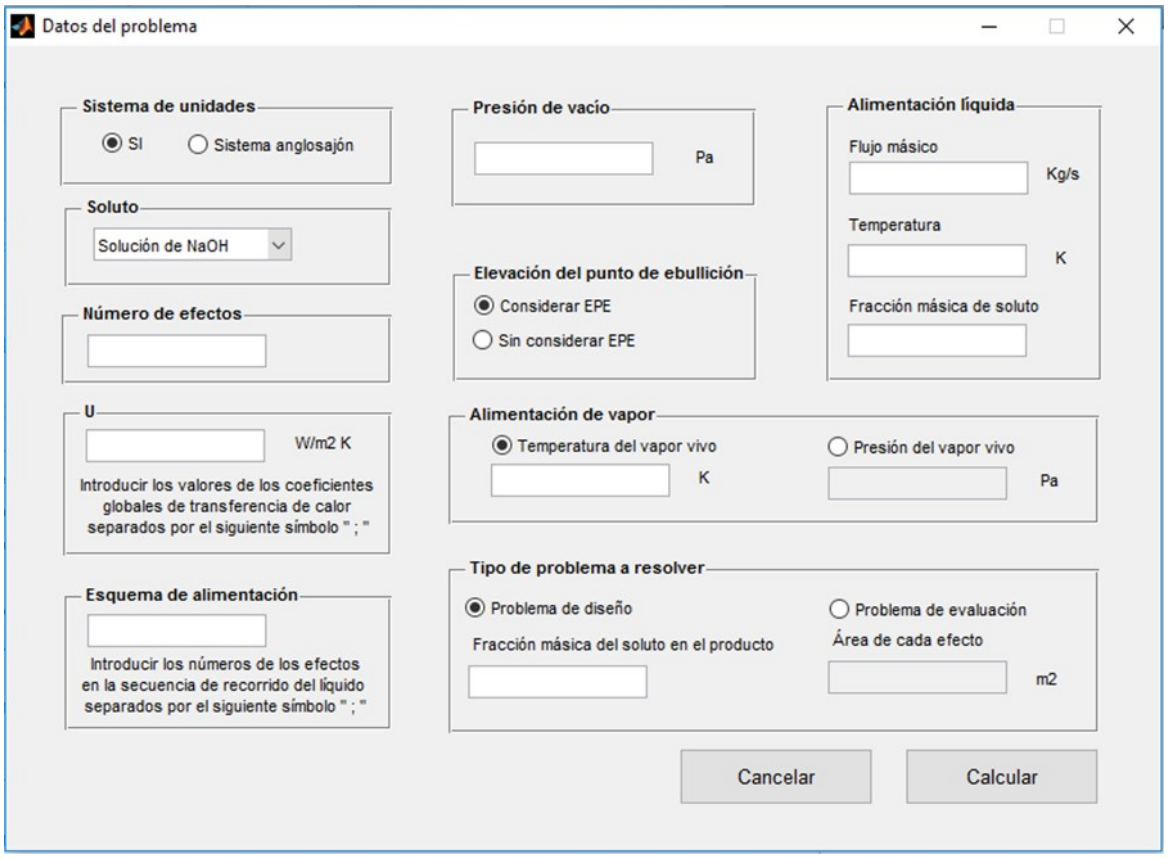


Fig. 1: Interfaz gráfica de entrada de datos.

Modelos termodinámicos

El programa contiene las ecuaciones para estimación de las propiedades físico-químicas pertinentes: temperatura de ebullición, presión de vapor y entalpía del agua, y elevación del punto de ebullición (EPE) y entalpía de las diferentes disoluciones. Las propiedades del agua pura se tomaron de tablas de vapor y se correlacionaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_{sat} = 6894.757 \cdot \exp(0.1507288 \cdot \theta^3 - 1.538735 \cdot \theta^2 - 5.371399 \cdot \theta + 13.59756) \tag{8a}$$

$$\text{donde } \theta \equiv \frac{5000}{9 \cdot T} \quad , \quad 273.15 \leq T \leq 394.25 \tag{8b}$$

$$T_{sat} = \frac{5000}{9 \cdot (3.6492 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3 - 8.8495 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^2 - 1.10617 \cdot \beta + 1.7812)} \tag{9a}$$

$$\text{donde } \beta \equiv \log(1.45039 \cdot 10^{-4} \cdot P) \quad , \quad 273.15 \leq T_{sat} \leq 673.4 \tag{9b}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

$$H = -8.9841 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + 7.4000 \cdot T^2 - 211.4552 \cdot T = 2191129.2496 \ , \ 280.13 \leq T \leq 478.91 \quad (10)$$

$$\lambda = -1.2639 \cdot 10^{-2} \cdot T^3 + 10.8247 \cdot T^2 - 5457.8442 \cdot T + 3443040.5363 \quad (11)$$

para T en K, P en Pa, H y λ en J/kg. Las correlaciones para las propiedades de las disoluciones se tomaron de la literatura, como se reseña en la Tabla 1.

Tabla 1: Correlaciones para estimación de las propiedades termodinámicas de las disoluciones.

Soluto	*EPE*	*Entalpía*
Hidróxido de sodio	Holland (1981)	Fernández et al. (1998)
Licor negro	Kumar et al. (2013)	Bhargava et al. (2008), Costa y Lima (2003)
Salmuera	El-Dessouky y Ettouney (2002)	Sparrow (2003)
Jugo de caña de azúcar	Chen y Hernández (1997)	Chantasiriwan (2015) levemente modificada
Leche	Winchester (2000)	Nishitani y Kunugita (1979)
Jugo de naranja	Angeletti y Moresi (1983), Ruan et al. (2015)	Muramatsu et al. (2010), Ruan et al. (2015)
Jugo de uva		
Jugo de piña		

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Casos de diseño

Para validar el programa, se resolvieron casos de diseño hallados en la literatura. La precisión de convergencia en el área de intercambio de calor se fijó en 0.01 m^2 como criterio general del programa. Los casos estudiados se resumen en la Tabla 2, que incluye el número de iteraciones efectuadas y la diferencia porcentual en el área obtenida con respecto a los resultados publicados. Estas diferencias están dentro de los márgenes esperados, tomando en cuenta que (i) ninguno de los métodos de resolución empleados por los diferentes autores coincide con el propuesto en este trabajo; (ii) los problemas provenientes de textos docentes, resueltos por el método tradicional de ensayo y error, utilizan valores de entalpías y temperaturas de ebullición leídas de gráficas, con la consiguiente incertidumbre de apreciación, y realizan el número mínimo de iteraciones suficiente para ilustrar el procedimiento de cálculo, sin llegar hasta la precisión de convergencia exigida en este trabajo; (iii) muchos autores introducen simplificaciones en la termodinámica de las disoluciones, tales como despreciar las $EPEs$ o la dependencia de las entalpías de las disoluciones con su composición o temperatura, y en algunos casos incluso errores conceptuales. Es razonable por lo tanto suponer que los presentes resultados pueden ser hasta más confiables que los reportados en cada referencia. Debe hacerse notar que los ejemplos que involucran un solo efecto podrían tener solución directa, no iterativa, pero se decidió no programar un código aparte para ellos, sino resolverlos con el mismo algoritmo que los sistemas multiefecto. Como se puede ver en la Tabla 2 (casos 2, 4, 7 y 9), no requieren más de tres iteraciones, y el tiempo de cómputo es tan pequeño que no se justifica una programación distinta.

Tabla 2: Comparación de resultados para casos de diseño

	Disolución	*Efectos*	*Esquema*	*Iteraciones*	ΔA %	*Referencia*
1	Hidróxido de sodio	3	1,2,3	5	-4.0	Foust et al. (1980)
2	Hidróxido de sodio	1	1	3	-2.9	Holland (1981)
3	Hidróxido de sodio	3	1,2,3	6	-4.8	Holland (1981)
4	Hidróxido de sodio	1	1	3	-0.4	McCabe et al. (1991)
5	Hidróxido de sodio	3	2,3,1	6	0.4	McCabe et al. (1991)
6	Licor negro	6	5,6,4,3,2,1	8	-6,8	Kumar et al. (2013)
7	Salmuera	1	1	3	-0.1	Morales Blancas (2016)
8	Salmuera	6	1,2,3,4,5,6	4	-4.7	El-Dessouky y Ettouney (2002)
9	Jugo de caña	1	1	3	0.4	Morales Blancas (2016)
10	Jugo de caña	3	1,2,3	5	0.5	Geankoplis (1993)

Casos de evaluación

La resolución de los problemas de evaluación se realiza suponiendo una concentración del producto, resolviendo el problema de diseño resultante, y comparando el área obtenida con la especificada por el usuario. Inicialmente, la fracción másica de salida se fija en el rango $X_W < X_S < 1$ y se varía incrementalmente hasta que dos valores sucesivos del área acotan el valor estipulado como dato. Una vez hallado este intervalo,

ISBN 978-607-8242-11-5

la iteración continúa por el método de la secante hasta dar el área pedida con una diferencia inferior a 0.01 m^2. Como una forma de verificar la consistencia interna de los cálculos, se resolvieron primero los mismos casos de la Tabla 2, introduciendo como dato el área obtenida en el caso de diseño, y resolviendo para hallar la composición del producto. En todos los casos, los resultados fueron plenamente consistentes, coincidiendo no solo el dato de cada caso de diseño con el resultado del correspondiente caso de evaluación, y viceversa, sino todos los valores de las variables intermedias. Seguidamente, se resolvieron nuevamente los mismos problemas de evaluación, pero esta vez tomando como dato el área obtenida por los autores respectivos. Los resultados se resumen en la Tabla 3, que amerita los mismos comentarios que para los problemas de diseño. Las iteraciones requeridas son obviamente mayores para evaluación que para diseño, dada la existencia de un doble lazo de iteración, pero aun así no hay diferencia perceptible en el tiempo de cómputo. Tal como en la Tabla 2, la mayor diferencia se observa en el problema 6, y puede atribuirse a la suposición de los autores de que la entalpía de las disoluciones es la misma del agua pura, vale decir independiente de su composición.

Tabla 3: Comparación de resultados para casos de evaluación

	Disolución	*Efectos*	*Esquema*	*Iteraciones*	ΔX_S %	*Referencia*
1	Hidróxido de sodio	3	1,2,3	11	3.9	Foust et al. (1980)
2	Hidróxido de sodio	1	1	8	1.8	Holland (1981)
3	Hidróxido de sodio	3	1,2,3	12	2.0	Holland (1981)
4	Hidróxido de sodio	1	1	18	0.1	McCabe et al. (1991)
5	Hidróxido de sodio	3	2,3,1	6	-0.2	McCabe et al. (1991)
6	Licor negro	6	5,6,4,3,2,1	8	10.1	Kumar et al. (2013)
7	Salmuera	1	1	7	0.5	Morales Blancas (2016)
8	Salmuera	6	1,2,3,4,5,6	11	3.3	El-Dessouky y Ettouney (2002)
9	Jugo de caña	1	1	7	-0.4	Morales Blancas (2016)
10	Jugo de caña	3	1,2,3	11	-1.5	Geankoplis (1993)

Otros casos

Un caso interesante que permite ejemplificar la utilidad adicional del programa es el problema propuesto por McCabe et al. (1991), que consiste en un evaporador de triple efecto con alimentación 1,2,3 para el cual se especifican tanto el área de intercambio como la composición del producto, y se pide determinar el máximo flujo de alimentación que puede ser procesado. La solución publicada (Smith y Harriott, sin fecha) desprecia las *EPEs* y supone que la capacidad calórica de todas las corrientes es constante. En el presenta trabajo, el problema fue resuelto como un caso de diseño, introduciendo como datos el área y diferentes valores del flujo de alimentación hasta reproducir la composición asignada del producto, y también como un caso de evaluación, introduciendo como datos la composición del producto y diferentes valores del flujo de alimentación hasta reproducir el área asignada. Una vez más, los resultados de ambos casos coincidieron plenamente entre sí, y el flujo máximo procesable difirió del publicado en 3.1%.

El programa puede ser empleado para realizar estudios de sensibilidad e identificar relaciones funcionales entre las diferentes variables de interés. Pérez Isaac (2017) ha mostrado, por ejemplo, que el área de diseño cambia con la composición del producto en forma aproximadamente cuadrática, y en algunos sistemas en forma casi lineal, lo cual valida la técnica de interpolación empleada en casos de evaluación. El consumo de vapor vivo, en cambio, crece aproximadamente en forma cúbica con la concentración del producto. Para sistemas sin *EPE* o con *EPEs* muy pequeñas, la composición del producto es muy sensible a variables como el área de intercambio o el flujo de alimentación, lo cual sugiere que en sistemas de este tipo es más crítico controlar factores tales como la carga al proceso y el ensuciamiento de los intercambiadores, con el fin de asegurar la estabilidad de la operación y la calidad del producto. Finalmente, las disoluciones de solutos iónicos, como el hidróxido de sodio, presentan mayores *EPEs* y requieren mayores temperaturas de operación, área de intercambio y consumo de vapor vivo que las de otros solutos, como el licor negro.

La aplicación puede también servir de base para estudios que, adecuadamente complementados con técnicas de estimación de costos, ayuden a optimizar el número de efectos o la conectividad entre ellos. Se muestra en la Figura 2 el área de intercambio y el consumo de vapor requeridos para el procesamiento de licor negro en un evaporador de seis efectos, correspondiente al problema 6 de las Tablas 1 y 2, pero con todas las posibles conectividades. Puesto que los costos fijos de inversión dependen del tamaño de los evaporadores, mientras que los costos recurrentes de operación están asociados al consumo de vapor de calentamiento, se puede inferir de esta gráfica que los esquemas potencialmente más económicos son el de alimentación hacia adelante (123456) y uno mixto (543216), aunque a este último deberían agregarse los costos adicionales por la necesidad de bombear algunos de los líquidos en contra del gradiente de presión entre los efectos. Esta es por supuesto una conclusión cualitativa y muy preliminar, pero ilustra la potencial utilidad del programa, dada su capacidad de analizar con igual eficacia cualquier esquema de conexión.

ISBN 978-607-8242-11-5

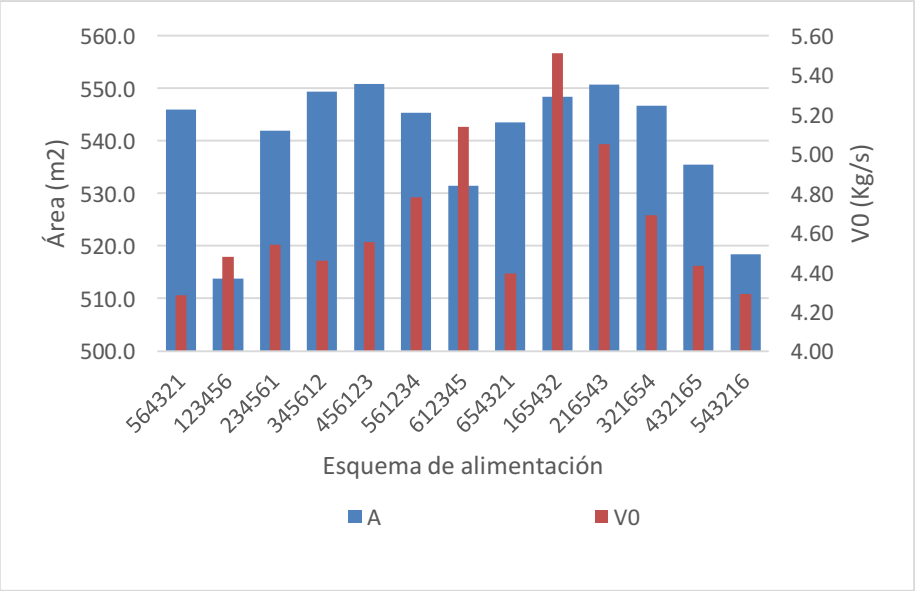


Figura 2: Variación del área y del consumo de vapor con diferentes esquemas de alimentación para el procesamiento de licor negro en un evaporador de seis efectos.

CONCLUSIONES

El programa DYEDEM 1.0, basado en el algoritmo de Jancew-Cudier & Olivera-Fuentes (2005), permite resolver problemas de diseño y evaluación de evaporadores de múltiples efectos en estado estacionario para diversas disoluciones de importancia industrial, sin restricciones en cuanto al número de efectos ni a su forma de interconexión. Esta aplicación programada en Matlab®, que puede ser instalada y usada de forma independiente en cualquier computador con sistema operativo Windows®, cuenta con una amigable interfaz gráfica de usuario y exporta los resultados a una hoja de cálculo en Excel®. El programa ha sido validado interna y externamente por comparación con un número de casos estudiados en la literatura, y más allá de la resolución inmediata de problemas del tipo mencionado, puede constituir una herramienta de apoyo para estudios de sensibilidad de estos sistemas y para la optimización de las estrategias de diseño u operación de los mismos. DYEDEM 1.0 es un "software" no comercial, desarrollado con fines netamente académicos, y puede ser obtenido de los autores en un archivo ejecutable de instalación, que incluye el conjunto de librerías del componente denominado "Matlab Compiler Runtime (MCR)", y también en código fuente, acompañado de un manual de uso e instrucciones para agregar otros solutos o refinar las correlaciones termodinámicas para los ya incluidos.

REFERENCIAS

Angeletti, S. y M. Moresi, *"Modelling of multiple-effect falling-film evaporators",* J. Food Technol. 18, 539-563 (1983).

Alemán, M., "*Elaboración de una hoja de cálculo para el diseño de evaporadores de múltiples efectos*", Informe de Pasantía Industrial en Ingeniería Química, Universidad Simón Bolívar, Caracas (2013).

American Chemical Society, "*Norbert Rillieux and a revolution in sugar processing"*, ACS Office of Communications, New Orleans (2002).

Ávalo, B. y A. Varela, *"Modeling and simulation of a triple effect evaporator for the concentration of natural juices"*, Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia 31, 151-158 (2008).

Badger, W.L., "*The first multiple-effect evaporator*", Ind. Eng. Chem. 20 (1), 55 (1928).

Bhargava, R., S. Khanam, B. Mohanty y A.K. Ray, "*Simulation of flat falling film evaporator system for concentration of black liquor*", Comput. Chem. Eng., 32 (12), 3213-3223 (2008).

Brown, G.G., A.S. Foust, D.L. Katz, R. Schneidewind, R.R. White, W.P. Wood, J.T. Banchero, G.M. Brown, L.E. Brownell, J.J. Martin y J.L. York, "*Unit Operations*", Wiley, New York (1950).

Chantasiriwan, S., "Optimum surface area distribution in co-current multiple-effect evaporator", *J. Food Eng.* 161, 48-54 (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Chen, C S. y E. Hernandez, "*Design and Performance Evaluation of Evaporation"*, Cap. 6 en Rotstein E., R.P. Singh y J.K. Valentas (Eds.), *"Handbook of Food Engineering Practice"*, CRC Press, New York (1997).

Costa, A.O.S. y E.L. Lima, *"Modelling and control of an industrial multiple-effect evaporator system",* Can. J. Chem. Eng. 81 (5), 1032-1040 (2003).

El-Dessouky, H.T. y H.M. Ettouney, "*Fundamentals of Salt Water Desalination*", Elsevier, Amsterdam (2002).

Esplugas, S. y L. Mata, *"Calculator design of multistage evaporators"*, Chem. Eng. 59-61 (Febrero 7, 1983).

Ettouney, H.M. y H. El-Dessouky, *"A simulator for thermal desalination processes",* Desalination 125, 277-291 (1999).

Fernández, C.V., J.R. Marcano y C.G. Olivera-Fuentes, "*Diagrama entalpía-concentración en unidades SI para el sistema hidróxido de sodio-agua*", Memorias de las X Jornadas Científico-Técnicas de Ingeniería de la Universidad del Zulia, Maracaibo, vol. 2, QUI-20–QUI-27 (1998).

Foust, A.S., L.A. Wenzel, C.W. Clump, L. Maus y L.B. Andersen, "*Principles of Unit Operations*", 2a Ed., Wiley, New York (1980).

Galatro, G., E. Verruschi y R. Guillen, *"Model and optimization of a multi-effect evaporator of sugarcane juice: Energy consumption and inversion losses"*, Chem. Eng. Trans. 24, 361-366 (2011).

Geankoplis, C.J., "*Transport Processes and Unit Operations*", Prentice-Hall International, New Jersey (1993).

Holland, C.D., *"Fundamentos y Modelos de Procesos de Separación"*, Prentice-Hall Internacional, Bogotá (1981).

Ibarz, A. y G.V. Barbosa-Cánovas, "*Unit Operations in Food Engineering*", CRC Press, Boca Raton (2003).

Irahola, J.A., *"Aplicación para formular y resolver modelos matemáticos de sistemas de evaporación multiefecto"*, Inf. Tecnol. 18 (2), 37-42 (2007).

Jancew-Cudier, A. y C. Olivera-Fuentes, "*A simplified and generalized method to size multiple-effect evaporator systems with any feed scheme*", Proceedings of the 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, Rio das Pedras, Brasil (2005).

Jorge, L.M.M., A.R. Righetto, P.A. Polli, O.A.A. Santos y R. Maciel Filho, "Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system", *J. Food Eng.* 99 (3), 351-359 (2010).

Joye, D.D. y F.W. Koko, *"A simpler way to tame multiple-effect evaporators"*, Chem. Eng. Educ. 52-56 (Winter 1988).

Kaya, D. y H.I. Sarac, *"Mathematical modeling of multiple effect evaporators and energy economy"*, Energy 32 (6), 1536-1542 (2007).

Khademi, M.H., M.R. Rahimpour y A. Jahanmiri, *"Simulation and optimization of a six-effect evaporator in a desalination process"*, Chem. Eng. Process. 48, 339-34 (2009).

Khanam, S. y B. Mohanty, *"Development of a new model for multiple effect evaporator system"*, Comput. Chem. Eng. 35, 1983-1993 (2011).

Koko, F.W. y D.D. Joye, *"Design calculations for multiple-effect evaporators. 2. Comparison of linear and nonlinear methods"*, Ind. Eng. Chem. Res. 26 (1), 104-107 (1987).

Kumar, D., V. Kumar y V.P. Singh, *"Modeling dynamic simulation of mixed feed multi-effect evaporators in paper industry"*, Appl. Math. Model. 37, 384-397 (2013).

Lambert, R.N., D.D. Joye y F.W. Koko, *"Design calculations for multiple-effect evaporators. 1. Linear methods",* Ind. Eng. Chem. Res. 26 (1), 100-104 (1987).

Madoumier, M, C. Azzaro-Pantel, G. Tanguy y G. Gésan-Guiziou, *"Modelling the properties of liquid foods for use of process flowsheeting simulators: Application to milk concentration"*, J. Food Eng. 164, 70-89 (2015).

McCabe, W.L., J.C. Smith y P. Harriott, "*Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*", 4a Ed., McGraw-Hill, Madrid (1991).

Morales Blancas, E.F., *"Guía de problemas resueltos I: Evaporadores de efecto simple"*, Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL), Universidad Austral de Chile (sin fecha). Recuperado el 10 de octubre de 2016 de http://studylib.es/doc/6798857/gu%C3%ADa-problemas-resueltos---evaporadores-efecto-simple

 ISBN 978-607-8242-11-5

Muramatsu, Y., E. Sakaguchi, T. Orikasa, y A. Tagawa, *"Simultaneous estimation of the thermophysical properties of three kinds of fruit juices based on the measured result by a transient heat flow probe method"*, J. Food Eng. 96 (4), 607-613 (2010).

Nishitani, H. y E. Kunugita, *"The optimal flow-pattern of multiple effect evaporator system"*, Comput. Chem. Eng. 3 (1-4), 261-268 (1979).

Pérez Isaac, P.M., *"Diseño y evaluación de evaporadores de múltiples efectos utilizando algoritmos lineales"*, Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería Química, Universidad Simón Bolívar, Caracas (2017).

Ruan, Q., H. Jiang, M. Nian y Z. Yan, *"Mathematical modeling and simulation of countercurrent multiple effect evaporator for fruit juice concentration"*, J. Food Eng. 146, 243-251 (2015).

Smith, J.C. y P. Harriott, *"Solutions Manual to Accompany Unit Operations of Chemical Engineering"*, 7a Ed., McGraw-Hill, New York (sin fecha).

Sparrow, B., *"Empirical equations for the thermodynamic properties of aqueous sodium chloride"*, Desalination 159 (2), 161-170 (2003).

Tarricone, G. y J. Bonnet, "*Simulación de una planta de evaporadores de múltiples efectos"*, Miniproyecto de Ingeniería Química, Universidad Simón Bolívar, Caracas (2001).

Ugrin, E. y M.J. Urbicain, *"Design and simulation of multieffect evaporators"*, Heat Transf. Eng. 20 (4), 38-44 (1999).

VanAntwerp, J., A. Sykes y A.X. Si, *"Noniterative design of multiple effect evaporators using Excel add-ins"*, 2009 ASEE Annual Conference, Paper AC 2009-2140, Austin, TX (2009).

Winchester, J., "*Model based analysis of the operation and control of falling film evaporators",* Tesis doctoral, Massey University, Palmerston North, New Zealand (2000). Citado por Madoumier et al. (2015).

Yanniotis, S., Material suplementario para *"Solving Problems in Food Engineering"*, Springer, New York (2008). Recuperado el 10 de marzo de 2017 de http://extras.springer.com/2008/978-0-387-73513-9

 ISBN 978-607-8242-11-5

Metaheurísticas Para Resolver El Problema De Gestión De Suministros Con Demandas Acotadas

Ángel D. Téllez-Macías[1], Antonin Ponsich[1] y Roman A. Mora-Gutiérrez[1]
Posgrado en Optimización, Departamento de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México, Ciudad de México
E-mail: anger.dralion1387@gmail.com, aspo@correo.azc.uam.mx, ing.romanmora@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se considera el Problema de Gestión de Suministros con Demandas Acotadas (SMPLD, por las siglas en inglés), en el cual consite en determinar que proveedores deben suministrar producto a los consumidores y la cantidad de producto suministrada de los primeros a los segundos. El objetivo consiste en minimizar los costos asociados a la apertura de cuenta de envío y los costos de envío por la cantidad de producto. Con el objeto de solucionar este problema, en el presnte se implementan cuatro metaheurísticas: ascenso a la montaña, búsqueda local multi-arranque, Recocido Simulado y Algoritmo Genético. Experimentos computacionales en instancias propuestas en la literatura especializada muestran que el Algoritmo Genético, es capaz de obtener resultados cometitivos con respecto a la literatura consultada, en tiempos computacionales razonables.

Metaheuristic For Solving Supply Management Problem with Lower-Bounded Demands

Abstract

This work addresses the Supply Management Problem with Lower-bounded Demands (SMPLD), aiming at determining which suppliers are to provide product to consumers, as well as the product quantity that should be supplied from the former to the latter ones. The Objective consists in minimizing costs associated with shipping account opening and with variable shipping (depending on the quantity of product to be sent).Four metaheuristic techniques were impleneted to solve this problem: a simple Hill-Climbing, Multi-Start Local Search, Simulated Annealing and Genetic Algorithm. Computational experiments performed over a set of benchmark instances highlight that the best solution technique is the Genetic Algorithm, which is able to produce high quality solutions within reasonnable CPU times.

Keywords: Supply Management Problem with Lower-bounded Demands, Minimizing costs, Hill-Climbing, Multi-Start Local Search, Simulated Annealing and Genetic Algorithm.

ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El problema de la gestión de la oferta con limites en la oferta y la demanda (SMPLD) fue propuesto en (Chauhan et al., 2004). En este problema, un conjunto de proveedores suministra un cierto tipo de producto a un conjunto de consumidores, tomando en cuenta que la cantidad de producto entregada debe encontrarse entre los valores mínimos y máximos dados. Además, los costos para cada proveedor son funciones lineales de la cantidad entregada, en caso de abrir una cuenta de envío.

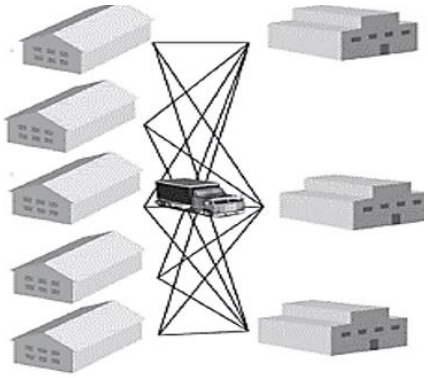


Figura 1: Suministro entre proveedores y consumidores

Cabe mencionar que muchos de los problemas prácticos de logística, programación y planificación de la producción y cadena de suministro, pueden modelarse como SMPLD, por ejemplo (Sun *et al.*, 1998; Sheng *et al.*, 2006).

En cuanto a la complejidad de este problema, en (Chauhan *et al.*, 2005) se demuestra que SMPLD es NP-difícil, ya que es reducible en un caso especial al Problema de la Mochila (Knapsack problem en inglés), el cual es NP-difícil. Dado que el Problema de la Mochila es NP-difícil, SMPLD también lo es.

EL MODELO

$$min \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} z_{ij}\left(a_{ij} + c_{ij}x_{ij}\right) \tag{1}$$

$sujeto\ a$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} \geq A_j, 1 \leq j \leq m, \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \leq M_i, 1 \leq i \leq n, \tag{3}$$

$$m_{ij}z_{ij} \leq x_{ij} \leq M_i z_{ij}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \tag{4}$$

$$z_{ij} \in \{0,1\}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \tag{5}$$

Donde m es el número de proveedores; n es el número de consumidores; z_{ij} indican si existe entrega del proveedor i al consumidor j, x_{ij} representan el tamaño del envío. A_j es la cantidad mínima de producto requerida por el consumidor j; M_{ij} es la cantidad mínima que el proveedor i puede entregar al consumidor j; M_i es la cantidad máxima total que el proveedor i es capaz de ofrecer. Se supone que los parámetros $a_{ij}, c_{ij}, m_{ij}, M_i, A_j$ son no negativos y enteros, aunque la integralidad no es esencial.

En este modelo, la función objetivo (1) minimiza la suma, en caso de que haya envió entre el proveedor i y el consumidor j, de los costos de apertura de envió y los costos de transportación por cantidad de producto

 ISBN 978-607-8242-11-5

enviado. La restricción (2) compromete que al menos se debe de cubrir la demanda de todos los consumidores, mientras que la restricción (3) implica que no se debe sobrepasar la oferta de los proveedores.

Para el SMPLD existe un banco de instancias ampliamente utilizado en la literatura especializada y disponible en *http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/Supply/supply-bench-eng.html*. Este banco contiene 5 series: RAN, H, S, P y MIS. Cada serie incluye características diferentes: la serie RAN consiste en 8 instancias de SMPLD obtenidas por puntos de referencia del Problema de Transporte de Costo Fijo (FCTP por sus siglas en inglés), con *m, n* y m_{ij} = 0, construido por Gottlieb y Paulmann (1998), usando el generador NETGEN (Barr *et al.* , 1981); la serie H consiste en 14 instancias mayores de FCTP, llamadas h_0, h_1, ..., h_c y h_e (la instancia h_d se omite porque resulta ser idéntica a h_c) con $m = 100$; $n = 50$, $m_{ij} = 0$ y el intervalo de los costos entre 6400-25600, producido por el mismo generador (Sun *et al.* , 1998); la serie S consiste en 8 instancias de SMPLD generadas al azar con $m = n = 50$. Los valores para $m_{ij} = 10, M_i \in [400, 600]$, $A_j \in [350, 550]$, $a_{ij} \in [500, 4500]$ y $c_{ij} \in [20, 1020]$ se obtuvieron mediante un generador de números pseudo-aleatorios uniformemente distribuidos. En promedio, la oferta total es un 10% mayor que la demanda total; la serie P consta de 14 instancias de SMPLD generadas al azar con $n = m = 50$. Los valores $M_i \in [12, 20], A_j \in [10, 20]$, $a_{ij} \in [5, 10]$, $c_{ij} \in [10 ; 20]$ y $m_{ij} \in [5, 10]$ se obtuvieron mediante un generador uniformemente distribuido. Los rangos de los parámetros implican que, en promedio, la oferta total es ligeramente superior a la demanda global. Los valores m_{ij} son suficientemente grandes para hacer particularmente difícil encontrar una solución factible; la serie MIS se compone de 6 casos obtenidos a partir de los problemas de conjunto máximo independiente, utilizando la reducción propuesta por Eremeev *et al.* (2006). En estas instancias de SMPLD $m = |E| + 1$ y $n = |V|$. Donde V y E son los conjuntos de vértices y aristas en el gráfico del problema de conjunto independiente máximo. Las instancias se obtienen de los gráficos de la colección DIMACS de puntos de referencia (Johnson y Trick, 1996).

TÉCNICAS PROPUESTAS DE RESOLUCIÓN

El SMPLD es un problema NP-difícil, es decir, que es un problema en el que no podemos garantizar encontrar la mejor solución en un tiempo polinómico razonable mediante un método exacto. Los métodos heurísticos se utilizan, cuando no existe un método exacto de resolución para el problema considerado o cuando existe un método exacto que consume mucho tiempo para ofrecer la solución óptima. Sin embargo, los heurísticos llegan a estancarse con facilidad en óptimos locales, es por ello que diseñaron nuevas estrategias o mecanismos específicos para escapar de óptimos locales, orientando la búsqueda en cada momento dependiendo de la evolución del proceso de búsquedas, llamando a estas metaheurísticas. Las metaheurísticas son procedimientos de búsqueda inteligente que no garantizan la obtención del óptimo sin embargo son capaces de generar buenas soluciones con un consumo razonable de recursos.

A continuación se describen las técnicas metaheurísticas empleadas en este trabajo:

- Ascenso a la montaña (HC por las siglas en inglés de Hill Climbing): es un algoritmo iterativo que comienza con una solución arbitraria a un problema, luego intenta encontrar una mejor solución variando incrementalmente un único elemento de la solución. Si el cambio produce una mejor solución, otro movimiento incremental se realiza sobre la nueva solución, repitiendo este proceso hasta que no se puedan encontrar mejoras.
- Búsqueda Local Multi-arranque (MSLS por las siglas en inglés de Multi-Start Local Search): es un algoritmo iterativo en el cual cada iteración implica dos fases. En la primera fase, se construye una solución, ya sea aleatoriamente o mediante un procedimiento heurístico. Una vez que se tiene una solución al problema, en la segunda fase, dicha solución generada se mejora (aunque no es necesario) mediante un algoritmo de búsqueda local o incluso otra metaheurística. Este procedimiento se repite un determinado número de veces, hasta que se satisface un criterio de paro. Nótese que cada ejecución del algoritmo embebido es completamente independiente de las demás.
- Recocido simulado (SA, por las siglas en inglés de Simulated Annealing): es un algoritmo iterativo que inicia con un cierto estado original s. Mediante un proceso particular al problema tratado, genera un estado vecino s' al estado actual. Si la energía, o evaluación mediante la función objetivo, del estado nuevo s' es menor (es decir mejor, para un problema de minimización) que la del estado actual s, el primer estado se cambia por el segundo. Si, al contrario, la evaluación del estado nuevo s' es mayor que la de s, entonces se puede eventualmente aceptar este deterioro de la función objetivo eligiendo s' en lugar de s bajo una cierta probabilidad que depende de la diferencia de calidad entre las soluciones y del valor actual de un parámetro de operación, la temperatura. Esta temperatura va decreciendo en el transcurso del proceso de búsqueda, de tal manera que la probabilidad de aceptar

 ISBN 978-607-8242-11-5

una solución deteriorando la función objetivo disminuye. La posibilidad de elegir un estado peor al actual es el mecanismo que le permite a SA salir de óptimos locales para poder llegar al óptimo global.

- Algoritmo genético (GA, por las siglas en inglés de Genetic Algorithm): es un algoritmo iterativo en el cual se genera una población de soluciones candidatas. Cada solución candidata tiene un conjunto de propiedades que pueden ser mutadas y alteradas. La evolución suele partir de una población de individuos generados al azar. Posteriormente, en cada generación, se evalúa la aptitud de cada individuo en la población. Los individuos más aptos son seleccionados estocásticamente de la población actual, y el genoma de cada individuo es modificado (recombinado y posiblemente mutado al azar) para formar una nueva generación. La nueva generación de soluciones candidatas se utiliza entonces en la siguiente iteración del algoritmo. El algoritmo termina cuando se ha producido un número máximo de generaciones, o se ha alcanzado un nivel de aptitud satisfactorio para la población.

METODOLOGÍA

Con el objeto de comparar el desempeño de las cuatro metaheurísticas diseñadas, en todas ellas implemeto el mismo número de llamadas a la función objetivo (puesto a que el tiempo de computo, depende del equipo, del sistema operativo y de la arquitectura del procesador). El cual se establecio en 50000 llamadas a la función objetivo (2000 para cada uno de los 25 arranques de la Búsqueda Local Multi-arranque y 5000 generaciones para el Algoritmo Genético ya que la población era de 10 individuos).

La generación de las soluciones iniciales (única o población), fue aletaroria sin embargo se implementaron tecnicas de forma que no salieran de la región factible del problema, esto para evitar una reparación de las soluciones. De igual manera, para generación de vecinos (o de hijos y mutantes, en el caso del Algoritmo Genético), se evitó la reparación de estos, es decir, solo se aceptaban soluciones que se encontraran en la región factible de las soluciones (método de pena de muerte).

La calibración de parámetros de Recocido Simulado y Algoritmo Genético, se realizó a través de fuerza bruta. Para ello se asigna un valor fijo a los parámetros, excepto a uno, el cual se modificaba entre los límites permitidos. Se elige aquel que muestre mejor desempeño y se repite el proceso, tomando un parámetro diferente y resignándole valores.

Para cada una de las técnicas se realizaron 20 corridas en cada una de las instancias, registrando el mejor valor obtenidopara compararlo con las demás. En la seccion siguiente se muestran los resumtados numericos para cada serie del banco de instancias con los mejores valores obtenidos de cada metaheurística y el mejor valor encontrado en la literatura.

Posteriormente, se analizo el comporamiento de las cuatro metauristicas en cada una de las series de las instancias. Para ello se realizo la prueba de wilkocxon sobre los resultados ontenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se resolvieron cada una de las instancias con las cuatro metaheurísticas implementadas, para comparar el desempeño de éstas, y también contra los mejores valores reportados en la literatura especializada.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la serie RAN, en la cual se comparan las técnicas implementadas y el mejor valor encontrado en la literatura especializada.

Serie RAN					
Instancia	Mejor valor encontrado	Ascenso a la montaña	Multi-Arranque	Recocido Simulado	Algoritmo Genético
ran13×13	3252	7838	5340	4741	3366
ran12×21	3664	7282	5424	4648	3828
ran14×18	3712	6794	6460	4683	3883
ran 4×64	9711	12894	10897	10856	9857
ran8×32	5247	10240	7761	6046	5373
ran16×16	3823	6896	6629	5263	4022
ran10×26	4270	7399	7058	5761	4432
ran17×17	1373	5452	3111	1969	1530

Tabla 1.- Comparación de resultados para la serie RAN

ISBN 978-607-8242-11-5

En la Tabla 2 se muentran los resutados de la prueba de Wilckoxon. Se observa que en esta serie de problemas el comportamiento de los métodos es diferente destacandose el comportemiento del GA sobre el resto de las técnicas.

	HC	MS	SA	GA
HC	Falso	Verdadero	Verdadero	Verdadero
MS	Verdadero	Falso	Verdadero	Verdadero
SA	Verdadero	Verdadero	Falso	Verdadero
GA	Verdadero	Verdadero	Verdadero	Falso

Tabla 2.- Resultados Wilckoxon para la serie RAN

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la serie H, en la que destaca el Algoritmo Genético por tener los mejores resultados, sin alcanzar el mejor reportado.

Serie H					
Instancia	Mejor valor encontrado	Ascenso a la montaña	Multi-Arranque	Recocido Simulado	Algoritmo Genético
h_0	1208672	1218593	1215215	1214040	1209585
h_1	1204194	1212640	1212584	1210474	1204804
h_2	1192687	1201281	1199708	1196397	1192866
h_3	1188904	1194841	1192315	1191664	1189856
h_4	1209357	1219051	1214068	1215304	1210290
h_5	1202258	1211541	1211491	1205360	1202283
h_6	1201097	1210620	1203833	1202674	1201509
h_7	1172931	1180939	1182218	1182070	1173783
h_8	1198108	1205835	1203741	1205024	1198153
h_9	1192529	1202120	1198072	1201158	1192625
h_a	1233688	1242656	1239034	1243490	1233925
h_b	1208211	1215718	1212211	1213405	1208906
h_c	1209685	1216558	1214111	1211318	1209750
h_e	1185378	1193902	1187171	1192106	1185612

Tabla 3.- Comparación de resultados para la serie H

En la Tabla 4 se muentran los resutados de la prueba de Wilckoxon. Se observa que en esta serie de problemas el comportamiento de los métodos MS y SA es similar, sin embargo estas son diferntes de HC y GA.

	HC	MS	SA	GA
HC	Falso	Verdadero	Verdadero	Verdadero
MS	Verdadero	Falso	Falso	Verdadero
SA	Verdadero	Falso	Falso	Verdadero
GA	Verdadero	Verdadero	Verdadero	Falso

Tabla 4.- Resultados Wilckoxon para la serie H

En la tabla 5 se muestran los resultados numericos sobre la serie S. Por otro lado en la tabla 6 se muestran los resultados de la prueba de Wilckoxon.

Serie S					
Instancia	Mejor valor encontrado	Ascenso a la montaña	Multi-Arranque	Recocido Simulado	Algoritmo Genético
s_1	613951	658730	620416	618786	614251
s_2	631219	674807	639322	633436	631232
s_3	627294	668368	636498	628787	627687
s_4	634609	679964	642656	638852	635082
s_5	605145	623997	613636	607301	605484
s_6	669346	717299	673878	670244	669539
s_7	602737	645346	611018	604112	602868

ISBN 978-607-8242-11-5

s_8	645843	670114	651560	647828	646160

Tabla 5.- Comparación de resultados para la serie S

	HC	MS	SA	GA
HC	Falso	Verdadero	Verdadero	Verdadero
MS	Verdadero	Falso	Verdadero	Verdadero
SA	Verdadero	Verdadero	Falso	Verdadero
GA	Verdadero	Verdadero	Verdadero	Falso

Tabla 6.- Resultados Wilckoxon para la serie S

En la tabla 7 se muestran los resultados numericos sobre la serie S. Por otro lado en la tabla 8 se muestran los resultados de la prueba de Wilckoxon, todas las técnicas propuestas tienen un comportamiento diferente.

Serie P					
Instancia	Mejor valor encontrado	Ascenso a la montaña	Multi-Arranque	Recocido Simulado	Algoritmo Genético
p_1	8527	10217	9268	9412	8579
p_2	7836	10524	8525	9170	7936
p_3	8423	10040	9697	10226	8453
p_4	8409	9950	9798	10328	8476
p_5	8007	10057	8782	9870	8186
p_6	8320	10690	9360	10081	8344
p_7	7874	10738	9368	8848	7928
p_8	9543	12145	10932	11179	9707
p_9	8831	11565	9813	9740	8899
p_10	8524	10345	9951	9199	8630
p_11	8196	9946	9221	8744	8249
p_12	8323	10062	9081	10084	8459
p_13	8276	10680	9111	9322	8457
p_14	8916	10454	9571	10042	8950

Tabla 7.- Comparación de resultados para la serie P

	HC	MS	SA	GA
HC	Falso	Verdadero	Verdadero	Verdadero
MS	Verdadero	Falso	Verdadero	Verdadero
SA	Verdadero	Verdadero	Falso	Verdadero
GA	Verdadero	Verdadero	Verdadero	Falso

Tabla 8.- Resultados Wilckoxon para la serie S

En la tabla 9 se muestran los resultados numericos sobre la serie S. Por otro lado en la tabla 10 se muestran los resultados de la prueba de Wilckoxon, las técnicas HC y MS son similares, mientras que SA y GA son similares entre si.

Serie MIS					
Instancia	Mejor valor encontrado	Ascenso a la montaña	Multi-Arranque	Recocido Simulado	Algoritmo Genético
hamming6–4	60	60	60	60	60
c125.9	91	95	91	91	91
johnson16.2.4	112	112	112	112	112
mann.a27	252	263	259	253	253
gen200_p0.9_44	156	167	165	159	158
gen200_p0.9_55	145	160	156	152	146

Tabla 9.- Comparación de resultados para la serie MIS

ISBN 978-607-8242-11-5

	HC	MS	SA	GA
HC	Falso	Falso	Verdadero	Verdadero
MS	Falso	Falso	Falso	Verdadero
SA	Verdadero	Falso	Falso	Falso
GA	Verdadero	Verdadero	Falso	Falso

Tabla 10.- Resultados Wilckoxon para la serie S

CONCLUSIONES

En conclusión, se puede ver que la metaheurística que tuvo mejor funcionamiento fue el Algoritmo Genético, ya que para las series RAN, S, H y P se obtuvieron valores muy cercanos (menos del 5%) al mejor reportado por la literatura especializada, sin embargo, solo en la serie MIS se alcanzaron los mejores reportados, excepto en las instancias mann.a27, gen200_p0.9_44 y gen200_p0.9_55. Siendo la tecnica de GA la que se destaco en su comportamiento en la mayoria de los caso.

Lo anterior se debió a dos razones: la manera en que se calibro el Algoritmo Genético y a la cantidad de llamadas a la función objetivo. En trabajos futuros se propone emplear otras tecnicas de calibracion tales como auto-adaptación o la calibración estadistica.

Por otro lado, se pudo observar que tanto la Búsqueda Local Multi-Arranque y Recocido Simulado tienen resultados buenos y malos, ya que en algunas instancias resulto ser mejor uno que el otro y viceversa. En trabajos futuros se propone hibridar estas tecnicas con GA ya que esta ha generado buenos resultados.

Por último, todas las técnicas pueden tener mejora, desde la calibración, la reparación de soluciones fuera de la región factible y la generación de vecinos, por lo que aún hay trabajo a futuro para esta investigación.

REFERENCIAS

Borisovsky, P., Dolgui, A., & Eremeev, A. (2009). Genetic algorithms for a supply management problem: MIP-recombination vs greedy decoder. *European Journal of Operational Research*, *195*(3), 770-779.

Chauhan, S.S., A.V. Eremeev, A.A. Romanova and V.V. Servakh (2004). Approximation of linear cost supply management problem with lower-bounded demands. In: Proc. of Discrete Optimization Methods in Production and Logistics (DOM`2004). pp. 16–21. Omsk.

Eremeev, A. (2007). On complexity of optimized crossover for binary representations. *arXiv preprint arXiv:0705.3766*.

Holland, J. H. (1992). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press.

Kirkpatrick, Scott, C. Daniel Gelatt, and Mario P. Vecchi. "Optimization by simulated annealing." *science* 220.4598 (1983): 671-680.

P Borisovsky, A Dolgui, A Eremeev, (2006). Genetic algorithms for supply management problem with lower-bounded demands, IFAC Proceedings Volumes, Volume 39, Issue 3, Pages 535-540

Sobolev Institute of Mathematics 20. (2015). Supply Management Problem with Lower-Bounded Demands, http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/english.html, Last redaction 15.10.13

Xie, F., & Jia, R. (2012). Nonlinear fixed charge transportation problem by minimum cost flow-based genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, *63*(4), 763-778.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelado de procesos continuos a través de ontología y uso de web semántica

Guillermo Lio[1], Gustavo Jiménez-Placer[1,2] , Néstor R. Barraza[3] y Daniel Zambrano[1]

(1) Instituto de Industria (IDEI), Univ. Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires- Argentina.
(2) Universidad Abierta Interamericana, Buenos Aires-Argentina
(3) Universidad nacional de Tres de Febrero, Buenos Aires-Argentina
e-mail: gplacer@ungs.edu.ar

Resumen

El objetivo del presente estudio, es el desarrollo de una ontología para la descripción general, exploración y consultas de una planta piloto industrial, la que integra distintos lazos de control. Entre ellos destacaremos los lazos de temperatura, nivel y caudal, para uso didáctico y de investigación, con el fin de luego poder escalar el sistema a procesos industriales de gran escala. El desarrollo está en la dirección de la integración dirigida por el conocimiento (knowledge driven approach) utilizando las herramientas y estándares de World Wide Web Consortium (W3C). En primer término se desarrolló una representación de la planta industrial tomando la misma como dominio, para poder obtener un modelo de conocimiento de procesos continuos. Para diseñar un modelo que que resultara simple su modelado se utilizaron ontologías. Se utilizó la metodología Neon para el desarrollo, descartándose la reutilización de ontologías existentes. El motivo principal para esto, fue la necesidad de formar investigadores en las nuevas herramientas y estándares de la World Wide Web Consortium (W3C), siendo una temática nueva para las investigaciones realizadas en la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS).
La motivación principal para realizar este trabajo, fue demostrar cómo se está desarrollando la problemática que tiene la pirámide del CIM (Computer Integrated Manufacturing), en cuanto a su integración vertical de niveles y su integración horizontal en las aplicaciones realizadas por nivel. Inicialmente la pirámide tenía 6 niveles, pero en las modificaciones establecidas por la ISA (International Society of Automation), se trabaja con una jerarquía de 3 niveles: Sistemas de gestión (o ERP, por Enterprise Resource Plannig), MES (por Manufacturing Execution Systems) y piso de planta (o shop floor), donde la investigación por el momento está centrada en la integración de la diferentes aplicaciones del piso de planta (integración horizontal), y la de este con el sistema MES (integración vertical), donde el objetivo final es poder brindar asistencia a las pequeñas y medianas empresas (PyMes) de la zona de influencia de la universidad.
Como conclusión hemos probado la aplicabilidad de las herramientas de la Web semántica a la Ingeniería de Control utilizada por las PyMes y su aplicabilidad a las radicadas en la zona de influencia de la universidad.

Keywords: Web semántica, ontologías, CIM, piso de planta, Mes, Pymes

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Por la velocidad de los avances informáticos y la importancia que estos adquirieron en los últimos tiempos en el control de procesos, se hace necesario la integración horizontal y vertical de los niveles de la pirámide del CIM que involucra sistemas de control, informática y la representación de datos en una arquitectura de sistemas distribuidos (Kalogeras, 2006), para lo cual las herramientas de la Web semántica ofrecen un vehículo de la integración de los Sistemas de Información de Planta (SIP) (Blet, 2011). Las ontologías en particular, permitieron la creación de mecanismos de representación del conocimiento y cada vez con un mayor nivel de abstracción en la información, para realizar procesos de análisis más complejos en forma automática (Murray R. M., 2003).
Las ontologías son especificaciones formales que proporcionan una vía para representar conocimiento en un dominio específico con el propósito de facilitar la comunicación, reusar y compartir información entre usuarios donde el modelado ontológico pone énfasis en la formalización de los conocimientos, y el modelado de objetos representa conceptualmente los datos requeridos por una base de datos. Las ontologías permiten transformar la web en un espacio de conocimiento además de un espacio de información y permiten la reutilización de recursos heterogéneos (Barrera Milagros et al., 2012; Roda Fernando et al., 2012].
En este trabajo proponemos integrar esquemas de representación ontológicos con los conceptos de la ingeniería de procesos, aplicando una capa semántica entre el plano de procesos y los usuarios. La Fig. 1 muestra la arquitectura propuesta.

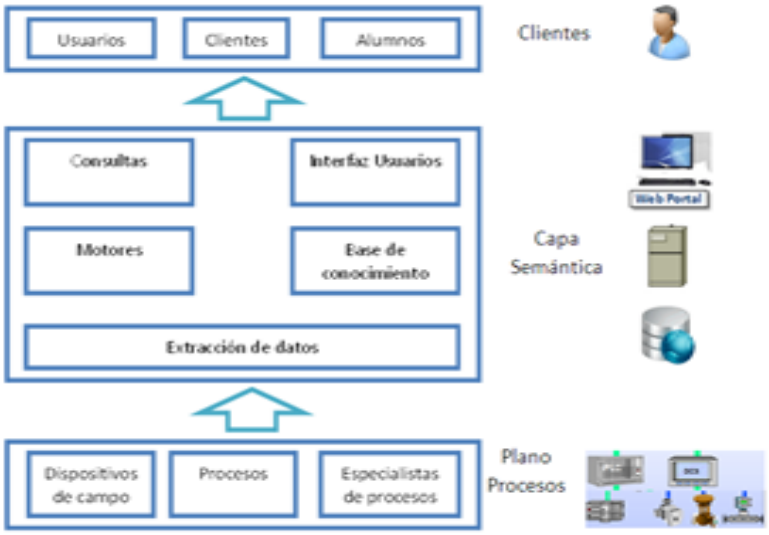


Fig. 1. Integración propuesta.

Para poder ejemplificar esta integración, se parte de una planta piloto industrial diseñada en el laboratorio de ingeniería de la universidad que representaría el piso de planta, donde se pueden simular tres lazos de control (temperatura, nivel, caudal) que pueden trabajar en configuración individual o multilazo. Para poder modelizar la misma se utilizó ontologías según la metodología Neon, la cual propone un marco de trabajo consistente en nueve escenarios: 1) Desde la especificación a su implementación, 2) Reutilización y Reingeniería de recursos no ontológicos, 3) La reutilización de recursos ontológicos, 4) La reutilización u reingeniería de recursos ontológicos, 5) La reutilización de recursos y la fusión ontológica, 6) La reutilización, la fusión, y reingeniería de recursos ontológicos, 7) La reutilización de patrones para el diseño de ontologías, 8) Reestructuración de los recursos ontológicos, 9) La localización de los recursos ontológicos (Barrera Milagros et. al., 2012). Este diseño permite separar en módulos los elementos (eventos, algoritmos, equipos, sensores y actuadores, etc.) del sistema de control con una alta especificación y un bajo acoplamiento, lo cual permite una facilidad de comunicación y posible reutilización.
La planta modelizada, integra tres lazos de control. La misma cuenta con dos recipientes contenedores de agua, 2 bombas centrífugas, sensores de nivel, caudal, presión y temperatura, actuadores del tipo válvula globo, proporcional, resistencia calefactora y radiador con forzador.

EL MODELO

Herramienta de desarrollo

ISBN 978-607-8242-11-5

Se utilizó la metodología Neon para la formulación de los requisitos del modelo, pero como se necesitaba que los investigadores nos formáramos en la temática, por ser esta nueva para el área de investigación, se decidió no reutilizar ontologías existentes, ni recursos, por lo tanto se utilizó solamente el escenario número 1.
El lenguaje que se utilizó para la representación se denomina OWL (Web Ontology Languaje), el mismo consta de clases, relaciones, funciones, instancias, entre otros. Permite describir conceptos y además cuenta con un conjunto de operadores como intersección, unión, negación. El OWL está basado en una lógica descriptiva. Para representar los datos en la Web generalmente se utiliza el lenguaje RDF (Resource Description Framework), que expresa proposiciones utilizando vocabularios formales y precisos, permitiendo el acceso y uso del World Wide Web (Klyne G. et. al.).
Par la construcción del modelo se utilizó el Protegé, que utiliza el formalismo OWL/RDF con una apariencia similar en la interfaz y el funcionamiento., Además tiene carácter de distribución bajo licencia de código abierto. Los componentes básicos son: Clases: representan conceptos que son agrupaciones de individuos que comparten un conjunto de propiedades, Slots: recogen las propiedades que distinguen a las clases, y a los valores que aparecerán en los slots se le pueden establecer restricciones por medio de las facetas (cardinalidad, valores por defecto, dominio, rango, etc.), Instancias: representan individuos concretos de una clase, correspondiendo a elementos reales en el mundo representado, donde la distinción entre instancia como concepto de la ontología e individuo como elemento en el mundo externo es importante. En el caso de las lógicas descriptivas y OWL dos instancias en la ontología pueden referirse a un mismo individuo: es una de las consecuencias de la asunción de mundo abierto. Además están los Axiomas: los cuales permitan la imposición de restricciones sobre los slots de forma más flexible que por medio de las facetas predefinidas (Wang, H. et. Al.).

Esquema de representación

Debemos definir un subdominio, ya que con una buena elección del mismo se podrán manifestar las bondades y ventajas del modelado del conocimiento en el campo del software para la ingeniería del control.
La metodología para la construcción de ontologías tienen las siguientes facetas:

- Definir el alcance de la ontología.
- Evaluar la posibilidad de reutilización de otras ontologías y/o partes de ontología.
- Enumerar los términos que aparecen en el dominio.
- Definir la taxonomía de conceptos. De arriba abajo, de abajo arriba o combinando las dos.
- Definir las propiedades.
- Definir las facetas.
- Definir las instancias.

Comprobar las estructuras creadas.

Especificación del modelo

Se utilizó la norma ISA-S88 [ISA: ANSI/ISA-S88.01, 1995] como estándar para el modelado, la misma permite una especificación en detalle de los sistemas de control. Se definió en primer lugar la clase de mayor jerarquía “Planta Piloto” en mención al nombre que lleva la planta real que se encuentra en los laboratorios de Universidad.
De esta se desprenden dos grandes subclases “Lazo Control” y “Tipo Lazo Control”. Este diseño tiene la ventaja de separar, por un lado, el lazo de control con sus tres componentes fundamentales (Actuador, Sensor, Controlador), obteniendo una arquitectura general para todos los lazos existentes. Por el otro lado, tenemos los tipos de lazo para esta planta (caudal, presión, temperatura, nivel) pudiendo asignarle, gracias a las propiedades de objeto y restricciones definidas, una descripción de los equipos que las integran con la ventaja de ser de fácil exploración, búsqueda y de consulta. En los ejemplos propuestos a lo largo del trabajo puede verificarse que la estructura elegida es acorde a la ingeniería de automatización y control, utilizando los mismos conceptos del control industrial para la descripción de los lazos.
Para volcar la información pertinente (marca, modelo, datos técnicos, etc.) a cada uno de los equipos de la planta se utilizaron los individuos en conjunto con las propiedades de datos y de anotación, pudiendo así demostrar la facilidad con la que se pueden obtener los datos de un equipo en particular de cualquier lazo en un sistema de control con múltiples lazos, cosa que es muy importante para el ingeniero de control y/o de procesos.
Este tipo de modelado fomenta compartir el conocimiento entre distintos sistemas, representándolos de manera intuitiva y extensible, pudiendo obtener a futuro la ventaja de que los usuarios puedan explorar, buscar y consultar sobre todos los equipos a través de la web semántica.
Este trabajo, propone además, una validación en la Planta Piloto de la Universidad para poder analizar su escalabilidad al ámbito de las aplicaciones industriales de gran escala.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Representación de estructura, propiedades y datos

Las clases se representarán con un círculo naranja y sus nombres siempre empiezan con mayúsculas. Tenemos 2 clases de mayor jerarquía “PlantaPiloto” y “ComponentesLazoControl”, de las cuales se desprenden sus sub-clases:

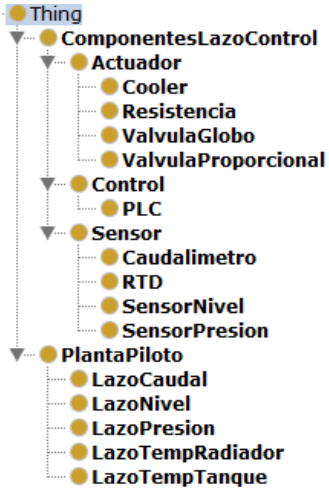


Fig. 2. Clases de mayor jerarquía.

La clase “ComponentesLazoControl” tiene todos los componentes de un lazo de control típico. Fig. 3.

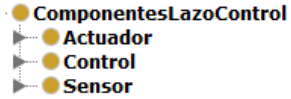


Fig. 3. SubClases ComponentesLazoControl.

Aquí se ven las sub-clases que se desprenden de “LazoControl”. Tenemos la clase “Actuador”, “Control” y “Sensor”. En cada una de ellas tenemos las sub-clases Fig. 4:

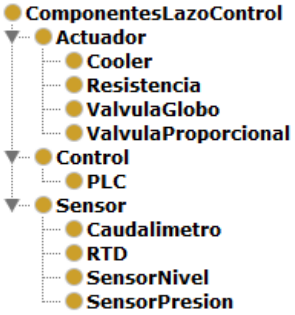


Fig. 4. SubClasesLazoControl.

Aquí vemos la estructura total de la clase “ComponentesLazoControl”.

Las propiedades representan relaciones entre objetos. En OWL existen dos tipos de propiedades: propiedades de objeto y propiedades de datos. Las propiedades de objeto tienen como elementos: Nombre, Dominio y Rango. Cada propiedad de objeto debe tener su inversa. Si una propiedad enlaza al elemento A con el B, debe haber una propiedad inversa que enlace el elemento B con el A. Se simbolizarán con un rectángulo azul y siempre empiezan en minúsculas. La propiedad “hasElementoControl” se usa para relacionar los componentes de un lazo de control. Por ejemplo: Un lazo de control tiene un elemento de control llamado PLC. A su vez “PLC” es un elemento de control del lazo. El dominio es la clase mayor “PlantaPiloto” y el rango limita la propiedad “Control”. En la Fig. 5 podemos ver las propiedades y las propiedades inversas:

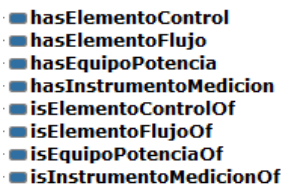


Fig. 5. Propiedades Inversas.

ISBN 978-607-8242-11-5

Las descripciones de cada propiedad son como la que se muestra para “hasElementoCotrol”, donde apreciamos su propiedad inversa “isElementoControOf”, su dominio “PlantaPiloto” y su rango “Control” Fig. 6:

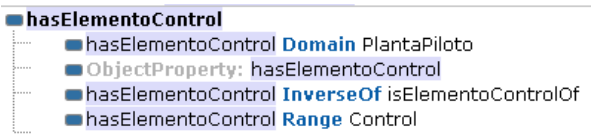


Fig. 6. Descripción.

Este tipo de relaciones establecen una conexión necesaria y suficiente entre ambas clases, permitiendo que el razonador detecte automáticamente los distintos lazos internos y pueda clasificarlos con la clase correspondiente.

El diseño de la ontología fue desarrollado de una manera que permita una representación adecuada y que contenga los datos básicos para su identificación.
Una vez creadas las propiedades, se procedió a describir el comportamiento de las clases para los distintos lazos de control que posee la planta. Las mismas se utilizan para crear restricciones en las clases para las ontologías OWL. Generalmente el nombre de la propiedad debería sugerir la restricción propuesta.
Hay 3 categorías de restricciones:

- Restricciones de cuantificación.
- Restricciones de cardinalidad.
- Restricciones de valor

Las restricciones de cuantificación se componen de los siguientes elementos:

- Cuantificador existencial (□), el cual permite indicar la existencia de al menos un objeto. En protégé la palabra clave “some” es usado para denotar □□
- Cuantificador universal (□), el cual permite indicar la existencia de todos los objetos. En protégé la palabra clave es “only" es usado para denotar □□

Usamos la restricción “some” para indicar las restricciones a las clases de los diferentes lazos que conforman la totalidad de la planta. Por ejemplo para la clase “LazoCaudal” se aplicó la restricción “some”, el lazo de caudal tiene como elemento de control al PLC. O sea, el lazo si o si tiene que tener un controlador para su funcionamiento. El mismo lazo caudal nos quedará restringido a los siguientes componentes como mínimo Fig. 7:

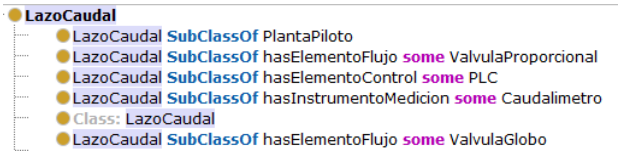


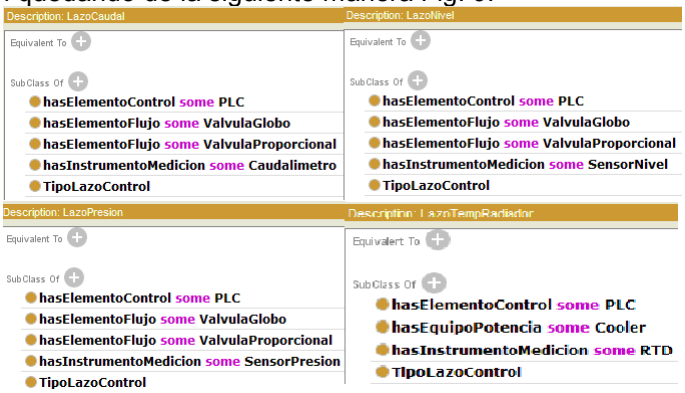
Fig. 7. Restricciones Lazo Caudal.

De la misma manera, se definieron para la planta piloto los distintos lazos de control en cuestión Fig. 8:



Fig. 8. Tipos Lazo Control.

A cada uno de los lazos se le colocó las restricciones pertinentes por cada uno de los componentes que forman el lazo en cuestión quedando de la siguiente manera Fig. 9:



ISBN 978-607-8242-11-5

Fig. 9. Restricción Lazos.

Las propiedades de datos se usan para relacionar un individuo con un XML Schema Datatype value o un literal RDF. Las mismas empiezan siempre con minúsculas y su nombre debe hacer referencia a la relación que se le va a dar. Se simbolizan con un rectángulo verde. Por ejemplo, una válvula tiene diámetro 1 pulgada Fig. 10.



Fig. 10. Propiedad de datos de ValvulaGlobo.

Dependiendo de las relaciones, se definen las distintas propiedades de datos, para nuestro sistema se definieron las siguientes Fig. 11:

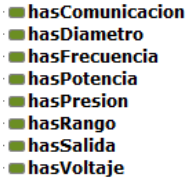


Fig. 11. Propiedades de Datos para el sistema.

Las propiedades de anotación permiten generar notas en las clases, individuos, cabeceras de ontologías e individuos. Por ejemplo se puede definir como propiedad al “Fabricante” para describir la marca de un equipo dado. Para nuestra descripción se utilizaron las siguientes propiedades de anotación Fig. 12:

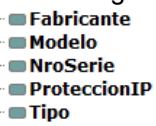


Fig. 12. Propiedades de anotación.

Las mismas se utilizaron para describir los distintos equipos que existen en la planta piloto.

Individuos

Los individuos representan objetos del dominio de interés y son también conocidos como instancias. Las clases OWL están formadas por individuos y pueden ser organizadas dentro de una jerarquía de clases y subclases conocida como taxonomía. Por ejemplo dentro de la clase Caudalímetro se creó el individuo o instancia “EndressHauser”. Para la descripción del mismo se pueden apreciar las propiedades de anotación, así también como las propiedades de datos Fig. 13:

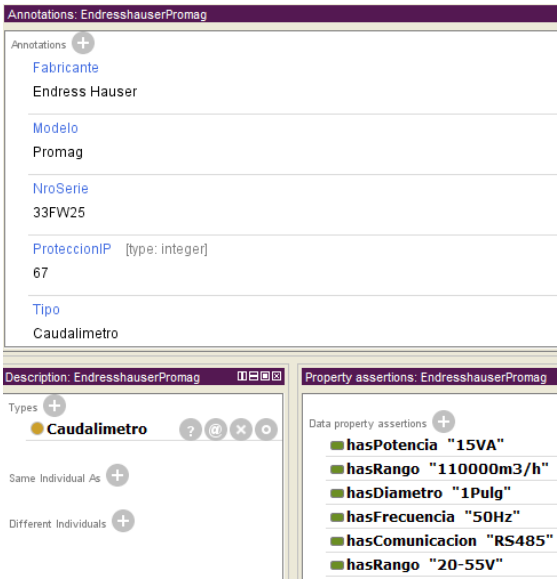


Fig. 13. Propiedades del Caudalímetro.

ISBN 978-607-8242-11-5

Ontograf

Esta herramienta da apoyo para navegar de forma interactiva en las relaciones de las ontologías OWL. Contiene varios diseños apoyados por la organización de forma automática dando la estructura de su ontología. Múltiples compatibilidades: subclase, individuos, dominios, propiedades de los objetos de rango y la equivalencia. Utilizando esta herramienta observamos la estructura y relaciones de la clase LazoControl Fig. 14.

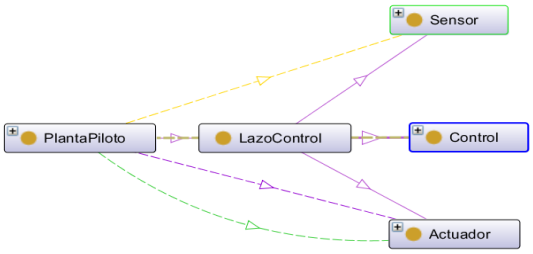


Fig. 14. Estructura Planta Piloto con OntoGraf.

Permite ver el URI en cada uno de los elementos. Un URI puede ser clasificado como un localizador, un nombre o ambos. Un localizador de recursos uniforme (URL) es un URI que, además de la identificación de un recurso, proporciona medios de actuar sobre o la obtención de una representación del recurso mediante la descripción de su mecanismo de acceso a la red primaria o "ubicación". En el ejemplo anterior podemos observar para la clase Sensor la dirección URI:
http://www.semanticweb.org/ModeladoPlantaPiloto#Sensor
asi también como la dependencia de la clase LazoControl Fig. 15.



Fig. 15. Dirección URI y superclases para Sensor.

Ejemplo: estructura y dependencia de la clase Actuador. Fig. 16:

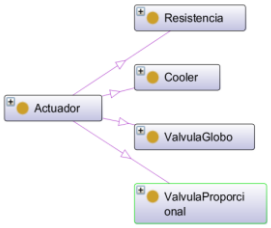


Fig. 16. Estructura Actuador en OntoGraf.

Con las propiedades podemos generar los distintos tipos de lazo de control contenidos en la planta piloto Fig. 17:

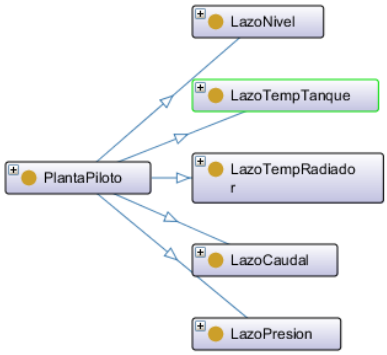


Fig. 17. Estructura Tipo Lazos en OntoGraf.

Para el caudalímetro podemos ver que es un Sensor que usa se usa en el Lazo de Caudal y que tiene como individuo al EndresshauserPromag Fig. 18.

ISBN 978-607-8242-11-5

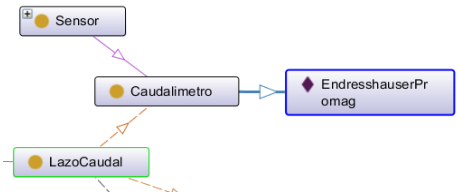


Fig. 18. Estructura Caudalímetro en OntoGraf..

Sparql

SPARQL es un lenguaje de consulta semántica de bases de datos, capaz de recuperar y manipular los datos almacenados. Una consulta SPARQL contiene tres cláusulas principales: SELECT, WHERE y un filtro.
Se utilizó la consulta SPARQL para buscar los instrumentos que componen los distintos lazos de control de la planta piloto, así también como las características de los equipos que los integran.
En algunas de las consultas propuestas, la cláusula SELECT propone mostrar el Tipo de Lazo de control, Tipo de Instrumento y el Instrumento en sí. En otras consultas el SELECT pretende mostrar las características de un equipo en particular.
Para obtener los resultados propuestos, en la cláusula WHERE, se utilizaron y combinaron las siguientes sentencias:
?a rdfs:subClassOf ?b: “a” es subclase de “b”.
?a owl:onProperty ?b: “b” contiene las propiedades de objeto.
?a owl:someValuesFrom ?b: Restricción, cuantificador existencial “some”. En “b” muestra las restricciones.
FILTER regex(str(?a), "string"): Filtra los “string” dentro de “a”.
Filter isLiteral(?a): Filtra los “literales” que se encuentran en “a”.

Ejemplo 1: Para consultar los instrumentos que integran el lazo de Caudal de la Fig. 19, se utilizó la sentencia descripta de la Fig. 20.

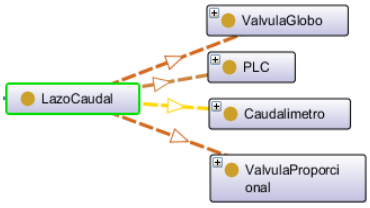


Fig. 19. Instrumentos del Lazo Caudal.

```
SELECT  ?Lazo ?Tipo_de_Instrumento ?Instrumento
                WHERE {?Lazo rdfs:subClassOf ?b.
?b owl:onProperty ?Tipo_de_Instrumento.
?b owl:someValuesFrom ?Instrumento.
FILTER regex(str(?Lazo), "LazoCaudal").
}
```

Fig. 20. Consulta SPARQL para el lazo de caudal.

En la Fig. 21 vemos el resultado arrojado para la consulta:

Lazo	Tipo_de_Instrumento	Instrumento
LazoCaudal	hasElementoFlujo	ValvulaGlobo
LazoCaudal	hasElementoControl	PLC
LazoCaudal	hasInstrumentoMedicion	Caudalimetro
LazoCaudal	hasElementoFlujo	ValvulaProporcional

Fig. 21. Resultado de la consulta SPARQL para el lazo de caudal.

Ejemplo 2: Para consultar los instrumentos que integran el lazo de temperatura del tanque de la Fig. 22., se utilizó la sentencia de la Fig. 23.

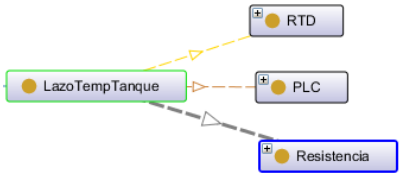


Fig. 22. Instrumentos del Lazo Temp. Tanque.

ISBN 978-607-8242-11-5

```
SELECT  ?Lazo ?Tipo_de_Instrumento ?Instrumento
                WHERE {?Lazo rdfs:subClassOf ?b.
?b owl:onProperty ?Tipo_de_Instrumento.
?b owl:someValuesFrom ?Instrumento.
FILTER regex(str(?Lazo), "LazoTempTanque").
}
```

Fig. 23. Consulta SPARQL para el Lazo Temp. Tanque.

En la Fig. 24 vemos el resultado arrojado para la consulta:

Lazo	Tipo_de_Instrumento	Instrumento
LazoTempTanque	hasInstrumentoMedicion	RTD
LazoTempTanque	hasElementoControl	PLC
LazoTempTanque	hasEquipoPotencia	Resistencia

Fig. 24. Resultado de la consulta SPARQL para el lazo de temperatura del tanque.

Ejemplo 3: Para consultar las características del instrumento en particular “Belimo” Fig. 25, se utilizó la sentencia de la Fig. 26.

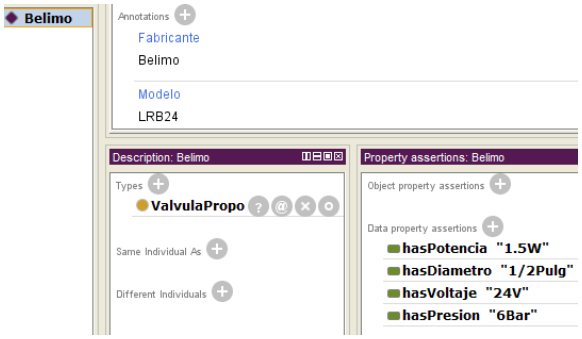


Fig. 25. Datos de la válvula proporcional Belimo.

```
SELECT  ?Propiedades ?Datos
                WHERE {?a ?Propiedades ?Datos.
filter isLiteral(?Datos).
FILTER regex(str(?a), "Belimo")
}
```

Fig. 26. Consulta SPARQL para el individuo Belimo.

En la Fig. 27 vemos el resultado arrojado para la consulta:

Propiedades	Datos
Fabricante	"Belimo"@
Modelo	"LRB24"@
hasPresion	"6Bar"@
hasVoltaje	"24V"@
hasDiametro	"1/2Pulg"@
hasPotencia	"1.5W"@

Fig. 27. Resultado de la consulta SPARQL para el individuo Belimo.

Aquí vemos que el resultado de la consulta nos muestra todas las características del equipo Belimo, como su modelo, presión, voltaje, diámetro, potencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el modelado realizado se puede afirmar que los investigadores de la universidad involucrados en la temática, adquirieron experiencia en la utilización de las herramientas de la Web semántica y además se comprendió como aplicar las mismas a la Ingeniería de control. Si bien en la investigación realizada se detectó que hay un ontología desarrollada para procesos continuos que se denomina ONTOCAPE desarrollada para para la industria química (Jan Morbach et. al., 2007), que podría ser reutilizada, para mejorar las capacidades de desarrollo se tomó la decisión de realizar una ontología desde el inicio. Los resultados fueron satisfactorios y abrió un camino que puede ahora ser desarrollado en el área de

ISBN 978-607-8242-11-5

investigación, con lo cual se prevén buenas perspectivas para el modelado en líneas de investigación del área.

CONCLUSIONES

A partir del resultado obtenido, se pueden indicar las siguientes conclusiones: 1) las herramientas utilizadas de la Web Semántica son totalmente aplicables a las diferentes temáticas del área de investigación la cual incluye las energías renovables donde su aplicación a nivel internacional es incipiente, 2) las ontologías permiten una modelización y cohesión con muy poco acoplamiento entre los módulos, a diferencia de UML (Unified Modeling Language) que es orientado básicamente objetos, lo cual la posibilidad de una reutilización del código establecido en diferentes aplicaciones industriales de interés en la ámbito de influencia de la universidad, 3) Utilizando las herramientas de la Web Semántica, se estableció realizar en el futuro el trabajo del diseño de un Scada (Sistema de Supervisión y Adquisición de datos) de bajo costo para brindar servicios a las Pymes

REFERENCIAS

Barrera Milagros, Núñez Haydemar, Ramos Esmeralda; (2012). Ingeniería Ontológica. Universidad central de Venezuela, Escuela de Computación. ISSN 1316-6239. Enero 2012

Bissell, C. (1993) A new way of talking: aspects of the creation of the language of control engineering, Faculty of Technology/Systems Architecture Group Internal Report (SAG/1993/RR31/CCB), November 1993

Blet Nora S. y Simón José L., “Soa en Automatización de Pymes Manufactureras “, Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, v. 3, n.2, p. 189-208, 2011

Fernando Roda, Estanislao Musulin and Marta Basualdo; (2012). Esquemas de representación ontológica para la integración de datos en los sistemas de información de planta. 1° Simposio Argentino de Informática Industrial, SII 2012; 41 JAIIO - SII 2012 - ISSN: 2313-9102. 2012

ISA: ANSI/ISA-S88.01 - 1995, Batch Control, Part I: Models and Terminology (1995)

Jan Morbach, Aidong Yang, Wolfgang Marquardt, “OntoCAPE—A large-scale ontology for chemical process engineering”, SienceDirect, Engineering Applications of Artificial Intelligence 20 (2007) 147–161.

Kalogeras, A., “Vertical integration of enterprise industrial systems utilizing web services”, IEEE Transactions On Industrial Informatics,v. 2, n. 2, p. 120-128, 2006

Klyne, G.; Carroll, J. J. (eds.) (2004) Resource Description Framework (RDF): concepts and abstract syntax, W3C Recommendation, 10 February 2004.

Murray, R. M.; Åström, K. J.; Boyd, S. P.; Brockett, R. W.; Stein, G. (2003) Future directions in control in an information-rich world, IEEE Control Systems Magazine, 23(2), pp 20 – 33

Wang, H.; Rector, A.; Drummond, N.; Horridge, M.; Seidenberg, J.; Noy, N.; Musen, M.; Redmond, T.; Rubin, D.; Tu, S.; Tudorache, T. (2006) Frames and OWL Side by Side, In 9th International Protégé Conference, Stanford, CA, USA

https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/

 ISBN 978-607-8242-11-5

Filtrado del Error de Alta Frecuencia en Series de Tiempo: Aplicación de las Ecuaciones de Euler-Lagrange

David Parra-Guevara[1] y Yuri N. Skiba[2]
Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CDMX, C. P. 04510, México.
(1) E-mail: pdavid@atmosfera.unam.mx, (2) e-mail: skiba@unam.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un método para filtrar series de tiempo con el objetivo de eliminar el error de alta frecuencia contenido en los datos. Se explica la importancia de la remoción de tal error y se enfatiza la diferencia entre este método y los esquemas contenidos en la teoría clásica del filtrado de series de tiempo. El método de filtrado se formula a través de un problema variacional. El funcional cuadrático que se minimiza está formado por un término que aproxima los datos y dos términos ponderados que estiman el tamaño de las dos primeras derivadas. Los parámetros de ponderación se introducen para regular el proceso de filtrado. Se prueba que el mínimo del funcional es la solución de una ecuación lineal de Euler-Lagrange de cuarto orden. Dicha ecuación diferencial se discretiza a través de fórmulas de diferencias finitas de segundo orden de aproximación para obtener un sistema lineal de ecuaciones. La solución de dicho sistema lineal es la serie de tiempo filtrada. Se describen dos criterios para seleccionar los parámetros que regulan el proceso de filtrado y se presentan ejemplos numéricos del filtrado de series de tiempo que confirman el buen desempeño del método.

Palabras clave: serie de tiempo; error de alta frecuencia; filtrado; ecuaciones de Euler-Lagrange

High-Frequency Error Filtering in Time Series: Application of Euler-Lagrange Equations

Abstract

In this work a method for time series filtering is presented with the aim to remove the high-frequency error contained in data. The importance of the disposal of such error is explained and the difference between this filtering method and the schemes contained in the classical filtering theory of time series is emphasized. The filtering method is formulated through a variational problem. The quadratic functional to minimize is formed by a term that approximates the data and two weighted terms that estimate the size of the first and second derivatives. The weight parameters are introduced to regulate the filtering process. It is proved that the minimum of such functional is the solution of a fourth-order Euler-Lagrange linear equation. Finite difference formulas of second order of approximation are used to discretize such differential equation and obtain a linear system of equations. The solution of this linear system is the filtered time series. Two criteria to choose the parameters that regulate the filtering process are described and numerical examples of the time series filtering are presented to confirm the method's fine performance.

Keywords: time series; high-frequency error; filtering; Euler-Lagrange equations

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las series de tiempo son conjuntos de datos que tienen gran importancia en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería ya que son un instrumento que contiene información relevante tanto para la predicción de fenómenos como para la estimación de parámetros de modelos. En las últimas décadas, las aplicaciones de las series de tiempo se han extendido a campos realmente disímiles (Golestani y Gras, 2014; Box et al., 1994), entre los que se encuentran la predicción del comportamiento de los mercados financieros, la predicción de ataques epilépticos, la predicción de eventos de extinción en ambientes naturales deteriorados, la estimación del incremento de la temperatura global o la recuperación de la historia de emisión de fuentes contaminantes (Parra-Guevara y Skiba, 2016). Dependiendo del tipo de aplicación, las series de tiempo pueden requerir de un pre-procesamiento que separe o filtre la información relevante con el fin de disponer de datos más precisos y así mejorar las predicciones o estimaciones. Existen diferentes tipos de filtros para series de tiempo, algunos de estos definidos por ecuaciones diferenciales, en particular, por ecuaciones de Euler-Lagrange.

Las ecuaciones de Euler-Lagrange son ecuaciones diferenciales cuyo espacio de soluciones contiene a las funciones extremo (máximos y mínimos) de problemas variacionales. Estas ecuaciones aparecen formalmente en el trabajo de Leonhard Euler de 1744: *Methodus inveniendi curvas lineas maximi minimive proprietate gaudentes sive solution problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti* (Fraser, 1994), en donde se analizan en forma sistemática algunos problemas propios de la geometría y de la cinemática. Sin embargo, la teoría del cálculo variacional y de las ecuaciones de Euler-Lagrange como se conocen actualmente se deben al método introducido por Joseph-Louis Lagrange en diversos trabajos presentados entre 1750 y 1760 (Fraser, 1994). Dicha teoría, mas general que la considerada por Euler, se basa en el concepto de la primera variación de un funcional, lo cual permite el análisis de extremos de funcionales en una gran cantidad de problemas prácticos (Cerdá, 2001; Smith, 1998), entre los cuales se encuentran problemas de geometría, mecánica, óptica, diseño y control óptimo, asimilación de datos, estimación de parámetros y filtrado de imágenes (Le et al., 2007; Rudin et al., 1992), entre otros.

Una de las aplicaciones más importantes de los filtros es la remoción de los errores, los cuales pueden ser más o menos nocivos dependiendo del tipo de problema que se desea resolver a través del conjunto de datos disponibles. En particular, los errores de alta frecuencia contenidos en las series de tiempo representan una dificultad para la solución de los problemas inversos relacionados con la identificación de parámetros en los modelos de dispersión de contaminantes. Esto se debe a la inestabilidad que dichos problemas inversos exhiben con respecto a las perturbaciones en los datos, en especial, se sabe que los errores de alta frecuencia inducen grandes cambios en los parámetros que se desean estimar, además de generar problemas de existencia de soluciones (Parra-Guevara y Skiba, 2016; Enting y Newsam, 1990). Ya que este tipo de error aparece como una componente aleatoria en el monitoreo de señales, como son, por ejemplo, la concentración de contaminantes, resulta importante filtrar este tipo de error contenido en las series de tiempo como un proceso a priori para poder utilizar diversos tipos de datos en la solución de problemas inversos relacionados con la dispersión de sustancias en la atmósfera.

El siguiente ejemplo muestra lo nocivo que puede ser para la solución de un problema inverso el tener un error de alta frecuencia contenido en una señal que depende del tiempo (datos). Consideramos un modelo de dispersión de dimensión cero o modelo de caja. Se asume que la concentración de un contaminante $\phi(t)$ se describe por las siguientes ecuaciones (Parra-Guevara y Skiba, 2003).

$$\frac{d\phi}{dt} + (\sigma + \frac{1}{V}ua^2)\phi = \frac{1}{V}Q(t), \quad 0 < t < T \tag{1}$$

$$\phi(0) = 0 \tag{2}$$

Aquí se supone que, en todo momento, el contaminante forma una mezcla homogénea con el aire en la región $\mathbf{D}=[0,a]\times[0,a]\times[0,a]$, la cual es un cubo con arista de longitud a y volumen $V=a^3$. La velocidad del viento u se asume de tipo estacionario, con dirección perpendicular a una pared vertical de la caja. Además, σ denota el coeficiente de transformación química del contaminante, y $Q(t)$ es la tasa de emisión de dicha sustancia para una fuente puntual en la región **D**.

El objetivo en el problema inverso es usar la función de la concentración del contaminante para obtener la tasa de emisión. Aparentemente, tal problema se resuelve sustituyendo la concentración del contaminante en el lado izquierdo de la ecuación (1). Sin embargo, si consideramos que la concentración del contaminante que se monitorea es $\phi(t)+\delta\phi(t)$, donde $\delta\phi(t)$ es una pequeña perturbación, entonces la solución de (1) que corresponde a estos datos es $Q(t)+\delta Q(t)$, donde $\delta Q(t)$ es la respectiva perturbación o error en la

 ISBN 978-607-8242-11-5

tasa de emisión. Debido a que la ecuación (1) es lineal, dichas perturbaciones pueden agruparse de acuerdo a la siguiente ecuación diferencial:

$$\delta Q(t) = V\{\delta'\phi(t) + r\delta\phi(t)\} \tag{3}$$

donde el coeficiente r está definido como $r=\sigma+V^{1}ua^{2}$.

Ahora se considera que la perturbación es de alta frecuencia, es decir, que tiene la forma $\delta\phi(t)=\varepsilon\text{sen}(4\omega\pi t/T)$, donde $\varepsilon>0$ es la amplitud de la perturbación ($\varepsilon<<1$), y la frecuencia ω es un número entero positivo. Sustituyendo $\delta\phi(t)$ en la ecuación (3) se obtiene lo siguiente:

$$\delta Q(t) = \varepsilon V\left\{\frac{4\omega\pi}{T}\cos\left(\frac{4\omega\pi t}{T}\right) + r\text{sen}\left(\frac{4\omega\pi t}{T}\right)\right\} \tag{4}$$

Observamos ahora que cuando $t=T/2$ en la ecuación (4) entonces se tiene que

$$\delta Q\left(\frac{T}{2}\right) = \varepsilon V\frac{4\omega\pi}{T}\cos(2\omega\pi) = \varepsilon V\frac{4\omega\pi}{T}, \quad \omega = 1,2,\ldots \tag{5}$$

Y por lo tanto, $\delta Q(T/2)\to\infty$ cuando $\omega\to\infty$. Esto significa que, aún para un error de pequeña amplitud en los datos ($\varepsilon<<1$), el error en la tasa de emisión que se recupera $\delta Q(t)$ es arbitrariamente grande cuando la frecuencia ω de la perturbación se incrementa. Esta es una de las motivaciones más importantes para obtener filtros que remuevan este tipo de error en señales que dependen del tiempo.

La teoría clásica para crear filtros que eliminen o reduzcan diferentes tipos de errores utiliza la transformada de Fourier $\mathfrak{F}$ y algunas propiedades de la convolución de señales (Gasquet y Witomski, 1999). El argumento general utiliza la propiedad que tiene la transformada $\mathfrak{F}$ cuando se aplica a la convolución de una función $h(t)$, conocida como función de respuesta al impulso, con una señal ϕ que depende del tiempo, $\phi=\phi(t)$:

$$\mathfrak{F}\{(h*\phi)(t)\} = \mathfrak{F}\{h(t)\}\mathfrak{F}\{\phi(t)\} \tag{6}$$

Ya que $\mathfrak{F}$ transforma las funciones que dependen del tiempo a funciones en el dominio de las frecuencias, entonces es posible escribir el lado derecho de la ecuación (6) en la siguiente forma:

$$\mathfrak{F}\{h(t)\}\mathfrak{F}\{\phi(t)\} = H(\omega)\Phi(\omega) \tag{7}$$

Ahora bien, la función H se puede elegir para eliminar ciertas frecuencias indeseables contenidas en la función Φ, por ejemplo, si

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \le \omega_0 \\ 0, & \omega > \omega_0 \end{cases} \tag{8}$$

entonces la función Φ se reduce sólo a las frecuencias bajas $\omega\le\omega_0$ después de multiplicar por H. La ventaja de este procedimiento es que cuando la señal $\phi(t)$ tiene errores cuyas frecuencias están contenidas en el intervalo (ω_0, ∞) entonces las frecuencias espurias desaparecen debido al producto $H(\omega)\Phi(\omega)$, y por lo tanto, desaparece el error en los datos. De hecho, la función resultante $H(\omega)\Phi(\omega)$ es el espectro de frecuencias de la señal que ha sido filtrada ϕ_f. Aplicando transformada inversa de Fourier en ambos lados de las ecuaciones (6) y (7) se tiene el siguiente resultado general:

$$\phi_f(t) = \mathfrak{F}^{-1}\{H(\omega)\Phi(\omega)\} = (h*\phi)(t) \tag{9}$$

Esto significa que es posible crear diferentes filtros para señales a partir de la elección de diferentes funciones de transferencia $H(\omega)=\mathfrak{F}\{h(t)\}$. En todos estos casos el filtro actúa como la convolución de la función de respuesta al impulso $h(t)$ con la señal $\phi(t)$ que se desea filtrar (ver ecuación (9)). Note que el filtro pasa-baja definido por la ecuación (8) es sólo uno de los tantos filtros posibles. Es importante observar que en el producto $H(\omega)\Phi(\omega)$ se pueden suprimir también frecuencias que conforman la señal real por lo que la recuperación perfecta de la información, en general, es poco probable. El filtrado de señales depende fuertemente de los parámetros que definen el filtro, como por ejemplo ω_0 en la ecuación (8), los cuales

 ISBN 978-607-8242-11-5

pueden depender del conocimiento que el usuario tenga a priori sobre el error que se desea suprimir.

Es claro que la aplicación de la ecuación (9) requiere de la transformada inversa de Fourier $\mathfrak{F}^{-1}$ cuando el filtro se define a través de la función de transferencia $H(\omega)$, lo cual implica un esfuerzo computacional que no es trivial. Para evitar este tipo de cálculo, los filtros se pueden definir aprovechando la operación de convolución en (9) junto con el siguiente teorema.

Teorema 1

La solución de una ecuación diferencial ordinaria lineal de orden n, con coeficientes constantes y condiciones iniciales homogéneas, es la convolución de la función de respuesta al impulso $h(t)$ con el forzamiento de la ecuación.

Demostración. Se considera el siguiente problema de valor inicial:

$$L[y] = \sum_{i=0}^{n} c_i \frac{d^i y}{dt^i} = \phi(t) \tag{10}$$

$$y^i(0) = 0, \quad i = 0,1,...,n-1 \tag{11}$$

donde los coeficientes c_i son números reales y $c_n \neq 0$. La función $h(t)$ se define como la solución del problema (10)-(11) con el forzamiento particular $\phi(t)=\delta(t)$, donde $\delta(t)$ es la función delta de Dirac centrada en $t=0$, también conocida como función de impulso (de aquí el nombre que recibe la función $h(t)$). Al multiplicar la ecuación (10) por la función $h(t-\tau)$ e integrar en el intervalo $(0, t)$ se obtiene que

$$\sum_{i=0}^{n} \int_0^t h(t-\tau) c_i \frac{d^i y}{d\tau^i} d\tau = \int_0^t \phi(\tau) h(t-\tau) d\tau = (h * \phi)(t) \tag{12}$$

Por otra parte, la técnica de integración por partes junto con la condición (11) permite escribir

$$\int_0^t h(t-\tau) c_i \frac{d^i y}{d\tau^i} d\tau = \int_0^t y(\tau) c_i \frac{d^i h}{d\tau^i}(t-\tau) d\tau, \quad i = 1,...,n \tag{13}$$

Sustituyendo la ecuación (13) en el lado izquierdo de la ecuación (12) se tiene que

$$\int_0^t y(\tau) \left\{ \sum_{i=0}^{n} c_i \frac{d^i h}{d\tau^i}(t-\tau) \right\} d\tau = (h * \phi)(t) \tag{14}$$

Por definición de la función $h(t)$ se tiene la siguiente igualdad

$$\sum_{i=0}^{n} c_i \frac{d^i h}{d\tau^i}(t-\tau) = \delta(t-\tau), \quad \tau \in (0,t) \tag{15}$$

y por lo tanto, de la ecuación (14) se obtiene

$$\int_0^t y(\tau) \delta(t-\tau) d\tau = (h * \phi)(t) \tag{16}$$

El cambio de variable $\xi = t-\tau$ en la integral de la ecuación (16) implica que

$$\int_0^t y(\tau) \delta(t-\tau) d\tau = \int_0^t y(t-\xi) \delta(\xi) d\xi \tag{17}$$

Finalmente, usando en (17) la propiedad de filtrado de la función delta de Dirac, y sustituyendo tal resultado en la ecuación (16), se tiene la conclusión del teorema.

$$y(t) = (h * \phi)(t) \tag{18}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Este resultado implica que todo problema de valor inicial del tipo (10)-(11) es un filtro para la señal $\phi(t)$. Además, la señal filtrada $\phi_h(t)$ es la solución $y(t)$ de dicho problema. En este caso, la forma en que se modifican las frecuencias de la señal dependerá de la función de transferencia $H(\omega)=\Im\{h(t)\}$, la cual a su vez dependerá de los coeficientes c_i, i=0,1,…,n, en la ecuación (10). Así, el proceso de filtrado se reduce a la búsqueda de ciertos coeficientes c_i junto con la solución de un problema de valor inicial. El llamado filtro RC es un caso particular de esta teoría (Gasquet y Witomski, 1990).

En este trabajo se muestra una aproximación diferente al problema de filtrado con el fin de eliminar errores de alta frecuencia contenidos en series de tiempo. No se recurre a rutinas de la transformada rápida de Fourier o rutinas de convolución, y tampoco se hace una búsqueda de parámetros c_i para el problema de valor inicial (10)-(11). Dichos filtros se basan en problemas con valores a la frontera para ecuaciones diferenciales ordinarias lineales, específicamente, ecuaciones de Euler-Lagrange (Smith, 1998). La ventaja de este método es que dichas ecuaciones se resuelven de forma eficiente a través de esquemas de diferencias finitas, es decir, el filtrado de series de tiempo se realiza rápidamente por medio de la solución de un sistema lineal de ecuaciones.

FORMULACIÓN VARIACIONAL Y ECUACIÓN DE EULER-LAGRANGE

Se considera conocida una función que depende del tiempo $\phi_d(t)$, la cual es la suma de la señal que se desea recuperar $\phi(t)$ con un error de alta frecuencia $\varepsilon(t)$.

$$\phi_d(t) = \phi(t) + \varepsilon(t), \quad t \in (0,T) \tag{19}$$

En forma discreta, se asume que el conjunto de datos que se desea filtrar es la respectiva serie de tiempo $\{\phi_d^k\}$, la cual tiene la siguiente estructura:

$$\phi_d^k = \phi_k + \varepsilon_k, \quad k = 1,2,...,K \tag{20}$$

donde $\phi_k = \phi(t_k)$ es el valor exacto de la señal al instante $t_k \in (0,T)$, y $\varepsilon_k=\varepsilon(t_k)$ es el error contenido en el k-ésimo dato. Para el filtrado de la señal se propone el siguiente problema variacional:

$$\text{minimizar} \quad J(\phi) = \tfrac{1}{2}\int_0^T (\phi_d - \phi)^2\,dt + \tfrac{1}{2\gamma}\int_0^T (\phi')^2\,dt + \tfrac{1}{2\eta}\int_0^T (\phi'')^2\,dt \tag{21}$$

$$\text{sujeto a:} \quad \phi(0) = \phi_0, \;\; \phi'(0) = \phi_0', \;\; \phi(T) = \phi_T, \;\; \phi'(T) = \phi_T' \tag{22}$$

La primera integral del funcional cuadrático $J(\phi)$ permite, a través del proceso de minimización, recuperar la señal ϕ aproximando los datos ϕ_d en el intervalo $(0,T)$, mientras que las dos últimas integrales eliminan el error de alta frecuencia ε por medio de la reducción del tamaño de las derivadas ϕ' y ϕ''. Los parámetros positivos γ y η se han introducido en el funcional $J(\phi)$ para regular el peso entre el término que facilita la aproximación a los datos y los términos que corresponden al filtrado del error. De esta forma, cuando γ y η tienden a infinito entonces los dos últimos términos en el funcional $J(\phi)$ tienen un peso pequeño, lo cual favorece la aproximación de los datos con funciones suaves. En el otro extremo, cuando γ y η tienden a cero entonces los dos últimos términos en el funcional $J(\phi)$ adquieren mayor peso, lo cual incrementa la suavidad de la solución del problema (21)-(22) pero no la aproximación a los datos. Las condiciones de frontera dadas por la ecuación (22) se asumen conocidas, ya que una simple interpolación usando los primeros y últimos datos de la serie de tiempo permite obtener tales valores.

Con el fin de hallar la solución ϕ del problema variacional (21)-(22) se calcula la primera variación del funcional $J(\phi)$ a través de la fórmula de Gateaux (Smith, 1998),

$$\delta J(\phi;\delta\phi) = \left\{\frac{\partial}{\partial\lambda} J(\phi + \lambda\delta\phi)\right\}_{\lambda=0} \tag{23}$$

donde $\delta\phi$ es una variación de la función ϕ. En el caso del problema (21)-(22), dicha variación debe satisfacer las condiciones de frontera homogéneas,

$$\delta\phi(0) = 0, \;\; \delta'\phi(0) = 0, \;\; \delta\phi(T) = 0, \;\; \delta'\phi(T) = 0 \tag{24}$$

Esto con el fin de que la función $\phi+\lambda\delta\phi$ satisfaga las condiciones de frontera (22) para todo número real λ.

 ISBN 978-607-8242-11-5

La aplicación de la ecuación (23) al funcional $J(\phi)$ definido en la ecuación (21) tiene por resultado que

$$\delta J(\phi;\delta\phi) = -\int_0^T (\phi_d - \phi)\delta\phi dt + \tfrac{1}{\gamma}\int_0^T \phi'\delta'\phi dt + \tfrac{1}{\eta}\int_0^T \phi''\delta''\phi dt \tag{25}$$

A partir de la aplicación del método de integración por partes en los dos últimos términos de la ecuación (25) y las condiciones de frontera (24) se obtiene que

$$\int_0^T \phi'\delta'\phi dt = -\int_0^T \phi''\delta\phi dt \quad y \quad \int_0^T \phi''\delta''\phi dt = \int_0^T \phi''''\delta\phi dt \tag{26}$$

Por lo tanto, sustituyendo las igualdades de (26) en la ecuación (25), se tiene la primera variación de *J*,

$$\delta J(\phi;\delta\phi) = \int_0^T \left\{\phi - \phi_d - \tfrac{1}{\gamma}\phi'' + \tfrac{1}{\eta}\phi''''\right\}\delta\phi dt \tag{27}$$

Por otra parte, al considerar la condición necesaria de extremo de un funcional (Smith, 1998),

$$\delta J(\phi;\delta\phi) = 0, \quad \forall\delta\phi \tag{28}$$

se tiene de la ecuación (27) que

$$\int_0^T \left\{\phi - \phi_d - \tfrac{1}{\gamma}\phi'' + \tfrac{1}{\eta}\phi''''\right\}\delta\phi dt = 0, \quad \forall\delta\phi \tag{29}$$

Lo cual implica que el integrando entre llaves en la ecuación (29) es igual a cero, ya que la variación $\delta\phi$ es arbitraria. Esto significa que la solución ϕ del problema variacional (21)-(22) es solución del siguiente problema lineal con valores a la frontera:

$$\tfrac{1}{\gamma}\phi'' - \tfrac{1}{\eta}\phi'''' - \phi = -\phi_d \quad \text{en} \quad (0,T) \tag{30}$$

$$\phi(0) = \phi_0, \quad \phi'(0) = \phi_0', \quad \phi(T) = \phi_T, \quad \phi'(T) = \phi_T' \tag{31}$$

La ecuación (30) se conoce como ecuación de Euler-Lagrange asociada al problema variacional y representa una condición necesaria de extremo. Además, debido a las propiedades de convexidad en el problema variacional (21)-(22), la solución del problema (30)-(31) es la única solución de dicho problema de optimización, es decir, el problema de valores a la frontera (30)-(31) también representa una condición suficiente para el extremo del funcional *J*. La demostración es similar a la contenida en Parra-Guevara et al. (2015). De esta forma, se concluye que la solución del problema (30)-(31) representa la señal que ha sido filtrada a partir de la señal conocida ϕ_d.

Cuando la señal ϕ_d se conoce en forma analítica en el intervalo (0, *T*) es posible obtener la solución exacta del problema (30)-(31). Para este fin, se buscan las cuatro soluciones básicas de la ecuación (30) en la forma $\phi(t)=\exp(rt)$. Lo cual conduce a la ecuación característica $p(r)=\eta^{-1}r^4-\gamma^{-1}r^2+1=0$. El cambio de variable $s=r^2$ reduce dicha ecuación a la cuadrática $\eta^{-1}s^2-\gamma^{-1}s+1=0$, cuyas raíces se determinan por la ecuación

$$s = \frac{\eta}{2}\left[\frac{1}{\gamma} \pm \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} - \frac{4}{\eta}}\right] \tag{32}$$

Cuando $\eta>4\gamma^2$ la ecuación (32) proporciona dos raíces reales positivas, y por lo tanto, todas las soluciones básicas son funciones exponenciales. En el caso $\eta=4\gamma^2$ se obtiene de (32) una raíz real positiva, lo cual implica que las soluciones básicas son dos funciones exponenciales y dos funciones que son producto de dichas exponenciales y la función identidad. En el último caso, $\eta<4\gamma^2$, se obtiene de (32) dos raíces complejas conjugadas, por lo que las funciones básicas son una exponencial multiplicada en forma separada por las funciones seno y coseno, y las respectivas funciones que son producto de éstas y la función identidad. La solución general de la ecuación (30) es la combinación lineal de dichas funciones básicas mas una solución particular de la ecuación diferencial no homogénea. Tal función particular se obtiene por el método de variación de parámetros también a partir de las funciones básicas y la señal ϕ_d (Braun, 1983). Finalmente, la solución analítica del problema (30)-(31) se obtiene al calcular los coeficientes que contiene la solución general a partir de las condiciones numéricas (31). Dicho cálculo consiste en

 ISBN 978-607-8242-11-5

resolver un sistema lineal de ecuaciones de dimensión cuatro. Este análisis muestra que la introducción del tercer término en el funcional $J(\phi)$, definido por (21), amplia el espacio de funciones desde el cual se pretende aproximar la señal ϕ, y por lo tanto, se puede esperar una mejor representación de dicha señal.

Desafortunadamente, es una situación poco común conocer la señal ϕ_d en forma analítica, más bien, la situación usual es contar con una serie de tiempo $\{\phi_d^k\}$ dada por la ecuación (20). En tal caso, se debe proceder en forma numérica para realizar el filtrado de los datos. El método que se propone para discretizar el problema (30)-(31) se basa en fórmulas de diferencias finitas centradas de segundo orden de aproximación. Para tal fin, se considera una partición regular del intervalo (0, T) en sub intervalos de longitud $\Delta t=T/(K\text{-}1)$, junto con los nodos $t_k=(k\text{-}1)\Delta t$, $k=0,1,\ldots,K+1$. Note que los nodos t_0 y t_{K+1} son artificiales, es decir, están fuera del intervalo (0, T). Considerando esta malla en el intervalo (0, T), la discretización de la ecuación (30) está dada como

$$\frac{1}{\gamma}\frac{\phi_{k-1}-2\phi_k+\phi_{k+1}}{\Delta t^2}-\frac{1}{\eta}\frac{\phi_{k-2}-4\phi_{k-1}+6\phi_k-4\phi_{k+1}+\phi_{k+2}}{\Delta t^4}-\phi_k=-\phi_d^k,\quad k=2,...,K-1$$

Además, la discretización para las condiciones de frontera (31) es

$$\phi'(0)=\phi'(t_1)=\frac{\phi_2-\phi_0}{2\Delta t}=\phi_0'\quad \text{y}\quad \phi'(T)=\phi'(t_K)=\frac{\phi_{K+1}-\phi_{K-1}}{2\Delta t}=\phi_T'$$

Las dos últimas expresiones conducen al siguiente sistema lineal de ecuaciones:

$$\phi_{k-2}-(4+\frac{\eta}{\gamma}\Delta t^2)\phi_{k-1}+(6+\frac{2\eta}{\gamma}\Delta t^2+\eta\Delta t^4)\phi_k-(4+\frac{\eta}{\gamma}\Delta t^2)\phi_{k+1}+\phi_{k+2}=-\eta\Delta t^4\phi_d^k,\quad k=2,...,K-1 \tag{33}$$

$$\phi_0=\phi_2-2\Delta t\phi_0'\quad \text{y}\quad \phi_{K+1}=\phi_{K-1}+2\Delta t\phi_T' \tag{34}$$

cuya solución es la señal filtrada de la serie de tiempo. Note que la matriz del sistema lineal es simétrica y penta-diagonal, además de que no depende de los datos $\{\phi_d^k\}$. Tal información aparece en el lado derecho del sistema lineal de ecuaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La dificultad de un proceso de filtrado se puede entender al observar la ecuación (20). En dicha ecuación, por cada dato ϕ_d^k se tienen dos incógnitas: ϕ_k y ε_k. Esto hace imposible cuadrar el problema para obtener exactamente todas las variables. Por esta razón, se busca una aproximación global de la señal a través de la formulación (21)-(22), la cual nos lleva al problema de resolver el sistema lineal (33)-(34). Para mostrar el desempeño de este método de filtrado de series de tiempo se presenta un ejemplo con resultados típicos. Para este fin, se considera la siguiente señal:

$$\phi(t)=\text{sen}(5t)+\{2\cos(3t)+5\cos(\sqrt{2}t)\}-t+e^{0.01t},\quad 0\le t\le 4\pi \tag{35}$$

La cual es la suma de una función periódica, una función cuasi-periódica, una función estrictamente decreciente y una función estrictamente creciente. A partir de esta función se generan series de tiempo sintéticas $\{\phi_d^k\}$, las cuales se obtienen adicionando a ϕ un error aleatorio de alta frecuencia (ver ecuación (20)). En los ejemplos se considera que la amplitud de dicho error es un valor representativo del tamaño de la señal ϕ, es decir, los errores ε_k se distribuyen uniformemente en el intervalo ($-p\max|\phi|/2$, $p\max|\phi|/2$), donde el coeficiente p es un porcentaje. Además, para estimar la calidad del proceso de filtrado se utiliza el error porcentual:

$$\text{E\%}=\left(\|\phi-\phi_f\|_2/\|\phi\|_2\right)\times 100 \tag{36}$$

donde ϕ_f es la serie de tiempo que ha sido filtrada, es decir, la solución del sistema lineal (33)-(34).

Los experimentos numéricos muestran que cuando γ y η se incrementan entonces se favorece la aproximación de la señal exacta ϕ a través de funciones suaves, es decir, se filtra la señal ϕ_d por remoción del error de alta frecuencia. Sin embargo, no existe ninguna ventaja en considerar tales parámetros en forma independiente. Por lo tanto, sin pérdida de generalidad, se supone que $\gamma=\eta$, y se realiza el filtrado de

 ISBN 978-607-8242-11-5

la serie de tiempo cuando γ aumenta de valor. La figura 1 muestra dicho proceso para varios valores de este parámetro. Cuando γ=1 se tiene que E%=53, observe en el primer gráfico que la señal filtrada ϕ_f (línea azul) se encuentra separada de los datos $\{\phi_d^k\}$ (línea roja) y de la señal exacta ϕ (línea verde); cuando γ se incrementa, por ejemplo, hasta γ=100, el error disminuye hasta E%=12 (segundo gráfico); y finalmente, para γ=4000 se obtiene un mejor resultado del filtrado de la serie de tiempo con E%=2 (tercer gráfico). En todos estos casos se consideraron *K*=800 elementos en la serie de tiempo y un coeficiente *p*=15/100.

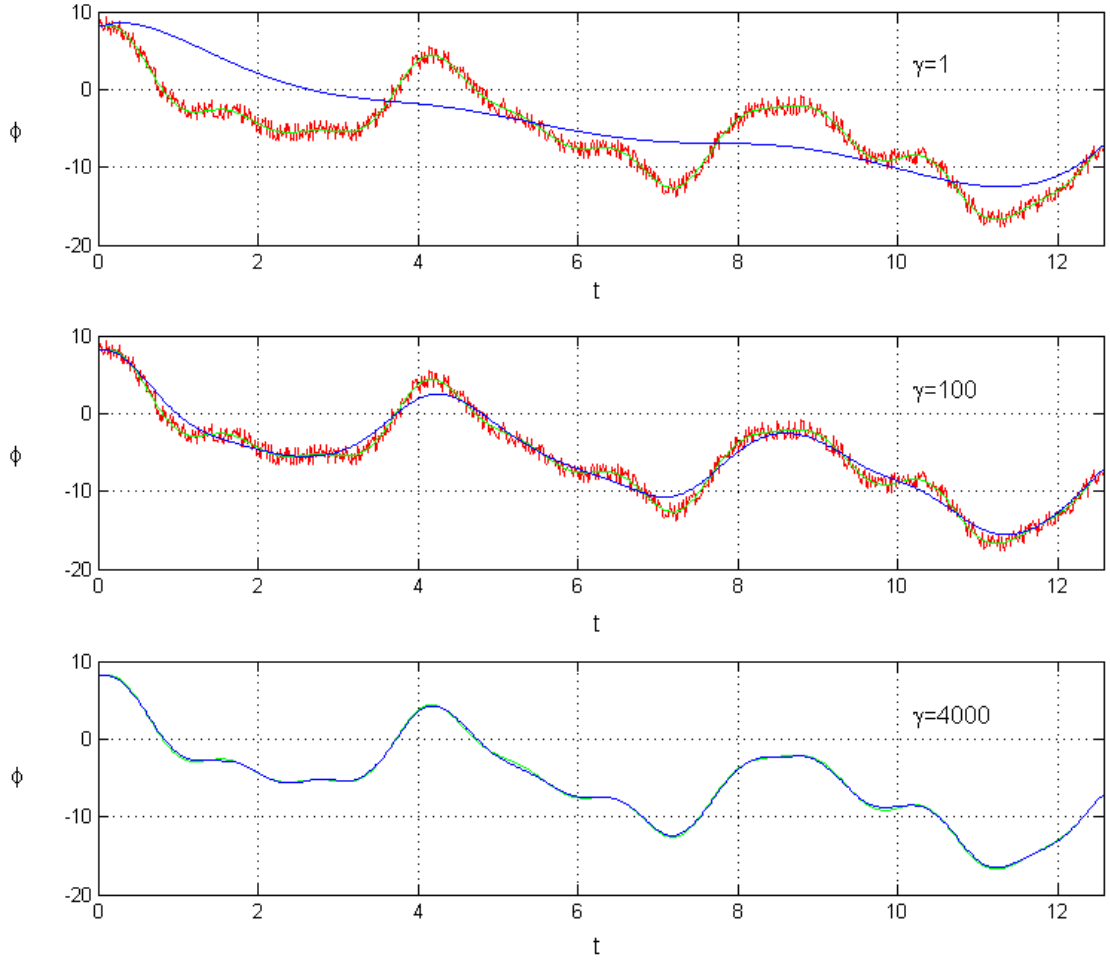


Fig. 1: Comparación del filtrado de una serie de tiempo para valores crecientes del parámetro γ.

Sin embargo, si se continua incrementando el valor del parámetro γ entonces la solución del sistema lineal (33)-(34) se contamina con el error de alta frecuencia contenido en los datos, es decir, aparecen oscilaciones espurias de pequeña amplitud. La figura 2 muestra dicho comportamiento para γ=10^7. En este ejemplo el error de aproximación es E%=5, y aunque no difiere mucho del error que inicialmente hay en los datos (E%=10), si se aprecian oscilaciones que no son parte de la señal exacta ϕ.

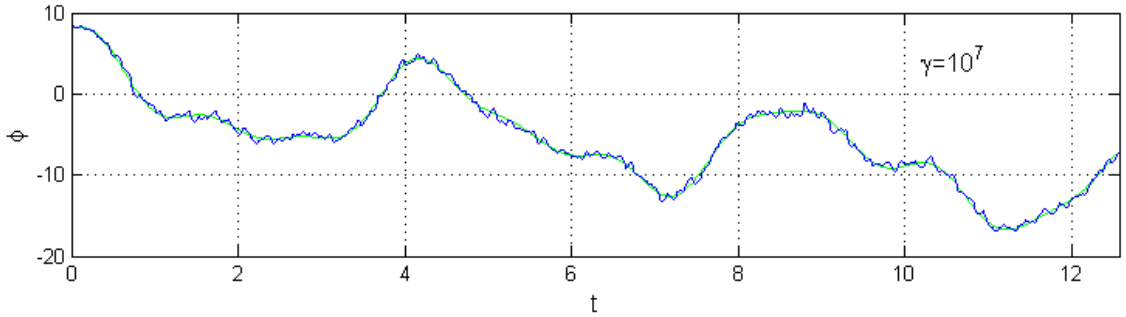


Fig. 2: Comparación de la señal exacta ϕ (línea verde) con la solución del sistema lineal (33)-(34) para γ=10^7.

ISBN 978-607-8242-11-5

Esto indica que es necesario introducir en este método de filtrado un criterio para seleccionar un valor apropiado del parámetro γ. Tal valor del parámetro debe permitir la aproximación de la señal exacta ϕ evitando la contaminación con el error de alta frecuencia contenido en los datos. Un criterio general para seleccionar dicho parámetro se obtiene al observar que el funcional definido por la ecuación (21) es una regularización del tipo Tikhonov con el parámetro de regularización γ. En este caso, el parámetro de regularización se elige aplicando el criterio de la curva L (Hansen, 1998). Dicho criterio consiste en establecer un balance entre la aproximación a los datos y el tamaño de la primera derivada. El procedimiento inicia con el trazo de la trayectoria (curva L) definida por

$$\gamma \mapsto \left(\ln\left\|\phi_d - \phi_f\right\|_2,\ \ln\left\|\phi_f'\right\|_2\right) \tag{37}$$

Posteriormente, se selecciona el parámetro γ como el valor que corresponde al punto de la trayectoria más cercano al origen. Considerando los datos de la figura 1, el primer gráfico de la figura 3 muestra la respectiva curva L (línea azul) para $1<\gamma<10^4$, y el punto de ésta que está más cercano al origen (en rojo). El valor del parámetro que corresponde a dicho punto es γ=794. Para este valor del parámetro la serie filtrada ϕ_f no contiene oscilaciones espurias (segundo gráfico en la figura 3), y el error de aproximación es E%=5.

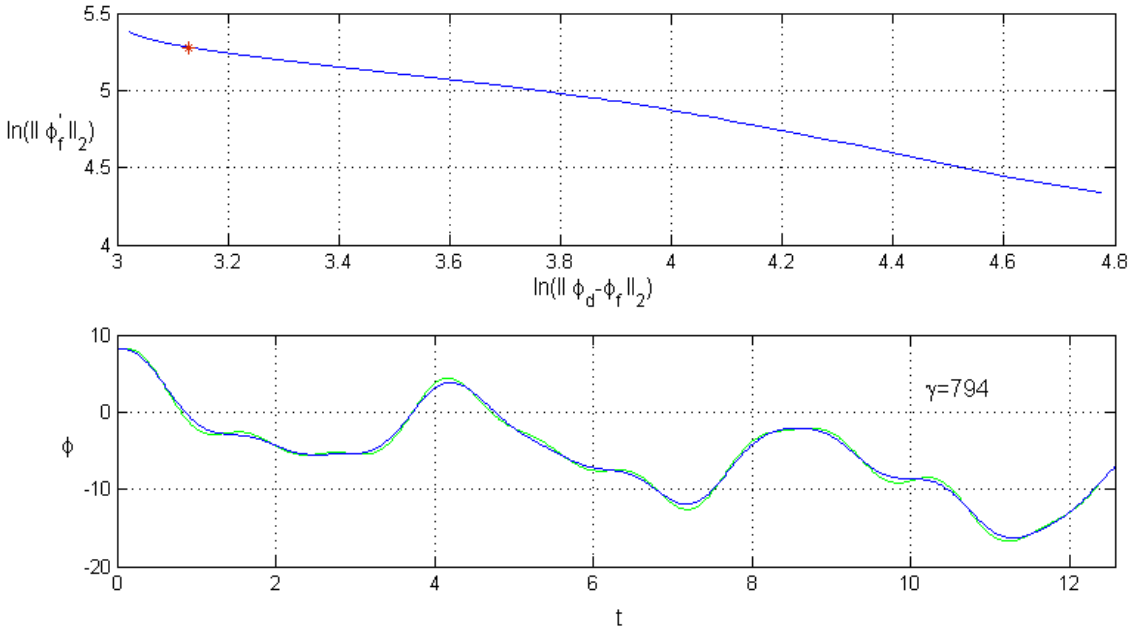


Fig. 3: Primer gráfico: Curva L; Segundo gráfico: Comparación de ϕ con ϕ_f cuando γ=794.

El valor de γ que proporciona el criterio de la curva L se puede mejorar. Para esto, observamos que cuando γ se incrementa el comportamiento de ϕ_f al aproximar a ϕ se divide en tres etapas. Primero hay un proceso de transición, después de cierto umbral, hay un estado de equilibrio, y a continuación, se tiene un proceso de contaminación con el error de alta frecuencia en los datos. Estas etapas se caracterizan a través de la función CSD, la cual se forma contando el número total de cambios locales en el signo de la derivada de ϕ_f. Note que si $(\phi_f^{k+1} - \phi_f^k)(\phi_f^{k+2} - \phi_f^{k+1}) < 0$ entonces hay uno de dichos cambios locales en $t=t_{k+1}$.

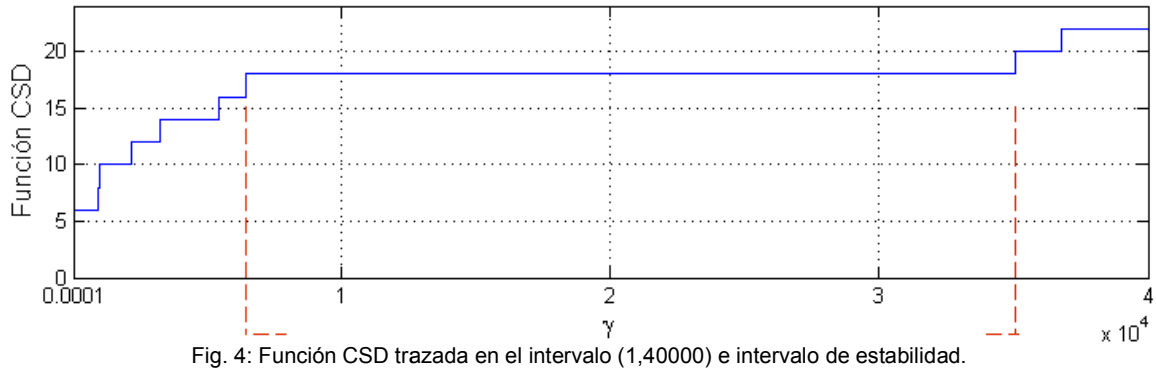


Fig. 4: Función CSD trazada en el intervalo (1,40000) e intervalo de estabilidad.

ISBN 978-607-8242-11-5

Cuando la función CSD alcanza el equilibrio se tiene que ϕ_f aproxima correctamente la señal ϕ, es decir, no incorpora aun los errores de alta frecuencia de los datos. Esto se debe al peso de los dos últimos términos del funcional (21). Por lo tanto, un valor apropiado de γ para el filtrado de series de tiempo es el inicio de dicho intervalo de estabilidad. La figura 4 muestra la función CSD correspondiente a los datos de la figura 1. El intervalo de estabilidad se encuentra limitado por las líneas de color rojo. Dicha intervalo inicia en γ=6450, que es el valor del parámetro que se elige para el filtrado de la serie de tiempo. En este caso, la serie de tiempo filtrada ϕ_f aproxima la señal exacta ϕ correctamente, es decir, sin oscilaciones espurias. El error de aproximación es E%=2, lo cual mejora la aproximación dada por el criterio de la curva L. El perfil de la señal ϕ_f es similar al que se observa en el tercer gráfico de la figura 1.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un método para el filtrado de series de tiempo que remueve el error de alta frecuencia. El filtro está definido por una ecuación de Euler-Lagrange y el proceso de filtrado se realiza resolviendo un sistema lineal de ecuaciones. También se han descrito dos criterios para estimar los parámetros que regulan el filtrado. El método muestra buenos resultados para la aproximación de la señal exacta. Se destacan dos ventajas operativas del método: i) la programación del método de filtrado en el ambiente de MATLAB es bastante sencilla. Además, los programas desarrollados son eficientes en una computadora de escritorio; y ii) el filtrado de series de tiempo muy largas se puede realizar a través del filtrando de la señal por intervalos adyacentes, las condiciones de frontera (31) garantizan la continuidad y la diferenciabilidad de la señal filtrada en los extremos de dichos intervalos. Esto permite resolver sistemas lineales de bajo orden.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Sistema Nacional de Investigadores del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México (SNI-CONACyT), becas No. 25170 y 14539.

REFERENCIAS

Box, G. E. P., G. M. Jenkins y G. C. Reinsel, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1994).

Braun, M., *Differential Equations and Their Applications*. Springer-Verlag, NY (1983).

Cerdá, E., *Optimización Dinámica*. Prentice-Hall (2001).

Hansen, P. C., *Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems. Numerical Aspects of Linear Inversion*. SIAM, Mathematical Modeling and Computation (1998).

Le, T., R. Chartrand y T. Asaki, *A variational approach to constructing images corrupted by Poisson noise*. J. Math. Imaging Vis., 27, 257-263 (2007).

Enting, I. G. y G. N. Newsam. *Atmospheric constituent inversion problems: Implications for baseline monitoring*, Journal of Atmospheric Chemistry, 11, 69-87 (1990).

Fraser, C. G., *The Origins of Euler´s Variational Calculus*. Archive for History of Exact Sciences, 47(2), 103-141 (1994).

Gasquet, C. y P. Witomski. *Fourier Analysis and Applications*. Springer-Verlag, NY (1990).

Golestani, A. y R. Gras, *Can we predict the unpredictable*?, Nature, Scientific Reports, 4:6834, 1-6 p. (2014).

Parra-Guevara, D. y Y. N. Skiba. *Recuperación de la tasa de emisión de una fuente contaminante: Análisis de la existencia, la unicidad y la estabilidad de las soluciones*. Información Tecnológica: 27 (5), 251-262 (2016).

Parra-Guevara, D., Y. N. Skiba y A. Reyes-Romero. *Existence and uniqueness of the regularized solution in the problem of recovery the non-steady emission rate of a point source: Application of the adjoint method.* In: Proceedings of the International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT 2014), *Engineering Optimization IV*, Rodrigues, H.C., et al. (eds.), pp. 181-186. CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, London, UK (2015).

Parra-Guevara, D. y Y. N. Skiba, *Elements of the mathematical modelling in the control of pollutants emissions*, Ecological Modelling, 167, 263-275 (2003).

Rudin, L. I., S. Osher y E. Fatemi, *Nonlinear total variation based noise removal algorithms*. Physica D, 60, 259-268 (1992).

Smith, D. R. *Variational Methods in Optimization*. Dover, NY (1998).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Numerical Determination of Voltage Potential Inside Three Dimensional Orthotropic Media Using Variational Methods

Igor Brilla[1]
(1) Department of Mathematics, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovakia
E-mail: igor.brilla@stuba.sk

Abstract

The problem of numerical determination of voltage potential inside three dimensional orthotropic media using values of the voltage potential on the boundary of the media has been solved. For numerical determination of the problem has been used the model described by the potential equation for the orthotropic media with appropriate boundary conditions. The convenient form of variational formulation of the problem has been derived. The numerical solution of the problem has been obtained by the method of local variations. The convergence of the method of local variations for the problem has been proved. Numerical experiments have been done from a mathematical point of view. The numerical solutions have been computed for different values of electrical conductivities of the media and for different values of the voltage potential on the boundary of the media.

Determinación Numérica del Potencial Eléctrico en el Interior de Materiales Ortotrópicos 3D con Aplicación de Métodos Variacionales

Resumen

Se buscaban soluciones del problema de precisar numéricamente el potencial eléctrico dentro de materiales ortotrópicos con uso de valores de potencial eléctrico en el borde del dominio. Para fijar numéricamente el problema fue utilizado un modelo determinado por una ecuación potencial para materiales ortotrópicos con las condiciones de borde correspondientes. Fue derivada una forma adecuada de la formulación variacional del problema. La solución numérica fue obtenida con aplicación del método de variaciones locales. La convergencia del método de variaciones locales para este problema fue confirmada. Pruebas numéricas eran calculadas para diferentes valores de la conductividad eléctrica y para diversos valores del potencial eléctrico en el borde del dominio.

Keywords: voltage potential, numerical determination, local variation

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

The paper is dealt with the numerical determination of voltage potential inside three dimensional orthotropic media using values of the voltage potential on the boundary of the media. For numerical determination of the problem is used the model described by the potential equation for the orthotropic media with appropriate boundary conditions. The convenient form of variational formulation of the problem is derived. For numerical analysis of the problem are applied discrete methods. They are very convenient because in the case of practical problems input data are measured in discrete points. The numerical solution of the problem is obtained by the method of local variations for three dimensional problems (Černousko and Baničuk, 1973). This approach is generalization of the method for numerical determination of voltage potential inside one dimensional nonhomogeneous media and inside two dimensional orthotropic and anisotropic media using values of the voltage potential on the boundary of the media derived in Brilla (2013) and in Brilla and Janíček (2016). The convergence of the method of local variations for the problem is proved.

The numerical experiments are done from a mathematical point of view. The numerical solutions are computed for different values of electrical conductivities of the media and for different values of the voltage potential on the boundary of the media. The case of discontinuous electrical conductivities is also considered. From computed examples it is seen that accuracy of the computation depends on the discretization errors.

FORMULATION OF THE PROBLEM

The following three dimensional potential equation is considered:

$$-\left(c_{ij}\, u_{,j}\right)_{,i} = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \tag{1}$$

for orthotropic media, where c_{ij} is a tensor of an electrical conductivity of the medium, u is the voltage potential. The summation and differentiation rule with respect to indices is applied. Ω is assumed as a three dimensional domain of following form:

$$\Omega = \left\{(x, y, z) \in R^2 : 0 < x < a, 0 < y < b, 0 < z < c\right\} \tag{2}$$

The following Dirichlet boundary condition is considered for the voltage potential:

$$u(s) = f(s) \quad , \qquad s \in \partial\Omega \quad , \tag{3}$$

where f represents values of the voltage potential on the boundary.

The equation (1) for three dimensional orthotropic case can be written in the following form:

$$\left(A\, u_{,x}\right)_{,x} + \left(B\, u_{,y}\right)_{,y} + \left(C\, u_{,z}\right)_{,z} = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \tag{4}$$

using following notation $c_{11} = A$, $c_{22} = B$, $c_{33} = C$.

It is possible to derive similarly as in Rektorys (1974) the convenient form of variational formulation of the problem (4), (3) as the following functional:

$$J(w) = \iiint_{\Omega} \left[A\, w_{,x}^2 + B\, w_{,y}^2 + C\, w_{,z}^2 + 2\, A\, w_{,x}\, v_{,x} + 2\, B\, w_{,y}\, v_{,y} + 2\, C\, w_{,z}\, v_{,z}\right] dx\, dy\, dz \quad , \tag{5}$$

where

$$u = w + v \quad \text{in} \quad \overline{\Omega} \tag{6}$$

and

$$v(s) = u(s) \quad , \qquad s \in \partial\Omega \tag{7}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

It means that v is arbitrary function having the same values on the boundary like the function u and w is the function fulfilling homogeneous boundary condition:

$$w(s) = 0 \quad , \qquad s \in \partial\,\Omega \tag{8}$$

It is possible to show (Rektorys, 1974) that the solution of the problem (4), (3) may be characterized as stationary point w of the functional (5) with respect to conditions (6) – (8).

METHOD OF LOCAL VARIATIONS

Discrete methods are applied for numerical analysis of the problem. They are very convenient because in the case of practical problems input data are measured in discrete points. On the domain Ω is considered uniform grid $(m+1)\,h \times (n+1)\,h \times (p+1)\,h$, $h > 0$. The functional J assume following discrete form:

$$J \approx I = h^3 \sum_{i=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} \sum_{l=0}^{p} I_{i;k;l} \quad , \tag{9}$$

where

$$I_{i;k;l} = A^*_{i;k;l} \left[\left(w_{,x}\right)^*_{i;k;l} \right]^2 + B^*_{i;k;l} \left[\left(w_{,y}\right)^*_{i;k;l} \right]^2 + C^*_{i;k;l} \left[\left(w_{,z}\right)^*_{i;k;l} \right]^2 + 2\, A^*_{i;k;l} \left(w_{,x}\right)^*_{i;k;l} \left(v_{,x}\right)^*_{i;k;l} +$$
$$+ 2\, B^*_{i;k;l} \left(w_{,y}\right)^*_{i;k;l} \left(v_{,y}\right)^*_{i;k;l} + 2\, C^*_{i;k;l} \left(w_{,z}\right)^*_{i;k;l} \left(v_{,z}\right)^*_{i;k;l} \tag{10}$$

and

$$A^*_{i;k;l} = \left(A_{i;k;l} + A_{i+1;k;l} + A_{i;k+1;l} + A_{i+1;k+1;l} + A_{i;k;l+1} + A_{i+1;k;l+1} + A_{i;k+1;l+1} + A_{i+1;k+1;l+1} \right) \Big/ 8 \tag{11}$$

$$B^*_{i;k;l} = \left(B_{i;k;l} + B_{i+1;k;l} + B_{i;k+1;l} + B_{i+1;k+1;l} + B_{i;k;l+1} + B_{i+1;k;l+1} + B_{i;k+1;l+1} + B_{i+1;k+1;l+1} \right) \Big/ 8 \tag{12}$$

$$C^*_{i;k;l} = \left(C_{i;k;l} + C_{i+1;k;l} + C_{i;k+1;l} + C_{i+1;k+1;l} + C_{i;k;l+1} + C_{i+1;k;l+1} + C_{i;k+1;l+1} + C_{i+1;k+1;l+1} \right) \Big/ 8 \tag{13}$$

$$\left(w_{,x}\right)^*_{i;k;l} = \left(w_{i+1;k+1;l} + w_{i+1;k;l} - w_{i;k;l} - w_{i;k+1;l} \right) \Big/ (4\,h) +$$
$$+ \left(w_{i+1;k+1;l+1} + w_{i+1;k;l+1} - w_{i;k;l+1} - w_{i;k+1;l+1} \right) \Big/ (4\,h) \tag{14}$$

$$\left(w_{,y}\right)^*_{i;k;l} = \left(w_{i+1;k+1;l} + w_{i;k+1;l} - w_{i;k;l} - w_{i+1;k;l} \right) \Big/ (4\,h) +$$
$$+ \left(w_{i+1;k+1;l+1} + w_{i;k+1;l+1} - w_{i;k;l+1} - w_{i+1;k;l+1} \right) \Big/ (4\,h) \tag{15}$$

$$\left(w_{,z}\right)^*_{i;k;l} = \left(w_{i;k+1;l+1} + w_{i;k;l+1} - w_{i;k;l} - w_{i;k+1;l} \right) \Big/ (4\,h) +$$
$$+ \left(w_{i+1;k+1;l+1} + w_{i+1;k;l+1} - w_{i+1;k;l} - w_{i+1;k+1;l} \right) \Big/ (4\,h) \tag{16}$$

$$\left(v_{,x}\right)^*_{i;k;l} = \left(v_{i+1;k+1;l} + v_{i+1;k;l} - v_{i;k;l} - v_{i;k+1;l} + v_{i+1;k+1;l+1} + v_{i+1;k;l+1} - v_{i;k;l+1} - v_{i;k+1;l+1} \right) \Big/ (4\,h) \tag{17}$$

$$\left(v_{,y}\right)^*_{i;k;l} = \left(v_{i+1;k+1;l} + v_{i;k+1;l} - v_{i;k;l} - v_{i+1;k;l} + v_{i+1;k+1;l+1} + v_{i;k+1;l+1} - v_{i;k;l+1} - v_{i+1;k;l+1} \right) \Big/ (4\,h) \tag{18}$$

$$\left(v_{,z}\right)^*_{i;k;l} = \left(v_{i;k+1;l+1} + v_{i;k;l+1} - v_{i;k;l} - v_{i;k+1;l} + v_{i+1;k+1;l+1} + v_{i+1;k;l+1} - v_{i+1;k;l} - v_{i+1;k+1;l} \right) \Big/ (4\,h) \tag{19}$$

with the following discrete form of boundary conditions (7) and (8):

ISBN 978-607-8242-11-5

$$w_{0;k;l} = w_{m+1;k;l} = 0 \ , \quad v_{0;k;l} = u_{0;k;l} \ , \quad v_{m+1;k;l} = u_{m+1;k;l} \ , \quad k = 0,1,\ldots,n+1, \quad l = 0,1,\ldots,p+1 \tag{20}$$

$$w_{i;0;l} = w_{i;n+1;l} = 0 \ , \quad v_{i;0;l} = u_{i;0;l} \ , \quad v_{i;n+1;l} = u_{i;n+1;l} \ , \quad i = 0,1,\ldots,m+1, \quad l = 0,1,\ldots,p+1 \tag{21}$$

$$w_{i;k;0} = w_{i;k;p+1} = 0 \ , \quad v_{i;k;0} = u_{i;k;0} \ , \quad v_{i;k;p+1} = u_{i;k;p+1} \ , \quad i = 0,1,\ldots,m+1, \quad k = 0,1,\ldots,n+1 \tag{22}$$

Instead of finding the minimum of the functional J now the problem arises to find values $w_{i;k;l}$ which fulfil the boundary conditions (20) – (22) and such that (9) is minimal. The minimum of (9) is found using the method of local variations (Černousko and Baničuk, 1973). The algorithm of this method is given by a sequence of iterations. It is necessary to start the algorithm with determination of some initial approximation of the values $w_{i;k;l}$, $i = 0,1,\ldots,m+1$, $k = 0,1,\ldots,n+1$, $l = 0,1,\ldots,p+1$ such that the boundary conditions (20) – (22) are fulfilled. The iterative solution is obtained in such a way, that the iteration from the previous step is considered as the initial approximation, and then it is necessary to go through all interior grid points in arbitrary order. At each grid point $(i\,h; k\,h; l\,h)$ $i = 1,2,\ldots,m$, $k = 1,2,\ldots,n$, $l = 1,2,\ldots,p$ is computed the value:

$$\Phi_{i;k;l}\left(w_{i;k;l}\right) = h^3 \sum_{j_1=0}^{m} \sum_{j_2=0}^{n} \sum_{j_3=0}^{p} \chi_{j_1;j_2;j_3} \, I_{j_1;j_2;j_3} \ , \tag{23}$$

where

$$\chi_{j_1;j_2;j_3} = \begin{cases} 1, & I_{j_1;j_2;j_3} = I_{j_1;j_2;j_3}\left(w_{i;k;l}\right) \\ 0, & I_{j_1;j_2;j_3} \neq I_{j_1;j_2;j_3}\left(w_{i;k;l}\right) \end{cases} \tag{24}$$

which is the collection of such $I_{j_1;j_2;j_3}$ from (9) which depends on the value $w_{i;k;l}$. According (10) - (19) it is possible to rewrite (23) in the following form:

$$\Phi_{i;k;l}\left(w_{i;k;l}\right) = h^3 \sum_{j_1=i-1}^{i} \sum_{j_2=k-1}^{k} \sum_{j_3=l-1}^{l} I_{j_1;j_2;j_3} \tag{25}$$

Then is changed a little the value $w_{i;k;l}$ to the values $w_{i;k;l} \pm r$, where $r > 0$ is the given step and two corresponding values $\Phi^{+}_{i;k;l}\left(w_{i;k;l} + r\right)$, $\Phi^{-}_{i;k;l}\left(w_{i;k;l} - r\right)$ are computed. The new value of the solution at grid point $(i\,h; k\,h; l\,h)$ is chosen from the values $w_{i;k;l}$, $w_{i;k;l} + r$, $w_{i;k;l} - r$ and it is this one which corresponds to the minimum value of $\Phi_{i;k;l}\left(w_{i;k;l}\right)$, $\Phi^{+}_{i;k;l}\left(w_{i;k;l} + r\right)$, $\Phi^{-}_{i;k;l}\left(w_{i;k;l} - r\right)$. The iteration is finished after we have gone through all interior grid points. Then the value of I is calculated for such solution and the process is repeated until the value of I is decreasing. Then it is possible to continue by dividing the step.

We can prove similarly to Brilla (2013) the following important theorem:
THEOREM. Let the electrical conductivities are piecewise smooth functions. Then the method of local variations is convergent for the problem (4), (3).

The program realization of the method of local variations for the problem is elaborated in the programming language Fortran 77.

NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM

Numerical experiments are done from a mathematical point of view. This means that at first is constructed the problem with the exact solution, afterwards is computed the numerical solution of this problem using the method of local variations and in the end the computed numerical solution is compared it with the exact one.

ISBN 978-607-8242-11-5

The numerical solutions were computed for different values of electrical conductivities of the media and for different values of the voltage potential on the boundary of the media. The following domain $\overline{\Omega} = \langle 0, 2 \rangle \times \langle 0, 1 \rangle \times \langle 0, 1 \rangle$ is considered. For the following voltage potential:

$$u = (x + 1) + (y + 1) + (z + 1) \tag{26}$$

the electrical conductivities:

$$A = 2, \quad B = 3, \quad C = 7 \tag{27}$$

using (27) and the boundary conditions constructed from (26), using the program realization of the method of local variations in the Table 1 it is able to see the percentage of errors in the computed solutions in the second column with respect to the exact solutions of the meshes given in the first column. In the third column are reported the numbers of iterations after which the numerical solution is obtained on the given mesh. From the results it is possible to see that very small errors are obtained for a course mesh and when the number of grid points increases, errors also increase slightly but are still small.

Table 1: Numerical results for the problem (26), (27).

Mesh	*Percent error (%)*	*Number of iterations*
8 x 4 x 4	$1.2\ 10^{-5}$	330
12 x 6 x 6	$1.4\ 10^{-4}$	845
16 x 8 x 8	$6.4\ 10^{-4}$	1864

For another electrical conductivities:

$$A = (y + 1), \quad B = (z + 1), \quad C = (x + 1) \tag{28}$$

for the voltage potential given by (26) similar results are obtained as it is shown in the Table 2.

Table 2: Numerical results for the problem (26), (28).

Mesh	*Percent error (%)*	*Number of iterations*
8 x 4 x 4	$7.4\ 10^{-6}$	337
12 x 6 x 6	$1.3\ 10^{-5}$	861
16 x 8 x 8	$5.4\ 10^{-4}$	2112

For another voltage potential:

$$u = e^{-x-y-z} \tag{29}$$

the electrical conductivities:

$$A = e^{x}, \quad B = e^{y}, \quad C = e^{z} \tag{30}$$

Table 3: Numerical results for the problem (29), (30).

Mesh	*Percent error (%)*	*Number of iterations*
8 x 4 x 4	$4.0\ 10^{-6}$	277
12 x 6 x 6	$4.1\ 10^{-5}$	900
16 x 8 x 8	$2.4\ 10^{-4}$	2568

ISBN 978-607-8242-11-5

as it is obvious from the Table 3 also now very small errors of computation are obtained.

For the following voltage potential:

$$u = (x+1)^2 + (y+1)^2 + (z+1)^2 \tag{31}$$

the electrical conductivities:

$$A = (y+1)/(x+1), \quad B = (z+1)/(y+1), \quad C = (x+1)/(z+1) \tag{32}$$

as it is obvious from the Table 4 the accuracy of computation is not so good as in the previous cases. This fact is caused by the discretization error, which is in this case greater than in the previous cases. For obtaining better results it is necessary to use better discretization scheme.

Table 4: Numerical results for the problem (31), (32).

Mesh	*Percent error (%)*	*Number of iterations*
8 x 4 x 4	$9.8\ 10^{-2}$	455
12 x 6 x 6	$3.8\ 10^{-2}$	1076
16 x 8 x 8	$2.2\ 10^{-2}$	2108

For another voltage potential:

$$u = \ln(x+1) + \ln(y+1) + \ln(z+1) \tag{33}$$

the electrical conductivities:

$$A = (x+1), \quad B = (y+1), \quad C = (z+1) \tag{34}$$

Table 5: Numerical results for the problem (33), (34).

Mesh	*Percent error (%)*	*Number of iterations*
8 x 4 x 4	$8.4\ 10^{-2}$	267
12 x 6 x 6	$3.3\ 10^{-2}$	700
16 x 8 x 8	$1.6\ 10^{-2}$	1717

as it is obvious from the Table 5 the accuracy of computation is also now not so good as in the first cases. Also now this fact is caused by the discretization error, which is in this case greater than in the first cases. Also in this case for obtaining better results it is necessary to use better discretization scheme.

We also deal with the case when the electrical conductivities are discontinuous:

$$\begin{aligned} A &= 4, \quad B = 3, \quad C = 1, \qquad x \le 0.7 \\ A &= 4.25, \quad B = 3.5, \quad C = 2, \qquad x > 0.7 \end{aligned} \tag{35}$$

Then for the voltage potential:

$$\begin{aligned} u &= (x+1) + (y+1) + (z+1), \qquad x \le 0.7 \\ u &= 16\,(x+1)/17 + (y+1) + (z+1) + 0.1, \qquad x > 0.7 \end{aligned} \tag{36}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

obtained results are shown in the Table 6. From Table 6 it is possible to see that also now the accuracy of computation is not so good as in the first cases. Also now this fact is caused by the discretization error, which is in this case greater than in the first cases. Also in this case for obtaining better results it is necessary to use better discretization scheme.

Table 6: Numerical results for the problem (35), (36).

Mesh	*Percent error (%)*	*Number of iterations*
8 x 4 x 4	$1.0\ 10^{-1}$	264
12 x 6 x 6	$6.0\ 10^{-2}$	837
16 x 8 x 8	$1.8\ 10^{-2}$	1638

For another discontinuous electrical conductivities:

$$\begin{aligned} &A = 2\,,\quad B = 3\,,\quad C = 7\,, \qquad x \le 0.7 \\ &A = (x+1)\,,\quad B = 3.5\,,\quad C = 8\,, \qquad x \rangle\ 0.7 \end{aligned} \tag{37}$$

the voltage potential:

$$\begin{aligned} &u = (x+1)+(y+1)+(z+1)\,, \qquad x \le 0.7 \\ &u = 2\ln(x+1)+(y+1)+(z+1)+1.7-2\ln 1.7\,, \qquad x \rangle\ 0.7 \end{aligned} \tag{38}$$

as it is obvious from the Table 7 the accuracy of computation is also now not so good as in the first cases. Also now this fact is caused by the discretization error, which is in this case greater than in the first cases. Also in this case for obtaining better results it is necessary to use better discretization scheme.

Table 7: Numerical results for the problem (37), (38).

Mesh	*Percent error (%)*	*Number of iterations*
8 x 4 x 4	$1.1\ 10^{-1}$	266
12 x 6 x 6	$1.3\ 10^{-1}$	1332
16 x 8 x 8	$5.0\ 10^{-2}$	3155

CONCLUSION

This paper is dealt with the numerical determination of voltage potential inside three dimensional orthotropic media using values of the voltage potential on the boundary of the media. For numerical determination of the problem is used the model described by the potential equation for the orthotropic media with appropriate boundary conditions. The convenient form of variational formulation of the problem is derived. The numerical solution of the problem is obtained by the method of local variations for three dimensional problems. The convergence of the method of local variations for the problem is proved. Program realization of the method of local variations is elaborated in the programming language Fortran 77.

The numerical experiments are done from a mathematical point of view. The numerical solutions are computed for different values of electrical conductivities of the media also for discontinuous electrical conductivities of the media and for different values of the voltage potential on the boundary of the media. From computed examples it is seen that obtained accuracy of the computation depends on the discretization errors. For obtaining better results it is necessary to use better discretization scheme.

This approach is possible to generalize to the problem for numerical determination of voltage potential inside two and three dimensional anisotropic media using variational methods.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCES

Brilla, I, "*Numerical Determination of Voltage Potential Inside Nonhomogeneous Media"*, Proceedings of the 14th International Scientific Conference on Electric Power Engineering 2013, 28-30 May 2013, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 1-6 (2013).

Brilla, I. and F. Janíček, "*Numerical determination of voltage potential inside 2D anisotropic media using variational methods",* Aplicaciones de las Ciencias 2016, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 360-366 (2016).

Černousko, F.L and N.V. Baničuk, "*Variacionnye zadači mechaniki i upravlenija"*, Izdateľstvo Nauka, Moskva (1973).

Rektorys, K, "*Variační metody v inženýrských problémech a v problémech matematické fyziky"*, SNTL, Praha (1974).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Concentración, Dispersión y Contribución de PM10 asociados a Aerosoles Marinos en una Ciudad Costera

Alejandra M. Vengoechea[1], Roberto E. Rojano[1, 2,] y Heli A. Arregoces[1, 2]
(1) Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación GISA, Univ. de La Guajira, Km 5, Riohacha-Colombia
(2) Fac. de Ingeniería Química, Grupo Procesos Físico Químicos Aplicados, Univ. de Antioquia-Colombia
E-mail: avengoechea@uniguajira.edu.co; rrojano@uniguajira.edu.co; harregoces@uniguajira.edu.co

Resumen

El conocimiento de la concentración y contribución el material particulado PM10 proveniente de los océanos es necesaria para determinar los posibles efectos sobre la calidad del aire y su distribución principalmente en las ciudades costeras. La distribución de los aerosoles varía en diferentes condiciones climáticas y su aporte en zonas urbanas, incrementando los niveles de material particulado PM10 y PM2.5. Se investigó la dispersión de los aerosoles marinos en la ciudad costera de Riohacha en Colombia y su aporte al material particulado PM10. Se tomaron 30 muestras de PM10 utilizando muestreadores de aire portátil en tres sitios, ubicados a la orilla del mar, Muelle Turístico, Centro Cultural y Centro de Convenciones este a 300 metros de la orilla de la playa y se muestreo con HiVol PM10 en la zona urbana desde Junio a Noviembre de 2016. Para el análisis de dispersión, las concentraciones de PM10 se estimaron utilizando un dominio de modelación que abarcó una rejilla de 20 km x 20 km con resolución de celdas de 1 km^2 y 5 niveles de alturas verticales 20, 40, 60, 80 y 100 m que contempla la ciudad de Riohacha. Se obtuvo promedios de PM10 a la orilla del mar en el rango de 2,81 $\mu g/m^3$ a 77,98 $\mu g/m^3$, con los máximos valores en la estación del Muelle Turístico. En el análisis de dispersión se observó el impacto de aerosoles marinos a más de 20 km de la Playa, en la dirección del viento. Este análisis arrojó niveles de PM10 en las coordenadas de muestreo de 10,5 $\mu g/m^3$ a 35,0 $\mu g/m^3$ y de aerosoles marinos con concentraciones máximas de 5,02 $\mu g/m^3$ y mínimas de 0,8 $\mu g/m^3$. Se observó un aporte significativo de aerosoles marinos a las concentraciones de PM10 en zona urbana entre un porcentaje de 10% al 63%.

Palabras clave: aerosoles marinos, filtros de muestreo, material particulado, modelación de aerosoles

Concentration, Dispersion and Contribution of PM10 associated with Marine Aerosols in a Coastal City.

Abstract

Knowledge of the concentration and contribution PM10 particulate material from the oceans is necessary to determine the possible effects on air quality and its distribution mainly in coastal cities. The distribution of aerosols varies in different climatic conditions and their contribution in urban areas, increasing the levels of particulate PM10 and PM2.5. Was investigated the dispersion of marine aerosols in the coastal city of Riohacha in Colombia and their contribution to PM10 particulate matter. Thirty samples of PM10 were taken using portable air samplers at three sites, located at the seashore, Tourist Pier, Cultural Center and Convention Center east 300 meters from the shore and sampled with HiVol PM10 in the area Urban from June to November 2016. For dispersion analysis, concentrations of PM10 were estimated using a modeling domain spanning a grid of 20 km x 20 km with cell resolution of 1 km^2 and 5 levels of vertical heights 20, 40, 60, 80 and 100 m that contemplates the city of Riohacha. Averages of PM10 were obtained at the seaside in the range of 2,81 $\mu g/m^3$ to 77,98 $\mu g/m^3$, with maximum values at the Turistic Pier station. In the dispersion analysis the impact of marine aerosols was observed to more than 20 km of the Beach, in the direction of the wind. This analysis yielded PM10 levels at the sampling coordinates from 10,5 $\mu g/m^3$ to 35,0 $\mu g/m^3$ and from marine aerosols with maximum concentrations of 5,02 $\mu g/m^3$ and a minimum of 0,8 $\mu g/m^3$. A significant contribution of marine aerosols to concentrations of PM10 in urban areas was observed between a percentage of 10% to 63%.

Keywords: marine aerosols, sampling filters, particulate matter, aerosol modeling

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El material particulado, también llamado aerosoles atmosféricos citado por Lippmann (2008), en analogía al término hidrosoles usados para describir sistemas dispersos en agua que comprenden las partículas en suspensión y sedimentables. Los aerosoles provocan forzamientos radiativo directo positivos o negativos y la cuantificación del forzamiento es más complejo que la de los gases de efecto invernadero debido a la viabilidad de masas, concentraciones y duración en la atmosfera (Pitari et al., 2001); Su duración en la atmosfera depende de su tamaño y composición química, pueden dispersar y absorben la radiación solar e infrarroja en la atmósfera, alterando la formación y la eficiencia de las precipitaciones, según su tamaño intervienen en los procesos de formación de tipos de nubes como núcleo de condensación (Otero, Ristori, y Holben, 2006).

El material particulado afecta la calidad de aire, la salud, el clima, los materiales, las estructuras y ocasiona impacto en la visibilidad. Estudios epidemiológicos demuestran la correlación entre enfermedades alérgica (Lang-Yona, Lehahn, Herut, Burshtein, y Rudich, 2014), depresivas, renales, coronarias, pulmonares, cardíacas y la contaminación por material particulado (Franklin, Brook, y Pope, 2015), en casos extremos ha causado muertes como resultado de la combinación de características geográficas inusuales con factores climáticos (Zhou et al., 2016).

Los aerosoles atmosféricos son emitidos desde diferentes fuentes dependiendo de sus procesos de formación y de sus propiedades físicas, con tamaños que van de 0,1 a 100 µm, pueden dispersarse a grandes distancias o sedimentar inmediatamente según su tamaño. Una fuente de emisión de aerosoles es el mar, los aerosoles marinos, se encuentran presentes en las partículas sólidas y liquidas del aerosol, haciendo parte de la totalidad de los aerosoles atmosféricos, en zonas costeras pueden afectar a la salud y a los ecosistemas (Gantt, Kelly, y Bash, 2015), son pequeñas partículas presentes en la atmósfera, en suspensión, formadas por la incidencia de los vientos sobre la superficie de los océanos, compuestos principalmente por iones inorgánicos NaC^{+}, $Mg2C^{+}$, $Ca2C^{+}$, KC^{+}, Cl^{-}, $SO2^{-}$, material orgánico que incluye carbohidratos, lípidos, microorganismos, virus marinos y algas, que pueden ser transportados a las costas por acción de los vientos.

La distribución del tamaño de aerosol varían en diferentes condiciones climáticas (Shen et al., 2016) y su aporte en zonas urbanas incrementa los niveles de material particulado PM10 y PM2.5, tradicionalmente se ha considerado que el aerosol marino se encuentra en la moda gruesa (Woodcock, 1972). Investigaciones científicas han concluidos que parte de esta fracción biológica de aerosoles marinos, como las cianobacterias y el desechos de plancton, puede influir en la salud humana por la inflamación y las reacciones alérgicas cuando se inhala (Lang-Yona, et al, 2014).

El tamaño de los aerosoles atmosféricos es una característica muy importante, mientras más pequeño sea su diámetro aerodinámico mayor será su capacidad de penetrar a áreas más profundas del sistema respiratorio, su sedimentación puede producir por deposición seca o húmeda y dependerá especialmente del diámetro aerodinámico de las partículas, su composición química y propiedades termodinámicas.

METODOLOGÍA

En este estudio se investigó la dispersión, el aporte y las concentraciones de los aerosoles PM10 originado en el mar, las mediciones se basaron en análisis gravimétricos de partículas recolectadas en los filtros de fibra de vidrio en período de 24 horas a través de muestreadores de aire portátil MiniVol TAS para el muestro a orilla de playa en tres sitios de muestreo, los datos meteorológicos para el año 2016 en el área de Riohacha se obtuvieron de la estación meteorológica Almirante Padilla, que es operada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

Se utilizaron muestreadores de aire portátil MiniVol TAS, ideal para el muestreo en sitios o áreas remotas, con un caudal volumétrico constante de 5 lpm en condiciones ambiente. Se seleccionaron tres sitios de muestreo el Centro Cultural (CC), Centro de Convenciones (AN) y el Muelle Turístico (MT) este último ubicados a 300 metros orilla de playa. Se tomaron 10 muestras en cada sitio para un total de 30 muestras recolectadas en periodos continuos de muestreo de 24 horas, en filtros de fibra de vidrio para PM10. Para el muestreo se utilizaron filtros de fibra de vidrio de tamaño de 47 mm y tamaño de poro de 2 µm, se realizó la inspección de los filtros, para detectar imperfecciones, fueron enumerados, con tinta a prueba de agua y equilibrados en un desecador, antes y después del muestreo, por un tiempo de 24 horas, en condiciones de humedad relativa de 20 a 45%, con variación < +-5%, y temperatura de 15 a 30ºC, con variación <+-3ºC. Se tomaron los pesos de

 ISBN 978-607-8242-11-5

cada filtro al inicio y final del muestreo equilibrando cada filtro y pesados en una balanza analítica, con una sensibilidad de 0,1 mg, los filtros utilizados se almacenaron con las condiciones descritas en la resolución número 0650 de 2010, por la cual se adopta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en Colombia.

El estudio se ubicó a orilla de playa en la ciudad costera de Riohacha que es la capital del departamento de La Guajira en Colombia, se encuentra sobre la costa Caribe, en el delta del río Ranchería ocupando cerca de la cuarta parte del territorio departamental con una extensión de 491.383 Ha, situada entre los 11° 30' 44,37" Norte, 72º 55' 26,09" Oeste, 11° 33' 15,65" Norte y 72º 53' 29,77" Oeste.

Para el análisis de dispersión de las concentraciones de PM10 fueron estimadas utilizando un dominio de modelación que abarcó una rejilla de 20 km x 20 km con resolución de celdas de 1 km^2 y 5 niveles de alturas verticales 20, 40, 60, 80 y 100 m que contempla la ciudad de Riohacha Fig. 1. Como modelo diagnóstico, CALMET requiere datos geofísicos y observacionales como insumos. La información de elevación digital y usos del suelo fueron obtenidas de la base de datos SRTM1 generada por la NASA y la U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), como parte del programa "Shuttle Radar Topography Mission" y la base de datos Global Land Cover Characteristics – GLCC con una resolución de 1 kilómetro, generada por la U.S Geological Survey – USGS (http://earthexplorer.usgs.gov/, http://edc2.usgs.gov/glcc/glcc.php).

Los datos meteorológicos en superficie y radiosondeos fueron obtenidos de la estación IDEAM ubicado en la ciudad de Riohacha en las coordenadas 11 °53'00" N y 72°93'00" O. Los datos fueron procesados por horas para el periodo del modelado que contemplo 5 días. Los datos horarios extraídos en superficie fueron temperatura (°K), precipitación (mm), presión (mbar), humedad relativa (%), dirección del viento (°), la velocidad del viento (ms-1), la nubosidad (Décimas), y altura de las nubes (ft). Por otra parte, en la estación solo se registra un radio sonde diario (12 UTC); se integró radiosondeo nocturnos (0 UTC) a través del modelo meteorológico MM5. El CALPUFF es un modelo gaussiano no estacionario que contiene módulos para complejos efectos del terreno, el transporte sobre el agua, los efectos de interacción costeras, la construcción de caída de flujo, eliminación húmeda y seca, y la transformación química simple (Scire et al., 2000). El modelado de aerosoles marinos con diámetro aerodinámico de 10 micras fue determinado a través de los parámetros y factores utilizados por Gantt et al. (2015). El modelo estimo los aportes de aerosoles a las concentraciones ambientales.

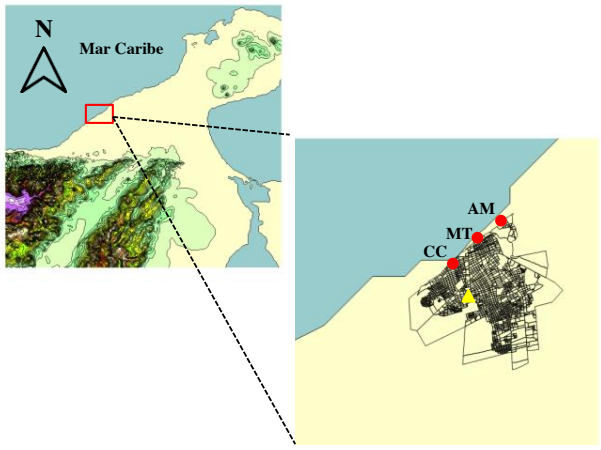


Fig. 1. Dominio de modelación.
Receptores (círculos) y la estación meteorológica IDEAM (Triangulo).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 2 muestras las contribuciones de aerosoles marinos a las concentraciones ambientales de PM10, donde las concentraciones máximas de aerosoles marinos fueron encontrados en la estación MT con 5,02 $\mu g/m^3$ seguida por la estación CC con valores promedios 2,19 $\mu g/m^3$ y la estación AN que presentó los niveles más bajos de concentración de aerosoles marinos de 0,84 $\mu g/m^3$.

ISBN 978-607-8242-11-5

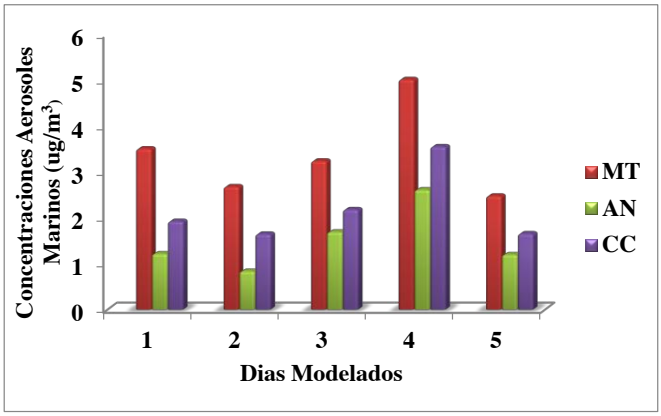


Fig. 2. Concentraciones de aerosoles marinos con diámetro menor a 10 μ

La Tabla 1, contiene los datos estadísticos de las concentraciones de los días modelados de los aerosoles marinos con promedios, máximos, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variación para cada uno de los puntos de muestreo. El mayor promedio lo alcanzo el punto MT con 3.38 esto se debe a la cercanía del sitio del muestreo con el mar, este punto se localizó a 300 m de orilla de la playa.

Tabla 1: Estadísticos de las concentraciones días de aerosoles marinos

Estadísticos	**MT**	**AN**	**CC**
Promedio (μg/m^3)	3.39	1.51	2.19
Máximos (μg/m^3)	5.02	2.61	3.55
Mínimo(μg/m^3)	2.48	0.84	1.65
Desviación estándar	1.00	0.69	0.79
Coeficiente de variación	0.30	0.45	0.36

Se determinaron las concentraciones de aerosoles marinos medios horarios en cada uno de los puntos de muestreo durante el periodo de 5 días modelados. La Fig. 3 muestra el comportamiento horario de las concentraciones de aerosoles marinos presentes en las concentraciones de PM10, con valores máximos de 5.02 μg/m^3 en la estación de muelle turístico (MT) en el rango de hora de 2 a 4 y valores mínimos encontrados de 0,84 μg/m^3 en la estación de Centro de Convenciones (AN) en el rango de hora de 17 a 19, se evidencia una disminución de concentraciones al finalizar el día con tendencia a aumento en las horas de la noche con su máximas concentraciones para los tres puntos de muestreo. Las mayores contribuciones de aerosoles marinos se dieron en horas nocturnas debido al cambio de estabilidad y disminución de las velocidades de los vientos. El comportamiento de los aerosoles marinos muestra un patrón generalizado caracterizado por presentar los niveles de concentraciones más altas en las primeras horas del día con fluctuaciones, se muestra valores inferiores con tendencias decrecientes durante el rango de hora de 9 a 19, con tendencias posteriores al aumento de concentraciones.

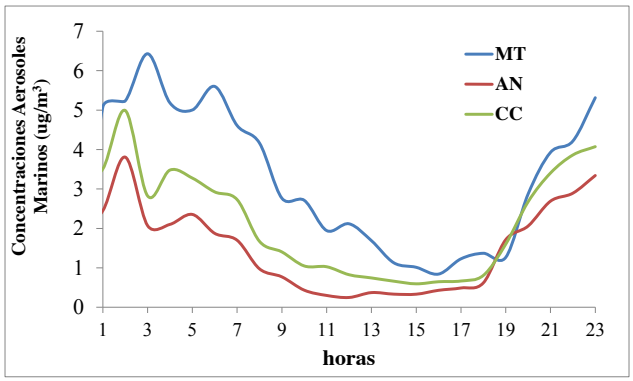


Fig. 3. Comportamiento horario de las concentraciones de aerosoles

ISBN 978-607-8242-11-5

La Fig. 4 muestra la modelación de los aerosoles marinos en el primer día de muestreo que evidencia la dispersión de los aerosoles a más de 20 km de la playa con menores concentraciones al alejarse de la zona costera para el primer día de muestreo. Las mayores concentraciones de aerosoles fue en el día 4 de muestreo, ver Fig. 7. La menor dispersión de aerosoles ver Fig. 5 se presentó en el día 2 de la modelación, en la Fig. 4, Fig. 5 y Fig. 6 la dispersión de los aerosoles en la zona rural de Riohacha fueron mínimas.

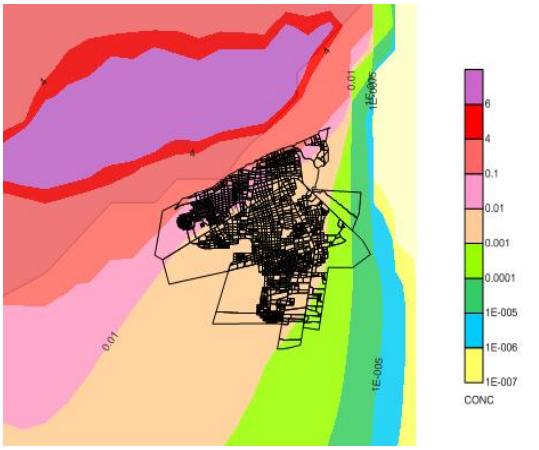


Fig.4.Dispersión de aerosoles día 1.

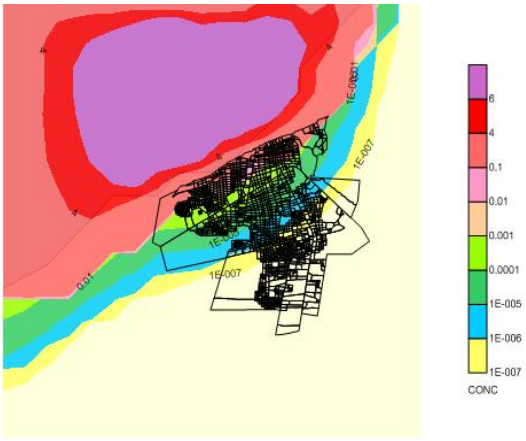


Fig.5.Dispersión de aerosoles día 2

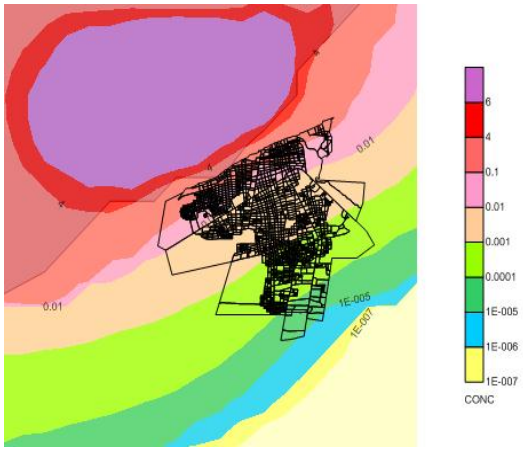


Fig.6.Dispersión de aerosoles día 3

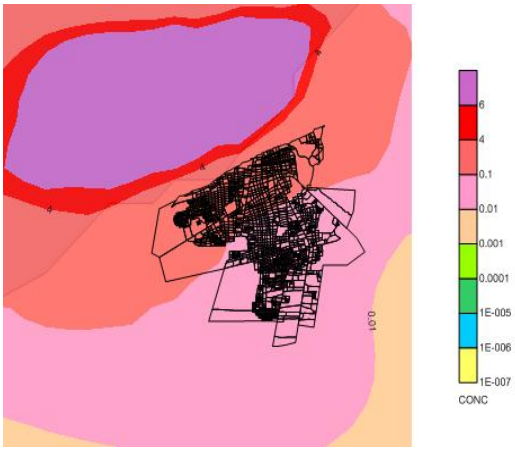


Fig.7.Dispersión de aerosoles día 4

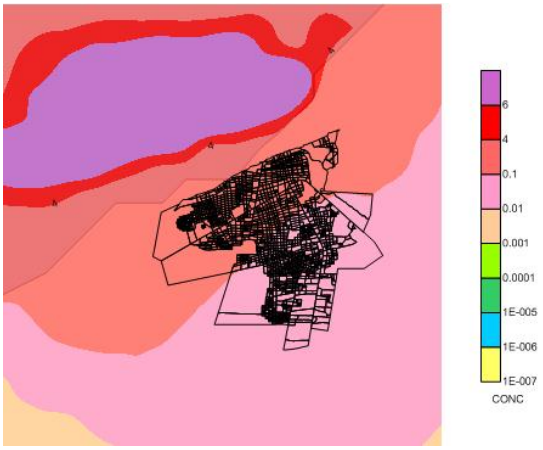


Fig.8.Dispersión de aerosoles día 5

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

Las concentraciones medidas de PM10 muestreadas en los tres puntos, no superaron los niveles máximo permisibles diarios para muestreos de 24 horas en condiciones de referencia según de la norma Colombiana y la National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) de los Estados Unidos.

Las concentraciones de PM10 máximas y mínimas a orilla de playa fueron de 81 $\mu g/m^3$ a 77,98 $\mu g/m^3$. Se evidencia distribuciones variadas de concentraciones de PM10 en los puntos de muestreos a orilla de playa, siendo la más alta la estación MT localizada a 300 metros de orilla de playa sobre el muelle.

Las concentraciones de aerosoles marinos manejaron promedio en las estaciones de MT de 3,39 $\mu g/m^3$, para la estación AN de 1,51 $\mu g/m^3$ y para la estación de CC de 2,19 $\mu g/m^3$. Se encontraron valores máximos de 5,02 $\mu g/m^3$ en la estación MT y mínimos de 0,84 $\mu g/m^3$ en la estación AN. La modelación mostró el impacto de aerosoles marinos a más de 20 km de la Playa, en la dirección del viento con un aporte significativo de aerosoles marinos a las concentraciones de PM10 en zona urbana entre un porcentaje de 10% al 63%.

REFERENCIAS

Franklin, B. A., Brook, R., y Pope, A. C. (2015). Air pollution and cardiovascular disease. *Current Problems in Cardiology*, *40*(5), 207–238. http://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2015.01.003

Gantt, B., Kelly, J. T., y Bash, J. O. (2015). Updating sea spray aerosol emissions in the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model version 5.0.2. *Geoscientific Model Development*, *8*(11), 3733–3746. http://doi.org/10.5194/gmd-8-3733-2015

Lang-Yona, N., Lehahn, Y., Herut, B., Burshtein, N., y Rudich, Y. (2014). Marine aerosol as a possible source for endotoxins in coastal areas. *Science of the Total Environment*, *499*(1), 311–318. http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.054

Lippmann, M. (2008). *Environmental Toxicants: Human Exposures and Their Health Effects: Third Edition* (3rd ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley y Sons. http://doi.org/10.1002/9780470442890

Otero, L., Ristori, P., y Holben, B. (2006). Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET – NASA Aerosol Optical Thickness at ten AERONET – NASA stations during 2002, *97*(2), 355–364.

Pitari, G., Ackerman, A., Adams, P., Austin, P., Boers, R., Boucher, O., Weele, M. Van. (2001). Aerosols, their Direct and Indirect Effects. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, *5*, 289–348. http://doi.org/10.1029/JD091iD01p01089

Rojano, R., Arregoces, H., y Restrepo, G. (2014). Composición elemental y fuentes de origen de particulas respirables (PM10) y Particulas Suspendidas Totales (PST) en el área Urbana de la Ciudad de Riohacha, Colombia. *Informacion Tecnologica*, *25*(6), 3–12. http://doi.org/10.4067/S0718-07642014000600002

Scire, J. S., Strimaitis, D. G., y Yamartino, R. J. (2000). A user's guide for the CALPUFF dispersion model. Earth Tech, Inc. Concord, MA.

Vengoechea, A., y Arregoces, H. (2011). *Composición química de las Partículas Suspendidas Totales (PST) y Partículas Menores de 10 micras (PM10) en la zona urbana de la ciudad de Riohacha, La Guajira Colombiana*. Universidad de La Guajira. Retrieved from http://www.uniguajira.edu.co/biblioteca

Zhou, M., Qiao, L., Zhu, S., Li, L., Lou, S., Wang, H., … Chen, C. (2016). Chemical characteristics of fine particles and their impact on visibility impairment in Shanghai based on a 1-year period observation. *Journal of Environmental Sciences*, 1–10. http://doi.org/10.1016/j.jes.2016.01.022

 ISBN 978-607-8242-11-5

Configuraciones geométricas que impactan en patrón de flujo de crudo y gas en una Simulación CFD

Ana K. Vázquez Barragán, Iván F. Galindo García y Miguel R. Rossano B.

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Reforma 113, Colonia Palmira, Cuernavaca Morelos, México.
akvb@iie.org.mx, igalindo@iie.org.mx, rossano@iie.org.mx

Resumen

Como parte del proceso de mejora de la viscosidad del crudo pesado para su recuperación dentro de un pozo de extracción y su mejor transporte, se requiere suministrar en un pozo vertical de 5.08 cm de diámetro y una longitud de 1000 m, un flujo determinado de crudo a alta temperatura y un flujo de gas, en presencia de un catalizador específico. Para que se presente la reacción entre los fluidos, es requisito que el crudo y el gas se mezclen, es decir, que presenten un patrón de flujo lo más homogéneo posible, que su temperatura se mantenga al llegar al medio poroso (roca), en el cual se pretende realizar la recuperación del crudo y que la presión absoluta de la columna hidrostática ejercida por el crudo y gas en el ducto, no sobrepase la presión de fractura de la roca.
Debido a la complejidad para efectuar este proceso de recuperación y por el delicado manejo del gas, es difícil y costoso realizar las pruebas experimentales en campo, para lo cual, previo a estas pruebas, y con el objetivo de proponer una configuración geométrica en la entrada del pozo, que garantice un patrón de flujo homogéneo, cumpliendo con los requisitos mencionados, se realiza un modelo de Simulación CFD multifásico de crudo y gas en el interior de un pozo. El modelo CFD predice el patrón de flujo resultante de combinar éstos dos fluidos en diferentes configuraciones y dimensiones geométricas en la entrada del pozo; además determina la presión hidrostática de la columna de crudo y gas para diferentes valores de presión de entrada de los fluidos, así como la densidad de la mezcla resultante y las fracciones volumétricas de crudo y gas. Dentro de las suposiciones y simplificaciones del modelo se tiene que no se simulan reacciones químicas, debido a que la reacción se realiza en fracciones de segundos. Para modelar los fluidos se usan las propiedades de densidad, viscosidad, capacidad calorífica y conductividad térmica a la temperatura de operación. Se considera el gas como gas ideal compresible. Se utiliza un modelo 3D en estado estacionario para flujo compresible y el modelo de turbulencia k-omega, SST aplicable para modelar la transición de flujo laminar al flujo turbulento. Se utiliza el modelo multifásico CFD Volumen de Fluido, que aplica las ecuaciones de Navier-Stokes para predecir las fracciones volumen en la interfaz entre dos fases inmiscibles.
Como resultado de esta primera parte del trabajo, se cuenta con un modelo CFD que simula el transporte de crudo y gas en el interior de una tubería vertical, presentando un patrón de flujo anular, cuando el flujo de gas se suministra por el diámetro menor de entrada del ducto. Y un patrón de flujo homogéneo esperado, cuando el flujo de crudo se suministra por el diámetro menor. Se determina la presión de la columna hidrostática para diferentes presiones de entrada de los fluidos, con lo cual se propone una presión de suministro de los fluidos en la entrada del pozo, que cumple con el requisito de no sobrepasar la presión de fracturación de la roca. Se espera que los resultados del modelo CFD apoyen en el diseño de la configuración geométrica del pozo, así como en las pruebas preliminares de mejoramiento de la densidad API.

Referencias

Barnea, D; *A Unified Model for Predicting Flow Pattern Transitions in the Whole Range of Pipe Inclination*; Int. Journal of Multiphase Flow:13(1), 1-12 (1987).
Barnea, D., O. Shoham e Y. Taitel; *Flow Pattern Characterization in Two-Phase Flow by Electrical Conductance Probe*; Int. Journal of Multiphase Flow: 6(5), 387-397 (1980).
García F. y Haoulo M.; *Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Aire-Agua en Tuberías Horizontales y Ligeramente inclinadas;* J. Información Tecnológica Vol.– 20 No. 3-2009.
Beggs H., y J. Brill; *A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes*, Journal of Petroleum Technology; 25(5), 607-617 (1973).
Fritz J., H. Russ Dolores; *Study of two and three phase's flows in pipelines*, Master thesis, 1995.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo basado en Agentes para la Detección de Fallas Cognitivas en Entornos de Aprendizaje Colaborativo

Santiago Álvarez, Oscar M. Salazar, Demetrio A. Ovalle
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión, Grupo de Investigación GIDIA, Medellín - Colombia
E-mails: {salvarezl,omsalazaro,dovalle}@unal.edu.co

Resumen

El objetivo de este artículo es proponer y validar un modelo basado en la integración de diferentes técnicas de la Inteligencia Artificial, como ontologías y agentes inteligentes de software con el fin de solventar problemáticas que aún persisten en el aprendizaje colaborativo. La metodología empleada incluye una representación de conocimientos basada en un modelo ontológico, el cual permite generar inferencias para la recomendación más acertada de recursos educativos a partir de las fallas cognitivas detectadas sobre cada estudiante durante el desarrollo de una actividad colaborativa. Adicionalmente, el modelo incorpora agentes inteligentes con el fin de brindar características de adaptatividad, distribución de tareas y proactividad en los procesos de recomendación de recursos educativos. La validación del modelo propuesto fue realizada a través de la implementación de un prototipo aplicado a casos de estudio. Los resultados obtenidos evidencian los beneficios de integrar ontologías y agentes inteligentes para detectar fallas cognitivas en entornos de aprendizaje colaborativo.

Palabras clave: detección de fallas cognitivas; aprendizaje colaborativo apoyado por computador; agentes inteligentes; ontologías

Agent-based Model for Cognitive Failure Detection in Collaborative Learning Environments

Abstract

The aim of this paper is to propose and validate a model based on the integration of several Artificial Intelligence techniques, such as ontologies and intelligent software agents in order to face problems that still persist in collaborative learning. The methodology employed includes a knowledge representation based on an ontological model, which allows to generate inferences in order to produce most accurate educational resources recommendation based on cognitive failures detected on each student during a collaborative activity execution. In addition, the model incorporates intelligent agents in order to provide characteristics of adaptivity, task distribution, and proactivity in educational resources recommendation processes. The validation of the proposed model was performed through the implementation of a prototype applied to case studies. The obtained results show the benefits of integrating ontologies and intelligent agents to detect cognitive failure in collaborative learning processes.

Keywords: cognitive failure detection; computer supported collaborative learning; intelligent agents; ontologies

INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

En los últimos años el aprendizaje colaborativo apoyado por computador o CSCL (por sus siglas en inglés para *Computer Supported Collaborative Learning*) ha sido fuertemente impulsado por los profesores al interior de las aulas de clase, esto con el objetivo de optimizar los procesos de adquisición y generación de nuevos conocimientos, aprovechando así las ventajas brindadas por los entornos de aprendizaje colaborativo. Adicionalmente, se busca que los estudiantes organizados en equipos trabajen juntos para lograr un objetivo común y además puedan discutir desde diferentes puntos de vista, siempre buscando mejorar los procesos de aprendizaje. Los procesos de CSCL incluyen diferentes etapas como la formación de grupos, la planificación de tareas de trabajo en equipo, la asignación de recursos de aprendizaje, la evaluación del trabajo en equipo, la evaluación de tareas, entre otros (Hübscher, 2010). Para soportar el proceso de trabajo en equipo, diferentes métodos y técnicas basados en aprendizaje colaborativo han sido propuestos y ampliamente utilizados, incluso existen diversas herramientas basadas en CSCL que han llevado a otro nivel los procesos de aprendizaje de los estudiantes.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Sin embargo, las técnicas y herramientas existentes no tienen en cuenta un conjunto de factores de alta importancia que deben coexistir y que pueden impactar en gran medida sobre los conocimientos adquiridos por los estudiantes; algunos de estos factores corresponden a las fallas cognitivas y fortalezas detectadas en los estudiantes. Adicionalmente, persisten problemáticas en los procesos de aprendizaje colaborativo tales como: (1) generalmente se evalúa a todos los estudiantes del equipo por igual, (2) no se realizan evaluaciones constantes durante las actividades para detectar fallas cognitivas tempranas, (3) los modelos actuales de aprendizaje colaborativo no recomiendan recursos educativos para solventar las fallas cognitivas identificadas.

La noción de ontología surge de la necesidad de representar formal y semánticamente el conocimiento utilizado en un dominio de aplicación con el fin de realizar inferencias entre los conceptos involucrados (Liang et al., 2010), así como de permitir su disponibilidad, accesibilidad y reutilización en Internet a través de sistemas de recuperación y buscadores de información en la Web. La Web semántica según Tim Berners-Lee (Berners-Lee y Hendler, 2001), “es una extensión de la Web actual en donde la información tiene un significado bien definido, es más entendible por los computadores y en donde las personas pueden trabajar cooperativa y colaborativamente”.

Los agentes inteligentes son entidades computacionales que poseen autonomía para realizar tareas y lograr sus metas con un mínimo de supervisión humana o incluso ninguna. Las siguientes son las características que deberían poseer los agentes para trabajar efectivamente (Weiss, 2013): Reactividad: responden inmediatamente a los cambios percibidos en su entorno; Proactividad: los agentes toman iniciativa para la solución de problemas; Cooperación y Coordinación: realizan tareas por medio de intercambio de mensajes con otros agentes a través de un lenguaje común; Autonomía: los agentes no requieren de la intervención directa de los seres humanos para operar; Deliberación: realizan procesos de razonamiento para tomar decisiones; Distribución de Tareas: cada agente tiene funcionalidades bien definidas e identifica los problemas a resolver; Movilidad: pueden moverse de un nodo a otro a través de la red; Adaptación: a partir de los cambios en el entorno cambian su comportamiento y mejoran de esta forma su desempeño, y Paralelismo: el sistema puede mejorar su desempeño a través de la ejecución de tareas realizadas en paralelo por los agentes. De esta forma, los sistemas multiagente (SMA) están compuestos por un conjunto de agentes inteligentes que trabajan conjuntamente e interactúan coordinadamente en un entorno computacional para resolver problemas específicos y de alta complejidad. De esta forma, este paradigma ofrece una nueva forma de análisis, diseño e implementación de sistemas de software complejos. Adicionalmente, se ha utilizado en el desarrollo de sistemas de recomendación (Rodríguez et al., 2016) los cuales buscan proporcionar a los usuarios resultados de búsqueda teniendo en cuenta sus necesidades y características cognitivas particulares. En el caso del e-learning estos sistemas buscan ofrecer recomendaciones de recursos educativos de acuerdo a las características, gustos y necesidades del estudiante.

El objetivo de este artículo es proponer y validar un modelo de aprendizaje colaborativo basado en la integración de diferentes técnicas de la Inteligencia Artificial, como las ontologías y los agentes inteligentes de software. La incorporación de una ontología de dominio específico aumenta la robustez del modelo y permite la representación semántica de las entidades relacionadas con el esquema planteado para el desarrollo de actividades colaborativas. Adicionalmente, a partir del desarrollo de la ontología, es posible generar inferencias para la recomendación acertada de recursos educativos basados en las fallas cognitivas diagnosticadas sobre cada estudiante. Por otro lado, el uso de agentes inteligentes permite la incorporación de funcionalidades de sensibilidad al contexto, es decir, se utilizan características del estudiante y del entorno en el que este se desenvuelve para mejorar la identificación de fallas cognitivas y así ofrecer una recomendación de recursos educativos proactiva que permita corregir dichas fallas.

El resto del artículo está organizado así: la siguiente sección presenta la revisión de literatura sobre trabajos de investigación relacionados con la temática de investigación; posteriormente, se describe el desarrollo metodológico del modelo propuesto. Luego se presentan los principales resultados obtenidos y el análisis de los mismos. Finalmente, se exponen las conclusiones y el trabajo futuro.

ANTECEDENTES

Oshima et al. (2016) proponen “edutab box” una herramienta de aprendizaje colaborativo soportado por computador para cursos escolares de niveles inferiores. El estudio se centra en validar la usabilidad de la herramienta y en aclarar la contribución que esta tiene en el proceso de enseñanza a partir del despliegue de las funcionalidades. El objetivo de la aplicación es que los estudiantes por medio de dispositivos móviles —en este caso tablets—, puedan interactuar entre ellos y llevar a cabo una serie de actividades que se despliegan en el tablero. Actividades tales como: realizar pantallazos, seleccionar asignaturas favoritas y sustentarlo, tomar fotos de elementos pertenecientes a la clase, realizar cuestionarios, entre otras. La

 ISBN 978-607-8242-11-5

herramienta se apoya en un modelo colaborativo interesante, que permite la difusión de resultados por parte de los estudiantes, lo que fomenta la discusión argumentativa. Sin embargo, la investigación no considera aspectos de detección de fallas, ni presenta una estructura del conocimiento bien definida que permita describir mejor el modelo utilizado. Adicionalmente, es importante incluir nuevos recursos que respondan a las necesidades de los usuarios, dotando al sistema con características de adaptabilidad.

Terzidou et al. (2016) proponen la implementación de características de Inteligencia Artificial sobre un juego serio para un entorno colaborativo aplicado a la educación terciaria. La investigación se encuentra basada en un trabajo previo realizado con agentes pedagógicos (Terzidou y Tsiatsos, 2016) los cuales son considerados como una técnica de aprendizaje colaborativo. El objetivo del estudio es conocer si el uso de herramientas de Inteligencia Artificial en juegos serios colaborativos es eficaz sobretodo en términos de lograr un mejor desempeño del equipo al mejorar las interacciones colaborativas de los estudiantes a través de la motivación en un ambiente de aprendizaje. El juego está basado en un entorno virtual en 3D donde los estudiantes pueden interactuar y trabajar en equipo para ser campeones de una partida, la cual cuenta con un tiempo, y consiste en una exploración de un entorno donde los estudiantes tratan de descubrir objetos virtuales que contienen preguntas de selección múltiple. Las características de Inteligencia Artificial propuestas para apoyar el juego serio son las siguientes: un agente de juego pedagógico, personajes que no juegan y funcionan como guías para el juego virtual, robots de chat y una interfaz de juego llamada "Mapa de Progreso". El juego colaborativo cuenta con retroalimentación individual al estudiante, con seguimiento a la actividad y motiva a los estudiantes en el uso de la herramienta. Sin embargo, la propuesta no cuenta con un esquema de actividades que motive la interacción constante y a conciencia con los demás integrantes del equipo. Finalmente, tampoco se contempla una estructura para la detección de fallas cognitivas y la recomendación de recursos educativos adaptados a las necesidades de cada usuario.

Lescano et al. (2016) proponen un algoritmo genético para la formación automática de grupos considerando los estilos individuales de aprendizaje de los estudiantes. Para ello, se utilizaron los datos históricos sobre el rendimiento de los grupos para crear reglas de asociación, que se emplean posteriormente en la función de fitness. El algoritmo diseña diferentes alternativas de agrupación considerando los estilos de aprendizaje de los estudiantes bajo la restricción de producir grupos de tamaño equilibrado. El algoritmo propuesto fue analizado con diferentes tamaños de grupos suministrados por el profesor. A través de la experimentación, se puede inferir qué tipo de configuración se logra para ser más apropiado. Aunque este enfoque produce buenos resultados, no se consideran las fallas cognitivas de los estudiantes, lo que puede ser un factor determinante en la conformación de equipos de trabajo.

Los trabajos anteriores permiten demostrar grandes fortalezas que ayudan a aclarar los desarrollos que han tenido lugar dentro del campo de CSCL. Sin embargo, estas investigaciones también muestran algunas debilidades que deben afrontarse para mejorar los procesos de aprendizaje colaborativo. Así por ejemplo, no consideran la detección temprana de fallas cognitivas, la realización de evaluaciones constantes durante el proceso de aprendizaje y la recomendación de recursos educativos en el desarrollo de las actividades colaborativas con el objetivo de corregir las fallas cognitivas identificadas.

DESARROLLO DEL MODELO

Como ya se ha mencionado, el modelo de aprendizaje colaborativo considera la integración de diferentes técnicas de la Inteligencia Artificial, como las ontologías y los agentes inteligentes de software. Es por ello, que el desarrollo del modelo considera tres etapas: (1) la identificación de las actividades colaborativas y el desarrollo de un esquema para el desarrollo de las mismas, (2) el proceso de especificación y el desarrollo del modelo ontológico y (3) la arquitectura multiagente para el despliegue del sistema colaborativo. A continuación se detallan cada una de las etapas:

A. Esquema para el desarrollo de actividades colaborativas

Para el proceso de detección de fallas cognitivas se propone un esquema secuencial, el cual se encuentra basado en el método de aprendizaje JigSaw (Esnawy, 2016). Este, busca potenciar el aprendizaje colaborativo a través de la integración de una serie de actividades bien definidas, permitiendo así la retroalimentación al estudiante y la recomendación de recursos educativos enfocados en la corrección de las fallas cognitivas identificadas durante las etapas del flujo. Es importante destacar que el esquema propuesto implementa, mejora, redefine y extiende el flujo de actividades colaborativas presentado por Álvarez et al. (2016) buscando resolver las siguientes limitaciones:

- No existe un mecanismo detallado para la detección de las fallas cognitivas en los procesos de aprendizaje colaborativo.
- No existe una especificación formal del tipo y la naturaleza de las fallas.

 ISBN 978-607-8242-11-5

- No se detalla el mecanismo de recomendación de recursos educativos. Por ejemplo, objetos de aprendizaje (OAs) y tutores.
- No se valida la efectividad en la etapa de reconformación de equipos por debilidades (reconformación de equipos por fallas cognitivas diagnosticadas en el proceso de aprendizaje y trabajo en colaborativo).

Teniendo en cuenta las limitaciones previamente mencionadas, se presenta una extensión del modelo de aprendizaje colaborativo que incluye las siguientes funcionalidades: (1) especificación formal de fallas cognitivas, (2) detección de fallas cognitivas en las etapas de evaluación de conocimientos, (3) recomendación de recursos educativos a partir de las fallas detectadas y (4) reconformación de equipos para atacar las debilidades (fallas cognitivas diagnosticadas).

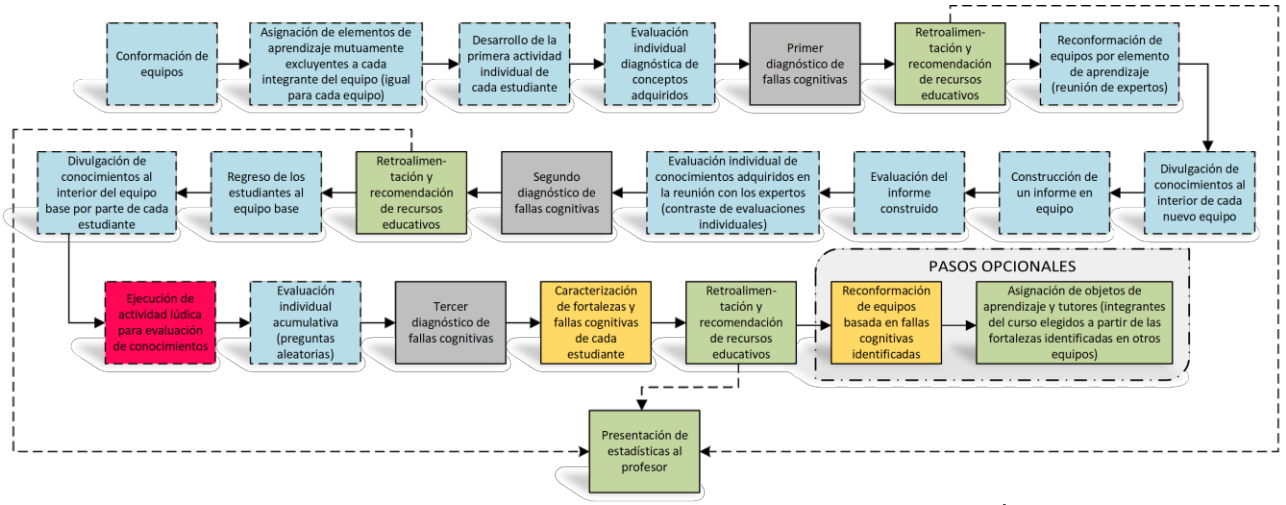


Fig. 1: Flujo del esquema para el desarrollo de actividades colaborativas. Adaptado de Álvarez et al. (2016).

La figura 1 presenta en colores distintivos las etapas inteligentes del esquema; en color gris se indica el diagnóstico de fallas cognitivas, en rojo se ilustra una fase que contiene una actividad lúdica de apoyo para el aprendizaje colaborativo, en color verde se encuentran las etapas donde se realiza la retroalimentación, la recomendación de recursos educativos y la presentación de estadísticas al profesor. Por otro lado, en amarillo se muestran la reconformación de equipos y la caracterización de fortalezas y fallas de cada estudiante. Finalmente, las etapas mostradas en azul presentan estados del esquema asociados a la actividad colaborativa y a la evaluación de la misma. A continuación se describe cada una de las etapas del esquema:

1. **Conformación de equipos:** ya que esta investigación no considera un modelo para la conformación de equipos, la elección de sus integrantes se deberá realizar sin tener en cuenta las características cognitivas de los estudiantes y por equipo se deberá contar con un número de miembros entre 4 y 6 personas.
2. **Asignación de elementos de aprendizaje mutuamente excluyentes a cada integrante del equipo (igual para cada equipo):** en el ámbito de una temática, el profesor de forma previa construirá una actividad, la cual será divisible en pequeñas sub-actividades (llamados elementos de aprendizaje) relacionadas entre ellas, pero mutuamente excluyentes para su desarrollo. Dicha actividad será asignada a todos los equipos y cada elemento de aprendizaje será asignado aleatoriamente a cada estudiante al interior de cada equipo.
3. **Desarrollo de la primera actividad individual de cada estudiante:** en esta etapa cada estudiante ejecuta la actividad correspondiente al elemento de aprendizaje que le fue asignado.
4. **Evaluación individual diagnóstica de conceptos adquiridos:** en esta etapa el sistema realizará de forma individual una evaluación inicial (construida por el profesor) de los conocimientos asociados al elemento de aprendizaje previamente asignado cada estudiante. Los resultados serán almacenados para continuar con el procesamiento de la información necesario en la siguiente etapa.
5. **Primer, segundo y tercer diagnóstico de fallas cognitivas:** según los resultados obtenidos en la evaluación individual de los estudiantes realizada en cada una de las etapas del esquema, el sistema realizará una caracterización de las fallas cognitivas de cada estudiante.
6. **Retroalimentación y recomendación de recursos educativos:** posterior a que el sistema diagnostique las fallas cognitivas de cada estudiante y conozca el resultado de la evaluación realizada, se presentará la retroalimentación de cada una de las respuestas erradas en la evaluación y se recomendarán recursos educativos asociados a las fallas diagnosticadas. Cabe

ISBN 978-607-8242-11-5

resaltar que esta investigación no contiene un sistema de recomendación desarrollado, y que, por el contrario, para recomendar OAs se hará uso de un servicio Web el cual se encuentra expuesto por ROAp (Rodríguez et al., 2013), una plataforma la cual contiene un repositorio que aloja OAs y permite realizar búsquedas automáticas basadas en palabras clave.

7. **Reconformación de equipos por elemento de aprendizaje (reunión de expertos):** esta etapa consta de una reconformación de equipos basada en que cada nueva agrupación va a estar constituida por integrantes con el mismo elemento de aprendizaje asignado en un principio. Es importante aclarar que debido a que cada estudiante se apropia de su elemento, será conocido dentro de esta investigación como un "experto".
8. **Divulgación de conocimientos al interior de cada nuevo equipo:** cada estudiante al interior de su nuevo equipo presentará mediante una exposición los conocimientos adquiridos durante las etapas previas del esquema (desarrollo de la actividad, retroalimentación y lo aprendido en los recursos educativos en caso que le fueran recomendados).
9. **Construcción de un informe en equipo:** los integrantes de cada equipo de expertos construirán un informe según los parámetros establecidos por el profesor.
10. **Evaluación del informe construido:** en esta etapa el profesor calificará el informe de cada equipo.
11. **Evaluación individual de conocimientos adquiridos en la reunión con los expertos (contraste de evaluaciones individuales):** el sistema realizará una vez más de forma individual, una evaluación de los conocimientos que el estudiante debió haber adquirido luego de la reunión con los expertos. Además, los resultados serán almacenados para continuar con el procesamiento de la información necesaria para la siguiente etapa, y de esta manera, contrastar los conocimientos y fallas con la evaluación diagnóstica realizada en la cuarta etapa del esquema.
12. **Regreso de los estudiantes al equipo base:** los estudiantes regresarán al equipo donde inicialmente comenzaron con la actividad colaborativa (equipo base), y una vez allí se dará inicio a la siguiente etapa.
13. **Divulgación de conocimientos al interior del equipo base por parte de cada estudiante:** en esta etapa cada estudiante —quién será experto en su elemento de aprendizaje— presentará de forma detallada mediante una exposición los conocimientos adquiridos en las etapas anteriores. Dicha presentación será realizada a sus compañeros de equipo base y tendrá la intención de transmitir todo el conocimiento posible.
14. **Ejecución de actividad lúdica para evaluación de conocimientos:** la actividad lúdica consiste en una serie de pasos cuyo objetivo es apoyar e incentivar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje colaborativo y se constituye como se menciona a continuación:
    a. Los integrantes de cada equipo base construirán una serie de preguntas con respuesta de alto nivel (aproximadamente 3 preguntas por estudiante).
    b. Se selecciona un estudiante aleatorio del equipo donde se construyó la pregunta —quién será conocido de aquí en adelante como *estudiante retador*—.
    c. Se selecciona un estudiante aleatorio de un equipo adicional —quién será conocido de aquí en adelante como *estudiante retado*—.
    d. Según la dificultad de la pregunta, se contará con un tiempo para darle la oportunidad al estudiante retado de responder correctamente y así ganar un punto para su equipo. En caso de no responder o hacerlo de forma errada, el estudiante retador estará en la obligación de responder la pregunta correctamente para evitar que su equipo pierda un punto.
    e. La actividad finaliza cuando todos los estudiantes hayan sido retados una vez, en dicho momento se asignará una nota a cada equipo de acuerdo a la tabla de posiciones final generada a partir de los puntos.
15. **Evaluación individual acumulativa (preguntas aleatorias):** en esta etapa se realizará una evaluación individual la cual contará con preguntas sobrantes de la actividad lúdica y con preguntas realizadas por el profesor. Una vez más, los resultados serán almacenados para continuar con el procesamiento de la información necesaria para la siguiente etapa.
16. **Caracterización de fortalezas y fallas cognitivas de cada estudiante:** el sistema realizará el procesamiento necesario de la información capturada en el desarrollo de la actividad colaborativa para inferir fallas y fortalezas cognitivas de cada estudiante.
17. **Reconformación de equipos basada en fallas cognitivas identificadas:** esta y la siguiente etapa son opcionales y a criterio del profesor; si se desean realizar, el sistema propondrá una reconformación de equipos en la cual estarán los estudiantes agrupados por fallas cognitivas similares e iguales.
18. **Asignación de objetos de aprendizaje y tutores (integrantes del curso elegidos a partir de las fortalezas identificadas en otros equipos):** finalmente en esta etapa el sistema asignará recursos de aprendizaje (OAs y tutores) a cada equipo según las fallas cognitivas identificadas.

ISBN 978-607-8242-11-5

19. **Presentación de estadísticas al profesor:** el sistema presentará durante esta etapa reportes estadísticos de información capturada e inferida durante el desarrollo de la actividad colaborativa. Dichas estadísticas corresponden a las siguientes:
    a. Visualización de las fallas cognitivas más repetidas.
    b. Visualización de las notas de la evaluación de cada estudiante.
    c. Visualización de los estudiantes con mayor y menor número de fallas cognitivas.

Es necesario puntualizar que, para la asignación de la nota final se tendrán en cuenta tanto las evaluaciones, como la actividad lúdica realizada. Para el cálculo de la nota final correspondiente a la actividad colaborativa, el profesor a su criterio asignará porcentajes a cada una de las notas generadas.

B. Modelo de representación del conocimiento

Con el objetivo de brindar inteligencia al modelo propuesto y conceptualizar formalmente los elementos asociados con el dominio, en esta etapa se busca representar el conocimiento y plasmarlo en un modelo ontológico. Actualmente, existe una gran variedad de metodologías para la construcción de ontologías a partir de una agrupación de instrumentos iterativos. Dichos instrumentos facilitan el proceso y perfeccionan el modelo con cada iteración. Una de las metodologías de desarrollo que son más conocidas y utilizadas hoy en día es Methontology, la cual se selecciona para realizar el modelo de representación del conocimiento asociado a esta investigación.

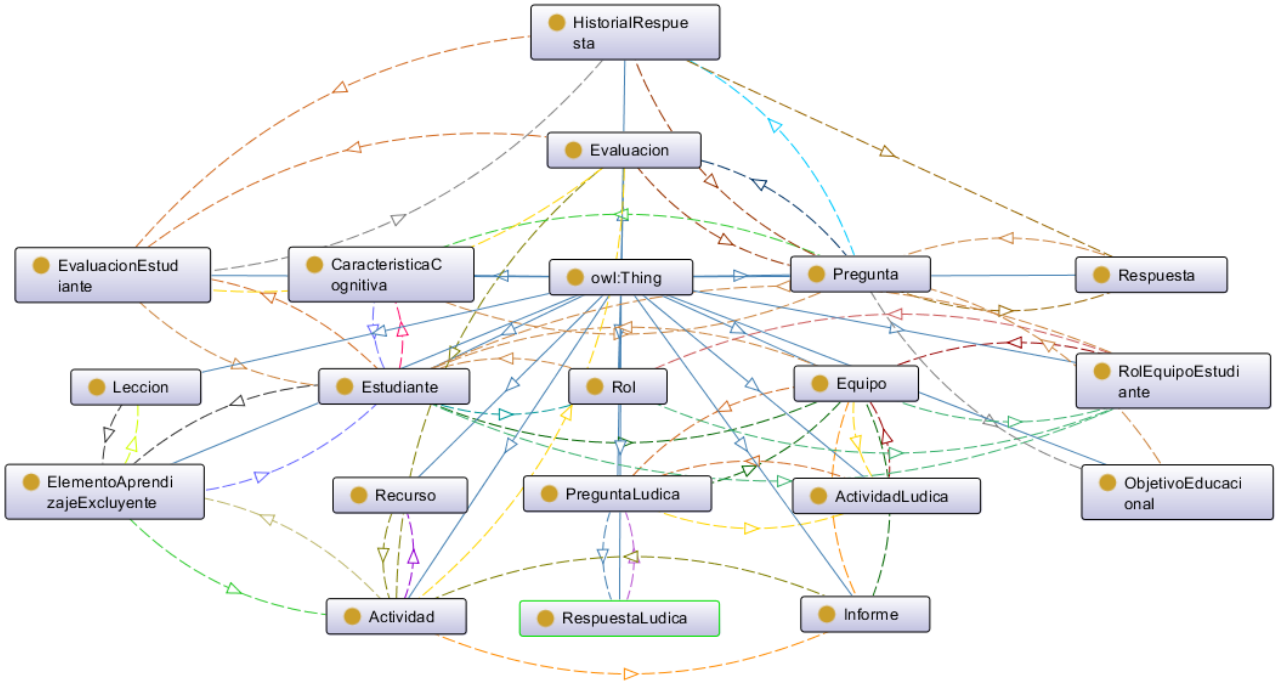


Fig. 2: Visualización de jerarquía entre clases de la ontología desarrollada.

A partir de las fases de especificación, conceptualización e implementación pertenecientes a la metodología Methontology, se logró obtener el modelo ontológico presentado en la figura 2. Este modelo presenta como entidad raíz la Lección del día desde la cual se despliega la Actividad propuesta por el profesor. La Actividad se encuentra asociada con la entidad que contiene los Recursos de la misma, y con cada uno de los Elementos de Aprendizaje Mutuamente Excluyentes que son asignados a cada Estudiante en un Equipo. Por otro lado, existe una entidad que representa la Evaluación que a su vez está conformada por Preguntas y Respuestas. Finalmente, el modelo establece la estructura necesaria para almacenar tanto el conocimiento inherente a la descripción de las Características Cognitivas, así como toda la información asociada con la Actividad Lúdica propuesta en el esquema para el desarrollo de actividades colaborativas.

C. Modelo multiagente colaborativo

La figura 3 presenta el modelo multiagente propuesto en el cual se pueden observar las interacciones entre los agentes de software, las fuentes de información del sistema y los actores involucrados en el proceso de aprendizaje colaborativo y detección de fallas cognitivas del sistema.

ISBN 978-607-8242-11-5

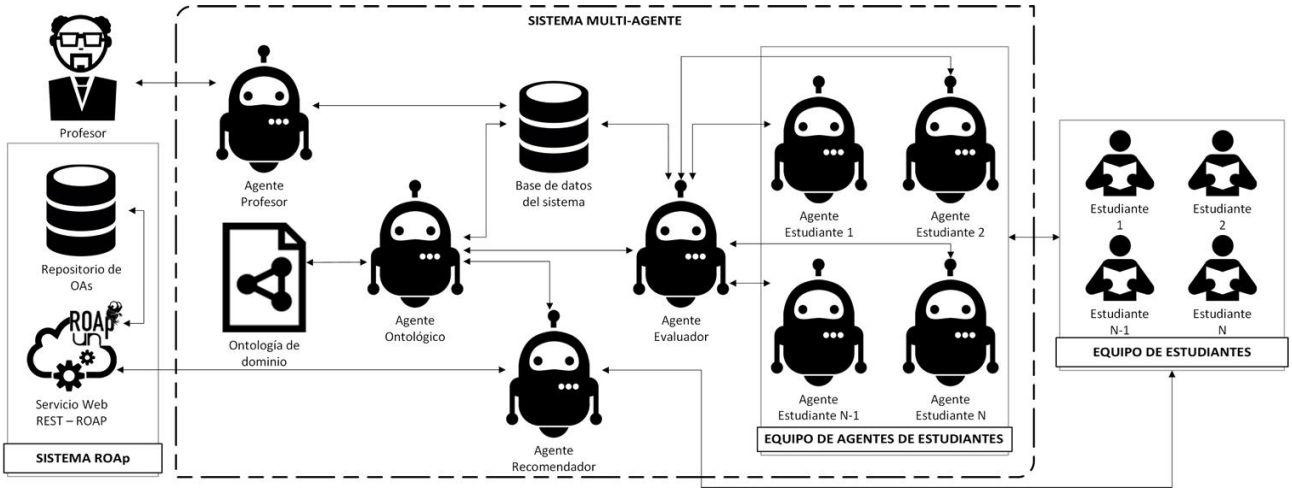


Fig. 3: Modelo propuesto de CSCL basado en agentes.

Este modelo es resultado de la aplicación de la metodología Prometheus, utilizando sus tres fases definidas. Como actores externos se identificaron tres entidades: el profesor, el equipo de estudiantes y el sistema ROAp. Adicionalmente, se identificaron cinco tipologías de agentes y dos fuentes de información, las cuales se describen a continuación:

- **Agente Estudiante:** encargado de representar al estudiante dentro de la plataforma, así como de administrar su perfil. Es un agente de interfaz, que administra todas las interacciones (percepciones y/o acciones) entre el sistema y el estudiante.
- **Agente Profesor:** sus funciones principales son representar al profesor dentro de la plataforma, asistir el diseño de las actividades (diseño instruccional) y presentar estadísticas de los resultados obtenidos por cada uno de los estudiantes.
- **Agente Ontológico:** tiene como objetivo principal la administración de la ontología de dominio específico detallada en la sección anterior, es decir, se encarga de poblar las entidades y de realizar inferencias solicitadas por otros agentes. Dichas inferencias son generadas a partir del uso de consultas y están relacionadas con la detección de fallas cognitivas, estructura de las actividades, recursos, información puntual de los estudiantes, detección de fallas cognitivas, etc.
- **Agente Evaluador:** encargado de desplegar las evaluaciones a los estudiantes, de transferir la información y de almacenar los resultados en la base de datos del sistema.
- **Agente Recomendador:** este agente cumple dos funciones las cuales tienen como objetivo entregar información al Agente Estudiante para su posterior presentación, así:
    - Consumir el servicio Web expuesto por el sistema ROAp para obtener OAs. Dicho sistema recibe las palabras claves inferidas por el Agente Ontológico cuando se detectan fallas cognitivas.
    - Obtener del Agente Ontológico los estudiantes que pueden cumplir el rol de tutores en la etapa final del esquema para el desarrollo de actividades colaborativas.
- **Ontología de dominio:** esta fuente de información comprende la ontología de dominio específico detallada previamente.
- **Base de datos del sistema:** fuente de información encargada de la persistencia de las entidades del sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fase de implementación de la ontología consiste en plasmar a través de un lenguaje formal, el conocimiento identificado a partir de las fases previas de especificación y conceptualización definidas por Methontology (Fernández-López et al., 1997). Para el desarrollo del modelo propuesto en esta investigación, se utilizó el lenguaje de Ontologías Web OWL mediante la herramienta Protégé (Tudorache et al., 2013). De esta manera, se crearon 20 clases, 104 instancias, 30 propiedades de tipo Object Property y 51 de tipo Data Property. Para la retroalimentación y la detección de fallas cognitivas asociadas a cada estudiante de los equipos, fueron creadas 2 reglas mediante el lenguaje de consulta SPARQL las cuales son presentadas en la tabla 1.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Reglas SPARQL para la retroalimentación y detección de fallas cognitivas.

Nombre de la regla	Expresión
Retroalimentación y recomendación	PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#> PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> PREFIX ontology: <http://www.semanticweb.org/santiago/ontologies/2017/5/ontology#> SELECT ?estudiante ?evaluacion ?nota ?historialRespuesta ?respuesta ?esCorrecta ?palabrasClave ?retroalimentacionPregunta WHERE { ?estudiante rdf:type ontology:Estudiante . ?estudiante ontology:perteneceAEvaluacionEstudiante ?evaluacion . ?evaluacion ontology:notaEvaluacionEstudiante ?nota . ?historialRespuesta rdf:type ontology:HistorialRespuesta . ?historialRespuesta ontology:perteneceAEvaluacionEstudiante ?evaluacion . ?historialRespuesta ontology:tieneRespuesta ?respuesta . ?respuesta ontology:esCorrectaRespuesta ?esCorrecta . ?respuesta ontology:perteneceAPregunta ?pregunta . ?pregunta ontology:palabrasClavePregunta ?palabrasClave . ?pregunta ontology:descripcionRetroalimentacionPregunta ?retroalimentacionPregunta . FILTER (?nota < 5 && ?esCorrecta = false) }
Detección de fallas cognitivas	PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#> PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#> PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> PREFIX ontology: <http://www.semanticweb.org/santiago/ontologies/2017/5/ontology#> SELECT ?estudiante ?evaluacion ?nota ?pregunta ?respuesta ?esCorrecta ?caracteristicaCognitiva ?tipoCaracteristicaCognitiva WHERE { ?estudiante rdf:type ontology:Estudiante . ?estudiante ontology:perteneceAEvaluacionEstudiante ?evaluacion . ?evaluacion ontology:notaEvaluacionEstudiante ?nota . ?historialRespuesta rdf:type ontology:HistorialRespuesta . ?historialRespuesta ontology:perteneceAEvaluacionEstudiante ?evaluacion . ?historialRespuesta ontology:tieneRespuesta ?respuesta . ?respuesta ontology:esCorrectaRespuesta ?esCorrecta . ?respuesta ontology:perteneceAPregunta ?pregunta . ?pregunta ontology:detectaCaracteristicaCognitiva ?caracteristicaCognitiva . ?caracteristicaCognitiva ontology:tipoCaracteristicaCognitiva ?tipoCaracteristicaCognitiva . FILTER (?nota < 5 && ?esCorrecta = false && sameTerm(?tipoCaracteristicaCognitiva, "falla_cognitiva"^^xsd:string))}

A continuación se detalla el funcionamiento de cada una de las reglas:

- **Regla para la retroalimentación y recomendación de recursos:** esta regla verifica las evaluaciones de cada estudiante y obtiene las palabras clave asociadas a las preguntas sobre las cuales su respuesta fue errada. Las palabras clave son utilizadas para la obtención de recursos educativos a través del consumo del servicio Web de ROAp mencionado anteriormente.
- **Regla para la detección de fallas cognitivas:** esta regla obtiene las fallas cognitivas de cada estudiante para utilizarlas en la presentación de estadísticas y la asociación con las palabras clave de cada pregunta.

Para el desarrollo de los agentes inteligentes propuestos se utiliza la metodología Prometheus (Golparyan y Behpour, 2013) la cual define las fases de especificación del sistema, diseño de la arquitectura y diseño detallado. A su vez, para la implementación del prototipo funcional basado en el modelo de agentes se emplea el Framework JADE (Bordini et al., 2013). Este Framework, se encuentra desarrollado para el lenguaje de programación JAVA y está orientado al desarrollo de SMA siguiendo los estándares definidos por FIPA (Foundation for Intelligent Agents) de la IEEE. Para el consumo del servicio Web necesario para la implementación de la funcionalidad de recomendación de recursos de aprendizaje, se hace uso del estándar RESTful obteniendo así las URL de cada uno de los recursos que son presentados al usuario en una interfaz Web HTML.

ISBN 978-607-8242-11-5

Respecto a la validación ontológica se simularon los perfiles de 5 estudiantes y falencias aleatorizadas fueron asignadas a cada estudiante. Posterior a ello, se ejecutaron las reglas anteriormente presentadas y se observó que el comportamiento de los resultados obtenidos era el esperado, ya que efectivamente se entregaba al usuario la información necesaria para cumplir con el objetivo de la ontología.



Fig. 4: Interfaz de recomendación de recursos educativos del prototipo.

Por otro lado, para realizar la validación del prototipo, se desplegó un caso de estudio en un ambiente controlado con 12 estudiantes que interactuaron con el sistema y recorrieron el flujo del esquema para el desarrollo de actividades colaborativas. En la figura 4, se presenta una de las interfaces del prototipo en donde el sistema identificó fallas cognitivas y muestra recomendaciones asociadas de recursos de educativos a cada uno de los estudiantes en las diferentes etapas del flujo de la actividad colaborativa. Adicionalmente, se realizaron encuestas de usabilidad, experiencia de usuario y efectividad de la recomendación de recursos basada en las fallas cognitivas identificadas.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos con la implementación del modelo propuesto para la detección de fallas cognitivas durante el desarrollo de actividades colaborativas, y luego de la validación del prototipo se logra concluir que:
i) se demuestra la eficacia de la integración del esquema para el desarrollo de actividades colaborativas con cada una de las tecnologías propuestas en esta investigación.
ii) se observó que los estudiantes se vieron más comprometidos y motivados al ser evaluados y retroalimentados de forma individual constantemente.
iii) se evidenció tanto en las encuestas de los estudiantes como durante el desarrollo de la actividad colaborativa, que la actividad lúdica genera una interdependencia positiva entre los integrantes del equipo, lo cual los mantiene en un estado de alerta y de conciencia para estar atentos a cada uno de los detalles asociados a los conocimientos relacionados con los tópicos de la actividad.

Como trabajo futuro se pretende validar el modelo y el esquema propuesto para el desarrollo de actividades colaborativas en un ambiente real, permitiendo que los estudiantes interactúen y se dejen llevar por el flujo del esquema planteado. Adicionalmente, se desea realizar una comparación de las encuestas de satisfacción y del conocimiento obtenido entre dos grupos de equipos, donde un grupo de equipos estará expuesto al modelo colaborativo propuesto en esta investigación realizando una actividad real, mientras que el otro grupo realizará la misma actividad, pero bajo el método de aprendizaje JigSaw estándar. Finalmente, se pretende enfatizar en el mecanismo para la detección de fallas cognitivas con el objetivo de brindar aún más inteligencia al modelo.

AGRADECIMIENTOS

La investigación presentada en este artículo fue financiada parcialmente por la beca de Jóvenes investigadores de COLCIENCIAS, otorgada a Santiago Álvarez Lebrum a través de la Convocatoria 761 “Convocatoria Nacional de Jóvenes Investigadores e Innovadores 2016”.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

Álvarez, S., Salazar, O. y Ovalle, D.A., "*Hacia un Modelo de Aprendizaje Colaborativo Soportado por Ontologías, Agentes Inteligentes y Servicios de Awareness*", CAVA – VIII International Conference of Adaptive and Accessible Virtual Learning Environment, Cartagena - Colombia (2016).

Berners-Lee, T., y Hendler, J., "*Publishing on the semantic web*", Nature, 410(6832), pp. 1023-4 (2001).

Bordini, R., Braubach, L., Dastani, M., El Fallah Seghrouchni, A., Gomez-Sanz, J., Leite J., O'Hare, G., Pokahr, A. y Ricci, A., *"A Survey of Programming Languages and Platforms for Multi-Agent Systems",* Informatica, 30(33), pp. 33-44 (2006).

Esnawy, S., "*EFL/EAP Reading and Research Essay Writing Using Jigsaw*", Procedia-Social and Behavioral Sciences, 232, pp. 98-101 (2016).

Fernández-López, M., Gómez-Pérez, A., y Juristo, N., "*Methontology: from ontological art towards ontological engineering"*, Ontological Engineering, volume 06 of AAAI Spring Symposium, pp. 33-40 (1997).

Golparyan, M., y Behpour, S., "*Reviewing On the Formalization of the Agent- Oriented Methodologies: Tropos and Prometheus"*, IEEE, Information and Knowledge Technology (IKT), 2013 5th Conference, pp. 284-289 (2013).

Hübscher, R., "*Assigning Students to Groups Using General and Context-Specific Criteria*", IEEE Trans. Learn. Technol., vol. 3, no. 3, pp. 178-189 (2010).

Lescano, G., Costaguta, R. and Amandi, A., "*Genetic algorithm for automatic group formation considering student's learning styles*," 8th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS), pp. 1-8 (2016).

Liang, Y., Zhu, H., Tian, Q., y Ji, S., "*A method for OWL ontology module partition"*, Proceedings IEEE 2nd Symposium on Web Society, SWS 2010, pp. 372-377 (2010).

Oshima, T., Mizuochi, T., Yatushiro, K. y Mizukoshi, K., "*Development of CSCL System with Usability for Lower Elementary School Grade Students**", Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, pp. 646-651 (2016).

Rodríguez, P. A., Duque, N. D., y Ovalle, D. A., "*Método Híbrido de Recomendación Adaptativa de Objetos de Aprendizaje basado en Perfiles de Usuario*", Formación Universitaria Vol. 9(4), pp. 83-94 (2016).

Rodríguez, P. A., Tabares, V., Duque, N. D., Ovalle, D. A., y Vicari, R. M., "*BROA: An agent-based model to recommend relevant Learning Objects from Repository Federations adapted to learner profile*", International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, *2* (Special Issue on Artificial Intelligence and Social Application) (2013).

Terzidou, T., y Tsiatsos, T., *"Pedagogical agents in 3D learning environments",* Encyclopedia of Information Science and Technology, Third Edition, pp. 2572-2581 (2015).

Terzidou, T., Tsiatsos, T., Miliou, C., y Sourvinou, A., *"Agent Supported Serious Game Environment"*. IEEE Transactions on Learning Technologies, *9*(3), pp. 217-230 (2016).

Tudorache, T., Nyulas, C., Noy, N. F., y Musen, M. A., "*WebProtégé: A collaborative ontology editor and knowledge acquisition tool for the web*", Semantic web Journal, 4(1), pp. 89-99 (2013).

Weiss, G., "*Multiagent Systems, Second Edition: From Intelligent Robotics and Autonomous Agents",* Book MIT Press, p. 920, ISBN: 9780262533874 (2013).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Clasificación de Tornillos Mediante Visión Artificial y Lógica Difusa

Francisco F. Zuñiga-Alvarez[1], Nohe R. Cazarez-Castro[1] y Miguel A. Duarte-Villaseñor1[1,2]
(1) Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Instituto Tecnológico de Tijuana, Tijuana, México
(2) Catedrático CONACYT, Instituto Tecnológico de Tijuana, Tijuana, México
E-mail: francisco.zuniga@tectijuana.edu.mx; nohe@tectijuana.edu.mx; miguel.duarte@tectijuana.edu.mx

Resumen

En éste artículo se presenta un método para clasificar tornillos en función de su sistema de apriete (de ranura plana y ranura de cruz o Phillips) utilizando los momentos invariantes de Hu como descriptores de la imagen. La clasificación se realiza mediante un sistema de inferencia difuso tipo Takagi-Sugeno de dos entradas y una salida. Su base de conocimiento consta de 9 reglas, definidas de acuerdo con los resultados obtenidos por los momentos de Hu al analizar un conjunto de 12 imágenes. Finalmente se generaron 9,720 imágenes sintéticas de tornillos en Matlab, simulando ruido, segmentación imprecisa, diferentes ángulos de rotación (0° a 179°) e imperfecciones en los bordes de las piezas, para realizar una validación del desempeño del clasificador obteniendo una precisión de 99.98%.

Screws Classification by Computer Vision and Fuzzy Logic

Abstract

This paper presents a method for classifying screws according to their drive design (slotted and Phillips) using Hu's invariant moments as image descriptor. Classification is done using a Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System composed by two inputs and one output. T-S system's knowledge base consists of 9 rules, defined by analyzing Hu's moments of a 12 images set. Finally, 9,720 synthetic images of screws were generated in Matlab, simulating noise, inaccurate segmentation, different rotation angles (0° to 179°) and imperfections in the edges of the pieces, to carry out a performance validation of the classifier obtaining 99.98% precision.

Keywords: computer vision, fuzzy logic, screws, Hu moments invariants, object recognition, classification

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La visión artificial (Computer Vision) o visión por computadora es una disciplina científica orientada a desarrollar modelos y métodos para adquirir, procesar, analizar y comprender imágenes del mundo real con el fin de producir información que pueda ser útil (Shapiro, 2001). De acuerdo con Huang (1996) desde el punto de vista de la ingeniería, busca automatizar las tareas repetitivas y monótonas donde la visión humana puede resultar ineficiente. La visión artificial se utiliza en diversas áreas, en las que se incluyen: reconstrucción de escenas (Kim, 2016), detección de eventos (Mathew, 2016), seguimiento de vídeo (Gül, 2016), estimación de movimiento (Basha, 2016), restauración de imágenes (Schmidt, 2016), reconocimiento de objetos (Malik, 2016), entre otras.

Como se puede ver en el trabajo presentado por Andreopoulos (2013), el reconocimiento de objetos es uno de los problemas clásicos de la visión artificial en el que dada una imagen con uno o más objetos, es necesario identificar y/o localizar uno o más objetos específicos. Los humanos reconocemos una multitud de objetos en imágenes con poco esfuerzo, a pesar de que la imagen del objeto pueda variar en diferentes puntos de vista, escala e incluso cuando fueron trasladados o rotados; sin embargo, todavía es un desafío para los sistemas de visión por computadora.

Uno de los problemas básicos en el diseño de un sistema de reconocimiento de objetos es la selección de un conjunto de atributos numéricos apropiados a extraer del objeto de interés con el propósito de clasificación. El reconocimiento de objetos a partir de imágenes se puede lograr con muchos métodos mediante la identificación de un objeto desconocido como miembro de un conjunto de objetos conocidos. Las técnicas de reconocimiento de objetos eficientes que resumen las caracterizaciones únicamente a partir de objetos para representación y comparación son de crucial importancia. Para este problema se han desarrollado muchos métodos como se puede ver en los trabajos de Prokop y Reeves (1992) y Zhang y Lu (2004), de aquí es notable que uno de los enfoques más prometedores es el uso de características invariantes. Su idea básica es describir los objetos mediante un conjunto de cantidades medibles llamadas invariantes que son insensibles a deformaciones particulares y que proporcionan suficiente poder de discriminación para distinguir entre objetos pertenecientes a clases diferentes (Flusser, 2006).

Desde el punto de vista matemático, el invariante I es un funcional definido en el espacio de todas las funciones de imagen admisibles que no cambia su valor bajo el operador de degradación D, es decir, que satisface la condición $I(f) = I\big(D(f)\big)$ para cualquier función de imagen f. Esta propiedad se llama invariancia. En la práctica, para adaptarse a la influencia de una segmentación imperfecta, la variabilidad intraclase y el ruido, se suele formular este requisito como una restricción más débil: $I(f)$ no debe ser significativamente diferente de $I\big(D(f)\big)$. Por lo general, un invariante no proporciona suficiente poder de discriminación por lo que deben utilizarse simultáneamente varios invariantes $I_1, \dots, I_n$. Entonces hablamos de un vector invariante. De esta manera, cada objeto está representado por un punto en un espacio métrico n-dimensional denominado espacio de características o espacio invariante (Flusser, 2009).

Describir imágenes con momentos en lugar de otras características de imagen más utilizadas significa que las propiedades globales de la imagen se utilizan en lugar de las propiedades locales. Los momentos invariantes son funciones especiales de los momentos de una imagen; es decir, cantidades escalares usadas para definir una función y capturar sus características significativas. Históricamente M. K. Hu publicó el primer artículo significativo sobre la utilización de momentos invariantes para el análisis de imágenes y la representación de objetos en 1961. Dado que un segmento de imagen tiene área finita, y en el peor de los casos, es continua por partes, un conjunto de momentos se puede calcular y utilizar para describir de forma única la información contenida en el segmento de imagen. A partir de combinaciones lineales de los momentos centrales Hu (1961) derivó un conjunto de funciones invariantes, que en valores únicos representan diferentes aspectos de una imagen, de tal forma que estos momentos son invariantes ante una transformación de traslación, cambio de escala, rotación y reflexión. Las ecuaciones 1-7 muestran los 7 momentos Invariantes de Hu (Gonzalez, 2008):

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \tag{1}$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02}) + 4\eta_{11}^2 \tag{2}$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \tag{3}$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} - \eta_{03})^2 \tag{4}$$

 ISBN 978-607-8242-11-5

$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (5)$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad (6)$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (7)$$

No obstante, una vez obtenido el vector invariante de los momentos de Hu de una imagen, es necesario utilizar una herramienta que permita hacer la comparación entre los vectores de varias imágenes, en este trabajo se recurre a la lógica difusa. El concepto de lógica difusa está asociado con la manera en que las personas perciben el medio; por ejemplo, comparativas relacionadas con la altura de una persona, velocidad con la que se mueve un objeto o la temperatura en una habitación. Cotidianamente estas comparativas se formulan de manera ambigua y depende de la persona que percibe el efecto físico o químico, ponderar su valor. Una persona puede ser alta o baja, algo puede moverse rápido o lento, una temperatura puede ser baja, moderada o alta; se dice que estas afirmaciones acerca de una variable son ambiguas porque rápido, bajo, alto son afirmaciones del observador, y estas pueden variar de un observador a otro (Chen, 2001).

Existen conceptos que no tienen límites claros, es por eso que surge la necesidad de trabajar con conjuntos difusos, para cada conjunto difuso existe asociada una función de pertenencia para sus elementos (definida por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo), que indica en qué medida el elemento forma parte de éste (Chen, 2001). En los conjuntos difusos la función de pertenencia puede tomar valores del intervalo entre 0 (no pertenencia) y 1 (completamente pertenece), y la transición del valor entre cero y uno es gradual y no cambia de manera instantánea como pasa con los conjuntos clásicos.

Esencialmente un sistema difuso es una estructura basada en conocimiento definida a través de un conjunto de reglas difusas del tipo si-entonces; las cuales contienen una cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística del experto de cómo realizar un control adecuado (Jang, 1997). El sistema difuso utiliza conjuntos difusos, definidos por la base de reglas difusa, para cuantificar la información en la base de reglas y que el mecanismo de inferencia opere sobre estos conjuntos difusos para producir nuevos conjuntos difusos, por tanto, es necesario especificar como el sistema convertirá las entradas numéricas en conjuntos difusos, un procedimiento llamado codificación difusa, tales que ellos puedan ser utilizados por el sistema difuso. De igual forma, el proceso llamado decodificación difusa describe la correspondencia de un espacio de acciones de control difuso en acciones de control no difuso.

Los sistemas difusos han demostrado su habilidad para resolver diferentes tipos de problemas tales como control, modelado o clasificación. Asimismo, han sido empleados en un amplio rango de aplicaciones; por ejemplo, procesamiento de señales e imágenes (Kalaykov, 2002), evaluación de riesgos (shang, 2013), recuperación de información (Crestani, 2013) y control de procesos industriales (Konar, 2005).

METODOLOGIA

En el presente trabajo se calcularon los 7 momentos invariantes de Hu (Tabla 1) de 12 imágenes de tornillos (Figura 1), capturadas a una distancia de 15 cm, 6 de tornillos de ranura (o plano) y 6 Phillips (Phillips, 1936) (de cruz); cabe mencionar que las imágenes se segmentaron manualmente y se varió la rotación de la cabeza de los mismos.

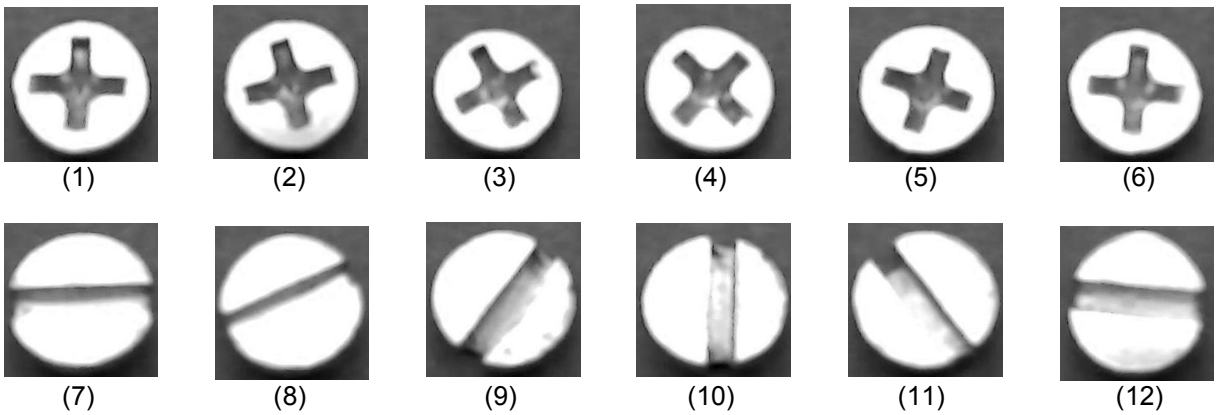


Fig. 1: Imágenes de tornillos utilizadas para calcular los Momentos de Hu.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Los 7 Momentos Invariantes de Hu de las 12 imágenes de prueba.

Imágenes	Momentos						
	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7
Tornillos de cruz							
(1)	62.6204	3,2099	4.2505	0.2130	0.0006	0.0191	0.0165
(2)	55.9952	5.3259	0.9222	3.2160	0.2031	0.8188	0.1986
(3)	51.1622	4.6003	5.5509	0.3149	0.0163	0.0972	0.0094
(4)	72.2896	4.4996	4.1561	0.4673	0.0218	0.0629	0.0305
(5)	67.3643	1.0536	1.4083	32.2604	6.3638	0.0026	12.3790
(6)	68.4963	27.2031	3.0484	6.4579	0.3376	4.0712	2.2400
Tornillos planos							
(7)	70.7743	98.8043	9.217	11.6231	4.6108	14.9276	3.3836
(8)	92.6189	13.3852	28.0889	61.0997	94.2840	33.1440	84.5886
(9)	40.4172	64.6742	4.1799	95.0243	63.7972	98.4590	87.3462
(10)	37.1875	61.7631	8.2406	62.5611	54.3024	68.4748	40.7040
(11)	40.1570	36.5245	0.5003	11.8006	0.4228	9.4711	2.1830
(12)	77.2315	12.1513	99.9968	0.1553	0.0242	0.0270	0.0122

Mediante un diagrama de cajas (Figura 2) se analizaron los valores obtenidos para encontrar una combinación de los diferentes momentos de Hu que permitiera diferenciar los tornillos planos y de cruz, se determinó que los momentos 2 y 6 son los que ofrecen resultados significativos.

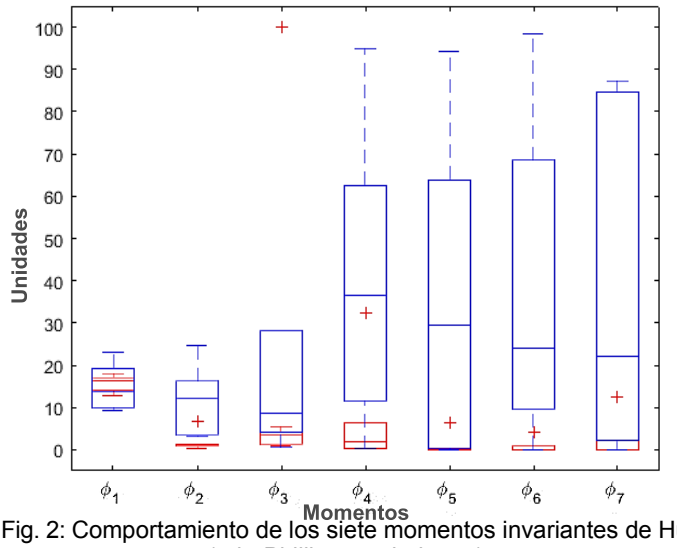


Fig. 2: Comportamiento de los siete momentos invariantes de Hu, (rojo-Phillips, azul-planos).

Para llevar a cabo la clasificación de los tornillos se diseñó un sistema de inferencia difuso tipo Takagi-Sugeno (Tabla 2) de dos entradas (momentos de Hu 2 y 6) con 5 funciones de membresía triangulares cada una, representando los valores lingüísticos “Muy Bajo”, “Bajo”, “Medio”, “Alto” y “Muy Alto” (Figura 3), y una salida singleton con valores “Cruz” o “Plano” (Figura 4).

Tabla 2: Funciones de membresía del sistema difuso.

Variable Lingüística	Parámetros	Rango	Tipo de Función de Membresía
Entradas			
	ϕ_2		
Muy Bajo	[0 0 3.2]	[0 25]	Triangular
Bajo	[1.6 4.5 7.24]	[0 25]	Triangular
Medio	[6 9.6 12.8]	[0 25]	Triangular
Alto	[11.2 14.4 17.6]	[0 25]	Triangular
Muy Alto	[14.4 25 25]	[0 25]	Triangular
	ϕ_6		
Muy Bajo	[0 0 5]	[0 100]	Triangular
Bajo	[2 15 25]	[0 100]	Triangular
Medio	[20 30 40]	[0 100]	Triangular
Alto	[35 45 55]	[0 100]	Triangular
Muy Alto	[45 100 100]	[0 100]	Triangular
Salida			
Cruz	-1	[-1 1]	Singleton
Plano	1	[-1 1]	Singleton

ISBN 978-607-8242-11-5

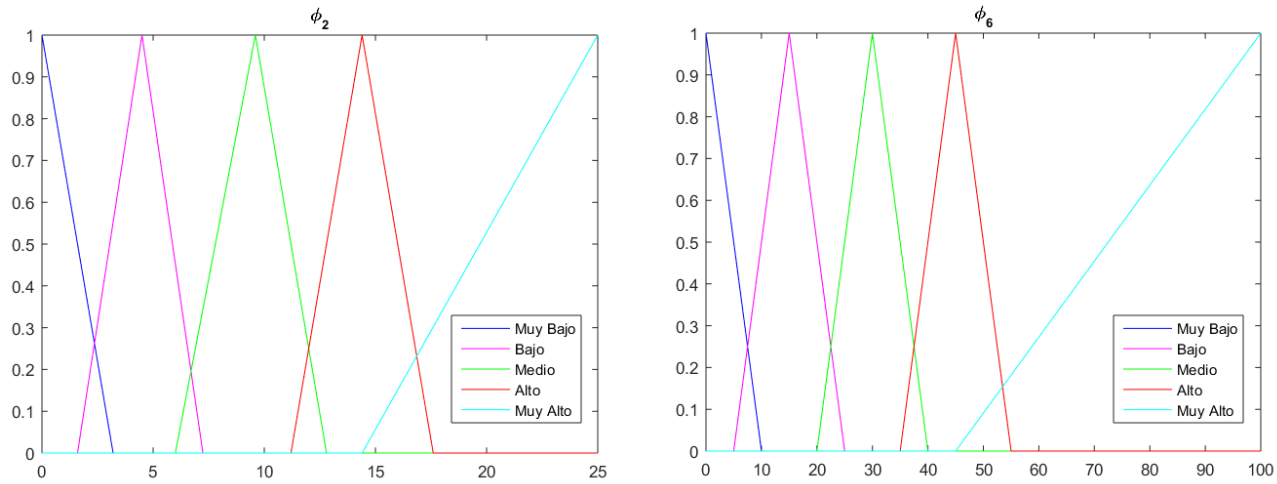


Fig. 3: Funciones de membresía para las entradas del sistema difuso.

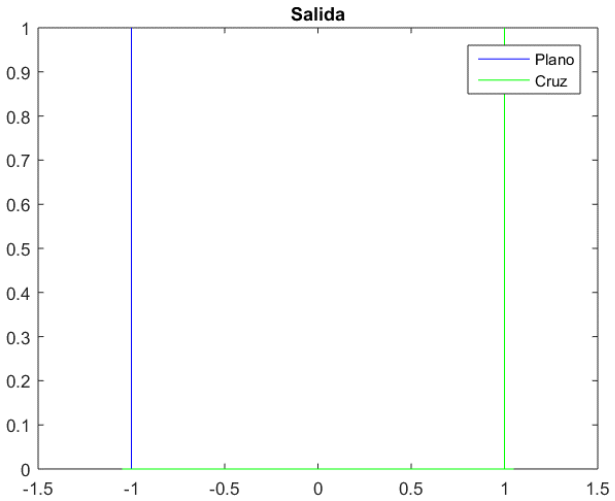


Fig. 4: Funciones de membresía para la salida del sistema difuso.

La máquina de inferencia diseñada considera 9 reglas, mostradas en la tabla 3.

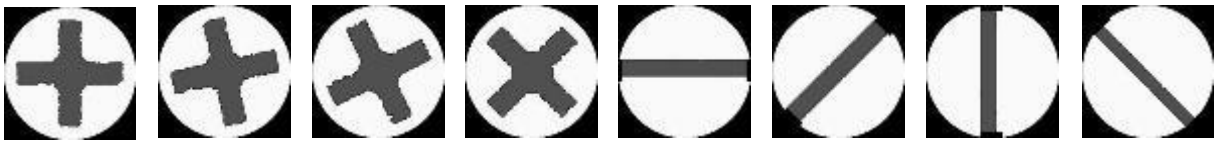
Tabla 3: Base de reglas del sistema difuso.

Reglas	**Variables de Entrada**			**Variable de Salida**
	Momento 2	**Conector**	**Momento 6**	
1	Muy Alto	OR	Muy Alto	Plano
2	Alto	OR	Alto	Plano
3	Medio	AND	Bajo	Plano
4	Medio	AND	Muy Bajo	Cruz
5	Bajo	AND	Medio	Plano
6	Bajo	AND	Bajo	Plano
7	Bajo	AND	Muy Bajo	Plano
8	Muy Bajo	AND	Bajo	Cruz
9	Muy Bajo	AND	Muy Bajo	Cruz

La validación del sistema de clasificación se realizó de la siguiente forma:

i) Se crearon en Matlab 9,720 imágenes sintéticas de tornillos (Figura 5), 4,860 imágenes de cada tipo de tornillo. A cada imagen se le aplicó ruido blanco con media 0 e intensidad de 0.05 para simular textura; se realizaron operaciones de apertura y cerradura para simular bordes imperfectos y segmentación imprecisa. Las imágenes fueron rotadas entre 0° y 179° en intervalos de 1°, para simular diferentes posiciones (de 180° a 359° no se consideraron pues son equivalentes a los realizados).

ISBN 978-607-8242-11-5



(a) 0° (b) 12° (c) 26° (d) 45° (e) 0° (f) 45° (g) 90° (h) 135°

Fig. 5: Ocho imágenes sintéticas de tornillos con diferentes ángulos de rotación.

ii) Se calcularon los momentos de Hu 2 y 6 de cada imagen generada.

iii) Se realizó la clasificación de estos utilizando el sistema difuso realizado. Para un adecuado funcionamiento de la clasificación en las imágenes sintéticas únicamente fue necesario escalar los datos obtenidos de sus momentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema diseñado se probó evaluando las 9,720 imágenes generadas, alcanzando un 99.98% de precisión para este clasificador. Analizando los valores de las imágenes clasificadas de manera incorrecta (falsos positivos) se encuentra nulo; es decir, ninguna imagen fue clasificadas erróneamente, sin embargo 2 imágenes no fueron clasificadas por falta de reglas.

Tabla 4: Resultados de la clasificación.

Tipo de tornillo	Clasificación correcta	Total	Porcentaje	Clasificación		Total	Porcentaje
Cruz	4858	4860	99.96%	Correcta	9718	9720	99.98%
Plano	4860	4860	100.00%	Incorrecta	0	9720	0.00%
				Ninguna	2	9720	0.02%

Al sistema difuso diseñado se agregó la regla “IF Muy Bajo AND Medio THEN Cruz”, con este nuevo sistema se obtiene un 100% de imágenes clasificadas correctamente.

Para incrementar la velocidad de clasificación se propone mudarlo a una arquitectura de FPGA; además, se piensa extender el problema a más tipos de apriete como torx, hexagonal, entre otros, además de poder realizar la separación de tornillos por tamaño y tipo de cuerda.

CONCLUSIONES

El presente estudio fue diseñado para determinar la conveniencia de emplear los Momentos invariantes de Hu como descriptores para imágenes del sistema de apriete (ranura o huella) de tornillos, los resultados obtenidos muestran que encontrando una combinación adecuada de estos es posible realizar una clasificación bastante precisa. Estos hallazgos sugieren que es posible extender el problema a mas tipos de tornillos; y también sería interesante investigar su aplicación a otros problemas de clasificación. Asimismo, un sistema de inferencia difusa muestra ser una muy buena herramienta de clasificación para el problema estudiado puesto que permite la utilización de múltiples entradas para su funcionamiento, así como la especificación de intervalos flexibles; además de permitir facilidad de adaptación para un mejor funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió financiamiento PORDEP del proyecto No. 6104.17-P del Tecnológico Nacional de México ITTIJ-CA-8-24056. El autor Francisco F. Zuñiga recibió beca CONACYT No. 583737 para realizar los estudios de Maestría.

REFERENCIAS

Andreopoulos, A., y J.K. Tsotsos, *“50 Years of object recognition: Directions forward”*, Computer Vision and Image Understanding, vol. 117, no. 8, 827-891 (2013).

Basha, S.M., y M. Kannan, “*Design and implementation of low-power motion estimation based on modified full-search block motion estimation”*, Journal of Computational Science, (2016).

Chen, G., y T. Tat-Pham, *“Introduction To Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, And Fuzzy Control Systems”*, 1st ed. CRC Press (2001).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Crestani, F., y G. Pasi, *"Soft Computing in Information Retrieval: techniques and applications"*, Vol. 50, Physica. (2013).

Flusser, J., *"Moment invariants in image analysis"*. In proceedings of world academy of science, engineering and technology, Vol. 11, No. 2, 196-201 (2006).

Flusser, J., y B. Zitov, *"Moments and moment invariants in pattern recognition"*. 1st ed. Chichester (2009).

Gonzalez, R.C, y R.E. Woods; *Digital Image Processing*. 3rd ed., Prentice Hall. (2008).

Gül, S., J.T. Meyer, C. Hellge, T. Schierl, y W. Samek, *"Hybrid video object tracking in H.265/HEVC video streams"*, IEEE 18th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP), 1-5 (2016).

Hu, M.K., *"Visual pattern recognition by moment invariants"*, IRE transactions on information theory, Vol. 8, No 2, 179-187 (1961).

Huang, T.S., *"Computer Vision: Evolution and Promise",* European Organization for Nuclear Research-Reports-CERN, 21-26 (1996).

Jang, J-S.R, et al., *"Neuro-Fuzzy And Soft Computing"*, 1st ed., Prentice Hall, (1997).

Kalaykov, I. y G. Tolt, *"Fast Fuzzy Signal And Image Processing Hardware",* Fuzzy Information Processing Society, 2002. Proceedings. NAFIPS. 2002 Annual Meeting of the North American. IEEE, 7-12 (2002).

Kim, H., S. Leutenegger, y A.J. Davison, *"Real-Time 3D Reconstruction and 6-DoF Tracking with an Event Camera",* Computer Vision – ECCV 2016, 349-364 (2016).

Malik, J., et al., *"The three R's of computer vision: Recognition, reconstruction and reorganization"*, Pattern Recognition Letters, vol. 72, 4-14 (2016).

Mathew, A., S.V. Nair, y B. Vinoth, *"Dynamic event detection in crowded environment by HOS"*, International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 3642-4913 (2016).

Phillips, H.F, *"Means for uniting a screw with a driver"*, US Patent and Trademark Office. US Government. (1936).

Prokop R.J., y A.P. Reeves, *"A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition"*, Graphical Models and Image Processing (CVGIP), vol. 54, no. 5, 438-460 (1992).

Shang, K., y Z. Hossen, *"Applying fuzzy logic to risk assessment and decision-making"*, Canadian institute of actuaries. (2013).

Shapiro, L.G. y G.C. Stockman, *"Computer Vision"*, 1st ed. Prentice Hall (2001).

Schmidt, U., J. Jancsary, S. Nowozin, S. Roth, y C. Rother, *"Cascades of Regression Tree Fields for Image Restoration"*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 38, no. 4, 677-689 (2016).

Zhang D., y G. Lu, *"Review of shape representation and description techniques"*, Pattern Recognition, vol. 37, no. 1, 1-19 (2004).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de la Velocidad en la Interceptación del Balón por Parte de los Porteros Profesionales de Fútbol de Salón

Mauro Callejas-Cuervo[1], Jairo A. Pineda-Rojas[2] y William A. Daza-Wittinghan[3]
(1) Grupo de Investigación en Software, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Avenida Central del Norte, Tunja, Colombia, mauro.callejas@uptc.edu.co
(2) Institución Educativa Pablo Valette, San Pablo de Borbur, Colombia.
(3) Escuela de Educación Física Recreación y Deportes, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Chiquinquirá, Colombia.

Resumen

El futbol de salón en Colombia y el mundo es una disciplina que hoy en día a evolucionado con respecto a su entrenamiento preparación y competición, por ende una de las posiciones más importantes en el desarrollo de esta, es la del portero debido a su especificidad y su complejidad en el desarrollo del entrenamiento, a esto se le suma la necesidad de implementar más herramientas para su estudio y análisis de diferentes situaciones que se presentan en el campo de juego (Bolaños & Duque, 2012) y que ayuden considerablemente en sus tareas específicas identificando situaciones adversas que signifiquen mejorar sus condiciones enfocadas a reducir el tiempo en la ejecución del movimiento característico de cada portero y aún más en la velocidad de interceptación siendo esta una de las facultades inherentes en esta posición puesto que el éxito o el fracaso del portero está en la finalización de la jugada y control total del elemento como lo es el balón. Con la construcción de herramientas que faciliten la medición en la interceptación del balón se pretende contribuir al proceso y evolución de la velocidad en los porteros de futbol de salón y medir adecuadamente esta cualidad para mejorar su desempeño, de la misma manera que se implementan situaciones adversas en relación con los jugadores de campo (Juares & Navarro, 2004) en la velocidad del pateo con efecto directo para los porteros de futbol de salón.

La presente investigación se enfocó en el diseño de un instrumento que permitió medir la velocidad en la intercepción del balón con el fin de implementar un método de medición apropiado, que reúna elementos suficientes para alcanzar e implementar seguimientos que determinen el desempeño en esta cualidad y que intervenga en el control de los tiempos de alcance del elemento, en el desarrollo de tareas que conjuguen la interceptación y habilidades visuales que ayuden en la efectividad de esta, de vital importancia para el desenvolvimiento de esta posición como lo es el portero (Antunez, Ureña, & Velandrino, 2004).

Para la validación del instrumento se seleccionaron diez porteros profesionales de futbol de salón en Colombia, se construyó una plataforma de medición con sensores inerciales y magnéticos con características especiales para el análisis de la interceptación del balón; se diseñó un protocolo de ejecución de pruebas y se realizaron unos pilotajes de estas para definirlos factores a evaluar, se establecieron las correlaciones y el análisis de los resultados. Los porteros resultaron casi similares en lo referente a la edad, el peso y el índice de masa corporal. Por consiguiente, los porteros son similares en lo que concierne características antropométricas relacionadas con las velocidades de interceptación del balón. En la velocidad de interceptación del balón hacia la derecha, un 50% de los porteros se ubicaron en un rango Bajo (entre 30 y 75 kilómetros por hora); un 40% en un rango Medio (entre 75 y 119 Km/h) y el 10% restante en un rango Rápido (más de 119 Km/h). Además, respecto a la velocidad hacia la izquierda, un 40% se ubicó en un rango Bajo (entre 32 y 75 Km/h) y el 60% restante en un rango Medio (75 y 119 Km/h). Estos resultados clasifican en un rango de mejor desempeño a los porteros en la velocidad hacia la derecha.

Referencias

Bolaños, J., y Duque, P; *Caracteristica fisica, tecnicas, tacticas y psicologicas de portero de futbol*. Trabajo de Grado, Universidad del Valle, Cali, Colombia. (2012).

Juares, D., & Navarro, F.; *Analysis speed ball in the beating in football players based measurement system, intended for precision shooting, and its relationship with other explosive action.* Eur. J. Hum. Mov: 15 (2004).

Antunez, A., Ureña, F. y Velandrino, A. Y.; *Valoracion de la Efectividad de la Interceptacion con Exito de la Portera de Balonmano Ante el Lanzamiento Tras la Aplicacion de un Programa Perceptivo Motor*: Rev. Int. Med. Cienc. Act. Fís. Deporte: 4 (15) pp. 192-203 (2004).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tipologías de Viviendas Vulnerables a Inundaciones en la Cuenca Urbana de Riohacha, La Guajira-Colombia

Jhonny I. Pérez[1], Andrea Nardini[2] y Yulenis Y. Olaya[3]
(1,3) Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Km 5 Vía a Maicao, Riohacha-Colombia. E-mail: jpemon@uniguajira.edu.co
(2) Fundación Centro de Recuperación de Ecosistemas Acuáticos CREACUA, Riohacha, Colombia.

Resumen

Se han identificado, por medio de a técnica de Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM), las tipologías más representativas de viviendas expuestas a inundaciones en la casi totalidad de la ciudad de Riohacha. Esta identificación es el paso previo para luego construir curvas de vulnerabilidad para cada tipología y llegar a evaluar el riesgo correspondiente. Para ello se han adoptado los criterios de minimizar el número de tipologías, maximizar el número de viviendas homogéneas asociadas y agrupar las viviendas con características más vulnerables (pared de bahareque o barro). Se realizaron 4 ACM usando el software IBM SPSS Statistics 21, en los que se analizaron los resultados de 411 encuestas a viviendas afectadas por inundaciones en el mayor evento de la "ola invernal 2010-2011", ocurrido el 18 de septiembre del 2011. En la encuesta (realizada anteriormente por el proyecto "Adaptacion urbana "verde" frente a inundaciones con el soporte de la modelación matemática MODCEL en Riohacha, La Guajira-Colombia se consideraron aspectos físico-estructurales, socioeconómicos, humanos y aquellos relacionados con la ocurrencia de inundaciones (daños y perjuicios, gastos). De acuerdo a los criterios antes señalados, se seleccionó el ACM 3 que agrupó las viviendas en 13 tipologías, de las cuales se seleccionar las 5 más representativas, 3 por tener el mayor número de viviendas agrupadas y 2 por asociar viviendas más vulnerables. El 37,6% de las viviendas asociadas en el ACM 3 están ubicadas directamente sobre la zona inundada, lo que da la idea del riesgo a que están expuestas. El ACM es un método válido y confiable para determinar tipologías de vivienda en cualquier zona urbana.

Palabras clave: tipologías de viviendas; vulnerables; inundaciones; análisis de correspondencias múltiples (ACM)

Typologies of Flood-Vulnerable Housing in the Riohacha Urban Basin, La Guajira-Colombia

Abstract

Through the technique of Multiple Correspondence Analysis (MCA), the most representative typologies of housing exposed to flooding have been identified in almost all Riohacha city. This identification is the previous step to construct vulnerability curves for each typology and to evaluate the corresponding risk. To reach this goal the mentioned criteria has been adopted to minimize the number of typologies, to maximize the number of homogeneous houses associated and to group the houses with more vulnerable characteristics (bahareque wall or mud). Four MCA were conducted using the IBM SPSS Statistics 21 software which analyzed the results of 411 surveys of flood-affected dwellings at the largest "winter wave 2010-2011" event on September 18, 2011. In The survey (previously carried out by the project "Urban adaptation" in the face of floods with the support of MODCEL mathematical modeling in Riohacha, La Guajira-Colombia, considered physical-structural, socioeconomic, human and flood-related aspects (Damages, expenses) According with the above mentioned criteria the MCA 3 was selected owing to the fact that it is able to group the dwellings into 13 typologies, the five most representative were selected. Three of the last mentioned typologies have the largest number of dwellings grouped and two 37.6% of the associated homes in MCA 3 are located directly on the flooded area, with the risk to which they are exposed. To conclude, the MCA is a valid and reliable method for determining typologies of housing in any urban area.

Keywords: typology of housing; vulnerability; floods; multiple correspondence analysis (MCA)

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas se han convertido en una preocupación cada vez más importante y en un creciente problema social en todo el mundo (Vojinovic y Tutulic, 2009). Colombia afrontó en el periodo 2010- 2011 las consecuencias del fenómeno de La Niña más fuerte desde 1956, cuyo costo material superó los $7 billones de pesos y sólo el 5,1% de los daños materiales causados por inundaciones estaba asegurado (Palacio, 2011). Riohacha fue una de las ciudades de Colombia más afectadas durante esta ola invernal sufriendo inundaciones y daños en varias zonas dejando miles de personas damnificadas por pérdida de bienes materiales, viviendas deterioradas y/o destruidas, y con enfermedades (BID , 2012). El evento más fuerte de esa ola invernal ocurrió el 18 de septiembre de 2011, dejando destrucción de algunas viviendas, miles de personas con prácticamente nada más que la enfermedad y la desesperación. Las inundaciones en la ciudad de Riohacha son un fenómeno bastante frecuente, lo que hace muy difícil la vida para sus ciudadanos (Nardini y Miguez, 2016

En busca de alternativas de solución a las inundaciones en la ciudad de Riohacha, se desarrolló el proyecto denominado: Adaptación urbana “verde” frente a inundaciones con el soporte de la modelación matemática MODCEL en Riohacha, La Guajira-Colombia, en adelante MODCEL, coordinado por la fundación CREACUA (Centro de Recuperación de Ecosistemas Acuáticos), financiado por Unidad Nacional de Gestión de Riesgos y Desastres – UNGRD de Colombia y co-financiado por la Alcaldía Municipal de Riohacha, y desarrollado con la fuerte colaboración de la Universidad Federal de Río de Janeiro - UFRJ y de la Universidad de La Guajira –UNIGUAJIRA (CREACUA, 2013).

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el riesgo por inundación, para ello necesitamos las curvas de vulnerabilidad; para realizar pocas es necesario tener un mínimo de tipologías de viviendas representativas. Las tipologías de viviendas son esenciales porque en igualdad de calado, los daños pueden ser radicalmente diferentes, para ello se utilizó el Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM). Los métodos exploratorios multivariantes como el análisis de componentes principales (ACP), análisis de correspondencia (AC) y el análisis de correspondencia múltiple (ACM), se utilizan a menudo como métodos descriptivos multivariantes para explorar y visualizar datos (Fithian y Josse, 2017). Comparten objetivos comunes pero difieren con respecto a la naturaleza de los datos que tratan: ACP está diseñado para una matriz de datos en la que las observaciones se describen por variables cuantitativas continuas, el AC para tablas de contingencia (para pares de variables categóricas cruzadas) y el ACM para una matriz donde las observaciones se describen por variables categóricas o una tabla de contingencia de múltiples vías. Esta técnica de reducción de dimensiones nos permite estudiar similitudes entre filas o columnas, y asociaciones entre ellas. Ellos producen subespacios que mejor representan los datos, en el sentido de maximizar la variabilidad de los puntos proyectados (Fithian y Josse, 2017).

Cuando las variables a analizar tienen un carácter cualitativo, resulta adecuado realizar el ACM, el cual asigna valores numéricos a los objetos o casos, y por lo tanto a las categorías, con el fin de cuantificarlos (Vignera et al., 2012). El ACM ha demostrado su validez en el campo de la Investigación sin importar la disciplina de estudio. La Universidad de Sevilla (España) lo aplicó para explorar los rasgos del discurso escolar e identificar géneros discursivos característicos de contextos educativo (Rebollo, 2002). En medicina se ha usado el ACM con registros clínicos, donde detectaron tipologías útiles para la toma de decisiones al tipo de paciente (Sánchez y Herrera, 1999), al igual que ha sido usado para analizar las homología y principios de diferenciación existentes entre las instituciones privadas en Argentina (Algañaraz, 2016)

El proyecto MODCEL generó una encuesta con información socioeconómica, características de la vivienda, daños ocurridos en Riohacha en la pasada ola invernal 2010-2011, nació entonces la idea de complementar el proyecto determinando las curvas de vulnerabilidad y como paso previo para determinar el riesgo, las cuales son esenciales porque los daños en la estructura varían para un mismo calado dependiendo de las características de las viviendas.

METODOLOGÍA-

Para el desarrollo del presente estudio se delimitó el área de estudio dentro de la zona urbana de la ciudad de Riohacha, La Guajira-Colombia, el criterio fue considerar las viviendas más afectadas por la ola invernal 2010-2011. Para determinar las tipologías se adoptó un enfoque multiatributo

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Riohacha, ciudad costera con una población estimada al año 2013 de 240951 habitantes aproximadamente, donde el 81,28% viven en la zona urbana, (DANE, 2010), ubicada al norte de Colombia, en el centro en el departamento de La Guajira. Dentro del área urbana se encuentran 4

 ISBN 978-607-8242-11-5

humedales: Jagüey Boca Grande, Jagüey La Esperanza, Jagüey 31 de Octubre y Laguna Salá, los dos últimos de origen natural y en su área periurbana se encuentra el brazo principal del río Ranchería conocido como El Riíto. Por lo anterior se tomó para el estudio la zona más afectada por la inundación en la pasada ola invernal 2010-2011 denominada en el proyecto MODCEL como cuenca urbana. En la Figura 1 se ilustra la ubicación de la ciudad de Riohacha y zona de estudio.

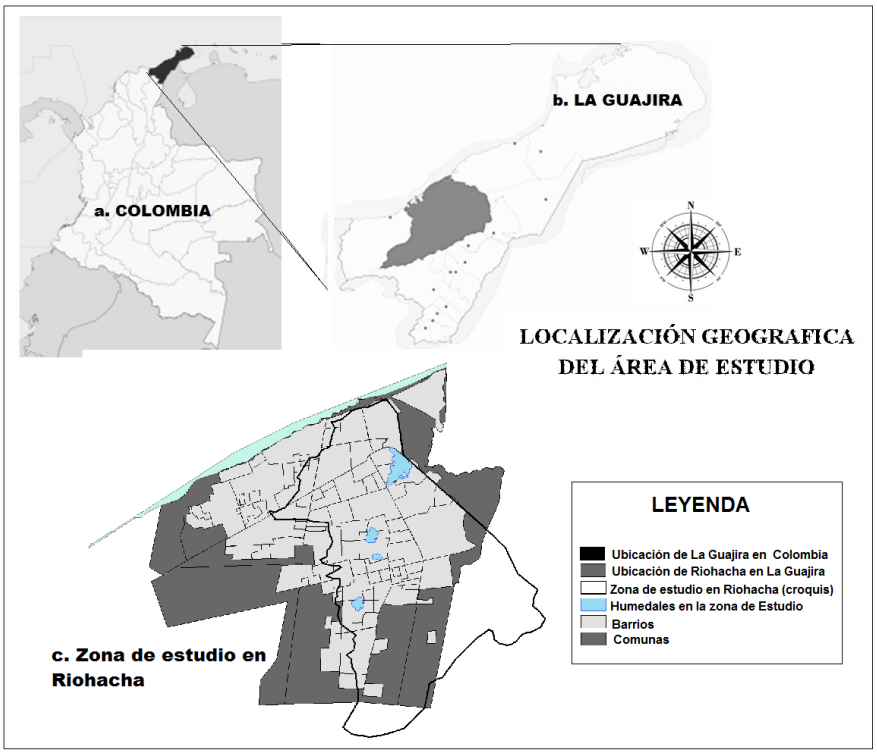


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. a) La Guajira en Colombia b) Riohacha en La Guajira. c) Cuenca urbana y humedales en Riohacha.

Enfoque multiatributo

Un enfoque exhaustivo en ámbito urbano sería demasiado pesado para llegar a construir funciones de daño (curvas de vulnerabilidad) y probablemente no necesario; además, en el caso de estudio considerado de Riohacha, solo se contaba (gracias al "proyecto MODCEL") con una encuesta extensa (411 viviendas), pero no exhaustiva; al momento del estudio se encontraban 14352 viviendas en la zona de interés. Por tanto, fue necesario identificar (pocas) tipologías representativas de la multiplicidad presente y sola para estas llegar a construir funciones de daño (curvas de vulnerabilidad).

En la encuesta MODCEL realizada en Riohacha se adoptó un enfoque multiatributo para caracterizar las viviendas encuestadas, incluyendo atributos socioeconómicos, físico-constructivos, físico-hidráulicos, económico y una serie de indicadores relacionados con los daños sufridos en cada evento de inundación. A las viviendas encuestadas se realizó una identificación de las tipologías más representativas de los valores asumidos por estos atributos utilizando un enfoque multiatributo a través de la técnica del Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM); técnica seleccionada por su aptitud para los casos en que algunos o todos los atributos se expresan con indicadores de tipo nominal (indicadores "categóricos") como es el caso de las encuestas (Fithian & Josse, 2017). En nuestro caso, para organizar y sistematizar las encuestas se utilizó el software Microsoft Office Access 2013 y los ACM fueron realizados en el software estadístico SPSS (Licencia Universidad de La Guajira).

Fue necesario decidir cuantas tipologías diversas aceptar, explorando posibilidades entre un mínimo de 4 y un máximo de 20. Finalmente se adoptaron los siguientes criterios para llegar a un análisis significativo seleccionando el ACM que cumpla con los siguientes criterios: i) que tenga el menor número de tipologías posibles, ii) mayor número de viviendas homogéneamente agrupadas y iii) agrupar las viviendas con características más vulnerables (viviendas tradicionales con pared de *bahareque*, o sea de barro con alma en madera). Para ello, se realizaron diversos intentos así:

ISBN 978-607-8242-11-5

ACM 1. Donde se determinó el tamaño de la vivienda de acuerdo al área, la cual fue válida para todos los análisis realizados, tipo de piso, tipo de pared, tipo de estructura y desniveles sin categorizar.

*ACM 2***.** Las mismas variables del ACM 1, pero en este se categorizaron los desniveles en negativos, positivos y cero, adicionalmente se excluyeron los casos con datos faltantes, quedando 406 casos de los 411 encuestados.

*ACM 3***.** Las mismas variables que el ACM1 y ACM2, pero se excluyeron los desniveles. Igual que en el ACM 2, se realizó con el mismo número de casos (406).

ACM 4. Las mismas variables del ACM 3 incluyendo los bienes categorizados. Este análisis se realizó con 316 viviendas, los datos faltantes en las 95 viviendas se debió al tiempo transcurrido entre el evento de referencia y la realización de la encuesta (2 años), existiendo recuerdos imprecisos de la cantidad de bienes perdidos o dañados.

De acuerdo a los criterios se seleccionó el ACM 3, las tipologías resultantes fueron ubicadas en un mapa para relacionar la ubicación respecto a la cercanía de los humedales y áreas inundadas detectadas en el proyecto MODCEL (CREACUA y UFRJ, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ACM 1 al no tener todas las variables recodificadas a ordinales (como es el caso de los desniveles) se obtuvieron tipologías de viviendas que no conservan las mismas características entre sí, lo que demostró que este método no es funcional en estas consideraciones. Lo que mejoró en el resto de los análisis que al tener variables categóricas se obtuvieron tipologías de viviendas con características semejantes u homogéneas (SPSS STATISTICS 22, 2016).

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los 4 ACM ensayados. De acuerdo a los criterios de selección se tomó el ACM 3, el cual agrupo 359 viviendas lo que representa un 88,42% de los casos. Es importante aclarar que el mapa perceptual del ACM 1 mostró una asociación de viviendas en 5 tipologías (Figura 2) sin embargo, al revisar las características de las viviendas en cada una de ellas se encontró profundas diferencias. Al realizar un zoom a los datos como se muestra en la Figura 3 tal asociación no es observada y por el contrario cada punto (vivienda) se puede visualizar sin superposición.

Tabla 1. Tipologías de viviendas obtenidas en los análisis de correspondencias múltiples (ACM).

ACM	Variables utilizadas	N° de Tipologías	N° de Viviendas agrupadas	% de viviendas agrupadas	¿Presentaron las viviendas por tipologías las mismas características?	¿Agruparon las viviendas vulnerables?
1	Estructurales con desniveles sin categorizar	5	411	100	No	Si
2	Estructurales con desniveles categorizados	20	329	81,03	Si	Si
3	Estructurales sin desniveles	13	359	88,42	Si	Si
4	Estructurales sin desniveles y bienes	15	92	29,11	Si	Si

ISBN 978-607-8242-11-5

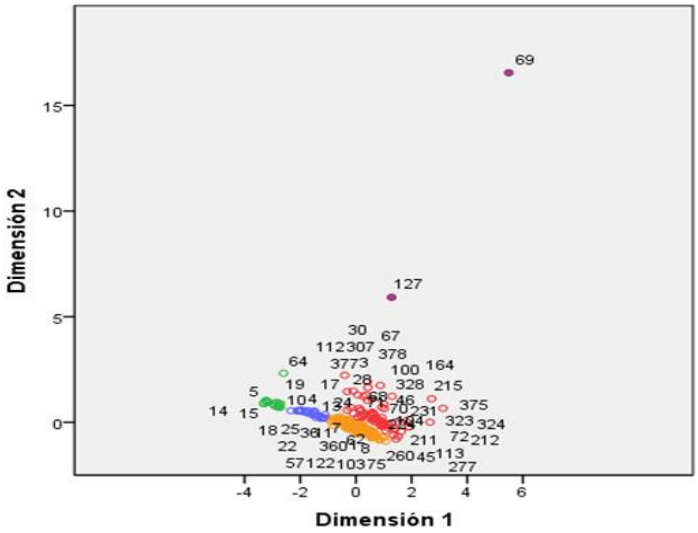


Fig. 2: Asociaciones del análisis de correspondencia múltiple realizado con variables estructurales y desniveles sin categorizar (ACM 1).

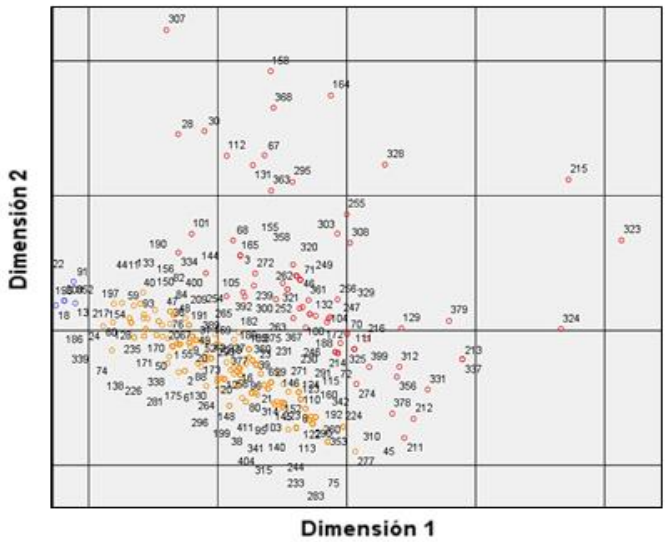


Fig. 3: Zoom de los datos ACM 1 que no muestra una asociación o tipologías definidas.

En la Figura 4 se muestra el resultado del ACM 3, en el que se pudo determinar 13 tipologías, para este caso y todos los demás análisis fue necesario realizar una ampliación a los datos (zoom) y disgregar los puntos que estaban superpuestos para determinar el número de viviendas asociadas en cada grupo. No obstante quedaron algunas viviendas que no compartieron afinidad como es el caso de la 69 con características: muy grande, paredes de lata/plástico, piso de cemento entre otras y la vivienda identificada con el número127 que era una casa pequeña con paredes de lata/plástico y por tanto no comparten similitud con ningún grupo.

ISBN 978-607-8242-11-5

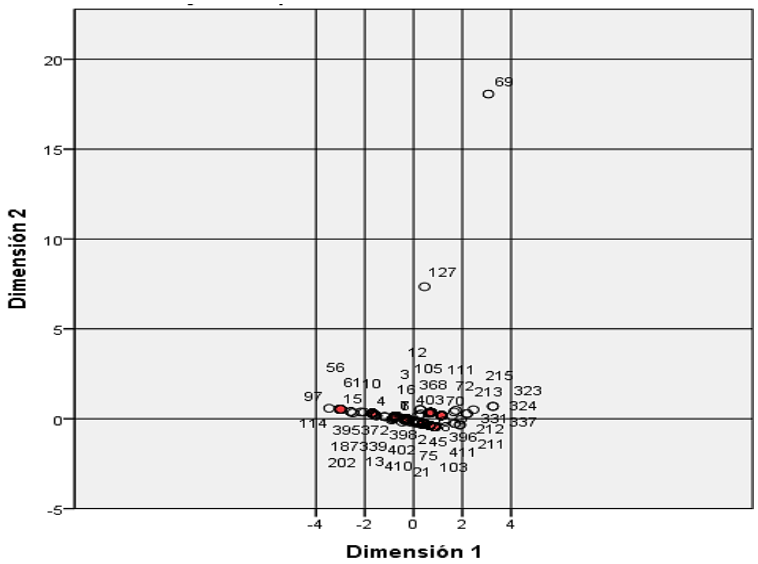


Fig. 4: Asociaciones del Análisis de correspondencia múltiple realizado con variables estructurales y sin desniveles (ACM 3).

De las 13 tipologías, la IV, V, IX fueron las que agruparon el mayor número de viviendas (ver Figura 5), personas y bienes, representando el 54,05% de las viviendas donde hay un total de 2034 personas (1105 son adultos y 929 niños). El total de bienes encontrado en las encuestas fue de 256190 entre colchones, televisores, electrodomésticos, lencería, libros, CD y vivieres; de los cuales el 33,85% se encuentran en las 3 tipologías antes señaladas.

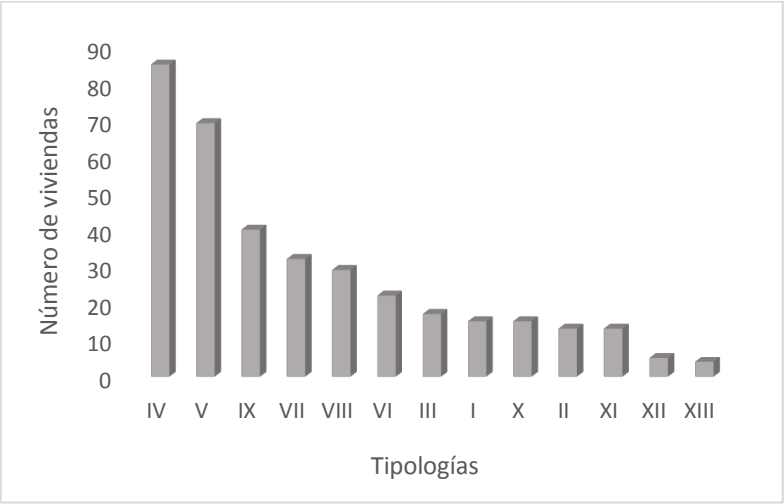


Fig. 5: Número de viviendas presentes en cada tipología del ACM 3.

En la Figura 6 se muestra el mapa donde se ubicaron las tipologías de viviendas identificadas en la zona de estudio (ACM 3), además se observan los 4 humedales que tienen influencia directa en el área por tener un papel muy importante en las inundaciones. En el mapa es evidente que las tipologías de viviendas se extiendan desde el norte hasta el sur oeste ocupando toda la franja de los humedales, la mayor parte de ellas están en el área de influencia directa de estos cuerpos de agua.

ISBN 978-607-8242-11-5

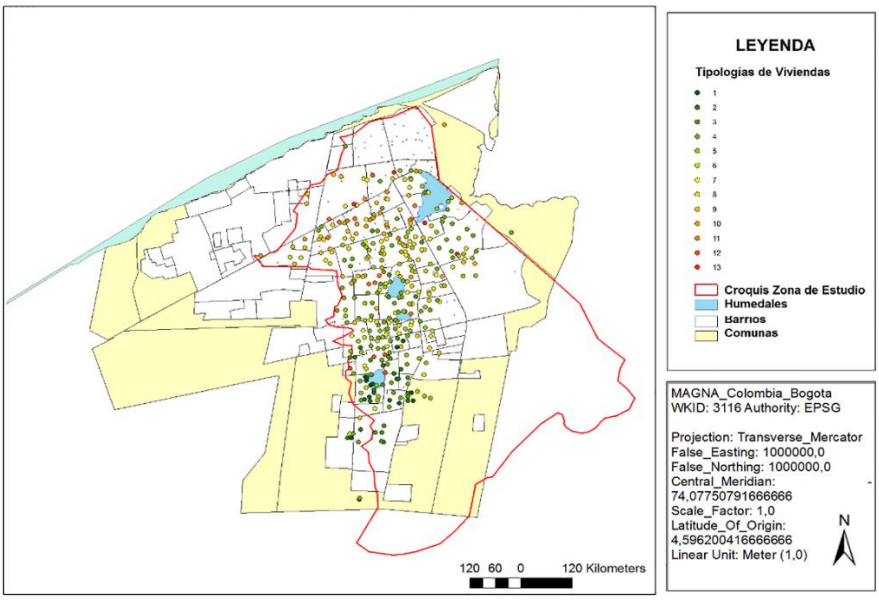


Fig. 6. Mapa de ubicación de las tipologías de viviendas en la zona de estudio.

Tipologías para construir curvas de vulnerabilidad

El análisis permitió finalmente concluir con cinco tipologías, tres que presentaron los mayores porcentajes (%) de viviendas agrupadas y dos que si bien tuvieron los menores %, tenían una característica estructural diferente a las anteriores propias de los grupos de viviendas con características vulnerables como es el caso de la tipología II que tiene pared de bahareque o barro y la XII con pared ladrillo desnudo (ver Tabla 2) por tanto fueron incluidas para determinar las curvas de vulnerabilidad. Por tanto las tipologías seleccionadas evidentemente fueron bien diferenciadas y suficientemente representativas de la realidad presente (dado que capturan globalmente el 59,05% de los casos considerados en el ACM 3 (359 viviendas). Como se puede observar por sus condiciones y características son viviendas muy vulnerables a eventos de inundación.

Tabla 2. Tipologías de viviendas a utilizar para construir las curvas de vulnerabilidad por los dos enfoques.

Tipología	Tamaño	Estructura	Tipo de Paredes	Tipo de Piso	Número de Viviendas	Porcentaje del Total
IV	Pequeña	1piso con patio	Bloque	Cemento	85	23,67
V	Mediana	1piso con patio	Bloque	Cemento	69	19,22
IX	Grande	1piso con patio	Bloque	Baldosa/vinilo	40	11,14
II	Pequeña	1piso con patio	Bahareque o barro	Cemento	13	3,62
XII	Mediana	1piso con patio	Ladrillo	Cemento	5	1,40
			TOTAL		212	59.05%

En la Figura 7 se muestra las imágenes típicas de las tipologías IV (área construida 64 m^2, de 1 piso con patio en suelo desnudo, pared de bloque desnudo, piso en cemento, y un solo cuarto), topología V (área construida 120 m^2, de 1 piso con patio en suelo desnudo, pared de bloque desnudo, piso de cemento y dos cuartos) y la tipología II (área construida 64,70 m^2, de 1 piso con patio en suelo desnudo, pared de bahareque, piso de cemento y un cuarto). Como se puede observar por sus condiciones y características son viviendas muy vulnerables a eventos de inundación.

ISBN 978-607-8242-11-5



Figura 7. Imágenes de tipologías representativas. a) tipología IV, b) tipología V, c) tipología II.

Un paso siguiente previsto en el análisis consiste en construir curvas de vulnerabilidad que expresan el % de valor de la vivienda perdido por daños de inundación en función del nivel de agua alcanzado, para cada una de las tipologías identificadas. Lo anterior es algo similar pero muy mínimo comparado con el proyecto FLOODsite que utiliza 7 sitios piloto repartidos por toda Europa para desarrollar interactivamente herramientas y soluciones para la gestión del riesgo de inundación (Unión Europea, 2006).

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones. 1) Las viviendas expuestas en el área de estudio, se pudieron agrupar en 13 tipologías, de las cuales cinco de ellas logran ser las más significativas; 2) Predominaron viviendas pequeñas, pero las más vulnerables son las viviendas con pared de bahareque y solo el 26,1% de las viviendas encuestadas tienen piso de baldosa/vinilo; 3) Durante el evento de inundación del 18 de septiembre del 2011 resultaron afectadas 135 viviendas donde la cercanía con los humedales tuvo influencia bien marcada; y 4) El Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM) fue un método funcional para determinar las tipologías de viviendas existentes en el área de estudio a pesa de ser viviendas aparentemente similares.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres (UNGRD) de Colombia por la financiación y a la Alcaldía de Riohacha por la cofinanciación del proyecto “Adaptación urbana “verde” frente a inundaciones con el soporte de la modelación matemática MODCEL en Riohacha - La Guajira” a la Universidad de La Guajira, y a nivel internacional a la Universidad Federal de Rio de Janeiro de Brasil, COPPETEC/PEUPOLI.

REFERENCIAS

Algañaraz V. H. “*El Análisis de Correspondencias Múltiples” como herramienta metodológica de síntesis teórica y empírica. Su aporte al estudio del locus universitario privado argentino (1955-1983)”*. Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales, 6 (1), 1-177 (2016)

Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2012) “V*aloración De Daños y Pérdidas. Ola Invernal en Colombia 2010-2011”*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) Bogotá, Colombia. (en línea: http://www.cepal.org/publicaciones/xml/0/47330/OlainvernalColombia2010-2011.pdf, acceso 20 noviembre 2015)

CREACUA-Centro de Recuperación de Ecosistemas Acuáticos. Proyecto: “*Adaptación Urbana Verde Frente A Inundaciones Con el Soporte de la Modelación Matemática y del Software MODCEL en Riohacha, La Guajira, Colombia*”; (en línea: http://modcelrhcdatos.wixsite.com/modcel-riohacha/avance, acceso: 28 de abril 2016) Convenio de cooperación Nº 9677-04-1047-2013; CREACUA: Riohacha, Colombia (2013).

CREACUA y UFRJ, Centro de Recuperación de Ecosistemas Acuáticos Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ): “*Modelo de Simulación de la Cuenca Urbana de Riohacha. Informe Técnico del Proyecto Adaptación Urbana Verde Frente a Inundaciones con el Soporte de la Modelación Matemática y del Software MODCEL En Riohacha, La Guajira, Colombia*”; Convenio de cooperación Nº 9677-04-1047-2013; CREACUA: Riohacha, Colombia, (en línea: http://docs.wixstatic.com/ugd/dad4f8_26e8648aacb44bdfbde9e709e6b11655.pdf, acceso 22 de marzo 2017 (2014)

 ISBN 978-607-8242-11-5

DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). Colombia. *Proyecciones De Población Municipales Por Área, 2005-2020.* (en línea: https://www.dane.gov.co/files/.../poblacion/...20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls, acceso 15 Marzo de 2015. Bogotá, Colombia (2010)

Fithian, W., y J. Josse. "*Multiple Correspondence Analysis And The Multilogit Bilinear Model*", Journal of Multivariate Analysis, 157, 87–102 (2017), doi: http://doi.org/10.1016/j.jmva.2017.02.009

Nardini, A., y M.G Miguez, "*An Integrated Plan To Sustainably Enable The City Of Riohacha (Colombia) To Cope With Increasing Urban Flooding, While Improving Its Environmental Setting"*. Sustainability (Switzerland), 8(3) (2016), doi: http://doi.org/10.3390/su8030198

Palacio, L. "*Inundaciones en Colombia: el peor invierno en 55 años".* Revista Fasecolda, (141), 13-16 (2011)

Rebollo M.A. "*Estudio Y Caracterización Del Discurso Escolar: Aplicación Del Análisis De Correspondencias Múltiples".* Revista de Investigación Edcativa, 20 (1), 131-151 (2002)

Sánchez, R., y N. Herrera. "*Caracterización De Pacientes Hospitalizados Mediante Análisis De Correspondencias Múltiples".* Revista Colomb Psiquiatr. XXVIII (1), 25-4 (1999)

SPSS STATISTICS 22. "*Análisis de correspondencias múltiple"*. IBM Knowledge Center, (en línea: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSLVMB_22.0.0/com.ibm.spss.statistics.help/spss/categories/idh_mcan.htm, acceso: 15 de agosto 2016) (2016)

Unión Europea. *FLOODsite Project. Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies*, Contract GOCE-CT-2004-505420, (en línea: http://www.floodsite.net/html/project_overview.htm, acceso 12 de julio 2017 (2006)

Vignera, M. L.; M. Batto.; G. Strangi.; G. Alcaraz.; E. Strangi.; M. Basso y G. Negri. "Búsqueda Del Perfil Docente De Una Universidad Nacional Argentina", (en línea: http://www.conferencias.unc.edu.ar/index.php/xclatse/clatse2012/paper/view/602/59, acceso: 15 de enero 2016), Actas del Décimo Congreso Latinoamericano de Sociedades de Estadística, Córdoba, Argentina 16 a 19 de Octubre (2010)

Vojinovic, Z. y D. Tutulic. "*On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas*". Urban Water Journal, 6 (3), 183-199 (2009), doi: http://doi.org/10.1080/15730620802566877

 ISBN 978-607-8242-11-5

Encriptación/Desencriptación de archivos usando RSA y un FPGA

José I. Vega[1], Mario A. Lagos[1], Gerardo Salgado[1], Víctor N. Tapia[1] y Francisco J. Sánchez[1]
(1) Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, Azcapotzalco, Cd. de México, MEXICO
E-mail: vlji@correo.azc.uam.mx

Resumen

La protección de información juega un papel vital e importante en empresas y organizaciones de cualquier tipo. La criptografía es una de las principales formas de protección de datos. Uno de los algoritmos para criptografía de llave pública más usados es el algoritmo RSA (Rivest, Shamir y Adleman). Este algoritmo no es nuevo, es eficiente y rápido, ya que se basa en la factorización de números grandes, en la multiplicación modular y en la exponenciación. El objetivo de este trabajo fue implantar un sistema para encriptar y desencriptar archivos de registro de intentos de acceso a un centro de datos, almacenados en una memoria SD, usando un FPGA y llaves RSA de 64 bits. La metodología usada consistió en dividir al sistema en los siguientes módulos realizados en un FPGA de una tarjeta Altera DE2: el procesador Nios II, el generador de números primos, el cálculo de exponentes y el cifrador/descifrador. Los módulos se pudieron haber programado en una computadora, pero ya que son computacionalmente intensivos, el tiempo de ejecución y recursos necesarios serían mayores a los usados en este trabajo. Implantar por hardware los módulos diseñados y seleccionar los algoritmos adecuados fue fundamental para lograr la disminución de tiempo de ejecución en 50%. Se obtuvo un sistema rápido, eficiente y de bajo costo que cumple con los requerimientos solicitados por las instituciones y organismos que auditan al centro de datos para el cual se realizó el trabajo.

Palabras clave: Altera DE2; centro de datos; criptografía; FPGA; RSA

Encryption/Decryption of files using RSA and an FPGA

Abstract

The protection of information plays a vital and important role in companies and organizations of any type. Cryptography is one of the main forms of data protection. One of the most widely used public key cryptography algorithms is the RSA algorithm (Rivest, Shamir and Adleman). This algorithm is not new, it is efficient and fast, since it is based on large number factorization, modular multiplication and exponentiation. The objective of this work was to implement a system to encrypt and decrypt data log files of attempts to access a data center, stored in an SD memory, using an FPGA and 64-bit RSA keys. The methodology used consisted in dividing the system into the following modules realized in an FPGA of a card Altera DE2: the processor Nios II, the generator of prime numbers, the calculation of exponents and the encipherer/decipherer. The modules could have been programmed in a computer, but since they are computationally intensive, the execution time and necessary resources would be greater than those used in this work. Hardware implementation of the designed modules and selection of the appropriate algorithms was essential to achieve the execution time reduction by 50%. A fast, efficient and low cost system was obtained that meets the requirements requested by the institutions and agencies that audit the data center for which the work was performed.

Keywords: Altera DE2; cryptography; data center; FPGA; RSA

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La seguridad de la información es una demanda creciente en la era digital. La criptografía es la ciencia de cifrar y descifrar información usando técnicas matemáticas para intercambiar mensajes e información que solo pueda ser leída por el destinatario. Existen diferentes métodos para cifrar de manera segura la información, entre los que se encuentran el RSA (Rivest, Shamir y Adleman), el AES (Advanced Encryption Standard), el de curvas elípticas (ECC-Elliptic Curve Cryptography) y el algoritmo ELGmal. Por su eficiencia y rapidez, los más usados durante los últimos años son el RSA y el AES. En 1975, Walter Diffie y Martin Hellman inician el desarrollo de la criptografía basada en dos llaves: una pública y una privada, también llamado sistema de cifrado asimétrico. Hasta entonces, los procesos de cifrado y descifrado simétricos usaban la misma llave privada. La llave pública se utiliza para cifrar la información y la privada para descifrarla. Su principal ventaja es que la distribución de la llave pública se realiza de manera sencilla entre los participantes de la comunicación, lo que representaba un problema en los sistemas de cifrado simétricos. En 1977 Ron Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), propusieron el primer sistema criptográfico de llave pública, el RSA (Rivest, Shamir y Adleman). El sistema RSA es un algoritmo de cifrado que permite tener confidencialidad de la información transmitida o compartida (Lakkadwala y Valiveti, 2017). Está basado en el artículo de Diffie-Hellman sobre sistemas de llave pública. Años antes, en 1973, el matemático británico Clifford Cocks describió un sistema criptográfico similar que no trascendió por el alto costo de las computadoras necesarias para su implantación. El sistema de Cocks fue confidencial y revelado en 1997. El RSA se desarrolló de forma independiente al trabajo de Cocks. Se registró en Estados Unidos en 1983, expirando la patente en 2000 y pasando a ser un algoritmo de dominio público. El algoritmo RSA se publicó antes de patentar su aplicación por lo que no se pudo patentar en el resto del mundo. El esquema de cifrado AES está basado en bloques y fue adoptado como estándar por el gobierno de los Estados Unidos a partir de 2002. El AES fue anunciado como ganador de un concurso convocado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) el 26 de noviembre de 2001, después de un proceso de selección y análisis que duró 5 años. El algoritmo usado por AES es uno de los más populares en criptografía simétrica. Fue desarrollado por Joan Daemen y Vincent Rijmen y al ser simétrico usa la misma llave de 128, 192 o 256 de bits para cifrar y descifrar texto. AES divide el texto en bloques de 128 bits y lo coloca en una matriz rectangular de 4x4 denominada matriz de estado. Si la llave de cifrado es de 192 bits se coloca el texto en una matriz de 4x6 o de 4x8 si es de 256 bits (Soliman et al., 2016). Estas matrices son más grandes que la matriz de estado y se transforman a matrices del mismo tamaño que el bloque a cifrar usando llaves. Las llaves se generan aplicando funciones de expansión y selección a la matriz de la llave para obtener el texto cifrado. La implantación del algoritmo AES es fácil, consume poca memoria y es rápido tanto software como en hardware.

El trabajo aquí presentado fue solicitado por una empresa propietaria de centros de datos. El objetivo fue encriptar y desencriptar archivos de registro de intentos de acceso en áreas privilegiadas de un centro de datos usando el algoritmo RSA y una tarjeta Altera DE2. Periódicamente, los centros de datos son auditados por organismos y empresas externas para poder estar certificados y ofrecer servicios garantizados a sus clientes. Un punto importante que consideran las auditorías son los procedimientos y técnicas usados en la seguridad de equipos y acceso a instalaciones. Los sistemas de control de acceso usan cámaras de video, lectores RFiD o biométricos y teclados. Particularmente, la institución que realiza la auditoria al centro de datos para el cual se realizó el trabajo, requiere que se entreguen los archivos de registro de intentos de acceso a salas de equipo, denominadas bunkers, encriptados con RSA usando llaves de 64 bits.

RSA es uno de los algoritmos más conocidos y usados actualmente y es el más sencillo de entender e implantar. La mayoría de servidores de la Internet usan los protocolos criptográficos SSL (Secure Sockets Layer) y TLS (Transport Layer Security). La llave pública generada por este algoritmo se distribuye en forma autenticada y la llave privada es almacenada confidencialmente en la computadora en la que se genera. La llave pública es un número de tamaño grande que conocen el transmisor y el receptor del mensaje cifrado. Para transmitir un mensaje cifrado, el emisor busca la llave pública del receptor y a continuación cifra el mensaje. Para descifrar el mensaje, el receptor usa la llave privada. Las dos llaves sirven tanto para cifrar como para autenticar información. La ventaja del algoritmo es que la comunicación puede realizarse a través de un canal inseguro (Borodzhieva, 2016). El algoritmo RSA se basa en la complejidad de calcular dos factores primos de un número compuesto muy grande, mayor a 10^{100}, lo cual es difícil de realizar computacionalmente hablando. La operación inversa, multiplicar dos números primos grandes, se puede realizar fácil y rápidamente con una computadora, pero determinar los factores primos de un número es una operación que requiere más hardware y tiempo de cálculo conforme crece el tamaño del número. Por ejemplo, para firmar certificados digitales que usan el estándar X.509 con el algoritmo RSA, los factores primos deben ser al menos de 155 dígitos o 512 bits. El producto de estos factores es de 310 dígitos o 1024 bits, cuya factorización es un problema complejo. Actualmente, algunas aplicaciones utilizan factores de al menos 1024 bits. Dada la complejidad y uso del algoritmo RSA, se ha publicado el RSA Cryptography Standard, el cual especifica las recomendaciones para implantar métodos criptográficos de llave pública

ISBN 978-607-8242-11-5

basados en RSA. Los mensajes cifrados con el algoritmo RSA se componen de números obtenidos mediante la llave de cifrado, la cual se genera con el producto de dos números primos grandes aleatorios mantenidos en secreto. La seguridad de RSA se obtiene porque no existen métodos rápidos conocidos para factorizar un número grande en sus factores primos utilizando computadoras tradicionales. Una forma posible de descomponer un número n en sus factores es probar dividiéndolo entre los números enteros positivos comprendidos entre 2 y la raíz de n. Cuando el número es de 1024 bits, este método es computacionalmente impráctico. Los matemáticos han creado otros métodos de factorización más eficientes, pero no se ha logrado factorizar, en tiempo razonable, números de tamaño similar a los empleados en RSA. La computación cuántica podría resolver este problema de factorización. Las llaves pública y privada del algoritmo RSA se determinan usando exponenciación modular utilizando exponente y módulo fijos. Las etapas para cifrar o descifrar un mensaje con el algoritmo RSA son las siguientes:

1. Determinar dos números primos grandes aleatorios, p y q, de 100 a 200 dígitos. Al resultado de n = pq se denomina módulo.
2. Usando el algoritmo de Euclides calcular los exponentes e y d utilizados en la generación de las llaves pública y privada.
3. Cifrar el mensaje M realizando la exponenciación modular $C = M^e \bmod n$, donde C es el mensaje cifrado.
4.- Descifrar y recuperar el mensaje original realizando la exponenciación modular $M = C^d \bmod n$.

Para generar dos números primos, la primera tarea es generar dos números aleatorios y posteriormente se prueba que sean primos. Los generadores de números aleatorios ideales o verdaderos (GNAV) son sistemas o algoritmos informáticos que producen secuencias infinitas de números uniformemente distribuidos, no correlacionados, sometidos a cualquier prueba estadística de aleatoriedad y con periodos de repetición infinitos. Usan un fenómeno físico aleatorio conocido, como el ruido electrónico o el decaimiento radiactivo, integrándolo a una computadora para producir un número aleatorio. Los GNAV se utilizan en simulaciones, seguridad informática, criptografía, loterías y juegos de azar. Su baja eficiencia y naturaleza no determinista hace que su implantación, a través de un programa de computadora, sea demasiado lenta y las secuencias generadas no sean reproducibles para analizar su influencia en el cálculo. Por otra parte, los algoritmos de cómputo usados actualmente generan números pseudoaleatorios (GNPA), ya que una computadora ejecuta instrucciones secuenciales de forma predecible que no producirán números aleatorios verdaderos. Los números generados casi aleatorios, o pseudoaleatorios, no están uniformemente distribuidos, están correlacionados, son perfectamente reproducibles a partir de un número inicial que se toma como semilla y tienen periodos de repetición finitos. Son generados por algoritmos determinísticos que requieren condiciones de inicio. No es posible generar números realmente aleatorios por medio de cálculos computacionales. Actualmente existen diferentes algoritmos GNPA que son más fáciles de implantar, más eficientes y rápidos que los algoritmos GNAV. Consumen menos recursos computacionales y producen secuencias de números con correlación baja y periodos de repetición muy grandes. La mayoría de estos algoritmos se basan en generadores de congruencia Lineal (GCL), en generadores de Fibonacci (GF) o en combinaciones y variaciones de ambos. Usan relaciones de recurrencia del tipo $N_i = F(N_{i-1},.., N_{i-k})$ iniciando desde una semilla para generar una cantidad aleatoria N_i, utilizando uno o varios números generados previamente. Los algoritmos GNPA son de dos tipos: algoritmos no congruentes, entre los que se encuentran los de cuadrados medios, productos medios y de multiplicador constante, y los congruentes, que incluyen algoritmos aditivos, multiplicativos y lineales. Uno de los algoritmos congruentes lineales comúnmente usado por su velocidad de respuesta, bajo consumo de memoria y CPU, portabilidad y fácil implantación, es el de registro de corrimiento con retroalimentación lineal (LFSR-Linear Feedback Shift Register). La operación del algoritmo LFSR se basa en un registro de corrimiento cuya entrada es un bit resultado de aplicar la transformación lineal de un estado anterior. Su funcionamiento es determinista ya que la secuencia de valores producidos está determinada por su estado actual o anterior (Kerner y Tammemäe, 2017). La secuencia tiene un periodo de repetición indefinido. Genera una serie de números binarios de n bits, un número cada ciclo de reloj, que no sigue un patrón determinado. Es una secuencia pseudoaleatoria de n-bits de 2^{n-1} posibles valores, donde n es la cantidad de registros del LFSR. El algoritmo LFSR se usa como cifrador de flujo y criptografía, en aplicaciones de GPS donde se transmiten posiciones de alta precisión y en transmisiones de audio y televisión digital. Es relativamente fácil y rápido de implantar en un FPGA, razones por la que se usó este trabajo para generar dos números pseudoaleatorios cuya primalidad es probada a continuación.

El problema de determinar si un número es primo es muy antiguo y es uno de los más difíciles en matemáticas, se le conoce como prueba de primalidad. Dado un número n, no prueba que sea compuesto, solo conjetura que n es un número primo. Por el contrario, una prueba verdadera de primalidad ofrece seguridad matemática al respecto. A lo largo de la historia, muchos matemáticos han trabajado en el tema de factorizar un número y determinar si es primo o no (Kochar et al., 2016). Euclides fue uno de los primeros que empezó a trabajar con números primos en el siglo III AC, pero el primer método matemático para determinar números primos se atribuye a Eratóstenes en el siglo II AC. Se le conoce como la criba de

 ISBN 978-607-8242-11-5

Eratóstenes y se usa para obtener números primos menores que n. Este método inicia creando una lista de números de 1 a n y eliminando los pares. A continuación, en la lista restante se eliminan los números múltiplo de tres y posteriormente los que son múltiplos de cinco y así sucesivamente. Actualmente, el algoritmo no es práctico y es ineficiente, ya que no determina la primalidad de un número dado, ofreciendo solo una lista de números primos, usando demasiada memoria al implantarlo en una computadora. En el siglo XVI el filósofo Marin Mersenne (1588-1665) estudió los números primos, creando una lista de números primos que lleva su nombre. Los números de Mersenne son de la forma $M_p = 2^p - 1$, donde p es un número primo. Mersenne comprobó que sólo 11 números de la lista son primos de los 257 primeros para p = 2, 3, 5, 7, 13, 17, 19, 31, 67, 127 y 257. En este algoritmo para generar números primos Mersenne cometió algunos errores, ya que M_p no es primo para p = 67 y p = 257 y sí para p = 61, 89 y 107. El matemático Pierre de Fermat (1607-1665), tal vez el más renombrado de la historia, es conocido por el teorema de primalidad, el cual no pudo demostrarse durante más de trescientos años. Fermat estableció el teorema conocido como teorema pequeño de Fermat (TPF). Este teorema tiene como corolario que si es p > 2 es primo, entonces cualquier número q primo que divida a 2^p - 1 es de la forma q = 2mp + 1. Fermat y Mersenne trabajaron lo problemas de factorización y primalidad, que aunque son de naturaleza distinta, son complementarios. Para demostrar que un número es compuesto es suficiente indicar los factores, pero demostrar que un número es primo es más difícil. Un algoritmo de prueba verdadera de primalidad es un algoritmo determinista que, dado un número n, verifica la hipótesis de un teorema cuya conclusión es que n es primo. Una prueba de primalidad es la verificación computacional de dicho teorema. La diferencia entre una prueba de primalidad y una prueba verdadera de primalidad es que en la primera existe certidumbre matemática y en la segunda existe certidumbre práctica. Una de las pruebas verdaderas de primalidad más famosas es la de Lucas-Lehmer. Esta prueba tiene la desventaja de que solo aplica a los números de Mersenne y consiste de una secuencia de pasos sencillos que usan operaciones básicas con polinomios como productos, restas, módulos y comparaciones (Duta et al., 2015).

Otra prueba verdadera probabilística, y la más usada actualmente es la de Miller-Rabin. Es conocida como prueba de pseudoprimos fuertes y se basa en que si n es un número primo y $n - 1 = 2^s r$, donde r es impar, se cumple que $\forall a \in \mathbb{N} / \text{mcd}(a, n) = 1$, entonces $a^r \equiv 1 \pmod{n}$ o $\exists j \in [0, s-1] / a^{2^j r} \equiv -1 \pmod{n}$. En esta prueba el error cometido en cada iteración es ¼, y la probabilidad de que la entrada sea un número compuesto habiendo sido declarado como primo es menor a $(¼)^t$. El algoritmo depende de una serie de desigualdades que debe cumplir un número para determinar que sea compuesto. Si alguna desigualdad no se cumple, el número puede ser primo (Dongjiang et al., 2012). Si no se cumplen varias desigualdades, es casi seguro que el número es primo, de tal forma que al realizar una cantidad grande de estas pruebas se puede tener mayor seguridad y confianza en la primalidad del número. Por el contrario, si una prueba es exitosa y se cumple la desigualdad, se determina que el número es compuesto. Al realizar t pruebas a un número compuesto, la probabilidad de que las supere es $(¼)^t$ o menos. Usando lo propuesto en la prueba de Miller-Rabin, las desigualdades dependen de la raíz cuadrada de la unidad. Si x es la raíz cuadrada de (1 mod p) y p es un número primo mayor a 2, entonces se cumple que $x^2 \equiv 1 \pmod{p}$, lo cual produce como resultado $(x-1)(x+1) \equiv 0 \pmod{p}$, indicando que el valor de x es (1 mod p) o (-1 mod p). Supóngase ahora que n es un número impar. Entonces n-1 es un número par que puede expresarse como $2^s * d$, donde s y d son enteros positivos y d es un número impar. Si se usa un número a en (Z/nZ), entonces $a^d \equiv 1 \pmod{n}$ o $a^d \equiv -1 \pmod{n}$ para $0 \leq r \leq s-1$. Usando el TPF $[a^{n-1} \equiv 1 \pmod{n}]$, se puede calcular repetitivamente la raíz cuadrada de a^{n-1} y se obtendrá 1 o -1, lo cual indica que si $a^d ¡ \equiv 1 \pmod{n}$ o $a^d \equiv -1 \pmod{n}$ para $0 \leq r \leq s-1$, entonces n no es primo. Por tanto, si se toma un número n y el test es exitoso, se asegura que es compuesto, donde a es el testigo del número compuesto n. En caso contrario, a es un mentiroso fuerte y n es un primo probable fuerte, de manera que se pueden generar números aleatorios a para determinar probabilísticamente si son primos. Al usar exponenciación binaria las operaciones necesarias para implantar el algoritmo Miller-Robin se realizan rápidamente. Este algoritmo es el mejor de su tipo, desde el punto de vista técnico y práctico, razón por la cual fue usado en este trabajo. Desde su aparición, se ha realizado una gran cantidad de implantaciones, desarrollos y aplicaciones del algoritmo RSA. La necesidad de transmisión segura de información ha traído como consecuencia que continúen llevándose a cabo investigaciones que tratan de hacer más eficientes las etapas del algoritmo. Los trabajos recientes tratan fundamentalmente de mejoras, pruebas de ataque y uso del algoritmo en diferentes campos de la ciencia y tecnología. Los trabajos más relevantes proponen mejoras en operaciones específicas como las siguientes: generación de exponentes pequeños (Kaminaga et al., 2015) y uso de multiplicadores bypass (Nirmala y Praveena, 2016) para acelerar el proceso de cifrado, modificación de la arquitectura, implantada en un FPGA, para realizar la multiplicación modular, la cual consume mucho tiempo del algoritmo RSA (Hanindhito et al., 2015), inclusive se ha implantado el algoritmo RSA utilizando arquitectura escalable distribuida en varios FPGA trabajando en paralelo (Ambika et al., 2014). Otros desarrollos proponen sistemas híbridos de criptografía para mejorar la seguridad y eficiencia del cifrado, combinando el algoritmo RSA con otros algoritmos como el RC6 basado en bloques (Chaturvedi y Jain, 2016), con el método Hamming para determinar una llave privada diferente a la del algoritmo RSA (Somsuk et al., 2016), con el ELGamal (Iswari, 2016) o con el algoritmo

 ISBN 978-607-8242-11-5

Blowfish implantado en un FPGA Virtex para autenticación de usuarios y formas digitales en la nube de cómputo para obtener criptografía simétrica y asimétrica (Bansal y Singh, 2015). Otras investigaciones realizadas han tenido como propósito: evaluar y comparar el algoritmo RSA con otros algoritmos como el de Criptografía de Curva Elíptica (ECC) (Singh et al., 2016, Liu et al. 2015), simular ataques a RSA (Mahanta et al., 2017), probar la seguridad de firmas basadas en identidad usando RSA (Kimura y Yoneyama, 2016) y demostrar que, midiendo el consumo de potencia y tiempo de procesamiento, puede determinarse el exponente usado en la generación de la llave pública (Zhao et al., 2016). Las aplicaciones del algoritmo RSA son muy variadas, en años recientes se ha utilizado para transmisión segura de imágenes médicas (Jain et al., 2016), para evitar el robo, modificación y acceso no autorizado a registros electrónicos de salud (Sadikin y Wardhani, 2016), en sistemas de acceso biométricos (Bourg y Govindan, 2016), en seguridad de pasaportes electrónicos (Sharma y Zodpe, 2016), en cifrado de SMS con FPGA en telefonía móvil (Sun y Ding, 2015), en firmas digitales de tarjetas de bancarias inteligentes (Shao et al., 2013) y recientemente, para evitar ataques en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT), en conjunto con protocolos como el Message Queue Telemetry Transport (MQTT) (Mektoubi et al., 2016) o en redes inalámbricas de sensores (Leelavathi et al., 2016). No se ha realizado una aplicación como la aquí presentada para un centro de datos. Esta aplicación es con propósitos de seguridad cifrando el archivo de registro de intentos de acceso, lo cual puede realizarse en una computadora, sin embargo, la aportación de este trabajo es que el cifrado se lleva a cabo, con un FGPA de una tarjeta Altera DE2 con la cual ya cuenta el centro de datos, de forma más eficiente, rápida y de menor costo.

METODOLOGÍA

El centro de datos para el cual se realizó este trabajo, cuenta con un sistema de registro de imágenes e información personas que intentan acceder a la sala de equipos. La imagen del rostro e información de tarjeta RFiD de la persona, es capturada por una tarjeta AlteraDE2 y transmitida para su registro a un servidor. El servidor copia a una memoria SD un archivo que contiene la fecha, hora, nombre y número de tarjeta RFiD de las personas registradas cada día. El trabajo solicitado consiste en leer el archivo y encriptarlo, usando el algoritmo RSA y llaves de 64 bits, aprovechando la tarjeta Altera DE2. Al no usar el servidor para el cifrado de los archivos se tiene mayor seguridad y secrecía de la información. El sistema desarrollado, cuyo diagrama de operación se muestra en la Fig. 1, también debe poder desencriptar un archivo.

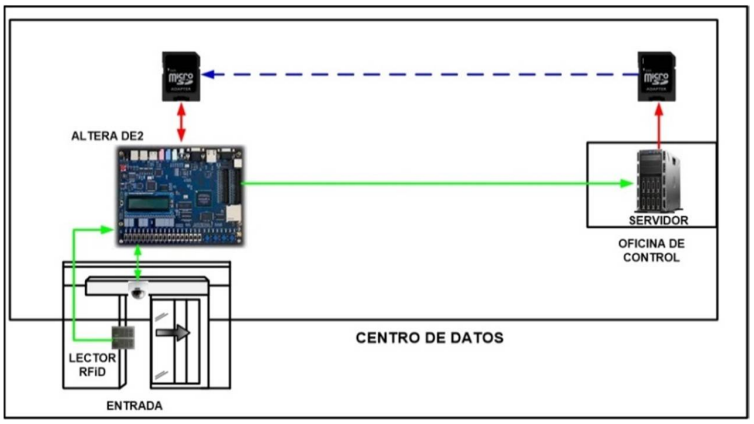


Fig. 1. Operación del sistema

La metodología seguida para implantar el sistema fue dividirlo en los siguientes módulos: el Procesador Nios II, el generador de números primos, el cálculo de exponentes y el cifrador/descifrador, como se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 2. Todos los módulos se implantaron en hardware usando Verilog ya que computacionalmente son intensivos.

El procesador Nios II

Con los FPGA de Altera se pueden implantar procesadores con características y funcionalidades a la medida, tal como el procesador Nios II. Es uno de los procesadores embebidos más utilizados en la industria de los FPGA. Tiene arquitectura RISC de 32 bits y la naturaleza de su núcleo por software permite que el Nios II sea creado con características específicas para cada aplicación. La tarjeta Altera DE2 utilizada en este trabajo tiene un FPGA Cyclone II EP2C35, 4 push-button, leds y ranura para tarjeta de memoria SD.

ISBN 978-607-8242-11-5

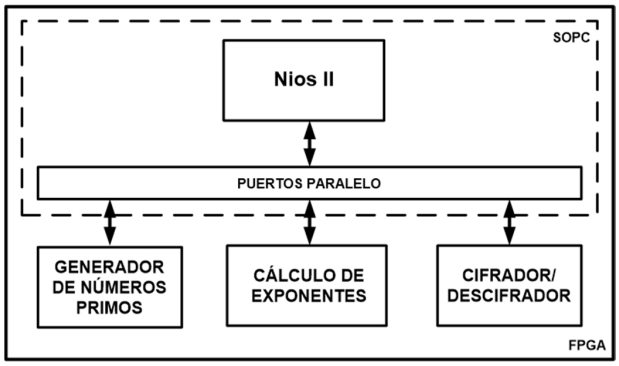


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema desarrollado

Altera ofrece el software Quartus II para el diseño y simulación de circuitos lógicos programables y soporta el uso de los lenguajes de descripción de hardware VHDL y Verilog. La programación realizada en Quartus II se transfiere desde una computadora a la DE2 para probar inmediatamente el diseño. El procesador Nios II implantado en el FPGA y los diferentes componentes de la tarjeta Altera DE2 permiten crear un sistema digital completo. Quartus II incorpora las herramientas SOPC Builder y Qsys mediante las cuales se usa una interfaz gráfica para establecer las características del procesador y seleccionar sus componentes como: periféricos, bloques de entrada/salida, temporizadores, interfaces y controladores, en lugar de escribir código para realizar el sistema embebido. SOPC Builder cuenta con una biblioteca de componentes para el procesador Nios II que incluyen: controladores de memoria, interfaces serie y paralelo e interface para tarjetas de memoria SD. El sistema resultante puede conectarse al exterior a través de las terminales programables del FPGA o internamente con otros componentes. En este módulo del trabajo se implantó un procesador Nios II cuya función es controlar los módulos restantes del sistema. Realiza las siguientes tareas: lee el archivo a cifrar o descifrar de la tarjeta de memoria SD, solicita la generación de números aleatorios y prueba de primalidad, solicita la generación de llaves pública y privada, solicita el cifrado o descifrado del archivo y escribe en la tarjeta de memoria SD el archivo resultante. Presionando un push-button de la tarjeta Altera DE2 se indica al Nios II que cifre un archivo. Para descifrarlo se debe presionar un segundo push-button. Mientras se realiza el cifrado o descifrado un led rojo se encontrará parpadeando y al terminar la escritura del archivo resultante en la tarjeta de memoria SD, se apagará el led rojo y encenderá, durante un minuto, un led verde. Para realizar el primer paso del cifrado o descifrado, el Nios II solicita al módulo generador de números primos dos números de 32 bits, p y q, y calcula el producto n = pq, denominado módulo.

El generador de números primos

Los números primos p y q son generados por este módulo del sistema. Esta tarea se divide en dos partes: generación de un número aleatorio y prueba de primalidad. En la primera parte, se realizó la programación que implanta en el FPGA un circuito generador de secuencia binaria pseudoaleatoria. El circuito se basa en el método LFSR. Genera una serie de números binarios de n-bits, un número por ciclo de reloj, sin usar un patrón determinado, que se repite después de 2^{n-1} ciclos de reloj, donde n es la cantidad de flip-flops del LFSR. Su operación usa la teoría de campos finitos, desarrollado por Evariste Galois. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de bloques de un LFSR de 4 bits. Cada ciclo de reloj se realiza un corrimiento a la derecha. La entrada de retroalimentación es resultado de la operación lógica XOR, o XNOR, de la salida de determinados flip-flops. Las salidas de los flip-flop se concatenan para formar un vector o bus de datos, obteniendo como resultado una secuencia de 2^{n-1} números binarios de n-bits. Para cualquier valor de n, cantidad de bits del LFSR, existe al menos una ecuación de retroalimentación basada en la operación lógica XOR o XNOR que genera una secuencia pseudoaleatoria de números binarios. Los bits del LFSR se numeran de izquierda a derecha. La retroalimentación es una compuerta lógica XOR cuyas entradas son el bit 1 y el bit 0 del LFSR. La salida de la XOR es la entrada del último flip-flop del LFSR. El valor de la salida transiciona entre 2^4-1 = 15 estados de forma cíclica. La secuencia generada es pseudo-aleatoria ya que sigue una propiedad estadística determinada que parece aleatoria. No se incluye en la secuencia el valor 0000 y si por alguna causa la salida del circuito pasa a ese valor, permanecerá en ese estado y no hay forma de salir del mismo. El valor de la semilla de la secuencia se define en la programación como genérico en la entidad correspondiente para poder establecerlo al valor deseado. La semilla puede ser cualquier valor excepto cero. En este módulo del sistema se implantó un LFSR de 32 bits, cuya operación es similar a la del ejemplo explicado anteriormente, para generar llaves RSA de 64 bits. Se usaron 32 flip-flops y tres compuertas XOR. La retroalimentación se configuró usando el siguiente circuito combinatorio: Q4 XOR Q3 XOR Q1 XOR Q0. La programación realizada excluye el estado de todos ceros en la salida del LFSR.

 ISBN 978-607-8242-11-5

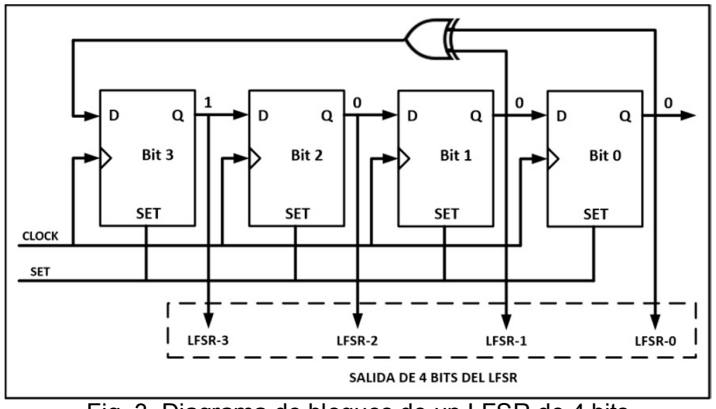


Fig. 3. Diagrama de bloques de un LFSR de 4 bits

Una vez generados los números aleatorios, se prueba su primalidad. En caso de que el número no pase la prueba, se genera otro y se realiza nuevamente la prueba para retornar dos primos al Procesador Nios II. Para llevar a cabo esta prueba se usó el algoritmo Miller-Rabin. En 1976, Gray Miller publicó un algoritmo determinístico para probar la primalidad de un número. El algoritmo estaba basado en la hipótesis de Bernhard Riemann de 1859, la cual era una conjetura sobre los números primos menores a una magnitud dada x, desarrollando una fórmula para calcular la cantidad de primos menores a x. La hipótesis de Riemann aún no ha sido probada y es uno de los problemas abiertos más importantes de las matemáticas. Posteriormente, Michael O. Rabin mejoró el algoritmo de Miller usando un enfoque probabilístico sin usar la hipótesis de Riemann. El resultado del algoritmo formulado por Miller-Rabin es un valor falso o verdadero. Si el resultado es verdadero no implica que el número sea primo, significa que el número es probablemente primo y si el resultado es falso significa que el número es compuesto. Para incrementar la exactitud de la prueba, es necesario examinar el número una cantidad de veces, de manera que si el algoritmo retorna el valor verdadero en una iteración, se puede tener la confianza que el número probablemente es primo. De forma básica, el algoritmo consiste en realizar las siguientes acciones: sea n un número dado y calcúlese n-1 y 2^{s*d}, donde d es impar. A continuación, debe elegirse un número aleatorio en el rango de 2 a n-1 y realizar la siguiente secuencia:

$$a^d, a^{2*d}, a^{4*d}, \ldots, a^{2^{s-1}*d}, a^{2^s*d} = a^{n-1} \quad (1)$$

El número n pasa la prueba de primalidad si a^d es congruente con (1 mod n), o si a^{2^k*d} es congruente con -1 para algunos k = 1, 2, 3, .., s-1. Congruencia es la relación entre dos enteros, x e y, tal que su diferencia con respecto a otro entero positivo llamado módulo, n, es múltiplo del módulo, expresado como $x \equiv y \pmod{n}$. Para implantar el algoritmo Rabin-Miller se siguió el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 4. Una vez generados los números primos p y q, el Procesador Nios II calcula el módulo n = pq. El siguiente paso del algoritmo RSA es determinar los exponentes de cifrado/descifrado e y d, usando el algoritmo de Euclides, para generar las llaves pública y privada. La llave pública de cifrado estará formada por e y n. El exponente de descifrado o d, es el inverso multiplicativo de e mod (p-1)(q-1). La llave privada de descifrado está compuesta por d y n.

El cálculo de exponentes

El exponente de cifrado, e, es un entero primo relativo a (p-1)(q-1). Para calcular e, se utilizó en este módulo del sistema el algoritmo extendido de Euclides, iterando a través de valores de e, hasta que el algoritmo indique que el máximo común divisor, o mcd, de (p-1)(q-1) y e sea 1. El algoritmo extendido de Euclides es un método eficiente para calcular el mcd de dos enteros, expresado como mcd (a, b) = d, donde d es número más grande divisor de a y b. Si mcd (a, b) = 1 se dice que a y b son primos relativos. El pseudocódigo de este algoritmo es el que se indica a continuación:

Entradas: dos enteros positivos, a y b, con $a \geq b$.
Salida: mcd (a, b).
Mientras b> 0, ejecuta:
    r = a mod b
    a = b
    b = r
Retorna a

 ISBN 978-607-8242-11-5

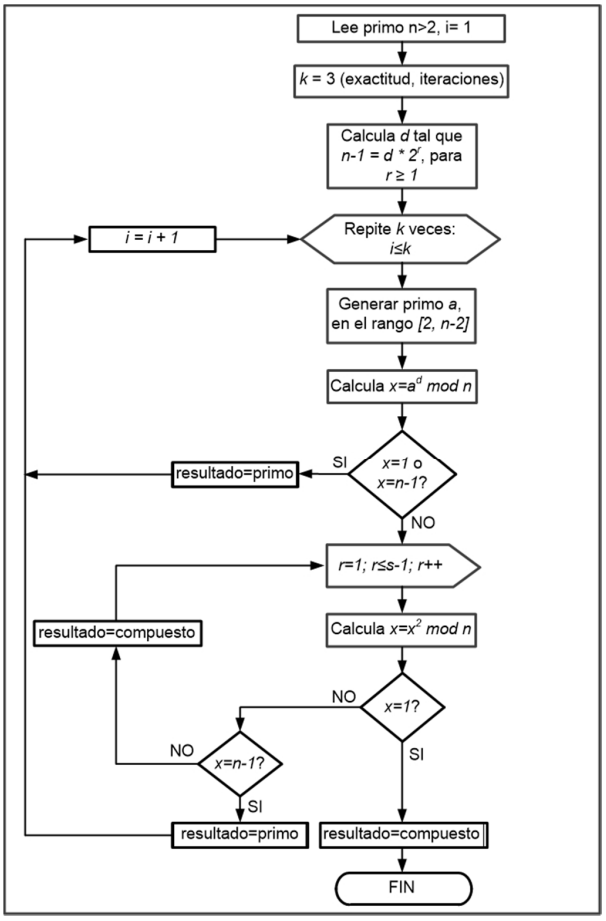


Fig. 4. Diagrama de flujo de la programación del algoritmo Miller-Robin

Con los exponentes e y d, el Procesador Nios II inicia la lectura del archivo correspondiente desde la tarjeta de memoria SD para realizar el proceso de cifrado o descifrado. El Nios II toma 4 caracteres del archivo y forma mensajes de 32 bits. En el proceso de cifrado, transfiere cada mensaje M y la llave pública al módulo cifrador/descifrador. Para el cifrado transfiere cada mensaje C y la llave privada.

El cifrador/descifrador

Este último módulo de sistema cifra el mensaje M ejecutando la exponenciación modular $C = M^e \bmod n$, donde C es el mensaje resultante y para descifrar el mensaje C ejecuta la exponenciación modular $M = C^d \bmod n$, donde M es el mensaje original. Finalmente, el Nios II escribe cada mensaje C en el archivo cifrado con extensión .cif o cada mensaje M en el archivo descifrado con extensión .org, en la tarjeta de memoria SD. Para acceder la tarjeta SD, el Nios II usa la interface proporcionada por el módulo SD Card IP Core disponible en SOPC Builder. Este módulo contiene los drivers necesarios para manejar un sistema de archivos con formato FAT16 en la tarjeta de memoria SD, permitiendo al Nios II explorar a través de directorios para ubicar archivos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron pruebas tanto de cifrado como descifrado con varios archivos. No se presentaron problemas en el funcionamiento de los módulos del sistema, solo se realizaron ajustes. Específicamente se varió el valor de la variable k que determina la cantidad de iteraciones y exactitud del algoritmo Miller-Rabin, ya que al descifrar un archivo, que previamente se había cifrado con el sistema, en el archivo original recuperado existían errores en algunos caracteres. Para determinar la eficiencia del sistema, se realizó el algoritmo RSA en lenguaje C y se ejecutó en una computadora. A continuación se cifraron y descifraron archivos tanto en la computadora como en la tarjeta Altera DE2 y los tiempos de ejecución son los mostrados en la Tabla1. A partir de los tiempos resultantes se puede indicar que la eficiencia del sistema desarrollado es de 50%. Una

 ISBN 978-607-8242-11-5

de las ventajas de este trabajo es usar algoritmos de dominio público y código abierto no patentados, los cuales se usan para cubrir una necesidad específica.

Tabla 1: Tiempos de ejecución de cifrado y descifrado de archivos.

Tamaño del archivo (KB)	*Tiempo de ejecución FPGA Altera DE2 (seg.)*	*Tiempo de ejecución computadora (seg.)*
2.897	2.63	5.23
2.765	2.59	5.20
2.700	2.54	5.16
2.675	2.52	5.12
2.665	2.49	5.07
2.567	2.47	4.98
2.345	2.38	4.76

CONCLUSIONES

Se obtuvo un sistema de bajo costo, eficiente y seguro que cumple con los requerimientos solicitados. Las llaves usadas actualmente en aplicaciones del algoritmo RSA son de 512 bits al menos. Las llaves usadas en este trabajo son de 64 bits debido a que así fue solicitado por el centro de datos. Para generar llaves de más de 64 bits, deben realizarse los ajustes necesarios a la programación y usar otra tarjeta Altera que cuente con un FPGA de mayores recursos. No es necesario cambiar los algoritmos usados, ni la estructura del sistema y módulos que lo componen. En el centro de datos se tiene planeado que el archivo a cifrar almacene el registro de intentos de acceso en todas sus puertas, no solo a la sala de equipos, por lo que su tamaño crecerá. El trabajo realizado soportará el crecimiento de archivos, ya que el Procesador Nios II realiza la lectura y escritura de archivos en bloques de 4 caracteres sin importar el tamaño de los archivos. Finalmente, una restricción del sistema es que trabaja con sistemas de archivos FAT16 en la tarjeta de memoria SD, un poco antiguo pero suficiente para la aplicación desarrollada en la que el tamaño de archivos de texto no es grande. En caso de ser necesario usar otro tipo de formato deberá analizarse la biblioteca de drivers disponibles en SOPC Builder.

REFERENCIAS

Ambika, R., S. Ramachandran y K. R. Kashwan, "Data security using serial commutative RSA CORE for multiple FPGA system", 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 1-5, Combiatore, India (2014).

Bansal, V. P. y S. Singh, "A hybrid data encryption technique using RSA and Blowfish for cloud computing on FPGAs", 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS), 1-5, Chandigarh, India (2015).

Borodzhieva, A. N., "Software implementation of a module for encryption and decryption using the RSA algorithm", XXV International Scientific Conference Electronics (ET), 1-4, Sozopol-Bulgaria (2016).

Bourg, M. y P. Govindan, "RSA based biometric encryption system using FPGA for increased security", IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), 1-4, Orlando, FL, USA (2016).

Chaturvedi, P. y D. C. Jain, "A hybrid RSA and RC6 based secure image cryptography to minimize entropy and enhance correlation", 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT), 32-37, Bangalore, India (2016).

Dongjiang, L., W. Yandan y C. Hong, "The Research on Key Generation in RSA Public-Key Cryptosystem", Fourth International Conference on Computational and Information Sciences, 578-580, Chongqing-China (2012).

Duta, C. L., L. Gheorghe y N. Tapus, "Framework for Evaluation and Comparison of Primality Testing Algorithms", 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, 483-490, Bucharest-Romania (2015).

Hanindhito, B., N. Ahmadi, H. Hogantara y A. I. Arrahmah, "FPGA implementation of modified serial montgomery modular multiplication for 2048-bit RSA cryptosystems", International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 113-118, Surabaya, Indonesia (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Iswari, N. M. S., "Key generation algorithm design combination of RSA and ElGamal algorithm", 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 1-5, Yogyakarta, Indonesia (2016).

Jain, M., R. C. Choudhary y A. Kumar, "Secure medical image steganography with RSA cryptography using decision tree", 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 291-295, Noida, India (2016).

Kaminaga, M., H. Yoshikawa y T. Suzuki, "Double Counting in 2 t-ary RSA Precomputation Reveals the Secret Exponent", IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 10(7), 1394-1401 (2015).

Kerner, M. y K. Tammemäe, "Hierarchical temporal memory implementation on FPGA using LFSR based spatial pooler address space generator", IEEE 20th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS), 92-95, Dresden-Germany (2017).

Kimura, S. y K. Yoneyama, "Security proof of identity-based signature under RSA assumption, reconsidered", International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA), 86-90, Monterey, CA, USA (2016).

Kochar, V., D. P. Goswami y M. Agarwal, "Contrast various tests for primality", International Conference on Accessibility to Digital World (ICADW), 39-44, Guwahati-India (2016).

Lakkadwala, M. y S. Valiveti, "Parallel generation of RSA keys-A review", 7th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering, 350-355, Noida-India (2017).

Leelavathi, G., K. Shaila y K. R. Venugopal, "Elliptic Curve Cryptography implementation on FPGA using Montgomery multiplication for equal key and data size over GF(2m) for Wireless Sensor Networks", IEEE Region 10 Conference (TENCON), 468-471, Singapore, Singapore (2016).

Liu, L., X. Cui, Y. Ran y X. Cui, "A countermeasure for power analysis to scalar multiplication of ECC hardware", IEEE 11th International Conference on ASIC (ASICON), 1-4, Chengdu, China (2015).

Mahanta, H.J., S. Ahmed y A. K. Khan, "A randomization based computation of RSA to resist power analysis attacks", 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 328-331, Coimbatore, India (2017).

Mektoubi, A., H. L.Hassani y H. Belhadaoui, "New approach for securing communication over MQTT protocol A comparaison between RSA and Elliptic Curve", Third International Conference on Systems of Collaboration (SysCo), 1-6, Casablanca, Morocco (2016).

Nirmala, S. y R. Praveena, "Implementation of efficient modular bypass multiplier logic in RSA cryptographic processor", International Conference & Workshop on Electronics & Telecommunication Engineering (ICWET 2016), 52-57, Mumbai, India (2016).

Sadikin, M. A. y R. W. Wardhani, "Implementation of RSA 2048-bit and AES 256-bit with digital signature for secure electronic health record application", International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 387-392, Lombok, Indonesia (2016).

Shao, J., L. Wu y X. Zhang, "Design and implementation of RSA for dual interface bank IC card", IEEE 10th International Conference on ASIC, 1-4, Shenzhen, China (2013).

Sharma, S., y H. Zodpe, "Implementation of cryptography algorithm for E-passport security", International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), 1-3, Coimbatore, India (2016).

Singh, S. R., A. K. Khan y S. R. Singh, "Performance evaluation of RSA and Elliptic Curve Cryptography", 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 302-306, Noida, India (2016).

Soliman, S. M., B. Magdy y M. A. Abd El Ghany, "Efficient implementation of the AES algorithm for security applications", 29th IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC), 206-210, Seattle, WA-USA (2016).

Somsuk, K., "The improving decryption process of RSA by choosing new private key", 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 1-4, Yogyakarta, Indonesia (2016).

Sun, H. y Q. Ding, "The Design of the Mobile Phone Module Information Encryption System Based on FPGA", Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 1343-1347, Qinhuangdao, China (2015).

Zhao, B., L. Wang y K. Jiang, "An Improved Power Attack on Small RSA Public Exponent", 12th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), 578-581, Wuxi, China (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Influencia de las Crecidas del Río Ranchería Sobre las Inundaciones en la Ciudad de Riohacha, La Guajira-Colombia

Jhonny I. Pérez[1], Jairo R. Escobar[1] y Jose M. Fragozo[1]
(1) Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Km 5 Vía a Maicao, Riohacha-Colombia
E-mail: jpemon@uniguajira.edu.co; jrescobar@uniguajira.edu.co; jomfrago2012@gmail.com

Resumen

La ciudad de Riohacha (La Guajira-Colombia), frecuentemente afecta por inundaciones por precipitaciones en su cuenca urbana, es bordeada por el delta del río Ranchería; el rio tiene el potencial para influir sobre ese fenómeno actuando como barrera al desagüe, o inclusive aportando volúmenes. Se investigó en particular la situación correspondiente a la "ola invernal 210-2011". Para ello, se realizaron simulaciones utilizando el modelo 2D IBER v2.3.2. Para definir las condiciones de borde se reconstruyó un hidrograma a paso diario del mes de septiembre de 2011 donde se registraron las mayores precipitaciones en Riohacha (18 de septiembre de 2011). Se representó la topografía con un Modelo Digital de Terreno (MDT) preliminar. Este fue construido digitalizando la elevación brindada por el software Google Earth ® en un conjunto de puntos seleccionados manualmente en planta, integrados por puntos levantados en terreno para algunas secciones representativas del rio, además de información topográfica existente en algunos puntos conocidos ubicados en la frontera del área modelada. Esta información altimétrica manejada como "nube de puntos" fue posteriormente transformada a una red de triángulos irregular (TIN) y luego convertida a información matricial tipo ráster, procedimiento realizado en el módulo ArcMap de ArcGIS. Se simularon dos alternativas: i) Alternativa_0 correspondiente a la situación presente en el evento del 18 de septiembre del 2011 y ii) Alternativa_1, donde se analizó el efecto que tendría un muro de contención o jarillón ubicado para proteger una zona urbana vulnerable (barrio Villa Fátima). La Alternativa_0 mostró que el desbordamiento del río se presentó solamente en el tramo final del delta por tanto no influyó sobre las inundaciones en el área urbana de la ciudad de Riohacha. La Alternativa_1 mostró que el muro logra evitar las inundaciones en el barrio Villafatima pero traslada efectos aunque no tan marcados en la llanura opuesta, hacia la ciudad. Sin embargo existen incertidumbres por los supuestos que fue necesarios asumir y las limitaciones de modelación.

Palabras clave: modelación; IBER; inundación de ribera; crecidas; delta, topografía

Influence of Ranchería River on the Flooding of the twon of Riohacha, La Guajira-Colombia

Abstract

The town of Riohacha (La Guajira-Colombia), frequently affected by flooding from precipitations within its urban catchment, lies along the delta of Ranchería river; this river can influence urban flooding acting as a barrier to drainage, or even by adding water volumes. We investigated in particular the situation corresponding to the "ola invernal 210-2011" ("winter wave"). To this aim, we carried out simulations by using the model 2D IBER v2.3.2. To define the border conditions we built a daily time-step hydrogram for the month of September 2011 when the heaviest precipitations were recorded (September 18th, 2011). The topography was represented through a preliminary Digital Terrain Model (MDT). This was built by digitalizing the elevation provided by the Google Earth ® software in a set of manually selected points on a digital map, integrated by points surveyed on the field for some representative cross sections of the river, together with existing topographic information available for some known points along the border of the modeled area. This altimetric information, managed as a "points cloud" was transformed into a network of irregular triangles (TIN) and later converted to a raster matrix information, a process carried out with the module ArcMap of ArcGIS. We then simulated two alternatives: i) Alternative_0 corresponding to the actual situation of the event September 18th, 201, and ii) Alternative_1, where we analized the effect that a levee located to defend a vulnerable new urban area (Villa Fátima) would imply on the whole delta Alternative_0 showed that river overflows only occurred along the final stretch of the river without any influence on the urban area of Riohacha. Alternative_1 showed that, hydraulically, the wall effectively avoids flooding of Villa Fatima, but indeed transfers flooding towards the facing floodplain along the town border, although not markedly. Several uncertainties, however, affect these conclusions because of assumptions and modelling limitations.

Keywords: modeling; IBER; river flood; floods; delta; topography

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo del estado medio del clima, y puede deberse a factores naturales y antrópicos. Sin embargo las rápidas variaciones que se han producido desde mediados del siglo pasado se han debido en gran medida a las emisiones de gases de efecto invernadero de la humanidad a la atmosfera. El cambio a corto plazo del clima se relaciona con modelos recurrentes de presión y circulación atmosférica, por ejemplo los fenómenos El Niño y La Niña (OMM, 2012).

El Cambio Climático (CC) y sus impactos asociados son una nueva realidad para la humanidad, que a largo plazo puede ser una gran amenaza u oportunidad (Walther et al., 2002; Patz, et al., 2005). Existe una influencia directa del calentamiento global (manifestación del CC) en los regímenes de precipitación; según los modelos de circulación global se proyectan eventos mucho más intensos que los observados actualmente, inclusive si la precipitación total disminuye (Trenberth, 2011). Regionalmente y a mediano plazo, el clima en los trópicos y los patrones de precipitación son dominados principalmente por el fenómeno natural ENOS (El Niño u Oscilación del Sur). De ENOS se proyecta un incremento en su intensidad, explicado en parte probablemente por la presión ejercida por el actual el CC (Cai, et al., 2015). Los efectos negativos actuales de ENOS en el contexto de Latinoamérica se evidencian con fuertes inundaciones (La Niña) y periodos de sequía (El Niño) cada vez más prolongados e intensos, escenarios que pueden llegar a ser significativamente más desfavorables de seguir la tendencia actual que simulan los escenarios de CC para la región (IPPC, 2007).

En el contexto de Colombia, La Niña, ha generado la mayor ola invernal de los últimos 50 años durante el periodo 2010-2011, produciendo desbordamientos en ríos e inundaciones pluviales que generaron significativas perdidas económicas y vidas humanas, lo que produjo la creación de una política nacional de adaptación ante la alta vulnerabilidad del país frente al CC (Euscátegui y Hurtado, 2012; Enciso et al., 2016).

En la última década, a nivel mundial, se han realizado importantes avances en el modelado de inundaciones mediante el uso de una nueva generación de modelos numéricos hidráulicos bidimensionales (2D) como alternativa más completa y precisa que la modelación unidimensional (1D) para la modelación de inundaciones fluviales y pluviales. Dado el incremento de la oferta de información topográfica en formato de Modelos Digitales del Terreno (MDT) derivados de sensores espaciales satelitales y aerotransportados, han empujado el empleo de la modelación 2D (Yan et al., 2015). En Latinoamérica, es parcialmente cierto que la modelación hidráulica 2D ha sido limitada por la escasez de datos, como es el caso de Colombia donde la densidad de estaciones meteorológicas, la frecuencia de medida y calidad de datos, y aún más la falta de una topografía de detalle son aún limitantes para la modelación 2D.

Una zona altamente impactada durante la ola invernal de la Niña 2010-2011, fue el tramo final y principal del delta del Rio Ranchería conocido como El Riíto, en la ciudad costera de Riohacha -Caribe Colombiano (Nardini y Miguez, 2016). Por tanto el interés de este trabajo fue conocer la influencia de las crecidas en el delta sobre la inundación urbana en la ola invernal 2010-2011. Previo a esta investigación se tiene información del proyecto “Adaptación Urbana “Verde” Frente a Inundaciones con el Soporte de la Modelación Matemática MODCEL en Riohacha, La Guajira-Colombia (CREACUA, 2013), que en adelante se abreviará como MODCEL, en cual se ha determinado las cotas del agua en los límites entre la zona urbana y el delta y se plantaron alternativas de solución para las inundaciones de Riohacha (CREACUA y UFRJ, 2014; Nardini y Miguez 2016).

Por lo anterior y conociendo que las aguas de la zona urbana drenan hacia el delta, específicamente El Riíto, fue razón para desarrollar un estudio de modelación 2D. El presente artículo enfrenta entonces el reto de modelar en 2D las inundaciones generadas en el delta del río Ranchería solventando la carencia frecuente de datos topográficos, hidrometeorológicos, lo cual es muy común en regiones en vías de desarrollo. Específicamente se propone i) Reconstruir un hidrograma de entrada para la modelación hidráulica 2D; ii) Proponer una metodología para la generación de un Modelo Digital del Terreno (MDT) apropiado para la modelación hidráulica (2D) del área bajo estudio; iii) Modelar en 2D el tramo bajo estudio por medio del software libre IBER v2.3.3 (Bladé et al., 2014a); y iv) Simular una medida de intervención estructural con el modelo empleado y evaluar la respuesta de control de inundaciones para una zona periurbana vulnerable.

METODOLOGÍA

El delta del río Ranchería se encuentra ubicado al noreste de la ciudad de Riohacha (Caribe Colombiano) entre los 11°32'48.97"N de latitud y 72°53'2.22"O de longitud. En la Figura 1 el área de estudio especialmente el trazado del cauce principal que se bifurca próximo a la línea de costa dando origen a los tres brazos que forman el delta denominados El Riíto (1), Calancala (2) y Santa Rita (3). El área de estudio de 12 km^2 aproximadamente corresponde al cauce principal y planicie de inundación del Ranchería para el brazo El

ISBN 978-607-8242-11-5

Riíto, en sus últimos12 Km de longitud y en línea recta de 7,2 Km desde el puente de la vía que conduce a Maicao.

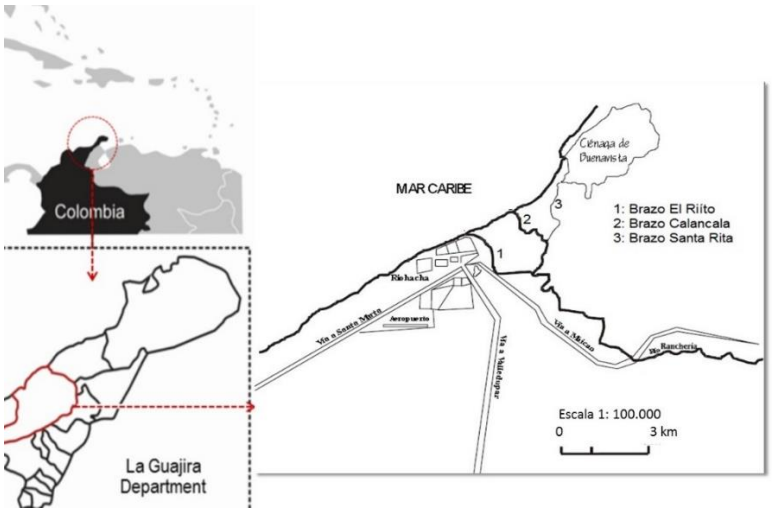


Fig.1: Ubicación del delta del río Ranchería respecto a la zona urbana de Riohacha y desembocadura al Mar Caribe.

El terreno es relativamente plano con elevaciones de 0 a 6 m.s.n.m, suelos aluviales arcillosos y vegetación dominante arbustiva del bosque seco tropical y de manglar en los últimos tramos del cauce cuando se aproxima a la costa. El régimen de lluvias de la región, en años con normalidad hidrológica, es bimodal con promedio de lluvia total anual de 541 mm, con los meses más lluviosos en septiembre y octubre (DIMAR, 2010). Parte de la zona del delta es destinada como área de preservación ambiental según el ordenamiento territorial local, aunque con asentamientos dispersos en puntos de cota alta. Entre los brazos (1) y (2) se encuentra un asentamiento suburbano “Villa Fátima” integrada por indígenas de la etnia wayuu, altamente expuesto a inundaciones fluviales que por la expansión desorganizada de la ciudad se ubican en zona de alto riesgo.

IBER 2D. Conceptualización de la modelación

Para la modelación hidráulica del delta del Ranchería se usó el modelo IBER v2.3.2, herramienta de distribución gratuita para la simulación matemática bidimesional 2D de flujo turbulento de lámina libre en régimen no-permanente para ríos, estuarios y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial (Bladé et al., 2014a). IBER se ha empleado en múltiples estudios de hidráulica aplicada, incluidos la modelación de inundaciones fluviales (Bladé et al., 2014b), evaluación de medidas de restauración para pequeños cauces (Castillo et al., 2015), e incluso para modelar transporte de material leñoso en ríos (Ruiz et al., 2015)

Un elemento importante en IBER es la construcción interna de una malla tridimensional para representar la superficie del terreno, generada principalmente a partir de un MDT. La malla son elementos (polígonos) planos (no curvos) que se obtiene de discretizar la geometría de la zona bajo análisis en elementos triangulares o cuadriláteros. En cada polígono de la malla de cálculo se resuelve las ecuaciones hidráulicas una vez asignadas a la geometría, las elevaciones del terreno, las condiciones de borde del sistema e hidrodinámicas. El flujo de trabajo detallado del modelo IBER 2D en su software consta de las siguientes fases: generación de la geometría de la zona de estudio; asignar condiciones de contorno de entrada y salida, condiciones iniciales, de rugosidad, coeficiente de Manning para el cauce y planicie de acuerdo a los uso y coberturas de usos del suelo; .asignar las opciones generales de cálculo (tiempo de cálculo, parámetros del esquema numérico, activación de módulos adicionales; construcción interna de la malla de cálculo: estructurada (cada elemento de control tiene el mismo número de vecinos) o no estructurada (diferentes números de elementos).

Datos hidrográficos de partida

La información hidrográfica que se usó para la modelación hidráulica 2D fue tomada de una (1) de las cinco (5) estaciones hidrométricas oficiales del Instituto de Hidrología, y Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2015) que se encuentran en la cuenca del río Ranchería, ubicada en el corregimiento de Aremasahin (11°28'0.93"N; 72°42'33.84"O) tipo Automática, Código IDEAM 15067180) que cuenta con registros diarios desde el 2007, consideradas por ser la más cercana al delta y al límite superior del área de estudio (11°30'38.65"N; 72°51'20.82"O. Cabe decir que los registros de caudales temporales a paso horario son inexistentes en la región por tanto se restringe la simulación a una escala diaria con las implicaciones en

 ISBN 978-607-8242-11-5

menor detalle en la información hidrográfica, pues las inundaciones varían en términos de horas e incluso minutos o segundos.

Para validar los resultados de las salidas de simulación estos fueron comparados con los valores de profundidad alcanzados en 3 puntos definidos en condición de frontera para el casco urbano de Riohacha, que coincide con los límites del delta y definidos en el proyecto MODCEL (CREACUA y UFRJ, 2014), esta frontera se definió físicamente como el nivel del agua que se alcanzó sobre la vía que conduce a Maicao y la carrera 1 (avenida circunvalar) en el cual el río puede drenar hacia la ciudad cuando los niveles sobrepasan la capacidad del cauce al igual que gran parte de la zona urbana de la ciudad de Riohacha. El proyecto MODCEL realizó modelación en la zona urbana, realizando la calibración con el máximo evento ocurrido en la ola invernal 2010-2011, identificado el 18 de septiembre de 2011, por tanto es el evento de referencia en nuestra investigación.

Fuentes de datos topográficos

La fuente de acceso libre de cartografía múltiple satelital a través del visor Google Earth (Google Earth, 2017) fue empleada por ser una de las pocas fuentes de información altimétrica para la determinación de datos puntales en la región tanto en ubicación como en elevación (X,Y,Z). De esta fuente se parte para llegar iterativamente a la confección supervisada de un MDT que capture de manera más fiel posible la configuración de la morfología del terreno de la planicie, en conjunto con la topografía convencional disponible, visitas de campo y el criterio de los investigadores. Los datos de elevación de Google Earth son derivados y correlacionados de fuentes como ASTER y STRM (Rusli et al., 2014), sin embargo, la determinación de altimetría (Z) solo se da en valores enteros, suponiendo un uso aún más restrictivo de esta fuente, incluso, reduciendo considerablemente el nivel de detalle del MDT a construir y calidad final de los resultados de simulación.

Diseño de la llanura de inundación. Dentro de la zona definida para la llanura de inundación, se asignaron puntos sobre el terreno de forma supervisada determinando la ubicación y elevación con Google Earth. Adicionalmente se integraron puntos con elevaciones de información topográfica conocida de los box culvert en la vía a Maicao (CREACUA y UFRJ, 2014). Finalmente se generó un archivo shape file de puntos que modeliza de forma más aproximada la morfología de la llanura de inundación.

Diseño del cauce del río. Debido a la ausencia de datos topográficos y batimétricos, el cauce del rio fue aproximado geométricamente a un canal tipo trapezoidal de configuración plana y de escasa pendiente propia de un delta (ver figura 2a). Para llegar a un diseño del cauce integrado y consistente con la llanura de inundación se siguió el siguiente procedimiento: i) Se dibujó un archivo de puntos shapefile en X,Y para cada margen del contorno del rio; ii) se procedió a ejecutar el paso anterior, con los pares de puntos ubicados en el cauce con el fin de establecer la base del fondo; iii) la elevación Z para cada par de puntos con posición conocida (X,Y) de las márgenes, se asignó mediante interpolación lineal una vez establecida la elevación al inicio y al final del cauce (desembocadura) de 6,0 y 0,0 m.s.n.m respectivamente, y iv) el mismo procedimiento iii) fue aplicado para los puntos del fondo, solo que trasladando verticalmente hacia abajo la profundidad promedio de 2,5 m observada en los levantamientos seccionales levantadas en campo (figura 2b). La nube de puntos X,Y, Z que discretiza el cauce idealizado del rio se guardó en un archivo de puntos shapefile

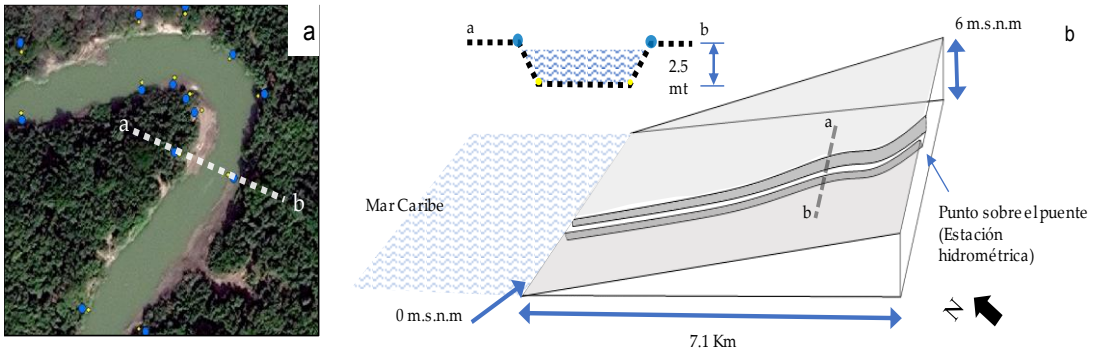


Fig. 2: Diseño del cauce del río. a) Muestra visual de puntos en archivo SIG shapefile de las márgenes y fondo del cauce; b) Representación idealizada de canal trapezoidal supuesto para el cauce del rio Ranchería.

Generación y ajuste iterativo del MDT: Los os archivos de puntos tipo ESRI shapefile (SHP) 2D para llanura y cauce fueron integrados para unificar información del terreno y geométrica del rio en un solo archivo. Paso seguido se procedió a generar una superficie tridimensional mediante la creación de una red irregular de

ISBN 978-607-8242-11-5

triángulos (TIN) del terreno "con la función *"Create TIN"* en ArcScene™Esri® a partir de la nube de puntos. El MDT finalmente se generó a partir de la rasterización del TIN con la herramienta "TIN to Raster" en ArcMap™Esri®.

Simulación con IBER 2D

Condiciones iniciales. Para definir la condición inicial fue necesario definir el caudal permanente para día 17 de septiembre de 2011. Con ese caudal se realizó una simulación inicial hasta cuando la cota y calado fueron estabilizados (se aprovecha de la asintótica estabilidad de los sistemas naturales). Lograda la estabilidad del río y llanura de inundación, se asignó el Hidrograma completo, partiendo desde el instante de tiempo en que se encontró las condiciones estables.

Condiciones de borde-entrada y salida. Definido el dominio de cálculo, la entrada fue el puente sobre la vía a Maicao y la salida corresponde a la línea de costa (figura 4a). Para la condición de borde en la entrada se construyó un hirograma construido de los datos diarios del mes de septiembre de 2011 de la estación Aremasahin, considerando el evento de referencia (18 de septiembre de 2011). Para la condición de entrada se usó la opción "caudal total" asignando el hidrograma reconstruido con un régimen de flujo "Crítico/Subcritico". La condición de salida de "tipo cota" que corresponde al máximo nivel presentado por el mar como condición de salida en régimen "Subcritico", la cual fue impuesta en la línea de costa (figura 4b). Esta cota fue tomada del proyecto MODCEL fijada en 1 m.s.n.m (CREACUA y UFRJ, 2014; Nardini & Miguez, 2016).

Coeficiente rugosidad "n" de Manning. Este fue definido en: i) cauce. el "n" se determinó de acuerdo al tipo de materiales presentes en la zona, sinuosidad del cauce, presencia/ausencia de vegetación, entre otros factores. Se realizó una prueba de distribución a los caudales del mes de septiembre de 2011 con varios tiempo de retorno (T_R) entre ellas: Log Normal, Log Norma l, Gumbell, Pearson III y Log Pearson III), siendo la Log Pearson III la de mejor ajuste. Por otro lado se determinó la capacidad del cauce en 5 secciones transversales entre ellas la definida como condición de entrada (Puente Batallón). Para determinar el caudal de bancas llenas se usó el programa HCANALES de distribución gratuita, disponible en la web http://www.ingeciv.com/descargar-hcanales-v3/. Para los valores de "n" se consideró un coeficientes de rugosidad típico, para canales naturales (Chow, 1994). Se compararon los caudales de bancas llenas con los obtenidos en la mejor distribución, seleccionando como T_R donde se obtuvo el caudal más similar. Para la planicie de inundación los valores de "n" se han encontrado entre 0,05 a 0,07 (Brugal. et al, 2010) por tanto se tomó el promedio de este rango (0,6).

Características de la malla de cálculo: Se creó una malla irregular en todo el dominio, se asignó los tamaños de elementos a generar (Cauce/llanura) de acuerdo al nivel de detalle que se requería en cada una de las zonas como. Para las simulaciones realizadas se trabajó con una malla irregular en todo el dominio. En el río el tamaño de los elementos de malla fue de 15 metros, en la llanura de inundación del margen derecho de 100 metros, y en la llanura de inundación de la margen izquierda de 50 metros. Esta malla fue modificada con la herramienta de IBER 2D para agregar un dique de protección de 1 m de alto y 3 m de ancho (alternativa_1) como escenario alternativo de comparación con respecto a las simulaciones sin intervención (alternativa_0).

Supuestos y limitaciones de modelación: i) Información hidrométrica: existen limitaciones en cuanto a estaciones de medición con series históricas suficientes, solamente una (1) próxima al dominio de cálculo "Aremasahin" a paso de tiempo diario, lo que no ofrece un nivel de detalle apropiado para una crecida que ocurre y varía en términos de horas o minutos. Se asume que el caudal que se estima en el Puente Batallón es el mismo que llega a la zona de estudio sin considerar aportes o extracciones adicionales. ii) Topografía y geometría del río: Limitaciones en cuanto a batimetrías de cauce y MDT detallado para la zona. No se consideró los otros dos brazos del rio, esto puede generar sobreestimación de niveles. Se asume la geometría del cauce trapezoidal con profundidades y pendientes constantes en todo su recorrido. iii) Dominio de cálculo: El área de cálculo se redujo significativamente para la creación del MDT de la llanura de inundación que podría aumentar los niveles de agua calculados en las simulaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de crecidas

De las distribuciones utilizadas para el análisis de frecuencia de los caudales, la mejor fue la Log Pearson III con la cual se analizaron los caudales de la estación Aremasahin periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Con los datos de las secciones transversales levantadas, la rugosidad y pendiente del tramo se determinó el caudal de bancas llenas (capacidad hidráulica) en la sección de entrada (Puente Batallón) con

 ISBN 978-607-8242-11-5

valores de Manning de “n”, 0,025, 0,030, 0,035 y 0,040. Los caudales más similares fueron los obtenido con “n” de 0,025 (121,25 m^3/s) y T_R de 2 años (145,56 m^3/s). Se tomó entonces como umbral mínimo el promedio entre ellos resultando un caudal de 133,40 m^3/s, a partir de este valor se consideró que existen crecidas en esta sección, las cuales fueron identificadas solo en el mes de junio de 2011, por tanto el primer hallazgo es que para el evento de referencia (18 de septiembre de 2011) no hubo crecida del río Ranchería, las cuales dependieron de las lluvias que cayeron sobre la cuenca días e incluso horas antes.

Condición inicial-Hidrograma

La condición inicial (tiempo cero) corresponde al caudal permanente al día 17 de septiembre. Analizando los datos de caudal de la estacón Aremasahin del mes de septiembre (IDEAM, 2015), se puedo ver que desde el día 10 de septiembre de 2011 se produjo un aumento del caudal, y se mantuvo casi constante hasta el día 17 del mismo mes, por tanto se determinó el promedio de este periodo (del 10 al 17 de septiembre de 2011), el cual fue considerado como el caudal permanente (58,51 m^3/s), que representa el tiempo cero (0) del Hidrograma lográndose la estabilidad el día 24 de septiembre del mismo año (hidrograma del 17 -24 de septiembre de 2011).

Modelación en IBER

Simulación de estabilidad. Después de crear el proyecto en IBER se procedió a realizar la simulación inicial para encontrar las condiciones de estabilidad con las condiciones iniciales (Alternativa_0), esta se hizo con caudal de 58,51 m^3/s, que corresponde al caudal permanente del Hidrograma, y a un tiempo de 45000 segundos, en la cual se verificó la evolución del calado y la cota del agua en varios puntos a lo largo del río y en las llanuras de inundación, en donde se presentó desbordamiento. Esta primera prueba demostró que la estabilidad en el cauce se logró antes de los 45000 s pero no en la planicie de inundación, por tanto fue necesario continuar la simulación hasta 90000 s. Por tanto fue necesario ajustar el tiempo cero del hidrograma inicial a 90000 s.

Alternativas simuladas. El primer ensayo fue determinar el tiempo en que se logra la estabilidad se realizó la simulación que en este caso el inicio del Hidrograma no es cero (0 s) si no 90000 s el caudal permanente (58,51 m^3/s) se incluyó para refrescar el proceso al momento de iniciar la nueva simulación, pues el programa inicia la simulación a partir de las últimas condiciones alcanzadas, por tanto no era necesario que este caudal se simulara por más tiempo, además así se reducía el tiempo de simulación total.

En la figura 3 se puede observar la inundación a los 600000 s. En la alternativa_0 (figura 3a) el desbordamiento se presentó en la zona periurbana el margen izquierdo y derecho donde se encuentra el barrio Villa Fátima, llegando hasta la comunidad aledaña conocida como Cangrejito, esto se debe al caudal simulado que no excedía la capacidad hidráulica del río por tanto no hay desbordamiento en otras secciones aguas arriba. El desbordamiento en la parte final se debió a la influencia de la cota del nivel del mar impuesta en el contorno de salida (1 m.s.n.m) determinada en el proyecto MODCEL (CREACUA y UFRJ, 2014), lo que ejerció una barrera impidiendo la salida del río. Lo anterior permitió evidenciar el efecto amortiguador del delta, es decir a medida que el río va desbordando la inundación se extendiendo. Se puede decir que el río Ranchería no influyó en la inundación ocurrida en la ciudad de Riohacha el día 18 de septiembre de 2011, lo puede explicarse porque en el proyecto MODCEL (CRECUAA y UFRJ, 2014) se demostró que el agua durante el evento de referencia fluyó del área urbana hacia el delta y no lo contrario.

Los resultados de la alternativa_1 (figura 3b) fueron similares a la alernativa_0, solo se observó en un ligero aumento del calado en la llanura contraria, lo que indica que el área de salida fue suficiente para el drenaje del río. Un efecto observado fue la inundación se propaga por la zona que queda desprotegida antes del punto inicial del muro, este resultado pone de manifiesto que este tipo de obras traen efectos secundarios y en muchas ocasiones no cumplen su objetivo. En un evento de mayor magnitud esta comunidad se podría inundar a pesar de la presencia del muro, además se podrían ver inundadas nuevas zonas del margen izquierdo. Al aumentar las cotas del agua en el margen derecho se incrementa el riesgo de inundaciones en la ciudad (margen izquierdo), al invertirse el flujo como ocurrió el día 27 de octubre del 2015 que luego de una creciente repentina del río Ranchería, la salida se encontraba cerrada con presencia de dunas y sedimentos marinos haciendo que el agua delta drenara hacia la ciudad por los box culvert.

ISBN 978-607-8242-11-5

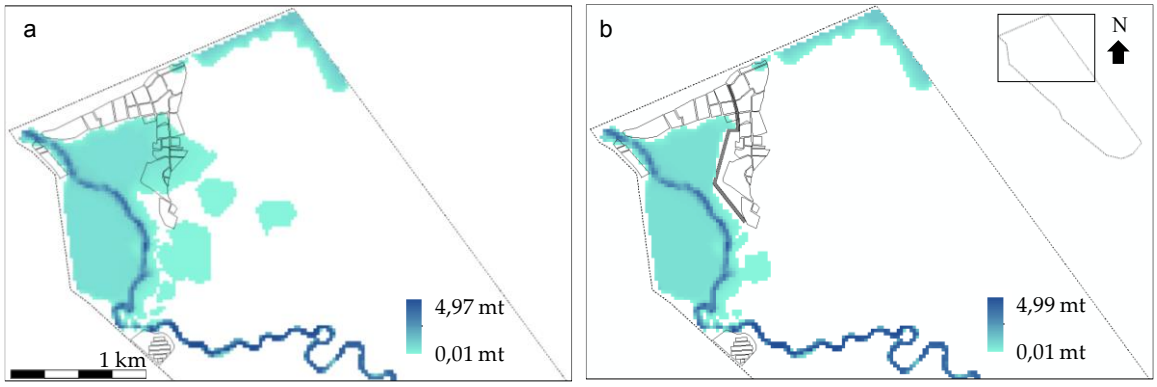


Fig. 3. Salidas de simulación para el instante 600000 s. a) Alternativa_0; b) alternativa_1

De los 3 puntos de verificación solo se inundó el más cercano desembocadura (box culvert la Pesquera) donde la cota media en el proyecto MODCEL alcanzó una cota de 1,2 m.s.n.m y la simulada IBER de 1.0 m.s.n.m, lo que se puede explicar por las mareas presentes el día del máximo evento, la cual no fue considerada en nuestro estudio.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones: 1) Se logró superar la ausencia de una topografía de la zona creando manualmente un Modelo Digital de Terreno (MDT) dibujando el río y las planicies de inundación; 2) El delta del Ranchería presta un gran servicio ambiental a la zona urbana de Riohacha, al recibir sus aguas de escorrentía y evitar o aliviar el problema de inundación; 3) la mayor crecida fue de 211 m^3/s, que se presentó los días 18 y 19 de diciembre del 2010, no coincidiendo con el evento de referencia (18 de septiembre de 2011); 4) IBER es un software muy versátil en cuanto a su manejo y aplicación, pero requiere de información muy precisa, principalmente de una topografía de detalle, la que en muchos casos no está disponible; 5) La Alternativa_1, permitió observar que el muro de contención impuesto para proteger el barrio Villa Fátima, cumple su función originando un pequeño incremento en la llanura contraria; 6) Las inundaciones de la ciudad de Riohacha del año 2011 no fueron afacetadas por las crecidas del río Ranchería, la cota del delta permitió que el agua drenara por los box culvert y por tanto los efectos ocurridos en la zona urbana se debieron al agua que cayeron en el área urbana de la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de La Guajira por el apoyo económico, al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia por la información suministrada, a la fundación CREACUA por la información del proyecto MODCEL, Al ing. Andrea Nardini por sus asesorías, y al ing. Yair Movil Fuentes por levantamiento de información topográfica.

REFERENCIAS

Bladé, E., Cea, L. y Corestein, G, *"Modelización Numérica de Inundaciones Fluviales",* doi: https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144, Ingeniería del Agua, 18 (1), 71–82 (2014b)

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J y Coll, A., *"Iber: Herramienta de Simulación Numérica del Flujo en Ríos",* doi: 10.1016/j.rimni.2012.07.004, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing, 30(1), 1–10 (2014a)

Brugal, A. P., Armaignac, A. D., & de León, N. M., *"El Coeficiente de Manning y el Cambio de Precisión de Los MDT en La Simulación Hidráulica"*, ISSN: 1815-591X, Rev. de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 31(3), 21-27 (2010)

Cai, W., Wang, G., Santoso, A., McPhaden, M., Wu, L., Jin, T.F., Timmermann, A., Collins, M., Vecchi, G., Lengaigne, M., England, H.M.,Dommengel, d., Takahashi, H. y Guilyardi, E., *"Increased Frequency of Extreme La Niña Events Under Greenhouse Warming",* doi: 10.1038/nclimate2492, Nature Climate Change, 5(2), 132-137 (2015)

Castillo, C., Pérez, R.M,. Gómez, J. C., "*A Conceptual Model of Check DAM Hydraulics for Gully Control: Efficiency, Optimal Spacing and Relation With Step-Pools",* doi: 10.5194/hess-18-1705-2014, Hydrology and Earth System Sciences, 18, 1705-721 (2014)

 ISBN 978-607-8242-11-5

CREACUA-Centro de Recuperación de Ecosistemas Acuáticos. "*Proyecto Adaptación Urbana Verde Frente a Inundaciones con el Soporte de la Modelación Matemática y del Software MODCEL en Riohacha, La Guajira, Colombia*"; Colombia"; Convenio de cooperación Nº 9677-04-1047-2013 (en línea: http://modcelrhcdatos.wixsite.com/modcel-riohacha/avance, acceso: Consultado marzo 22 de marzo 2017), Riohacha, Colombia (2013).

CREACUA-Centro de Recuperación de Ecosistemas Acuáticos y UFRJ -Universidad Federal de Río de Janeiro. "*Modelo de Simulación de la Cuenca Urbana de Riohacha. Informe Técnico de Proyecto Adaptación Urbana Verde Frente a Inundaciones con el Soporte de la Modelación Matemática y del Software MODCEL en Riohacha, La Guajira, Colombia*"; Convenio de cooperación Nº 9677-04-1047-2013 (en línea: http://docs.wixstatic.com/ugd/dad4f8_26e8648aacb44bdfbde9e709e6b11655.pdf, acceso:22 de marzo 2017), Riohacha, Colombia, (2014)

Chow, V. T. *Hidráulica de los Canales Abiertos*, 1ª edición, 3-32, (traducido Saldarriaga, J.G, McGRAW- HILL, Bogotá, Colombia (1994)

DIMAR -Dirección General Marítima de Colombia Riohacha. "*Climatología de los Principales Puertos del Caribe Colombiano" (disponible en:* https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/Climatologia%20Riohacha.pdf, acceso: 18 febrero 2017). (2010).

Enciso, A.M., Carvajal, Y.E, y Sandoval, M.C. "*Hydrological analysis of historical floods in the upper valley of Cauca River: Análisis Hidrológico de las Crecientes Históricas del Río Cauca en su Valle Alto", doi:* http://dx.doi.org/10.25100/iyc.v18i1.2176*,* Ingeniería y competitividad 18(1), 47-58 (2016).

Euscátegui, Ch., y Hurtado, G., "Análisis Del Impacto Del Fenómeno "La Niña" 2010-2011 en la Hidroclimatología del País", IDEAM, Colombia (2012)

Google Earth. "La Información Geográfica del Mundo en tu Mano". (en línea: https://www.google.es/intl/es_es/earth/, acceso: 22 febrero 2017), (2017).

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. "Base de Datos Hidrometerológica Del Departamento de La Guajira"*. Bogotá, Colombia, (en línea: http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion, acceso22 de Feb. 2016 (2015)

IPCC-Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. *"Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad"* (en línea: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf, acceso: marzo 5 2017), PNUMA (2001).

Nardini, A., y Miguez, G.M., "*An Integrated Plan to Sustainably Enable the City of Riohacha (Colombia) to Cope with Increasing Urban Flooding, while Improving Its Environmental Setting*", doi: 10.3390/su8030198, Sustainability, 8(3), 198 (2016).

OMM-Oganizacion Mundial Meteorologica, "*el Estado del Clima Mundial 2001-2010. Un decenio de Fenómenos Climáticos Extremos Informe Resumido"* (en línea: https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1119_es.pdf, acceso: abril 5 2016), Ginebra, Suiza (2012)

Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. y Foley, J.A. "*Impact of regional climate change on human health*", doi: 10.1038/nature04188*,* J. Nature, (438), 310-317 (2005).

Ruiz, V.V., Bladé E., Sánchez, J.M.,Marti B.C., Díez, A, H., Bodoque, J.M "*Two dimensional numerical modelling of wood transport",* doi: 10.2166/hydro.2014.026, Journal. of Hydroinformatics, 16 (5), 1077–1096 (2014)

Ruslin N, Majid, M.R. y Din, A.H., 2014, Google Earth's derived digital elevation model: A comparative assessment with Aster and SRTM data, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 18 (1), IOP Publishing (2014).

Trenberth, K.E. "*Changes in precipitation with climate change*", doi: 10.3354/cr00953, Climate Research, 47(1-2), 123-138 (2011)

Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Mensel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J., Fromentin, J.M., Guldberg, O.H y Bairlein, F. "Ecological responses to recent climate change, doi: 10.1038/416389ª, J. Nature, 416 (6879), 389-395 (2002)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Generador de Trayectorias Para Manejo y Gestión de Transporte de Materiales al Interior de una Empresa

Daniel Santiago Rondón[1], Andrés Mauricio Cifuentes[2], Mauricio Plaza Torres[3]
(1) Estudiante de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, u1802364@unimilitar.edu.co
(2) Magister en Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, andres.cifuentes@unimilitar.edu.co
(3) Doctor en Ingeniería con énfasis en Realidad Virtual y Bioingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, mauricio.plaza@unimilitar.edu.co

Resumen

Se presenta un generador de trayectorias que crea un camino continuo entre un producto y su lugar de almacenamiento de manera que pueda dar soporte a un posible proceso de gestión de almacenes (WMS) y hacerlo más robusto. El sistema genera trayectorias desde una cierta posición inicial hasta un punto determinado por el usuario, evitando obstáculos, arrojando como resultado una combinación entre las trayectorias más rápidas y las más seguras.
Las trayectorias son obtenidas por un algoritmo que emplea métodos genéticos, el cual, mediante procesos estocásticos genera puntos a lo largo de un plano conocido, garantizando la exploración de todo el espacio de búsqueda. Cada una de las trayectorias es codificada para crear un “genoma” que describe el trazo continuo que forma la trayectoria, la evolución emplea más de una métrica para puntuar que tan buena es una trayectoria, una estrategia de doble puntuación conocida como PFGA (Pareto Fitness Genetic Aloritm) evalúa y direcciona el proceso evolutivo, de modo que el proceso de optimización se convierte en optimización multiobjetivo.
Las pruebas de funcionamiento se hicieron sobre sobre un mapa con obstáculos bien definidos y se enviaron los datos de la trayectoria final a un LEGO MindStorms NXT 2.0 que debía desplazarse en el entorno simulado del mapa que se le suministró al algoritmo. Con esto comprobamos que el algoritmo cumple con los objetivos planteados y que los datos que esta entrega son fácilmente traducibles al lenguaje de un robot de trasporte.
Automatizando los desplazamientos de material se minimizan los desperdicios por trasporte, y se empieza a maximizar la eficiencia y la productividad de cualquier empresa, facilitando la aproximación a modelos de gestión como Lean manufacturing, sin contar además con que se abren las puertas para la automatización de otros procesos y la utilización de robótica colaborativa que simplifique y mejore los niveles de producción.

Palabras clave: Generador de trayectorias, gestión de almacenes, algoritmo genético

Path Generator for admin and management of material transport inside a company

Abstract
It presents a path generator that creates a continuous path between a product and its storage location so that it can support a possible Warehouse Management Process (WMS) and make it more robust. The system generates trajectories from a certain initial position to a point determined by the user, avoiding obstacles, resulting in a combination between the fastest and safest trajectories.
The trajectories are obtained by an algorithm that uses genetic methods, which, through stochastic processes generates points along a known plane, guaranteeing the exploration of the entire search space. Each of the trajectories is coded to create a "genome" that describes the continuous path-tracing, evolution employs more than one metric to rate how good a trajectory is, a double-score strategy known as PFGA (Pareto Fitness Genetic Algorithm) evaluates the evolutionary process, so that the optimization process becomes multiobjective optimization.
Performance tests were made on a map with well-defined obstacles and the final path data was sent to a LEGO MindStorms NXT 2.0 which must be shifted in the simulated environment that was supplied to the algorithm. With this we verify that the algorithm meets the objectives and that the data that it delivery are easily translatable to the language of a transport robot.
Automating material movements, minimizes waste by transportation, and begins to maximize the efficiency and productivity of any company, facilitating the approach to management models like Lean manufacturing, also opening doors for the automation of other processes and the use of collaborative robotics to simplify and improve production levels.

Key words: Path generator, warehouse management, genetic algorithm

 ISBN 978-607-8242-11-5

Introducción

El presente documento se expone el proceso de creación de un algoritmo capaz de guiar a un robot en el interior de un espacio de almacenamiento, de forma tal que pueda desempeñar labores de desplazamiento de materiales de manera independiente, por medio de un algoritmo que es capaz de escoger la ruta más optima teniendo en cuenta parámetros de seguridad y tiempo de desplazamiento.

El desarrollo se llevó a cabo con el fin de dar mayor autonomía al proceso de transporte de materiales, de forma tal que se maximice la eficiencia tanto en tiempos de desplazamiento, como en consumo de energía y estado de la carga al final del recorrido.

Actualmente la mayoría de investigaciones en cuanto a la logística y gestión de materiales en almacenes se basan el uso de programación lineal para encontrar las cantidades optimas y satisfacer las restricciones propias de cada producto (Ferrer, Coves, & De Los Santos, 2004) pero son escasos los desarrollos llevados a cabo para la automatización de procesos en esta rama en general.

Teniendo en cuenta los argumentos de varios autores (Mucahy, 1993) (Urzelai Inza, 2006) (Mauleon, 2006) (Harnsberger, 1997) podríamos definir los objetivos de la gestión de almacenes como:

"Minimizar:

- El espacio empleado, con el fin de aumentar la rentabilidad
- Las necesidades de inversión y costos de administración de inventarios
- Los riesgos de los cuales se consideran los relacionados con el personal, con los productos y con la planta física
- Perdidas por robos, averías e inventario extraviado
- Las manipulaciones por lo cual los recorridos y movimientos de personas, equipos de manejo de materiales y productos deben ser reducidos a través de la simplificación y mejora de los procesos
- Los costos logísticos a través de economías de escala, reducción de faltantes y retrasos en la preparación de despachos

Maximizar:

- La disponibilidad de productos para atender pedidos de clientes
- La capacidad de almacenamiento y rotación de los productos
- Operatividad del almacén
- La protección de los productos" (Correa Espinal, Gomez Montoya, & Cano Arenas, 2010)

De acuerdo con esto, el algoritmo que se creó, pretende ser solución para los problemas típicos de gestión de almacenes de manera que disminuyan los riesgos tanto para el personal como para la carga y en la misma medida las perdidas debidas averías, a su vez mejore los tiempos de traslado de materiales y mercancías minimizando así los costos y aumentando la productividad.

El sistema tiene cabida en distintos puntos de la gestión de materiales, desde embarque de materias primas y productos intermedios, hasta el producto terminado. Y es que según Ettinger las plantas modernas son, básicamente, un sistema de manejo de materiales, puesto que la producción es esencialmente de materiales en movimiento (Ettinger, 1966), por lo que podríamos decir que este es un producto de gran utilidad para la industria en general.

Metodología

Partiendo del principio de que un robot de transporte puede ser modelado como un robot diferencial, se desarrolló el modelo matemático de la dinámica de un robot de este tipo, teniendo como objetivo controlar la posición y orientación final del efectuador, que para fines prácticos se asume al frente del robot.

Si se tiene un sistema de referencia global XY, y un sistema de referencia local xy, como se ve en la Figura 1, y se definen un ángulo Ψ como el ángulo de orientación, obtendremos el modelo de la siguiente forma.

ISBN 978-607-8242-11-5

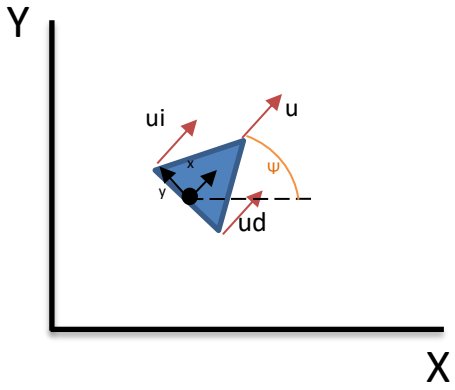


Figura 1: Base para el modelamiento de la dinámica del robot. Fuente: creación propia

Tomando u como la velocidad lineal del robot, y ui y ud como las velocidades lineales en las ruedas izquierda y derecha respectivamente, podemos decir que:

$$U = \frac{Ui+Ud}{2} \quad (1)$$

Adicionalmente designaremos r como el radio de las ruedas, w como la velocidad angular del elemento, d como la distancia entre las ruedas, y wd y wi como las velocidades en cada rueda. De este modo, tenemos que:

$$ui = wi * r \quad (2)$$

$$ud = wd * r \quad (3)$$

$$u = \frac{wi*r+wd*r}{2} = \frac{r}{2}(wi + wd) \quad (4)$$

$$w = \frac{ud-ui}{d} \quad (5)$$

Adicionalmente sabemos que la velocidad lineal u puede descomponerse en velocidades en X y en Y, como

$$\dot{X} = u * cos(\Psi) \quad (6)$$

$$\dot{Y} = u * sen(\Psi) \quad (7)$$

Reemplazando obtenemos:

$$\dot{X} = \frac{r}{2}(wi + wd) * cos(\Psi) \quad (8)$$

$$\dot{Y} = \frac{r}{2}(wi + wd) * sen(\Psi) \quad (9)$$

$$\dot{\Psi} = \frac{r}{d}(wd - wi) \quad (10)$$

Con este modelo matemático el problema de llegar a un punto específico con una orientación especifica se reduce a determinar las velocidades angulares necesarias para cada rueda.

Ahora bien, como nuestro espacio de movimiento es un ambiente dinámico en el que existen obstáculos, no es posible describir una línea entre el inicio y el final. Para poder generar una trayectoria en la que nuestro robot no choque, es necesario subdividir el problema de ir de un punto inicial a un punto final en una serie de puntos intermedios seguros.
Para tal fin nos basaremos en un plano simplificado del espacio de trabajo, en que se identifican claramente las zonas seguras en blanco y los obstáculos en negro, como se ve en la Figura 2.

ISBN 978-607-8242-11-5

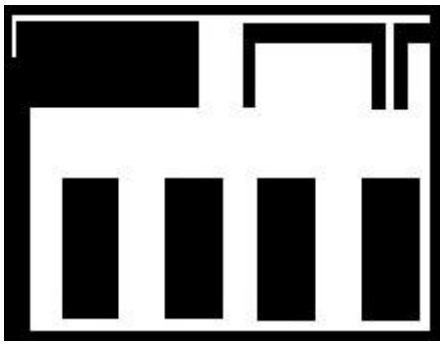


Figura 2 Plano simplificado de un almacén. Fuente: Elaboración propia

Este plano se difuminará utilizando mascaras de filtrado para obtener una imagen en escala de grises como la que se ve en la Figura 3, de forma que tendremos tonos oscuros cerca del obstáculo y tonos más claros a medida que se aleja del mismo.

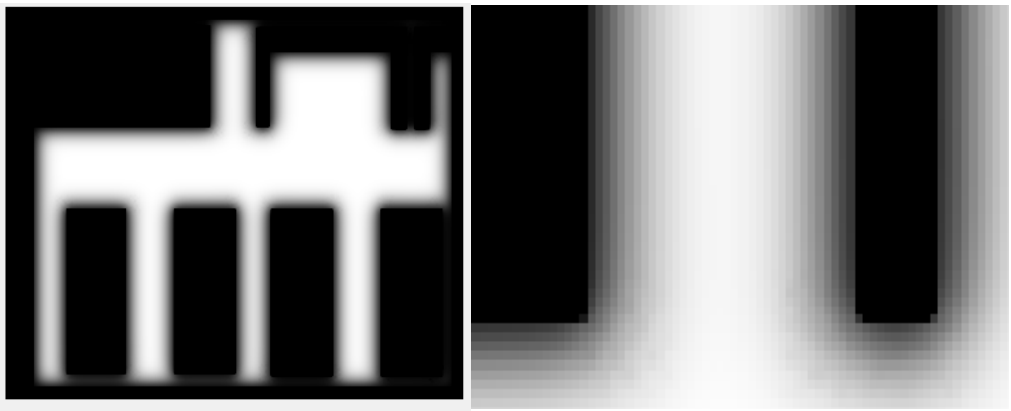


Figura 3 Plano distorsionado y acercamiento del mismo. Fuente: Elaboración propia

Luego de esto es necesario que el algoritmo conozca lo mejor posible el espacio de búsqueda, para ello se generarán cierta cantidad de puntos aleatorios en lo que desde ahora denominaremos espacio factible (en donde los tonos son lo suficientemente claros como para determinarlos como seguros). Se evaluará si existe línea de visión entre el punto inicial y el punto final, es decir si entre los puntos no existe ningún obstáculo, de ser así obtendremos la más sencilla de las trayectorias y el algoritmo habrá concluido, de lo contrario se evaluara si existe línea de visión entre el punto inicial y el primero de los puntos aleatorios, si existe se evalúa si existe línea de visión entre ese punto y el final, de ser así se guardara esta trayectoria como un sujeto, de lo contrario el primer punto aleatorio se tomara como el nuevo inicio y se repetirá el proceso hasta que se pueda trazar una trayectoria válida para generar un primer sujeto de la población (Figura 4). Si luego de evaluar todos los puntos aleatorios el programa aun no encuentra una trayectoria se agregarán más puntos aleatorios hasta que sea posible concluir el proceso. Si llegado un numero demasiado grande de puntos aleatorios no es posible culminar la trayectoria, se concluirá que es una trayectoria demasiado peligrosa o imposible y se preguntará al usuario si desea continuar de todos modos.



Figura 4 Ilustración del concepto de línea de visión y sujeto inicial de la población. Fuente: Elaboración propia

Debido a la aleatoriedad de los puntos es posible que se generen bucles o desplazamientos no óptimos en las trayectorias (Figura 5), por lo que un solo sujeto no es solución para el problema planteado.

ISBN 978-607-8242-11-5

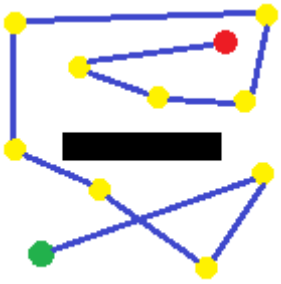


Figura 5 Posible sujeto inicial. Fuente: Elaboración propia

Para mejorar esta situación podría pensarse en generar muchos sujetos y escoger al mejor entre ellos basándonos en una calificación. Podríamos calificar a los sujetos mediante dos cualidades: seguridad y longitud, ya que de la forma en la que hemos venido planteando el algoritmo es fácil cuantificar la cantidad de pixeles sobre el mapa que debe recorrer el robot en cada trayectoria (longitud), y que tan oscuros son los pixeles por lo que pasa la trayectoria (seguridad).
Entre más sujetos generemos mayor será la posibilidad de encontrar una mejor trayectoria, pero sin importar cuantos sujetos generemos jamás podremos garantizar que de este modo encontremos una solución ideal. Pero es posible que una combinación de los mejores sujetos de una población se aproxime más a una respuesta ideal, por lo que se propuso un algoritmo genético.
Se genero una variante del Algoritmo Genético de Aptitud de Pareto (PFGA) propuesto por Elaoud (Elaoud, Loukil, & Teghem, 2007), el cual basa su funcionamiento en un método de puntuación para múltiples objetivos, en nuestro caso las mismas 2 que hemos venido trabajando, seguridad y longitud.
La optimización por Pareto es un concepto que nació en la economía y luego se encontraron múltiples aplicaciones en la ingeniería. Y define que una solución será optima si no existe otra solución que mejore los objetivos sin empeorar los costos.
El algoritmo busca minimizar ambas características, por lo que es común graficar el estado de todos los sujetos con respecto a los objetivos en un gráfico nombrado por el autor como frente de Pareto. Entre más cerca se encuentre el sujeto del centro de coordenadas más optima será la solución. Este será nuestro referente para saber el estado de la evolución del algoritmo.

Para comenzar con la evolución se dibuja el frente de Pareto para todos los sujetos creados, a los que se les conocerá como primera generación. Se dividirá el plano en subespacios adaptativos, con el fin de encontrar que tantos sujetos existen en determinadas partes del frente, de esta manera agregaremos otro parámetro de calificación llamado densidad de población.

Con estos parámetros se da paso a un proceso llamado elitismo, que consiste en seleccionar el 10% de la población con mejores calificaciones y pasarlos a la siguiente generación sin efectuar ningún cambio. Con esto se garantiza que la mejor solución encontrada en puntos intermedios sobrevivirá hasta el final del algoritmo.

Para completar el 90% de la población restante en la siguiente generación se utilizará el método conocido como *torneo,* el cual ha sido utilizado en aplicaciones similares (Cifuentes Bernal, 2015). Se selecciona 10% de la población aleatoriamente y se escoge el que tenga mejores calificaciones para que se convierta en el primer padre, y se repite el procedimiento para encontrar el segundo padre. Con estos dos se realiza el proceso de crossover; este consiste en tomar un punto de corte determinado en ambos sujetos y unir las partes resultantes de uno con las del otro, de forma tal que se tendrán 2 nuevos sujetos. Para que esto sea posible es necesario que el último de los puntos antes del corte en uno de los sujetos tenga línea de visión con el siguiente punto luego del corte en el otro sujeto, de no darse esta condición se cambiara el punto de corte hasta que puedan crearse dos nuevos sujetos.
El torneo se repetirá hasta que se complete el total de la población.

Una vez la descendencia está completa, se da paso al proceso de mutación. En este se selecciona un sujeto al azar y se toma de él un punto al azar, en el que se agrega un nuevo punto del espacio factible. Si existe línea de visión entre los puntos de antes y después del corte con el nuevo punto se generará una nueva trayectoria valida que reemplazará al sujeto original.

Culminada la mutación se dice que la nueva generación está completa y reemplazará a la generación actual. Este proceso se repetirá tantas veces como el usuario lo desee, teniendo en cuenta que entre mayor sea el número de generación mejor será el resultado final, pero tomará mayor cantidad de tiempo.

Tan pronto como termine el proceso iterativo de todas las generaciones el algoritmo mostrará las 3 mejores

 ISBN 978-607-8242-11-5

opciones para que el usuario seleccione una.

Finalmente, la trayectoria es enviada al robot como un vector de puntos, de forma tal que el robot simplemente debe calcular la orientación necesaria para ubicarse en línea recta con su objetivo, así mismo como la distancia entre su posición actual y el siguiente punto en la trayectoria.

Resultados y Discusión

Las pruebas fueron realizadas en un LEGO MindStorms NXT 2.0, en su configuración de robot móvil diferencial, como se ve en la Figura 6, al cual se le acoplo una brújula electrónica que daba información del ángulo actual con respecto al norte magnético de la tierra, por lo que el ambiente simulado debió ubicarse en este mismo sentido.
Se escogió la plataforma de LEGO por su facilidad al momento de programar y su versatilidad en cuanto a configuraciones posibles.
Se creo un entorno simulado del mapa haciendo una equivalencia de 1 pixel por 1 centímetro con obstáculos en forma de cubos.



Figura 6 LEGO® MINDSTORMS® NXT 2.0. Fuente: Página oficial de ventas de LEGO (LEGO Group, 2016)

Se planteo un problema sobre el mapa mostrado anteriormente, en el cual se supone un recorrido desde una bodega de almacenamiento hasta una estantería, como se muestra en la Figura 7.

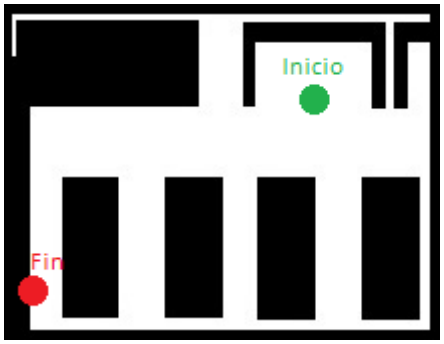


Figura 7 Puntos de inicio y fin en el problema planteado para la prueba. Fuente: Elaboración Propia

Para garantizar la exploración completa del espacio de búsqueda se requirió al algoritmo que generará 100 sujetos, y pesando en un tiempo aceptable se pidieron 35 generaciones.

En la primera generación se consiguió el objetivo de copar todo el espacio de búsqueda, como se ve en la Figura 8.

ISBN 978-607-8242-11-5

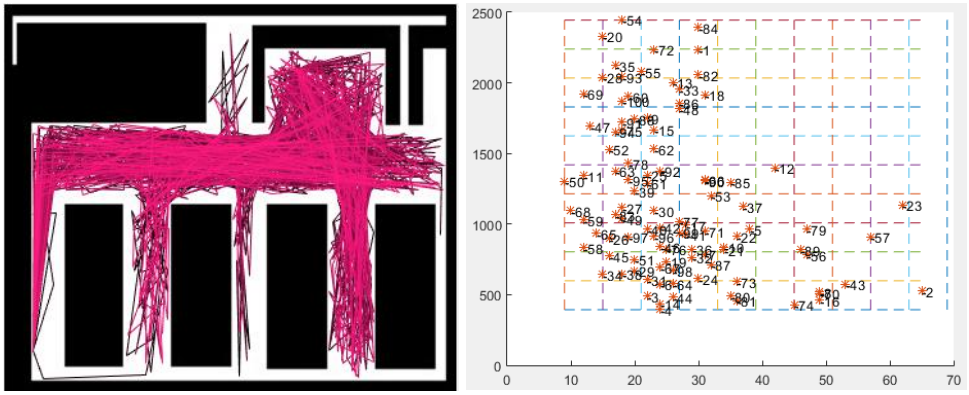


Figura 8 Población inicial de 100 sujetos. A la izquierda el fenotipo de cada sujeto y a la derecha su correspondiente frente de Pareto. Fuente: Elaboración propia

Pasadas 10 generaciones, en la Figura 9 es evidente la convergencia en el final del trayecto, y muchos de los bucles han sido eliminados. Además, en el frente de Pareto se puede observar que las soluciones existentes tienden a acercarse al origen.

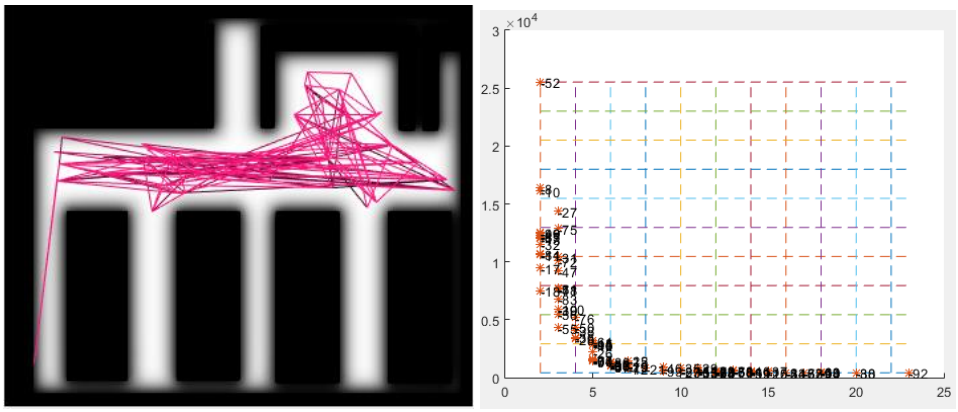


Figura 9 Frente de Pareto y Fenotipo de la población pasadas 10 generaciones

Pasadas 20 generaciones, el cambio en el fenotipo ya no es tan evidente, pero en el frente de Pareto las soluciones se aproximan cada vez más al origen.

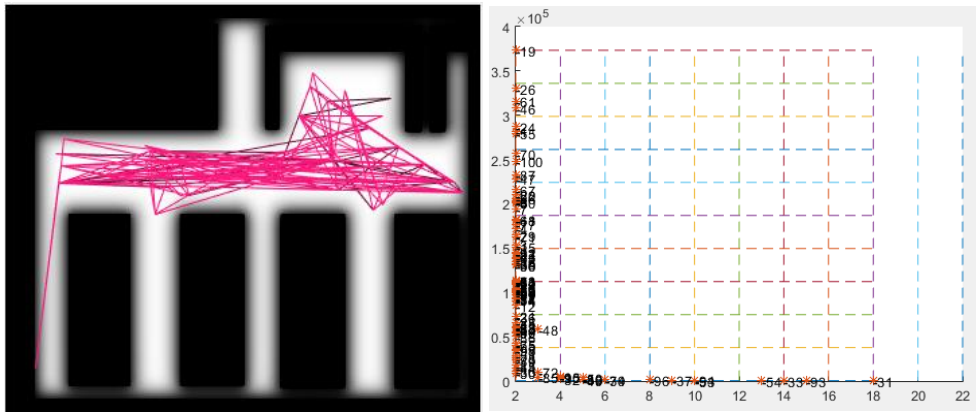


Figura 10 Frente de Pareto y Fenotipo de la población pasadas 20 generaciones

Luego de las 35 generaciones, el fenotipo continuo sin mostrar una gran variación, pero las mejoras en el frente de Pareto son considerables.

ISBN 978-607-8242-11-5

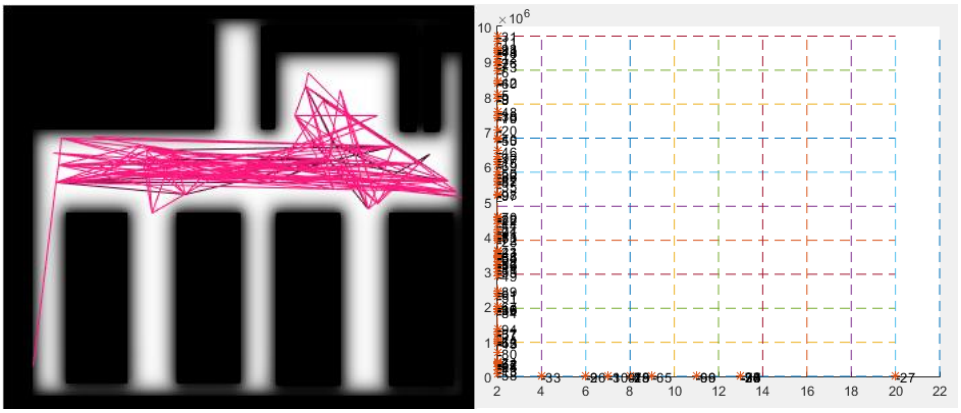


Figura 11Frente de Pareto y Fenotipo de la población pasadas 20 generaciones

Finalmente, el algoritmo entrega los 3 mejores sujetos.

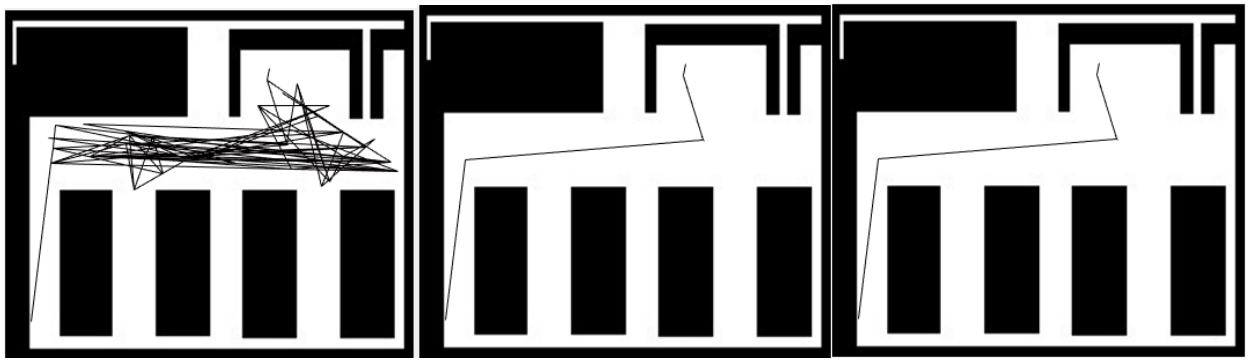


Figura 12 Mejores sujetos resultado de la evolución

Puede evidenciarse que uno de los sujetos no es una solución ideal, mientras que los otros dos sujetos son prácticamente iguales. Puede decirse que el algoritmo encontró una muy buena solución.

Se selecciono la trayectoria 3 como la mejor, esta constaba de 11 puntos que fueron enviados al robot, el cual siguió perfectamente la trayectoria con un pequeño error en la parte final, pues al llegar al punto indicado no se tuvieron en cuenta las dimensiones del LEGO por lo que se estrelló contra su punto final.

Conclusiones

Algoritmos tradicionales de generación de trayectorias presentan dificultades al momento de atacar un problema con diferentes objetivos. Al ser este, precisamente un algoritmo multiobjetivo es posible escalarlo para diferentes tipos de necesidades al interior de una empresa.

Para el caso concreto de experimento expuesto, el algoritmo no mostro mejoras significativas luego de la 15° generación, por lo que se propone que en un futuro el algoritmo sea capaz de predecir su punto de finalización.

El algoritmo es funcional y cumple los requerimientos planteados al inicio de la investigación, sin embargo, tiene aún oportunidades de mejora en cuanto al tiempo de respuesta y la supresión de desplazamientos innecesarios.

Al generar suficientes puntos aleatorios dentro de todo el espacio factible se garantiza la completa exploración del plano, y por ende la exploración de todas las posibles soluciones.

Referencias

Cifuentes Bernal, A. (2015). *DISEÑO DE SISTEMAS DE APOYO PARA SILLA DE RUEDAS INTELIGENTES EMPLEADAS POR PERSONAS CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD DEBIDAS A LESIONES DE SEXTO NIVEL CERVICAL.* Bogotá: UMNG.

Correa Espinal, A., Gomez Montoya, R., & Cano Arenas, J. (2010). GESTIÓN DE ALMACENES Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN (TIC). *Estudios Gerenciales, 26*(117), 145-171.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Elaoud, S., Loukil, T., & Teghem, J. (2007). The Pareto fitness genetic algorithm: Test function study. *European Journal of Operational Research*, 1703-1719.

Ettinger, K. (1966). *Dirección de la Producción.* Ciudad de Mexico: Herrero Hermanos Sucs.

Ferrer, L., Coves, A., & De Los Santos, M. (2004). Modelado del Transporte de Distribución Mediante Programación Lineal Entera. *Informacion Tecnologica, 15*(4), 65-69.

Harnsberger, J. (1997). *Production and inventory control handbook (3rd ed.).* New York: McGrawHill.

LEGO Group. (2016). *MINDSTORMS*. Recuperado el 14 de 06 de 2017, de https://shop.lego.com/en-CA/LEGO-MINDSTORMS-NXT-2-0-8547

Mauleon, M. (2006). *Logística y Costos.* Madrid : Diaz de Santos .

Mucahy, D. E. (1993). *Warehouse Distribution and Operations Handbook.* McGraw-Hill Handbooks.

Urzelai Inza, A. (2006). *Manual Basico de Logistica Integral.* Madrid: Diaz de Santos .

 ISBN 978-607-8242-11-5

Software Geo-Referencial de Pacientes, Neoplasias e Infraestructura Contaminante Asociados a la Radiación Electromagnética No Ionizante

SOTO-SUMUANO Jesús L. [1,2], TLACUILO-PARRA José A.[2], OLIVERA-GUERRERO Francisco J.[3], GARIBALDI-COVARRUBIAS Roberto F.[2], ROMO-RUBIO Hugo[2,4], ABUNDIS- GUTIÉRREZ Emmanuel[5]
[1] Depto. de Sistemas de Información, Universidad de Guadalajara, Periférico Norte 799, Zapopan,
[2] División de Investigación Médica, Hospital de Pediatría, Centro Médico Nacional de Occidente IMSS.
[3] Desarrollador de Sistemas Independiente, Profesor, Zapopan, Jalisco, México.
[4] División de Oncología Pediátrica, Nuevo Hospital Civil OPD UdeG, Guadalajara, México.
[5] Director de la Sociedad Mexicana para la Protección de la Radiación No Ionizante, México.
leonardo.lsoto@gmail.com, jose.tlacuilo@imss.gob.mx, fco_olivera@hotmail.com, roberto.garibaldi@imss.gob.mx, hugoromo48@gmail.com, eabundis@gmail.com

RESUMEN

Esta aplicación ofrece una solución informática al registro y visualización geo-referenciada de pacientes, neoplasias y la contaminación ambiental asociada. La información estadística generada permite a los médicos y hospitales evaluar de manera puntual el comportamiento de la enfermedad y su asociación con los elementos contaminantes, asimismo por medio de algoritmos obtener agrupamientos o "clusters" que permitan delimitar zonas de alto riesgo. De manera general la aplicación permite el estudio de pacientes pediátricos con distintas neoplasias y su asociación con diferentes contaminantes ambientales. Los resultados muestran mediante mapas, gráficas y tablas, los datos de la distribución geográfica de los pacientes, los valores de radiación recibida, los hospitales, las escuelas, las líneas de alta tensión, antenas de telecomunicaciones y las zonas de alto riesgo por contaminación. Como conclusión ahora se cuenta con una herramienta en tiempo real que facilita la creación de políticas de prevención para combatir el impacto de la radiación como uno de los posibles causantes en el desarrollo de leucemia en la población infantil considerada como un elemento más de riesgo de salud pública.

Palabras clave. Base de datos, carga ambiental de la enfermedad, clúster, contaminación electromagnética, geo-referencia, radiación no ionizante, leucemia.

ABSTRACT

This application offers a computerized solution to the registration and geo-referenced visualization of patients, neoplasms and associated environmental contamination. The statistical information generated allows physicians and hospitals to evaluate in a timely manner the behavior of the disease and its association with the pollutants, also by means of algorithms to obtain clusters that allow the delimitation of high risk areas. In general, the application allows the study of pediatric patients with different neoplasms and different contaminants. The results shows the geographical distribution of patients, radiation values received, hospitals, schools, high voltage lines, telecommunication antennas and high risk areas for contamination using maps, graphs and data tables. As a conclusion, we now have a real-time tool that facilitates the creation of prevention policies to combat the impact of radiation as one of the possible causes in the development of leukemia in the child population considered as an additional element of health risk public.

Keywords. Database, environmental burden of disease, cluster, electromagnetic pollution, geo-referencing, non-ionizing radiation, leukemia.

ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) del 16 de junio de 2006, se estima que más del 33% de las enfermedades de los niños menores de cinco años se deben a la exposición a riesgos ambientales. La prevención de estos riesgos podría salvar hasta cuatro millones de niños por año, sobre todo en países en desarrollo. Asimismo dicho informe muestra que gran parte de estos riesgos ambientales puede evitarse mediante intervenciones bien orientadas (Osseiran, 2006).

La carga de enfermedad debida a factores de riesgo asociados al medioambiente se incluyó desde sus inicios dentro de los Estudios Globales de Carga de Enfermedades (Bermejo, 2014) del año 1990 y publicados por primera vez en 1996, haciendo referencia al estudio de factores ambientales: agua y saneamiento, contaminación del aire en el interior de las viviendas y contaminación del aire en exteriores (Placeres, 2014).

Vale la pena señalar que dentro de los factores evaluados, no se considera aún a la contaminación electromagnética como riesgo, a pesar de que la carga de enfermedad y los daños derivados de su exposición ya están siendo evaluados a nivel mundial (Bermejo, 2014), muestra de ello es el evento celebrado entre la Academia Nacional de Medicina de México, el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) y el Instituto de Métrica y Evaluación en Salud de la Universidad de Washington (IHME por sus siglas en inglés) con la presentación de la publicación: La carga de la enfermedad, las lesiones y los factores de riesgo en México 1990-2013: resultados a nivel nacional y estatal (INSP, 2016).

Aun así textualmente se "**expuso la necesidad de contar con datos finos geo-referenciados para diseñar políticas de salud focalizadas en los problemas locales, así como investigar las posibles reducciones de la carga de la enfermedad en diferentes niveles socioeconómicos**". (INEGI, 2010)

El objetivo del presente trabajo es mostrar y relacionar diversos factores de riesgos medio-ambientales probados, desarrollado ante la falta o insuficiencia de datos específicos y relevantes, con la finalidad de contribuir en la construcción de la carga de enfermedad asociada a su exposición, lo cual constituye evidencia para la toma de decisiones en materia de salud ambiental.

JUSTIFICACIÓN

La aplicación desarrollada tiene por nombre **SirGeoS** y fue realizada con el apoyo y asesoría de médicos especialistas tanto de la Unidad Médica de Alta Especialidad Hospital de Pediatría del Centro Médico Nacional de Occidente del IMSS, como del Nuevo Hospital Civil de Guadalajara. Los argumentos que justifican su desarrollo fueron:

1) El reconocimiento de la exposición a la radiación electromagnética como un contaminante ambiental, por parte de la agencia internacional para la investigación del cáncer (IARC) de la OMS, quien la clasifica como: "posiblemente carcinógeno para seres humanos". (IARC, 2002), (IARC, 2011).
2) El hecho científicamente comprobado de la alta vulnerabilidad de los niños hacia cualquier tipo de contaminación que puede generar incluso cáncer, lo cual representa una preocupación y prioridad de todas las instituciones de salud, hecho evidenciado por el incremento en la tasa de incidencia anual (TIA) en particular de la leucemia aguda, ya que en México las tasas oscilan entre 5.76 a 10.12 casos /100,000 habitantes, por encima de la media mundial, (Soto Sumuano, et al. 2015), (Tlacuilo-Parra, et al. 2017).
3) La inexistencia de una aplicación de este tipo en Hospitales del IMSS que permita conjugar el registro de los pacientes, el eventual desarrollo de neoplasias y los potenciales factores de riesgo a los que se encuentra expuesto, como potenciadores de enfermedades en población pediátrica. (Fajardo-Gutierrez A, et al., 2007)

ISBN 978-607-8242-11-5

MATERIALES Y METODOLOGÍA

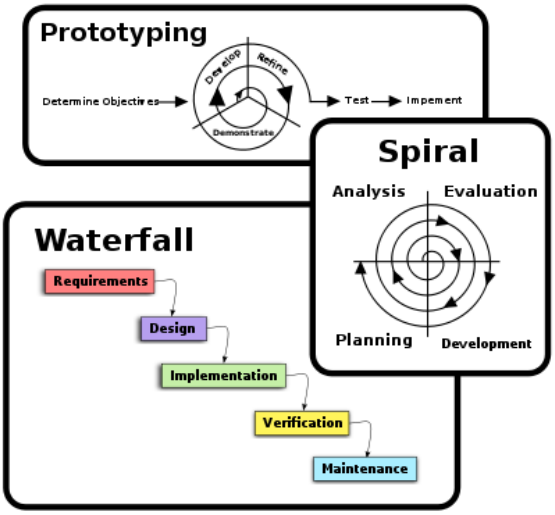
Metodología

El desarrollo de la aplicación está basada empleando la metodología combinada de prototipo, cascada y espiral (ver Fig. 1). Dicha combinación se justifica por la obtención de resultados óptimos en procesos basados en sistemas de investigación, de similar estructura. Gracias a esta combinación el proyecto tiene un ciclo de desarrollo que permite reanalizar y rediseñar partes del sistema conforme se avanza en la obtención de los datos y en los requerimientos.

La metodología de prototipos se implementó por ser un proceso de investigación y análisis de datos.

La misma rotación de la información y la estructura que se establece en el sistema hace que se requiera el uso de la metodología de la espiral, ya que es común realizar algunos cambios en el diseño del sistema puesto que es parte de lo que se va descubriendo dentro de la misma investigación.

Fig.1: Metodologías de sistemas implementadas



Herramientas utilizadas

La aplicación **SirGeoS** aquí presentada utiliza WinDev como herramienta de desarrollo cuenta con las siguientes características:

- El diseño de la base de datos en su totalidad es desarrollado en HyperFileSQL motor HFSQL dentro del entorno de WinDev.
- Permite importar la información a partir de un archivo de Excel partiendo de un formato ya preestablecido.
- Implementa Google Maps como servidor de aplicaciones de mapas en la web que ofrece imágenes de mapas e interactúa con el sistema para presentar los elementos dentro de un mapa en tiempo real.

El sistema es una aplicación de escritorio desarrollada con el lenguaje de programación WinDev versión 20. A su vez WinDev es un entorno de desarrollo integrado que permite crear aplicaciones basadas en un motor de ejecución (framework) y cuenta con las siguientes características:

- Funciona con 32 y 64 bits en Windows y Linux, con un Framework.
- Es un lenguaje de 5ta generación
- Utiliza HyperFileSQL que es el motor de base de datos incluido dentro del entorno de desarrollo.
- Permite el manejo de Queries, que mejora el rendimiento para el manejo de información y obtención de resultados de manera más rápida y eficiente, ya sea dentro de los formularios como en los reportes, gráficas y tablas de datos.

Ubicación del proyecto

Para este proyecto se determinó como lugar para la obtención de datos, la zona metropolitana de Guadalajara y 6 de sus municipios: Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco, El Salto.

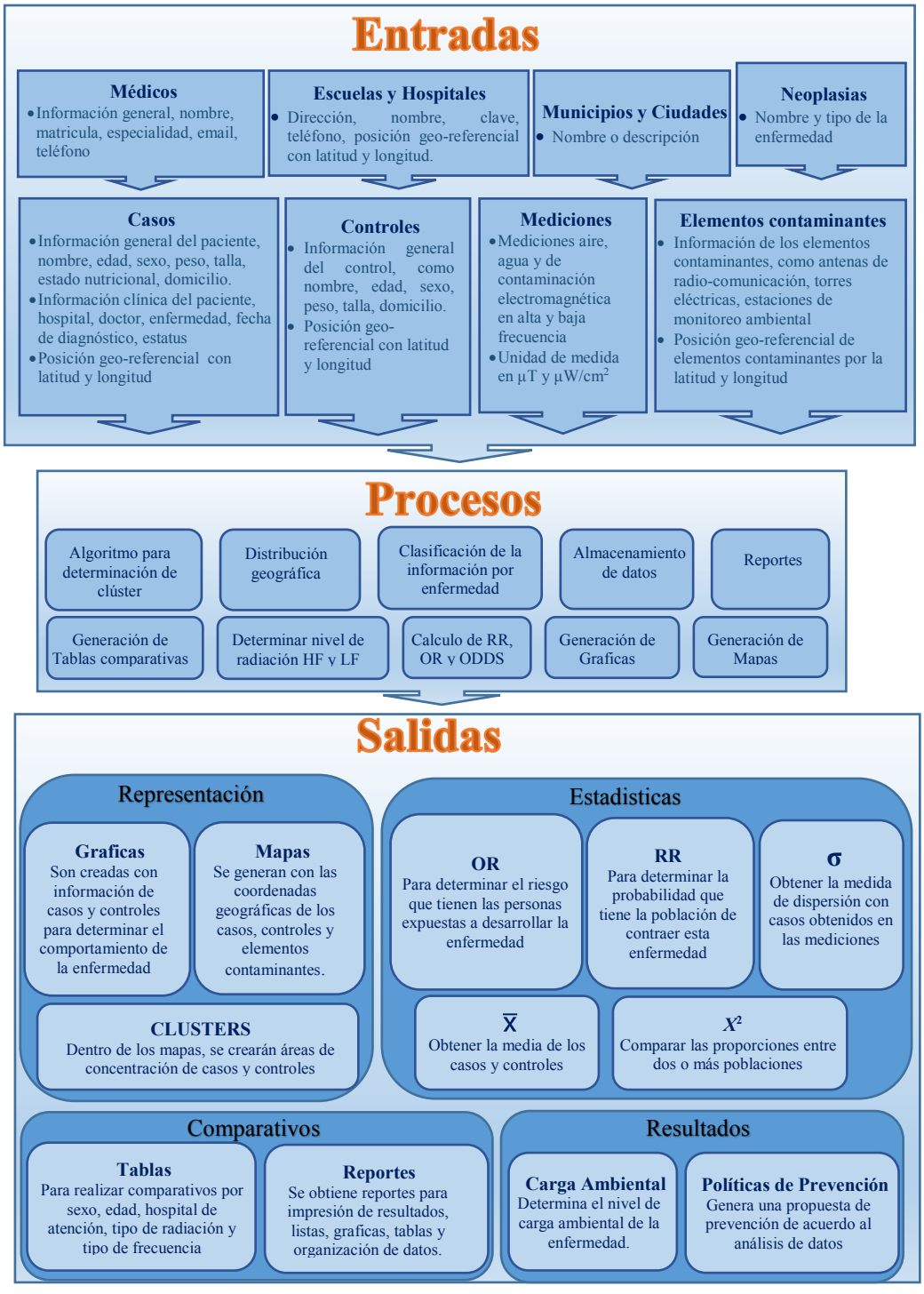
En su etapa inicial se realiza por primera vez en México un censo geo-referenciado de los casos de leucemia linfoblástica y mieloide aguda de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) (Soto Sumuano, et al. 2015) (Tlacuilo-Parra, et al., 2017) El censo representa el 95% de todos los casos atendidos en la ZMG, para lo que se establecieron procesos para obtener los valores de medición intra-domiciliaria siguiendo los protocolos de medición de los niveles de contaminación electromagnética en alta y baja frecuencia. Las mediciones de campo magnético a baja frecuencia y mediciones de campo eléctrico en alta frecuencia en el domicilio de pacientes conocidos y tratados con leucemia se realizaron utilizando el equipo HI-3604 ETS-LINDGREN (ETS-Lindgren, 2017).

ISBN 978-607-8242-11-5

Diagrama a bloques:

Para hacer más clara la parte estructural del sistema se ha creado un diagrama de bloques el cual nos permite describir de manera sencilla y rápida la estructura de los módulos y procesos que se desarrollan en la aplicación (ver Fig. 2).

Fig. 2 Diagrama a Bloques



Primeramente tenemos el bloque de "**entradas**" el cual nos muestra todos los requerimientos que necesita el sistema para obtener y registrar la información en la base de datos, como por ejemplo: datos de médicos, enfermedades, pacientes, hospitales, escuelas, ciudades, municipios, elementos contaminantes, mediciones, etc. En el bloque de **"procesos"** se integra toda la información que la aplicación utiliza para procesamiento de algoritmos, clasificación de información, distribución geográfica de elementos por medio de mapas, etc. Y en la sección de **"salidas"** nos encontramos con el producto que se genera, el cual ofrece los resultados en representaciones gráficas y en mapas así como estadísticas que permitan deducir el impacto y asociación de la enfermedad con el elemento contaminante (Cantú Martínez P, 2003).

ISBN 978-607-8242-11-5

FUNCIONAMIENTO

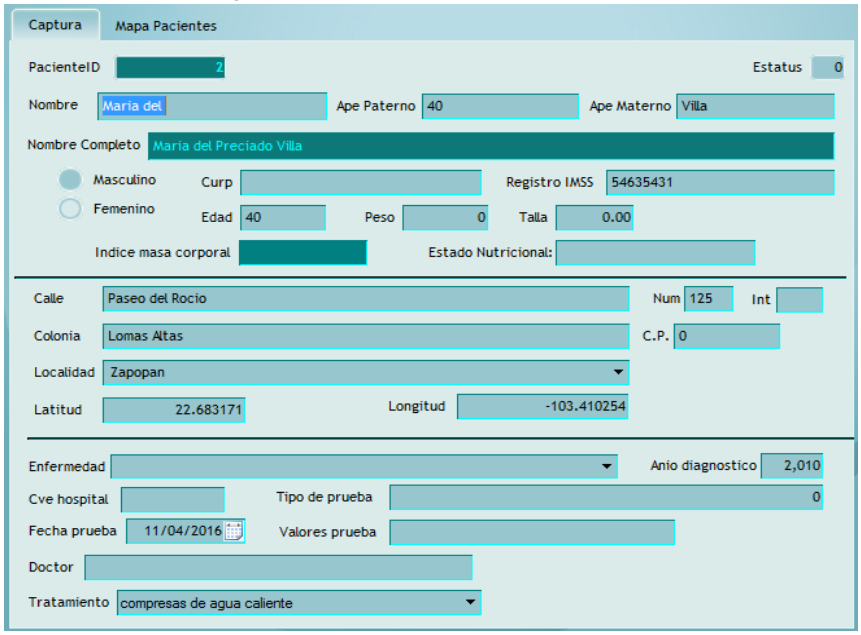
La aplicación se utiliza en el Departamento de Hemato-Oncología, de la UMAE Hospital de Pediatría, CMNO del IMSS en Guadalajara, con el logo para su reconocimiento en la institución (Fig. 3). El sistema establece como parte principal la captura del catálogo de pacientes. Que incluye dar de alta ciudades, municipios, médicos, escuelas, hospitales, enfermedad y su tipo, factores contaminantes y unidades de medida, que son requeridas para el llenado del formulario de cada paciente.

Fig. 3 Logo del Sistema



Además el sistema es capaz de importar datos que estén en una tabla de Excel siguiendo un formato propio de la aplicación. Para casos nuevos la aplicación tiene una pantalla de captura de información de todos los catálogos de datos (ver Fig. 4).

Fig. 4 Pantalla de captura de pacientes



A continuación se presentan los iconos utilizados en el mapa de acuerdo al estatus o tipo de elemento:

- Niña/niño con estatus de ALTA
- Niña/niño con estatus de baja radiación en alta y baja frecuencia
- Niña/niño con alta radiación en alta y baja frecuencia
- Niña/niño con alta radiación en alta frecuencia, baja radiación y baja frecuencia
- Niña/niño con alta radiación en baja frecuencia, baja radiación en alta frecuencia
- Niña/niño con estatus de excluido del programa
- Niña/niño con estatus de fallecido
- Antenas de telefonía
- Antenas de Radio
- Escuelas
- Hospital
- Líneas de Transmisión
- Cables de alta tensión
- Subestaciones eléctricas
- Puntos de medición ambiental
- Antenas de Wi-Fi

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS

Ejemplos de resultados que el sistema emite después del procesamiento de la información por medio de tablas, gráficas y mapas.

Tabla 1 Campo Eléctrico

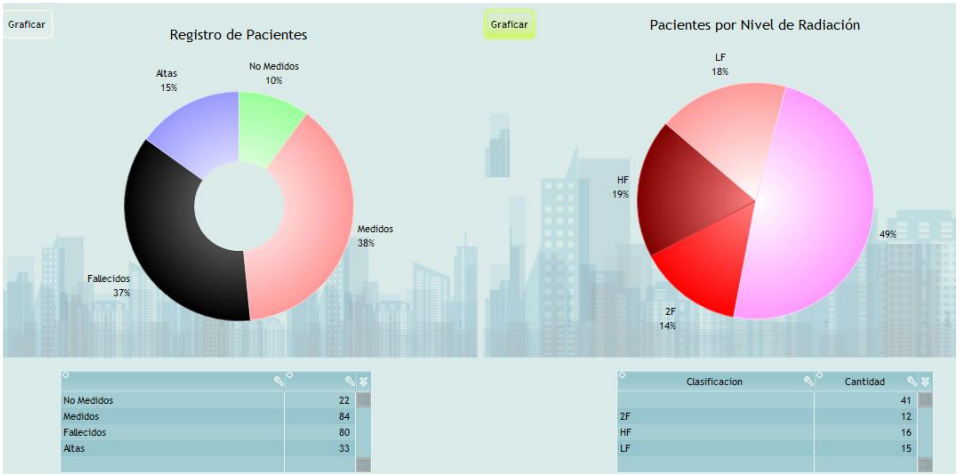
Radiación: Campo Eléctrico	Número de casos	% Total de Casos
R ≥ 1 μW/cm^2	28	33.33%
0.5 ≤ R < 1 μW/cm^2	15	17.86%
R < 0.5 μW/cm^2	41	48.81%

Tabla 2 Campo Magnético

Radiación: Campo Magnético	Número de casos	% Total de Casos
R ≥ 0.3 μT	27	32.14%
0.1 ≤ R < 0.3 μT	12	14.29%
R < 0.1 μT	45	53.57%

Las tablas 1 y 2 muestran los casos con valores de radiación clasificados en 3 opciones, tanto para campo eléctrico como para campo magnético. Valores en alta (≥ 1 μW/cm^2) y baja (≥ 0.3 μT) frecuencia.

Fig. 5 Resultados por Gráficas



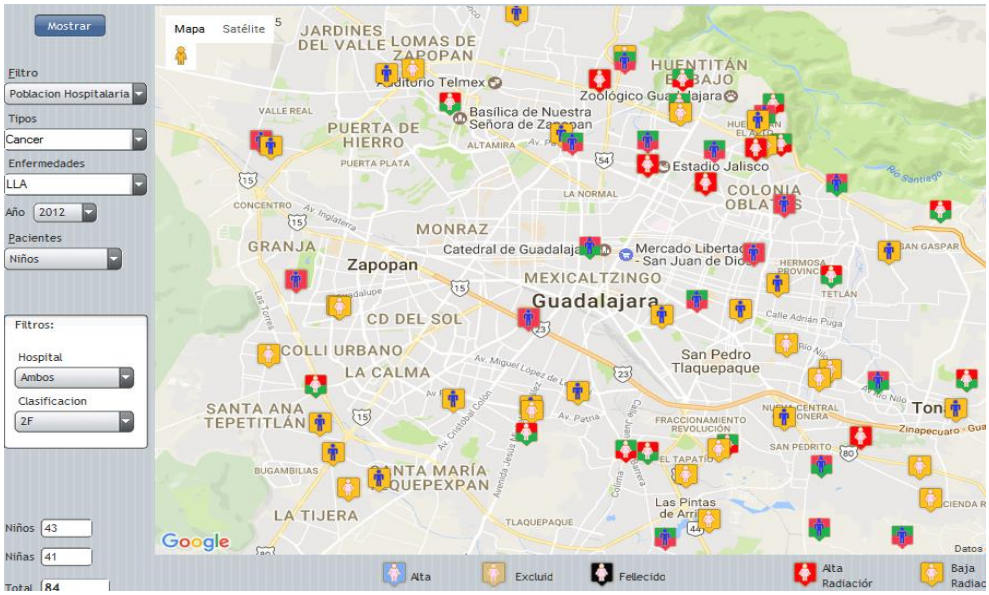
La Fig. 5 muestra resultados por medio de gráficas del registro de pacientes y del nivel de radiación de los pacientes así como sus porcentajes de distribución. La Fig. 6 muestra mapas generados y su distribución geográfica de tipo de pacientes, escuelas, hospitales y elementos contaminantes.

Según el tipo de enfermedad seleccionada al inicio del sistema se filtran la información de dicha enfermedad, además en la opción de mapas se cuenta con un filtro de datos que muestra la información de acuerdo a las opciones seleccionadas.

La ventana muestra el mapa que es un API de “Google Maps” insertada dentro de la aplicación para el manejo geo-referencial de la información.

ISBN 978-607-8242-11-5

Fig. 6 Resultados por Mapa



En las tablas 3 y 4 comparativas de resultados los valores obtenidos en el proceso de medición son clasificados en alta y baja frecuencia y a su vez en alta y baja radiación para niños y niñas, además de la clasificación de la enfermedad en LLA (Leucemia Linfoblastica Aguda) y LMA (Leucemia Mieloide Aguda).

Tabla 3 Distribución de la radiación vs las leucemias en alta frecuencia.

Alta Frecuencia							
Alta Radiación				**Baja Radiación**			
Niños		Niñas		Niños		Niñas	
LLA	LMA	LLA	LMA	LLA	LMA	LLA	LMA
13	2	11	2	22	3	30	1
15.48%	2.38%	13.10%	2.38%	26.19%	3.57%	35.71%	1.19%

Tabla 4 Distribución de la radiación vs las leucemias en baja frecuencia

Baja Frecuencia							
Alta Radiación				**Baja Radiación**			
Niños		Niñas		Niños		Niñas	
LLA	LMA	LLA	LMA	LLA	LMA	LLA	LMA
15	2	7	3	20	3	34	0
17.86%	2.38%	8.33%	3.57%	23.81%	3.57%	40.48%	0.00%

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

En esta propuesta de desarrollo se crean las bases de registro de toda la información necesaria para evaluar la carga ambiental de la enfermedad en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Esta primera fase implementa mapas geo-referenciados de la información de los pacientes, enfermedades y contaminación ambiental asociada a los campos electromagnéticos. (Soto Sumuano, L., 2014)

Contamos con una herramienta que permite identificar y analizar en tiempo real, la existencia de zonas de alto riesgo para el desarrollo de la leucemia en la población infantil, derivadas de la exposición a contaminantes ambientales, considerados como un riesgo de salud pública para los sujetos sanos, permitiendo crear políticas de prevención o mitigación de dicho efecto. (Cantú Martínez P, 2003)

La colaboración entre ingenieros y médicos permitió el desarrollo de una aplicación especializada, que permite evidenciar, medir y analizar la interacción existente entre la contaminación ambiental y el desarrollo de enfermedades utilizando información geo-referenciada útil para la toma de decisiones en salud. (Martínez de Jordán M, 2009),(Jarup, 2004).

Referencias

Bermejo, D. P. (2014). Recuperado el 10 de 01 de 2017, de Carga de la enfermedad ambiental, Biblioteca Virtual en Salud de Cuba.: http://www.bvs.sld.cu/revistas/hie/vol42_3_04/hig01304.htm

Cantú Martínez P, G. G. (2003). EL VALOR DE LA ESTADÍSTICA PARA LA SALUD PÚBLICA. *Revista Salud Pública y Nutrición*.

ETS-Lindgren. (2017). Recuperado el 10 de 01 de 2017, de ETS-Lindgren: http://www.ets-lindgren.com/HI-3604

Fajardo-Gutierrez A, Juarez-Ocaña, S., Gonzalez-Miranda, G., Palma-Padilla, V., Carreon-Cruz, R., Ortega-Alvarez, M., & Mejia-Arangure, J. (2007). Incidence of cancer in children residing in ten jurisdictions of the Mexican Republic: importance of the cancer registry (a population based study). *BMC Cancer*, 7: 68.

IARC. (2002). *IARC Monographs Evaluation Carcinogenic Risks Hum. 2002.* Geneve: WHO.

IARC. (2011). *IARC Monographs Eval Carcinog Risks Hum.* Geneve: WHO.

INEGI. (2010). *Instituto Nacional de Estadistica y Geografia (INEGI)*. Obtenido de [http://inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras]

INSP. (2016). Recuperado el 10 de 01 de 2017, de Instituto Nacional de Salud Publica: https://www.insp.mx/avisos/3917-estudio-carga-enfermedad.htm

Jarup, L. (2004). Health and environment information systems for exposure and disease mapping, and risk assessment. *Environ Health Perspect*, 112:995-7.

Martínez de Jordán M, R. R. (2009). Análisis estadístico de la población infantil con cáncer en los principales centros urbanos del país.

Osseiran, N. (2006, 01 02). *Organizacion Mundial de la Salud*. Retrieved 01 10, 2017, from Organizacion Mundial de la Salud: http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2006/pr32/es/

Placeres, D. M. (2014). Recuperado el 10 de 01 de 2017, de Biblioteca Virtual en Salud de Cuba: http://www.bvs.sld.cu/revistas/hie/vol52_2_14/hie01214.htm

Soto Sumuano, L., Ruiz Chavez, C., Tlacuilo Parra, A., Garibaldi, R., Romo, H., & Arriaga Dávila, J. (2015). *Geographical Distribution of Childhood Acute Leukaemia in the Metropolitan Area of Guadalajara, Mexico and Its Correlation with th Wireless and High Voltage Networks.* Recuperado el 10 de 01 de 2017

Soto Sumuano, Leonardo. (2014). *Radiación Electromagnética no Ionizante en escuelas y hospitales de la zona metropolitana de Guadalajara.* Guadalajara, México: AmateEditorial.

Tlacuilo-Parra, A., Garibaldi-Covarrubias, R., Romo-Rubio, H., Soto-Sumuano, L., Ruiz-Chávez, C. F., Suárez-Arredondo, M., Gallegos-Castorena, S. (Febrero de 2017). Geographical Distribution And Cluster Detection of Childhood Leukemia in the Metropolitan Area of Guadalajara, México. *Revista de Investigación Clínica, 69*(3), 159-165.

 ISBN 978-607-8242-11-5

CFD Simulation of a Stirred-Tank Reactor in the Soybean Oil Hydrolysis under Subcritical Water Conditions

Andrés Aldana Rico[1,4], Johnnys Bustillo Maury[2,4] y Antonio Bula Silvera[3,4]
(1) afaldana@uninorte.edu.co
(2) bjohnnys@uninorte.edu.co
(3) abula@uninorte.edu.co
(4) Mechanical Engineering Department, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Abstract

On this paper CFD modeling use on second order chemical reaction systems is presented. The Soybean oil hydrolysis under subcritical water conditions was established as the base process to simulate the fatty acid generation and reaction yield based on (C.A. Schall, 2013) kinetics. Turbulence effects were considered under the RANS and κ- ϵ equation systems. Computational experiments were performed under three heating source levels, and the cross sectional area of a real reactor was used as geometric base for the domain establishment. MRF meshing technique was applied with focal refinement. The obtained results effectively represented the experimental values at 548K.

Keywords: Oil hydrolysis, Subcritical water, Autocatalytic reaction systems, Computer Fluid Dynamics, Turbulent heat and mass transfer

INTRODUCTION

Subcritical water -SW- has become one of the most interesting substances to perform hydrolysis of lipids, recent studies have explored the use of this fluid in different biomasses such as wheat straw (W. Abdelmoez, 2014), algae (S. Deng, 2014), and vegetable oils such as sunflower (R. Alenezi, 2009), soybean (C.A. Schall, 2013) or corn (F. Lancas, 2006). Subcritical water has also shown significant advantages in the oil extraction processes, according to (X.-D. Fan, 2015) times can be reduced 8 times compared to steam distillation extraction, also the yield increases approximately a 21.5% compared with the same method.

Actually the subcritical processing of lipids have been studied in laboratory scale, (W. Abdelmoez, 2014) used a continuous system in pipe reactors, (S. Deng, 2014) used a microwave reactor, (R. Alenezi, 2009) used a continuous reactor coil and (C.A. Schall, 2013) performed the process in a stirred tank in batches. Due to the nature of the process, limited kinetic data is available (S. Adachi, 2004) indicated that SW hydrolysis of fatty acid esters in a batch reactor responds to a first order kinetics, (C.A. Schall, 2013) provided a divided mechanism composed by a first order set of sequential reactions and a second set of auto catalytic reactions. The laboratory scale experimentation implies the use of specialized equipment that operates at high pressure and temperature which represents that using simulation tools such as Computer Fluid Dynamics -CFD- could help to increase the research capabilities on this field using the experimental data actually obtained as a comparison measure. (R.H. Natelson, 2012) performed a CFD simulation of canola oil hydrolysis.

In tank reactor analysis CFD has been widely used to analyze the hydrodynamics, mixing properties and chemical reaction kinetics of several processes. (E. Molga, 2004) performed a CFD analysis in homogeneous and heterogeneous reaction systems using Eulerian-Eulerian framework approach; (J. Baldyga, 2001) used CFD to establish the effect of mixing on parallel chemical reactions and (X. Jia, 2014) modeled a gas-liquid system in a multiphase stirred tank reactor.

In this paper, CFD modeling is used to simulate the hydrolysis of soybean oil according to the kinetics expressed by (C.A. Schall, 2013), using COMSOL MULTIPHYSICS—in 0D and 2D obtaining a projected yield and establishing which zones of the cross section have differences in concentration of the species and fluid mixture temperature.

 ISBN 978-607-8242-11-5

PHENOMENON DESCRIPTION

Subcritical Water Characteristics

Water is considered to be in subcritical state at a temperature range varying between 100°C to 374°C, at that range the hydrogen bonds due to thermal agitation are weakened which generate a significant decrease on the dielectric constant of the fluid, thus increasing the solubility of normally hydrophobic compounds such as lipids and aromatics (A. G. Carr, 2011). Figure 1 illustrates the behavior of this property at different temperatures of saturated water. The increase on hydrophobic compound solubility in subcritical water is caused due to the reduction of this properties (C. Turner, 2015): Hydrogen-bond donating ability (Acidity), Hydrogen-bond accepting ability (Basicity) and Polarity.

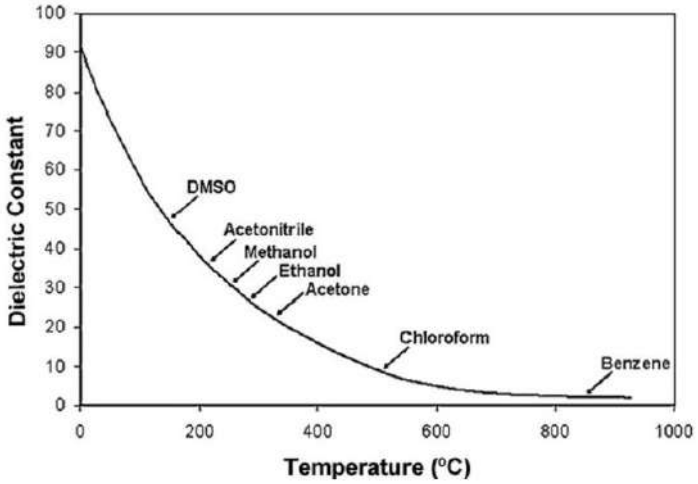


Figure 1: Dielectric constant of water behavior with temperature increase and the comparison with organic solvents values (A. G. Carr, 2011)

Soybean Oil Characteristics

Soybean seeds oil content normally varies between 19 to 21% wt.[A. Dijkstra (2016)] and commercially it's available in three types, crude degummed, once refined and fully refined; and depending on the type, a specific standard applies. This substance has the following particular fatty acid profile (S.Z. Erhan, 2002).

Table 1: Soybean oil fatty acid profile

Substance	***Palmitic (16:0)***	***Stearic (18:0)***	***Oleic (18:1)***	***Linoleic (18:2)***	***Linolenic (18:3)***
Soybean Oil	6.0	5.2	20.2	63.7	5.0

Liquid density, thermal conductivity and specific heat of the soybean oil lipid fraction can be calculated according to the following expressions (G.V. Barbosa-Canovas, 2002):

$$\rho = 9.2559 \text{ x } 10^{-2} - 0.41757 * T \quad (1)$$

$$k = 0.18071 + 2.7604 \text{ x } 10^{-3} * T - 1.7749 \text{ x } 10^{-7} * T^2 \quad (2)$$

$$C_P = 1.9842 + 1.4733\ x\ 10^{-3} * T - 4.8008\ x\ 10^{-6} * T^2 \quad (3)$$

Figure 2. Shows the oil viscosity and the temperature impact on this property was reported by (C.C. Ting, 2011).

ISBN 978-607-8242-11-5

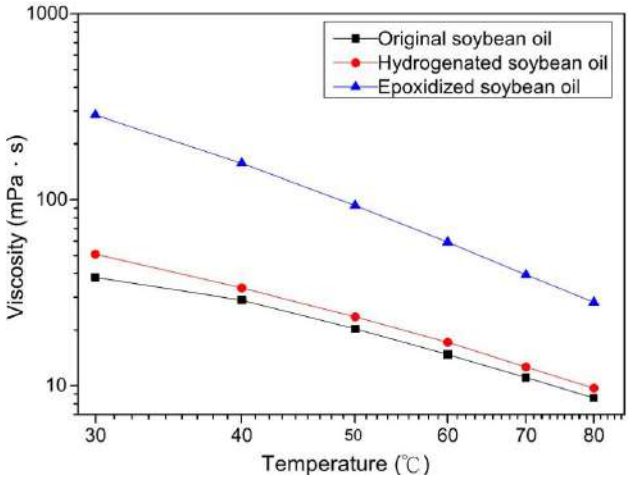


Figure 2: Temperature dependent viscosity of several soybean oils (C.C. Ting, 2011)

Oil hydrolysis reaction

Soybean oil can be considered as a predominant mixture of carboxylic acid esters and water. The hydrolysis of this kind of material has been widely studied and the overall mechanism of reaction is shown on equation 4 (N.L. Wolfe, 2000):

$$R - COO - R + OH^{-} \rightarrow R - COOH + HOR \tag{4}$$

Subcritical water oil hydrolysis kinetics

[R. Alenezi (2009)] found that the fatty acid yield in a subcritical water hydrolysis of sunflower oil described a sigmoidal function which suggest an autocatalytic phenomenon involved; according to that (C.A. Schall, 2013) formulated the following reaction system:

$$TG + W \leftrightarrow DG + FA \tag{5}$$

$$DG + W \leftrightarrow MG + FA \tag{6}$$

$$MG + W \leftrightarrow G + FA \tag{7}$$

$$TG + FA + W \leftrightarrow DG + 2FA \tag{8}$$

$$DG + FA + W \leftrightarrow MG + 2FA \tag{9}$$

$$MG + FA + W \leftrightarrow G + 2FA \tag{10}$$

Equations 5 to 7 describe the standard set of the system, meanwhile equations 8 to 10 represent the auto-catalytic part of the phenomenon. (M. Diasakou, 1998) found that the standard section of the set in a transesterification phenomenon showed similar reaction rates, so (C.A. Schall, 2013) suggested to couple the kinetic rates of equations 5 to 10 in two groups, one for the standard and a second value for the auto-catalytic section assuming an Arrhenius dependency over temperature. Table 2 shows the kinetic parameters of the system.

Table 2: Kinetic parameters of the system

Section	***Direction***	***Frequency Factor***	***Activation Energy J/mol***
Standard	Forward	3.91	90,290
Standard	Reverse	1.2937×10^{8}	158,750
Auto Catalytic	Forward	2.6414×10^{-8}	26,770
Auto Catalytic	Reverse	0.875	95,230

On table 2, frequency factor units are (m^3/s mol) for the standard section and (m^6/s^2 mol) for the autocatalytic part of the system.

ISBN 978-607-8242-11-5

APPLIED METHODOLOGY

Simulation strategy

Simulation can be seen as a copy of a real-world situation, in chemical engineering processes this feature is extremely important to acquire knowledge of a complex process (S. Bandyopadhay, 2014). In this case COMSOL MULTIPHYSICS™. Chemical engineering module was used to simulate the behavior of a reaction system based on the kinetics described in section 2 on a batch stirred reactor, looking to establish if the behavior of target variables such as conversion yield and species concentration are homogeneous inside the equipment or if there are zones with higher efficiency among the studied domain. Figure 3 illustrates the applied methodology:

Process description

The simulation was configured assuming a 250ml stainless steel batch reactor (Amar Equipments PVT. Model AC2503392) dimensions and heating method (Figure 4), agitation speed was assumed 700rpm, and a 1:4 oil to water ratio was set, and a 14%wt of the whole reactor charge amount of linoleic acid was considered added as a catalyst, then the agitation starts to develop a flow pattern and finally the heating source is activated assuming a constant temperature on the whole heater. Simulation time was 40 minutes and the computational experiment was done with three temperature levels (523, 548 and 573K) in order to establish comparison baselines with the (C.A. Schall, 2013) experiment.

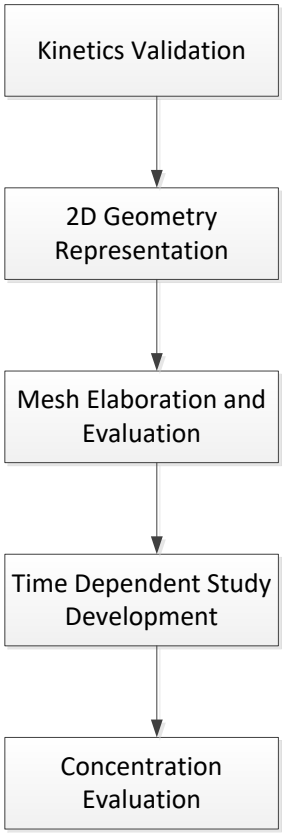


Figure 3: Simulation methodology

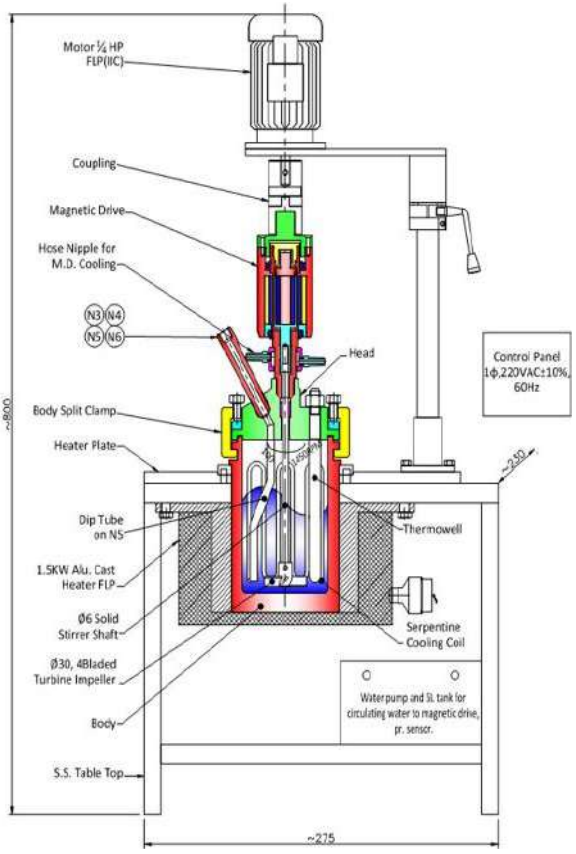


Figure 4: Considered Reactor Drawing

RESULTS

Kinetics Validation: 0D experiments

After configuring the computational suite with the reaction kinetics established in section 2, a non-dimensional study was performed assuming perfect mixing. Species concentration, mixture temperature and fatty acid (FA) yield were established as target variables and in this case a 100min (6000s) process time was simulated at 523K, 548K and 573K. Figures 5 and 6 shows the species concentration and temperature drop profiles respectively for each temperature level. The obtained results on species concentration show a positive influence.

ISBN 978-607-8242-11-5

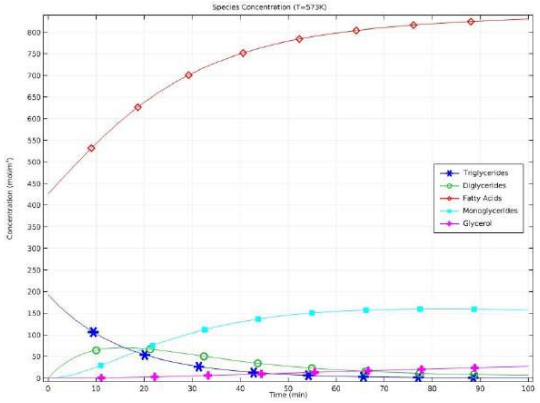


Figure 5: Species concentration profiles obtained for 523K

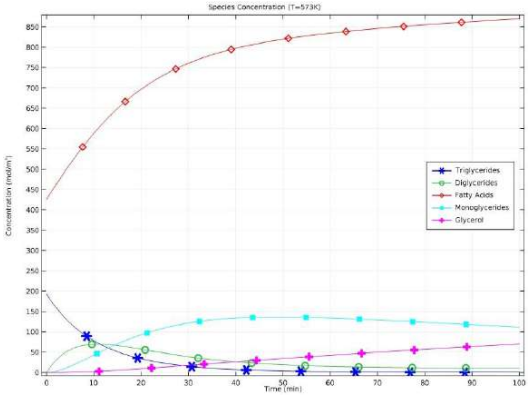


Figure 6: Species concentration profiles obtained for 548K

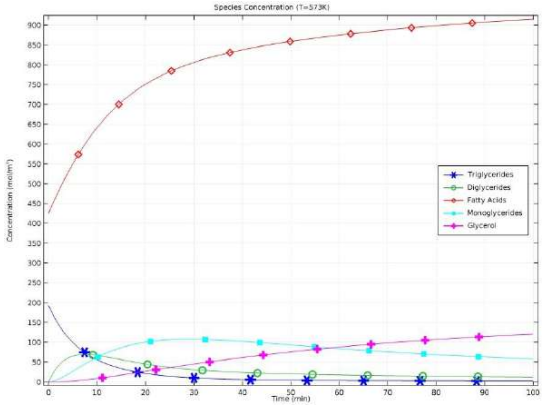


Figure 7: Species concentration profiles obtained for 573K

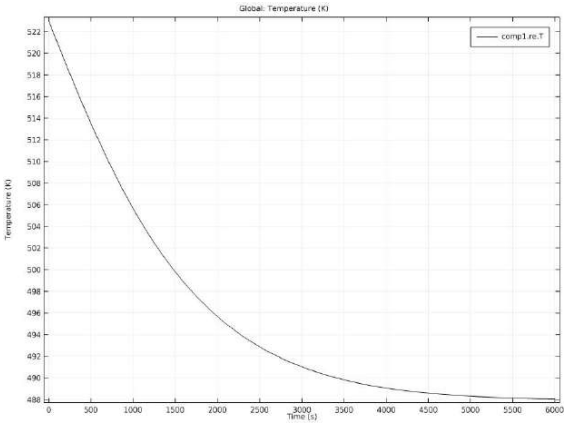


Figure 8: Mixture temperature profiles obtained for 523K

ISBN 978-607-8242-11-5

Figures 5, 6 and 7 show that the fatty acid production is favored with higher reaction temperatures, this could be seen comparing the ranges of FA concentration that are significantly bigger at 573K; also the reaction kinetics reaches stability faster due to the earlier apparition of the inflection point indicating a longer stabilization period at higher temperatures, evaluating this criteria it could be seen that at 573K the inflection point appears almost 10min earlier compared to 523K. Moreover,

The Figures 8, 9 and 10 confirm the positive impact of a higher reaction temperatures on the system. Temperature drop was 4˚C lower at 573k than 523K, and temperature stabilization was faster at initial higher temperatures.

FA yield was defined by the following expression:

$$Y_{FA(t)} = \frac{C_{FA(t)} - C_{FA(i)}}{3\, C_{TG(i)}} \tag{11}$$

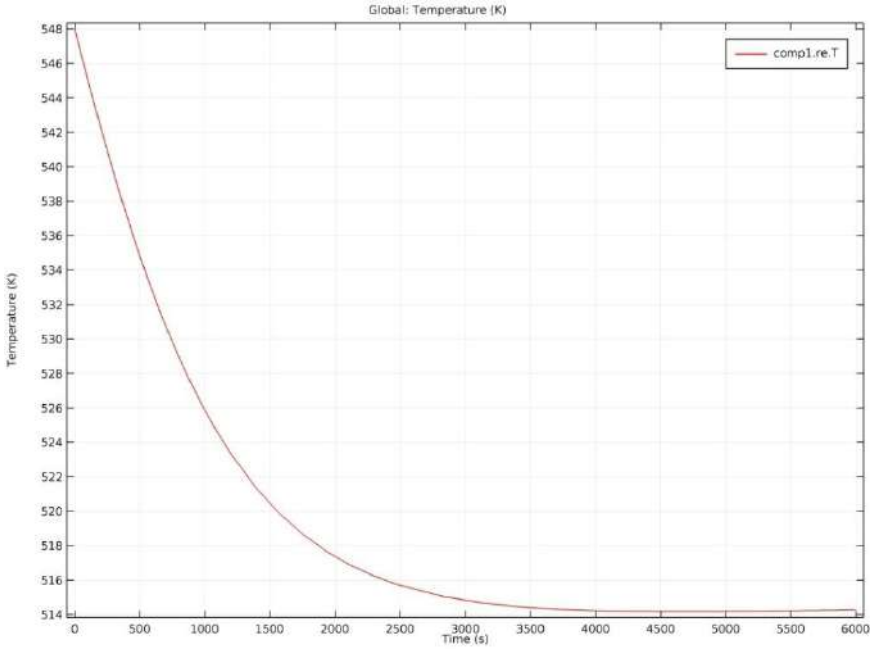


Figure 9: Mixture temperature profiles obtained for 548K

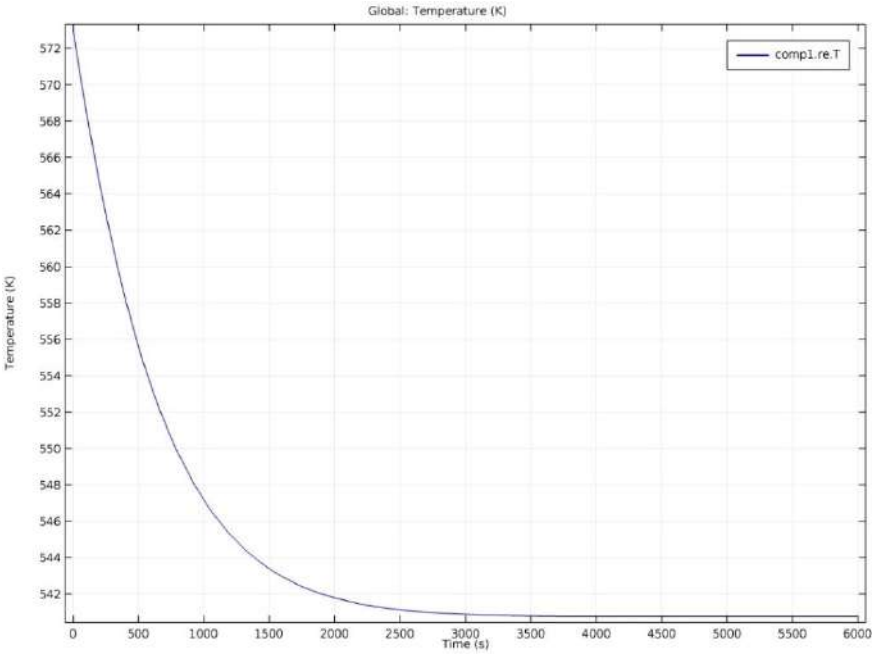


Figure 10: Mixture temperature profiles obtained for 573K

ISBN 978-607-8242-11-5

Figures 11 to 13 show the obtained Y_{FA} on each reaction temperature and confirm the positive impact of carrying the reaction at higher temperatures, showing a conversion yield nearly 15% larger at 573K than the one obtained at 523K after 100min of process.

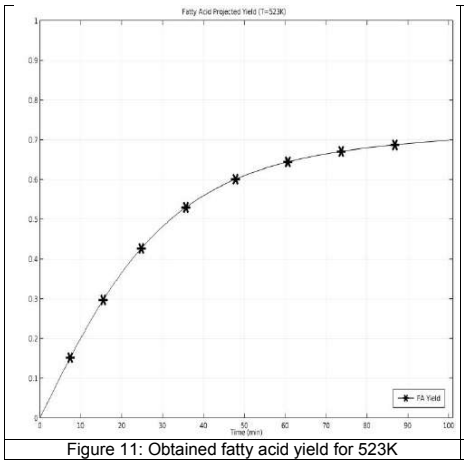


Figure 11: Obtained fatty acid yield for 523K

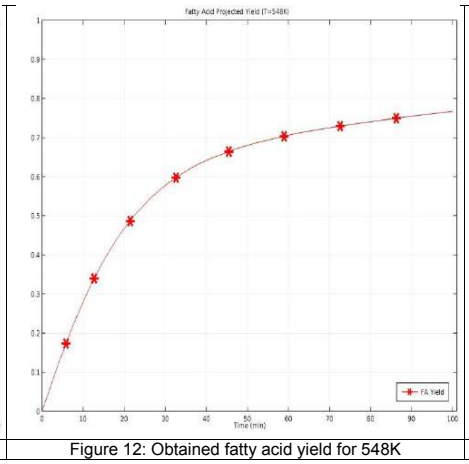


Figure 12: Obtained fatty acid yield for 548K

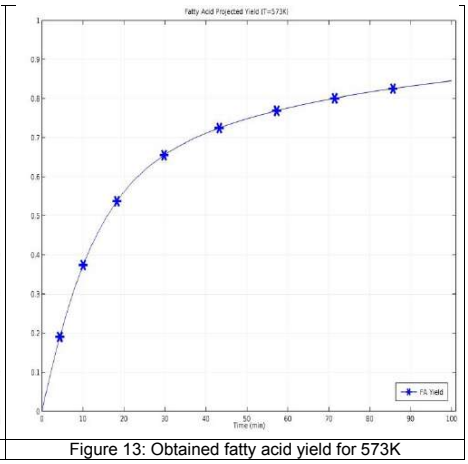


Figure 13: Obtained fatty acid yield for 573K

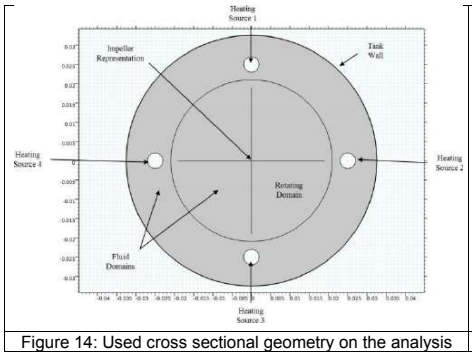


Figure 14: Used cross sectional geometry on the analysis

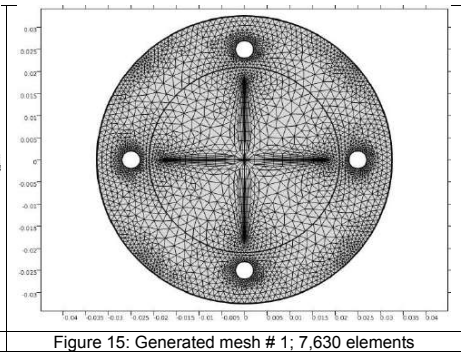


Figure 15: Generated mesh # 1; 7,630 elements

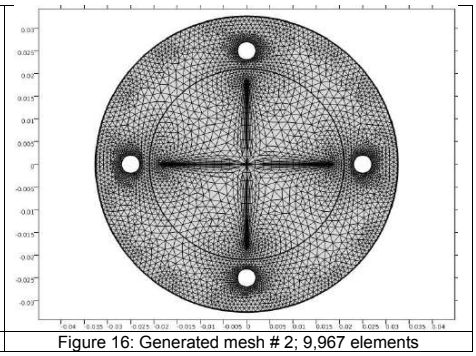


Figure 16: Generated mesh # 2; 9,967 elements

ISBN 978-607-8242-11-5

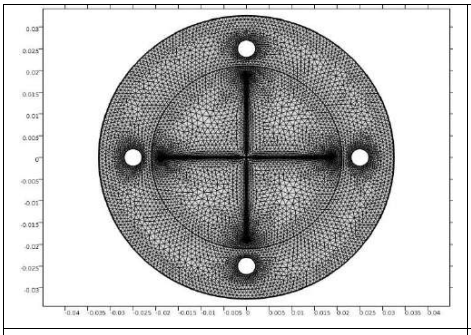


Figure 17: Generated mesh # 3; 16,402 elements

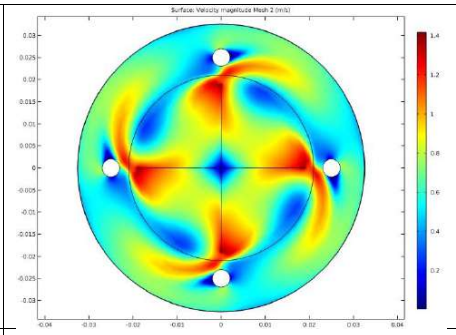


Figure 18: Mesh # 1 developed velocity profile

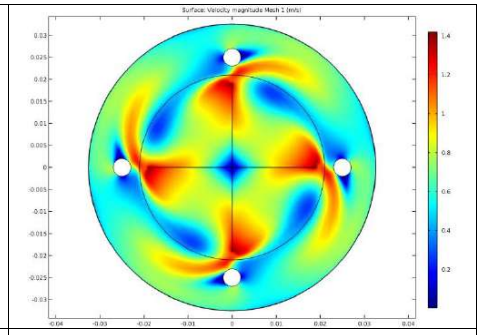


Figure 19: Mesh # 2 developed velocity profile

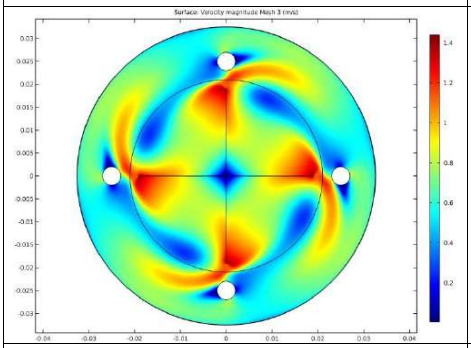


Figure 20: Mesh # 3 developed velocity profile

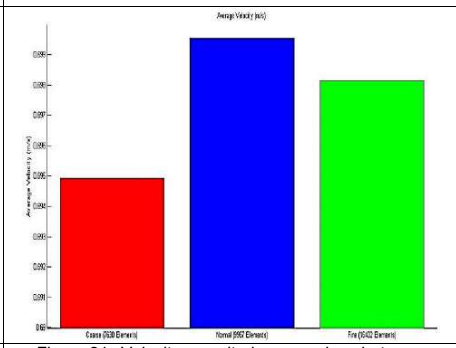


Figure 21: Velocity magnitude comparison between meshes

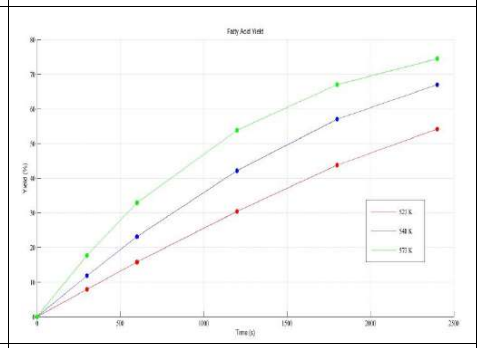


Figure 22: Time dependent study obtained FA yield

ISBN 978-607-8242-11-5

2D Geometry representation

The phenomenon is going to be represented as a cross section of the considered tank, Figure 14 shows an illustration of the used geometry.

Mesh elaboration and evaluation

Mesh generation

On the figure 14 geometry a heterogeneous mesh was generated with a domain decomposition technique (R.K. Connelly, 2007) establishing a central rotating frame and an inertial frame were the momentum equations are solved ordinarily. Beside the multiple reference frames, also due to the nature of the phenomenon, refinement of the mesh was applied on the critical zones of the geometry (Impeller, heat sources and rotating domain) and relaxation was applied on the tank wall domain. Three meshes were generated; Figures 15, 16 and 17 illustrate them.

Mesh independence analysis

To determine which one of the generated meshes was adequate for the study, a stationary state mixing simulation exercise was performed with the absolute velocity as target variable. The evaluation was based using the results of 33 common points on the system between meshes and graphic comparison of the obtained velocity profiles showed on Figures 18 to 20. Visual evaluation showed slight changes on the high velocity sectors of the profile mainly on Mesh #1. Common points absolute velocity is shown on figure 21 confirming that the results between mesh #2 and #3. are more close compared with mesh #1. Mesh selection index is established according to the following expression:

$$MS_I = \frac{U_{M(i)} - U_{M(i-1)}}{E_{M(i)} - E_{M(i-1)}} \tag{12}$$

Where:

$MS_I = Mesh\ Selection\ Index$, $U_M = Velocity\ Magnitude$ and $E_M = Mesh\ Element\ Account$

Operating expression (12) the values of $MS_{I(1\rightarrow 2)}$ and $MS_{I(2\rightarrow 3)}$ are $1.98\text{x}10^{-6}$ and $2.17\text{x}10^{-7}$ showing that changing from Mesh #2 to #3 has 10 times less impact than going from #1 to #2. According to that Mesh #2 was selected.

Time dependent study

Governing equations

Due to the phenomenon nature it is probable that viscous forces infer on fluid behavior; thus RANS equation system was used to calculate the momentum and heat transfer in the domains (D.A. Caughey, 2014). Continuity and kinetic equations were used to estimate the species concentrations.

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{13}$$

Momentum equation (14)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left(-2Pl + (\mu + \mu_t)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_t)(\nabla \cdot u)l - \frac{2}{3}\rho k l\right) + F$$

Turbulent kinetic energy equation

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right) + P_k - \rho\epsilon \tag{15}$$

Turbulent dissipation rate equation

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\nabla \epsilon\right) + C_{\epsilon(1)}\frac{\epsilon}{k}Pk - C_{\epsilon(2)}\rho\frac{\epsilon^2}{k} \tag{16}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Turbulent viscosity equation	$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\epsilon^2}{k}$	(17)
Reynolds stress tensor equation	$Pk = \mu_t \left[(\nabla u) : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3}\rho k \nabla \cdot u$	(18)
Turbulent heat equation	$\rho C_P \frac{\partial T^2}{\partial t} + \rho C_P u \cdot \nabla \mathrm{T2} = \nabla \cdot (\mathrm{k} \nabla \mathrm{T2}) + \mathrm{Q}$	(19)
Reaction rates equation	$R_i = \nabla(-D_i \nabla C_i) + u \cdot C_i$	(20)
Molar flow equation	$N_i = -D_i \nabla C_i + u C_i$	(21)

Yield results

As it was shown on the 0D section, temperature elevation has a positive influence on the FA production, in the dynamic simulation a GAP increase appears between the different temperature levels as an example, the yield at 573K and 2400s (40min) in this study is 20% meanwhile on the 4.1 section was near 16%, this can be explained due to the contact increase between the molecules caused by the induced rotational movement of the impeller.

Fatty acid concentration results

The fatty acid profile on the cross sectional area was recorded every 10min (600s), initial concentration of FA was 346.3mol m^{-3} recorded results can be seen on figures 23, 24, 25 and 26 that showed almost identical shaped profiles among temperatures but the magnitude of FA concentration is significantly higher on the 573K captions.

Temperature behavior results

Temperature distribution is another comparison point between the reaction treatments, now looking for uniformity instead of magnitude.

Figures 27 to 29 confirm the impact of having the process at 573K, increasing the heat source temperature helps to minimize the spread of the cool zone created near the impeller center.

CONCLUSIONS

CFD modeling is an effective tool to simulate the Soybean oil hydrolysis under subcritical water conditions, describing the process dynamics in a similar way compared with physical experimentation carried out by other authors, proving that these techniques can help to understand complex reaction systems and to estimate the impact of source variables on target results such as reaction yield.

Doing a split modeling in phases that starts with the velocity profile generation, allows to minimize the computational cost and doesn't have a distortion effect on kinetics simulation in a highly turbulent domain such as a stirred reactor tank with a rotating impeller under a viscous media, also if this is complemented with a MRF meshing technique creates a significant computer usage reduction, allowing the user to describe the phenomenon more efficiently.

Comparing the results with the physic experimentation of (C.A. Schall, 2013), it is evidenced that there are some differences mainly on the 523K and 573K results, this could be an effect of differences on the estimation of thermal properties such as Thermal diffusivity and Specific heat of the water-oil mixture. But at 548K the estimated results of CFD modeling were very similar which leads to conclude that this model effectively represents that behavior.

Actually CFD modeling is not able to perfectly represent this type of physic phenomena but provides a very approximated overview of the behavior of this processes, implying that these methods are very important prior to real-life experimentation helping to establish operational regions and baseline target values for desired variables.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCES

Adam G. Carr, Raffaella Mammucari, N.R. Foster, “A review of subcritical water as a solvent and its utilisation for the processing of hydrophobic organic compounds”. Chemical Engineering Journal, Volume 172, Issue 1, 1 August 2011, Pages 1-17

Amber L. Milliren, Joshua C. Wissinger, Vasudev Gottumukala, Constance A. Schall, “Kinetics of soybean oil hydrolysis in subcritical water”, Fuel, Volume 108, June 2013, Pages 277-281

Chen-Ching Ting, Chien-Chih Chen, “Viscosity and working effciency analysis of soybean oil based bio-lubricants”, Measurement, Volume 44, Issue 8, October 2011, Pages 1337-1341

Caughey, David A, “Computational Fluid Dynamics. Computer Science and Software Engineering”, Edited by Allen Tucker, Teofilo Gonzalez, Heikki Topi, and Jorge Diaz-Herrera. Chapman and Hall/CRC. 2014. Pages 124

Dijkstra A.J., “Soybean Oil”, In Encyclopedia of Food and Health, Academic Press, Oxford, 2016, Pages 58-63

Gustavo V . Barbosa-Canovas, Albert Ibarz, “Unit Operations in Food Engineering”, CRC Press 2002. Pages 309320.

Harvind K. Reddy, Tapaswy Muppaneni, Yingqiang Sun, Yin Li, Sundaravadivelnathan Ponnusamy, Prafulla D. Patil, Peter Dailey, Tanner Schaub, F. Omar Holguin, Barry Dungan, Peter Cooke, Peter Lammers, Wayne Voorhies, Xiuyang Lu, Shuguang Deng, “Subcritical water extraction of lipids from wet algae for biodiesel production”, Fuel, Volume 133, 1 October 2014, Pages 73-81

Hongna Wang, Xiaoqiang Jia, Xue Wang, Zhengxi Zhou, Jianping Wen, Jinli Zhang, “CFD modeling of hydrodynamic characteristics of a gas liquid two phase stirred tank”, Applied Mathematical Modelling, Volume 38, Issue 1, 1 January 2014, Pages 63-92

J. Baldyga, M. Henczka, L. Makowski, “4th International Symposium on Mixing in Industrial Processes Effects of Mixing on Parallel Chemical Reactions in a Continuous-Flow Stirred-Tank Reactor”, Chemical Engineering Research and Design, Volume 79, Issue 8, 2001, Pages 895-900

Leszek Rudniak, Piotr M. Machniewski, Aleksandra Milewska, Eugeniusz Molga, “CFD modelling of stirred tank chemical reactors: homogeneous and heterogeneous reaction systems”, Chemical Engineering Science, Volume 59, Issues 2223, NovemberDecember 2004, Pages 5233-5239

M. Diasakou, A. Louloudi, N. Papayannakos, “Kinetics of the non-catalytic transesterification of soybean oil”, Fuel, Volume 77, Issue 12, 1998, Pages 1297-1302

Merichel Plaza, Charlotta Turner, “Pressurized hot water extraction of bioactives, TrAC Trends in Analytical Chemistry”, Volume 71, September 2015, Pages 39-54

N . LeeWolfe, PeterM. Jeffers, “Handbook of Property Estimation Methods for Chemicals Environmental Health Sciences”, Edited by Robert S . Boethling CRC Press 2000.

Pinto, Jair Sebastiao S. and Lancas, Fernando M, “Hydrolysis of corn oil using subcritical water”, J. Braz. Chem. Soc. [online]. 2006, vol.17, n.1 [cited 2016- 06-08], pp.85-89

Pramote Khuwijitjaru, Tomoyuki Fujii, Shuji Adachi, Yukitaka Kimura, Ryuichi Matsuno, “Kinetics on the hydrolysis of fatty acid esters in subcritical water”, Chemical Engineering Journal, Volume 99, Issue 1, 17 May 2004, Pages 1-4

Qin Ma, Xiao-Dan Fan, Xiao-Cao Liu, Tai-Qiu Qiu, Jian-Guo Jiang, “Ultrasound-enhanced subcritical water extraction of essential oils from Kaempferia galangal L. and their comparative antioxidant

 ISBN 978-607-8242-11-5

activities", Separation and Purification Technology, Volume 150, 17 August 2015, Pages 73-79

R. Alenezi, G.A. Leeke, R.C.D. Santos, A.R. Khan, "Hydrolysis kinetics of sunflower oil under subcritical water conditions", Chemical Engineering Research and Design, Volume 87, Issue 6, June 2009, Pages 867-873

Robin K. Connelly, Jozef L. Kokini, "Analysis Mixing Processes using CFD", Computational Fluid Dynamics in Food Processing. Edited by Da-Wen Sun. CRC Press 2007. Pages 555587

Sevim Z Erhan, Joseph M. Perez, "Biobased Industrial Fluids and Lubricants", AOCS Publishing 2002

Susmita Bandyopadhyay and Ranjan Bhattacharya, "Discrete and Continuous Simulation. Theory and Practice", CRC Press 2014. Pages 227240

Wael Abdelmoez, Soah M. Nage, Ali Bastawess, Ahmed Ihab, Hiroke Yoshida, "Subcritical water technology for wheat straw hydrolysis to produce value added products", Journal of Cleaner Production, Volume 70, 1 May 2014, Pages 68-77

Wei-Cheng Wang, Robert H. Natelson, Larry F. Stikeleather, William L. Roberts, "CFD simulation of transient stage of continuous countercurrent hydrolysis of canola oil", Computers and Chemical Engineering, Volume 43, 10 August 2012, Pages 108-119

 ISBN 978-607-8242-11-5

Arquitectura Empresarial y Simulación de Procesos – Una fusión necesaria antes de realizar cambios significativos en la estructura de negocio: Caso aplicado

Jorge E. Puerta-Ramírez, Jaime A. Giraldo-García y Mari L. Tabares-López
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial, Campus La Nubia Bloque Q piso 2, Manizales - Colombia.
(e-mail: jepuertar@unal.edu.co, jaiagiraldog@unal.edu.co, mltabaresl@unal.edu.co)

Resumen

El objetivo del trabajo propuesto es comprobar el valor de la fusión entre Arquitectura Empresarial y Simulación de Procesos antes de realizar cambios significativos en la estructura de uno de los macro procesos de la Contraloría General de la República de Colombia. Se identificó el Proceso Auditor como clave para el cumplimiento de la misión de la organización y se utilizó una herramienta de modelado y simulación basada en el estándar BPSim (Business Process Simulation) para garantizar una evolución metódica del modelo. El modelado y la simulación mostraron una organización lógica del proceso estudiado y las dimensiones para limitar el alcance de la actividad de arquitectura, lo que permite establecer que existe un conjunto de condiciones para modelar la realidad de la organización y proponer escenarios distintos. Con base en los resultados se concluye que la construcción de una Arquitectura Empresarial fusionada con la Simulación de Procesos, genera la posibilidad de crear escenarios para distintas combinaciones de datos, garantiza una adecuada evolución desde un modelo actual a un modelo objetivo y permite analizar sus resultados antes de tomar cualquier decisión con la arquitectura de la organización.

Palabras clave: Arquitectura Empresarial, Modelamiento y Simulación de Procesos, Proceso Auditor, estándar BPSim.

Business Architecture and Process Simulation - A necessary merger before making significant changes in the business structure: Case applied

Abstract

The objective of the proposed work is to verify the value of the merger between Business Architecture and Process Simulation before making significant changes in the structure of one of the macro processes of the General Comptroller of the Republic of Colombia. The Audit Process was identified as key to the fulfillment of the mission of the organization and a modeling and simulation tool based on the BPSim (Business Process Simulation) standard was used to guarantee a methodical evolution of the model. The modeling and simulation showed a logical organization of the studied process and the dimensions to limit the scope of the architecture activity, which allows to establish that there is a set of conditions to model the reality of the organization and propose different scenarios. Based on the results, it is concluded that the construction of an Enterprise Architecture merged with Process Simulation generates the possibility of creating scenarios for different combinations of data, guarantees an adequate evolution from a current model to an objective model and allows the analysis of its results Before making any decision with the architecture of the organization.

Keywords: Business Architecture, Modeling and Simulation of Processes, Audit Process, BPSim standard.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La CGR (Contraloría General de la República) es un ente fundamental dentro de la estructura del Estado colombiano, ya que la Constitución Política de 1991, la instituye como el máximo órgano de control fiscal para ejercer, en representación de la comunidad, la vigilancia de la gestión fiscal y de los particulares o entidades que manejan fondos o bienes de la Nación, en procura del buen uso de los recursos públicos y de contribuir a la modernización del Estado mediante acciones de mejoramiento continuo. (CGR, 2011). Bajo estas premisas la CGR tiene una serie de retos políticos, jurídicos y de gestión, siendo éste último un factor importante a la hora de demostrar su eficiencia y efectividad en el Control Fiscal Micro, que como lo afirma Restrepo (2017), debe ser identificado a través del desarrollo de una arquitectura propia para la organización.

Ante esto autores como Geyer y Fourie (2015), argumentan que las organizaciones deben definir formalmente y documentar sus procesos de negocio con el fin de entenderlos y así permitir un mejoramiento continuo de su gestión. Es por este motivo que se buscó determinar las características de los flujos de trabajo del Proceso Auditor. Como medio para determinar dichas características y para la comprensión de los procesos de la CGR, se utilizó el concepto de Arquitectura Empresarial, específicamente el dominio de Arquitectura de Negocio que como lo definen Arango y otros (2010), se encarga entre otros, de la descripción de la estructura organizacional y de los procesos de negocio a través del modelamiento, que como manifiestan Bolaños y López (2012), es una técnica que permite captar las características principales del proceso, identificando su flujo y sus componentes para poder así comunicarlo con otros procesos, comprender las relaciones entre sus partes y conocer sus actores, responsables y demás artefactos que intervienen en su ejecución. Por otro lado y con el fin de analizar el modelo de procesos desarrollado, se utilizó la simulación como herramienta para representar el funcionamiento del mismo, que como afirma Villanueva (2008), es un procedimiento que nos permite analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes circunstancias, el análisis de todos los cambios posibles y sus consecuencias, es decir, reemplazando variables y analizando el desempeño de los procesos hasta obtener la mejor alternativa.

Teniendo en cuenta los planteamientos de Álvarez y Patiño (2015) en cuanto a la existencia de aspectos críticos y cambiantes que atañen a la Arquitectura Empresarial, se puede afirmar que esta debe evolucionar al mismo ritmo que las condiciones del negocio le impongan, partiendo de un modelo que de forma coordinada plasme la realidad presente de la organización y modele su visión futura. Estos cambios deben reflejarse en los modelos de arquitectura y si no sucede así, lo más seguro es que la misma fallará como modelo de alineación entre negocio y necesidades. Por lo anterior y para contrarrestar las mencionadas fallas, es necesario asegurar que se dimensionen de manera apropiada las necesidades de la organización y garantizar una adecuada evolución de su modelo de arquitectura.

A partir de los planteamientos anteriores, se realizó el modelado y simulación utilizando una herramienta tecnológica BPSim (Business Process Simulación) bajo los estándares BPMN (notación gráfica creada para proveer un lenguaje unificado de acepción mundial) del OMG (Object Management Group 2011) y XPDL (formato estándar para el intercambio de definiciones de procesos de negocio entre diferentes productos) definido por la WfMC (Workflow Management Coalition 2005) que permiten visualizar el impacto de cambios propuestos a los procesos empresariales antes de su implementación en el mundo real, como se afirma en Bizagi (2014) o en el Proceso Auditor, identificado como clave para el cumplimiento de la misión de la CGR.

METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico se presenta en dos etapas: en una se describen las dimensiones para limitar el alcance de la arquitectura; y en otra etapa la aplicación del modelado y simulación.

Etapa 1. Dimensiones para limitar el alcance de la arquitectura

Tomando como base el marco de referencia de arquitectura empresarial TOGAF Versión 9.1 (2011) y según su metodología, se identificaron las siguientes dimensiones para definir y limitar el alcance de la actividad de arquitectura, como se muestra en la tabla 1.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1. Dimensiones para limitar el alcance de la arquitectura

Dimensión	*Consideraciones*
Amplitud	¿Cuál es la extensión total de la empresa, y con qué parte de esa extensión debería tratar el esfuerzo de arquitectura?
Profundidad	¿Qué nivel de detalle debería alcanzar el esfuerzo de arquitectura?
Dominios de arquitectura	¿Cuál o cuáles dominios de arquitectura se van a especificar?

Amplitud

En cuanto a la extensión de la CGR para la actividad de arquitectura y debido a su tamaño, solo se tuvo en cuenta el Proceso Auditor, fig. 1.



Fig. 1: Etapas del Proceso Auditor

Profundidad

Para tal fin se aplicó el primer paso del ciclo de vida bajo el enfoque BPM (Business Process Model) con el fin de entender los procesos de negocio de la CGR, dando como resultado que un punto neurálgico y del cual dependen el rumbo y los resultados del Proceso Auditor, es la fase de planeación. Dicha fase tiene como objetivo definir el alcance y la estrategia de auditoría a partir del conocimiento del auditado y de la evaluación de los controles para mitigar los riesgos.

Dominios de arquitectura

Teniendo en cuenta que el marco de referencia TOGAF es modular, lo que admite particionar las arquitecturas dentro de una misma empresa o áreas de ésta por dominios, fue elegido el dominio de arquitectura de negocio, para lo cual se debe seleccionar una herramienta que permita definir un modelo e identificar las acciones que permitan mejorar su desempeño.

De tal modo, la definición del proceso para el modelamiento y simulación se inició haciendo uso del dominio de arquitectura de negocio a nivel de diagnóstico, el cual implica realizar un análisis de la situación actual y un inventario de procesos de negocio.

Etapa 2. Aplicación del modelado y simulación a través de la herramienta

Con base en las actividades descritas para la fase de planeación del Proceso Auditor en la guía de auditoría de la CGR, se realizó el modelo de procesos sobre el cual se ejecutara la simulación, fig. 2. En éste modelo se pueden identificar las siguientes actividades y subprocesos: inicia con la notificación del memorando de asignación y comprende la elaboración del cronograma de actividades para la misma; el análisis en detalle del ente o asunto a auditar; la evaluación del sistema de control interno o de los mecanismos de control; la determinación de los criterios técnicos de evaluación, alcance y estrategia de auditoría, hasta la elaboración y aprobación del plan de trabajo y de los programas de auditoría.

La modelación se realizó haciendo uso del software Bizagi Process Modeler, el cual es una herramienta que permite modelar y documentar procesos de negocio bajo el estándar Business Process Model and Notation (BPMN), corriendo cuatro niveles, i) Validación; ii) Análisis de tiempo; iii) Análisis de recursos; iv) Análisis de calendarios. En cada nivel de la vista de simulación se añade mayor grado de detalle al modelo, la posibilidad de crear escenarios para distintas combinaciones de datos y analizar sus resultados.

ISBN 978-607-8242-11-5

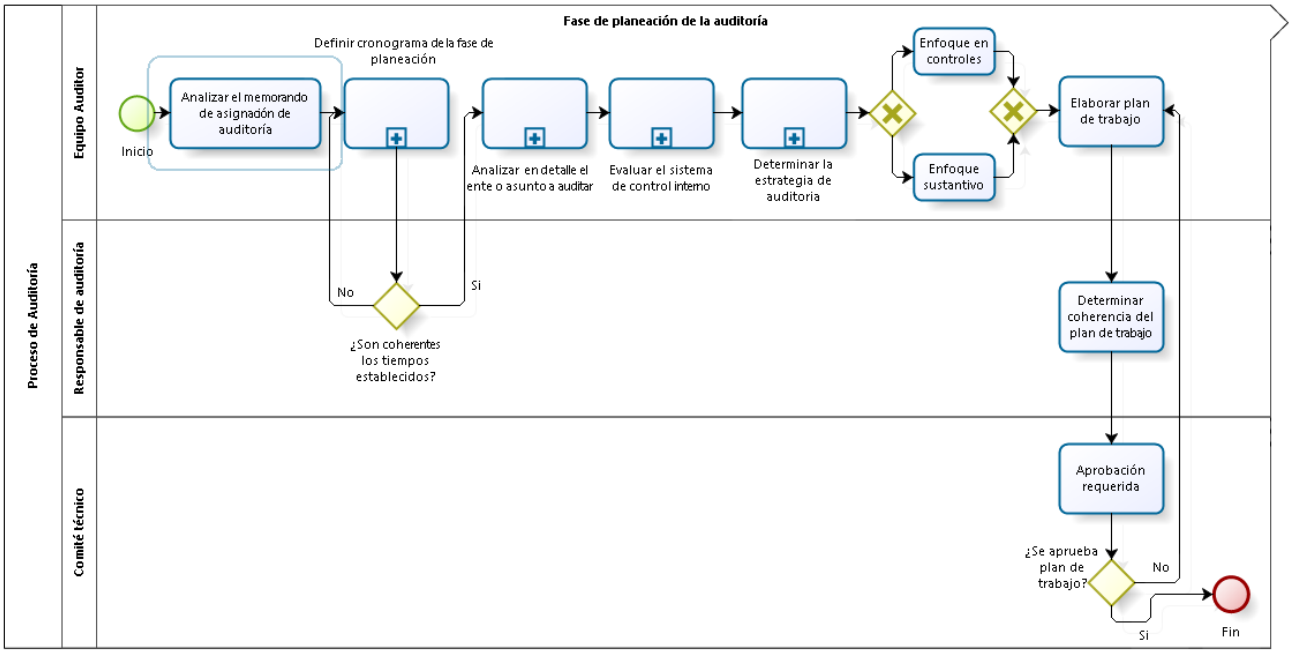


Fig. 2. Modelo de la Fase de planeación de la auditoría en formato BPMN 2.0.

Validación del proceso

Este se realiza con el fin de evaluar la estructura y la lógica del diagrama desarrollado, se programaron las compuertas de decisión con las probabilidades correspondientes a cada uno de los flujos de proceso. Así por ejemplo, la compuerta “Determinar la estrategia de auditoría” tiene un 95% de posibilidades que el flujo de trabajo vaya por el “Enfoque en controles” y el 5% que sea “Enfoque sustantivo” fig, 3. Estos porcentajes se obtuvieron de distribuciones históricas de auditorías realizadas en anteriores PGA (Plan General de Auditoría de la CGR) bajo variadas condiciones.

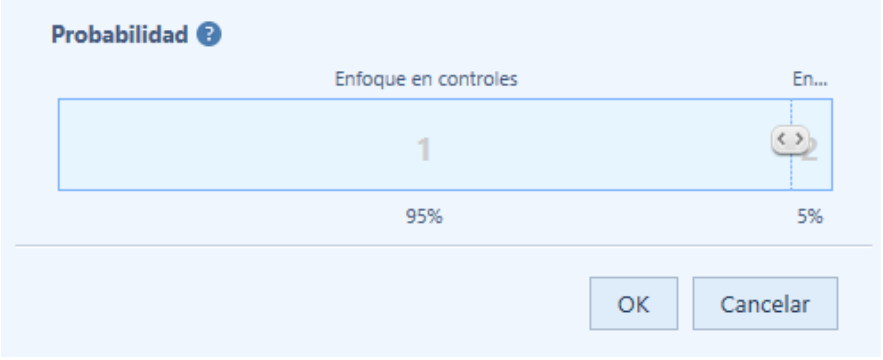


Fig. 3. Validación del modelo a través de compuertas

Análisis de tiempo

Este nivel se simula para comprender el tiempo de procesamiento de cada actividad y el intervalo de tiempo entre la generación de las instancias del proceso. Los resultados deben mostrar el desempeño del proceso de planeación de auditoría, consolidando los tiempos mínimos, máximos, medios y totales de procesamiento, para lo cual se establece la duración de cada tarea y subproceso asignándole valores determinísticos o probabilísticos a los tiempos, según ocurre en la realidad. Por ejemplo, el tiempo del subproceso “Elaborar plan de trabajo” se distribuye probabilísticamente mediante una distribución normal, fig. 4.

ISBN 978-607-8242-11-5

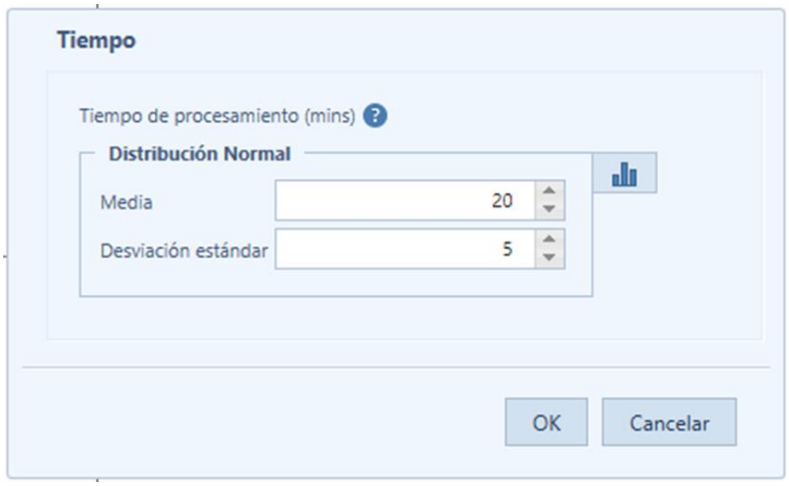


Fig. 4. Nivel de análisis de tiempo

Análisis de recursos

Adicional a los datos introducidos en los niveles anteriores, en este nivel se incluyen los recursos disponibles, tales como costo y personal. Por ejemplo, al subproceso de “Evaluar el sistema de control interno” se le realiza la asignación de 2 auditores. fig. 5.

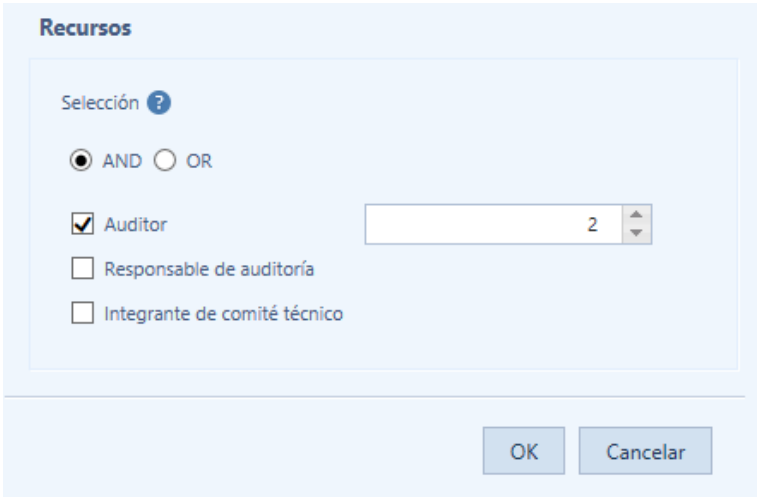


Fig. 5. Nivel de análisis de recursos

Análisis de Calendarios

En cuanto a este nivel, se obtiene como resultado que la disponibilidad de tiempo por parte de los auditores, en diferentes etapas del proceso es exagerada, lo que se debe a la espera de aprobaciones por parte de instancias superiores, impidiendo que el flujo continúe hasta que se obtenga una respuesta positiva. En este nivel se definen los calendarios de los procesos en periodos de tiempo, que para este caso corresponde a la duración de la etapa de planeación del proceso auditor con su patrón y rango de recurrencia, fig. 6.

ISBN 978-607-8242-11-5

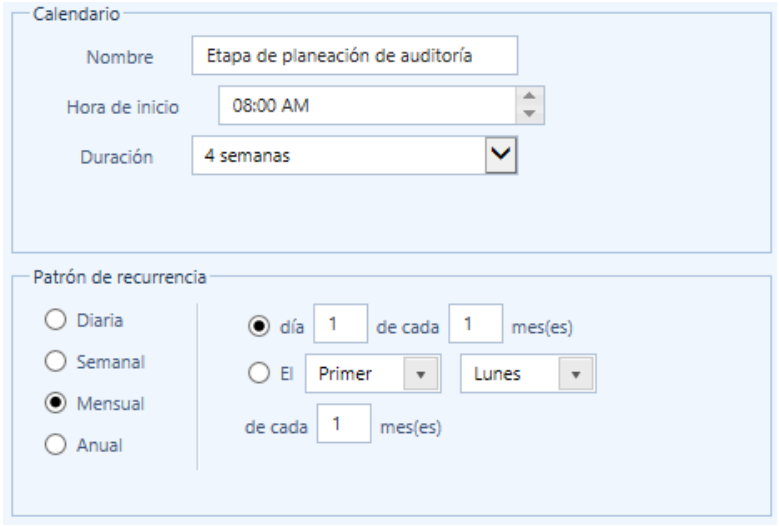


Fig. 6. Nivel de análisis de calendarios

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al ejecutar el nivel de análisis de tiempo, simulando 25 instancias correspondientes al mismo número de auditorías, se obtiene como resultado la duración de cada una de las tareas, así como el tiempo total en que estas estuvieron en funcionamiento. Como se puede evidenciar en estos resultados, los tiempos no son coherentes con los trabajos desarrollados, lo que se puede justificar por la rigidez del proceso al depender de la aprobación del responsable de auditoría y del comité técnico, generando un cuello de botella en los flujos de trabajo, lo que puede en un momento determinado entorpecer el inicio de las otras fases del proceso auditor, como la de ejecución y hasta el mismo informe de auditoría.

Como consecuencia de lo anterior y teniendo en cuenta la evolución del modelo de Arquitectura Empresarial, fig. 7, se crearon tres escenarios para analizar el comportamiento al realizar cambios en el proceso, el primer escenario es configurado con datos que se obtuvieron de distribuciones históricas de auditorías anteriores (escenario actual), un segundo escenario (escenario transitorio), modificando el reproceso “Aprobación requerida” y un tercer escenario (escenario objetivo), en el que se eliminó el reproceso que generaba un cuello de botella en los flujos de trabajo al depender de dos instancias, asignándole la aprobación al responsable de auditoría cuando estas se presentan de manera repetitiva por falta de coherencia en su planteamiento, observándose una reducción del 29.8%, en el tiempo total del proceso, tabla 2.



Fig. 7. Evolución de un modelo de arquitectura empresarial
Fuente: elaboración propia basada en Álvarez y Patiño 2015

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 2. Resultados de simulación – Validación de proceso y análisis de tiempo

Nombre proceso	Escenario actual		Escenario transitorio		Escenario objetivo	
	Instancias	Tiempo (d)	Instancias	Tiempo (d)	Instancias	Tiempo (d)
Proceso de Auditoría	25	33.5	25	28.5	25	23.5
Analizar el memorando de asignación de auditoría	25	1	25	1	25	1
Elaborar plan de trabajo	59	5	59	5	59	5
Determinar coherencia del plan de trabajo	59	5	59	5	59	5
¿Se aprueba plan de trabajo?	59		59		59	
Aprobación requerida	59	10	59	5	59	0
¿Son coherentes los tiempos establecidos?	40		40		40	
Compuerta exclusiva	25		25		25	
Enfoque en controles	15	1	15	1	15	1
Enfoque sustantivo	10	0	10	0	10	0
Compuerta exclusiva	25		25		25	
Fin	25		25		25	
Inicio	25		25		25	
Definir cronograma de la fase de planeación	40	0.5	40	0.5	40	0.5
Analizar en detalle el ente o asunto a auditar	25	5	25	5	25	5
Evaluar el sistema de control interno	25	3	25	3	25	3
Determinar la estrategia de auditoria	25	3	25	3	25	3

CONCLUSIONES

De los resultados expuestos en el punto anterior se pueden exponer las siguientes conclusiones:

Con base en los resultados se concluye que la construcción de una Arquitectura Empresarial fusionada con la Simulación de Procesos, genera la posibilidad de crear escenarios para distintas combinaciones de datos, garantizando una adecuada evolución desde un modelo actual a un modelo objetivo y permitiendo analizar sus resultados antes de tomar cualquier decisión con la arquitectura de la organización.

Finalmente, se considera pertinente iniciar nuevas investigaciones donde no solamente se modele y simule el Proceso Auditor, sino otros como complemento a la construcción de un prototipo de arquitectura empresarial de los procesos misionales de la CGR.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y a la Contraloría General de la República de Colombia, por el apoyo institucional y financiero al desarrollo de esta investigación, la cual hace parte del proyecto de tesis doctoral “Incidencia de la administración con enfoque burocrático en los resultados del control fiscal micro, caso aplicado a la Contraloría General de la República de Colombia”.

REFERENCIAS

Álvarez, A., & Patiño, A. Enterprise architecture and agile methodologies-An effective combination to tackle the frequent business changes. Actas de Ingeniería, 1, 145-152 (2015).

Arango, M. D., Londoño, J. E. y Zapata, J. A., Arquitectura empresarial - una visión general, http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/46, ISSN: 1692-3324, Rev. Ingenierías, 9(16), 101-111 (2010).

Barros, O. Ingeniería de negocios. Diseño integrado de negocios, procesos y aplicaciones TI. Primera parte. Versión, 4. CEGES, Departamento de Ingeniería Industrial (2011).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Bizagi, Bizagi BPM Suite Functional Description, (en línea), 2014. https://www.bizagi.com/docs/BizAgi%20Functional%20Description.pdf. Acceso: 18 de diciembre (2015).

Bolaños, S. J. y López, S. A., LMPS como propuesta alterna a BPMN para el modelado de procesos de software, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2012000400012&lng=en&tlng=., ISSN: 0123-921X, Rev. Tecnura, 16(34), 157-170 (2012).

CGR - Contraloría General de la República, Control Fiscal Participativo, Economía Colombiana, edición 315 enero-febrero (2011).

Geyer, R. W. y Fourie, C. J., *Determining the suitability of a business process modelling technique for a particular application*, http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-78902015000100019&lng=en&nrm=iso, ISSN: 1012-277X, Rev. South African Journal of Industrial Engineering, 26(1), 252-266 (2015).

OMG - Object Management Group, Business Process Model and Notation (BPMN), (en línea), 2011. http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/. Acceso: 22 de mayo (2015).

Restrepo, J. C. R. (2017). Modelos de gestión pública y organizaciones públicas un análisis de dependencia. *Difusiones*, 2(2).

The Open Group, Togaf 9.1. – Gruía (Latin American Spanish), (en línea), 2011. https://www2.opengroup.org/ogsys/ServePublicationGraphic?publicationid=13158. Acceso: 18 de agosto (2015).

Villanueva, J., La simulación de procesos, clave en la toma de decisiones, http://www.revistadyna.com/busqueda/la-simulacion-de-procesos-clave-en-toma-de-decisiones, Rev. Dyna Ingeniería e Industria, 83(4), 221-227 (2008).

WfMC - Workflow Management Coalition, Process Definition Interface, (en línea), 2005. http://www.xpdl.org/standards/xpdl-2.0/TC-1025_xpdl_2_2005-10-03.pdf. Acceso: 8 de agosto (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Estimación de la Temperatura de Transición Vítrea de Líquidos Iónicos mediante Redes Neuronales Artificiales

José O. Valderrama[1,2], Richard A. Campusano[2,3] y Roberto E. Rojas[4]
[1]Univ. de La Serena, Depto. de Ing. Mecánica, Casilla 554, La Serena-Chile
[2]Centro de Inform. Tecnológica, Mons. Subercaseaux 667, La Serena-Chile
[3]Univ. de La Serena, Depto. de Física y Astronomía, Casilla 554, La Serena-Chile
[4]Univ. de La Serena, Depto. de Química, Casilla 554, La Serena-Chile
(jvalderr@userena.cl)

Resumen

Se estudia y analiza la capacidad de las redes neuronales artificiales para correlacionar y predecir la temperatura de transición vítrea de líquidos iónicos. Se consideraron descriptores moleculares como variables independientes para definir las características de un líquido iónico. Se consideraron varias arquitecturas para RNA, se analizaron diferentes combinaciones de descriptores moleculares y, los resultados se compararon con datos reportados en la literatura. Las variables independientes (aquellas que podrían tener mayor influencia sobre la temperatura de transición vítrea) considerados para el entrenamiento de la RNA fueron: *(i)* índice de conectividad másica (λ); *(ii)* masa del catión (M^+); *(iii)* masa del anión (M^-); *(iv)* área de superficie (S_A); *(v)* volumen de van der Waals (V_w)*; (vi)* índice de conectividad (X_0); y *(vii)* número de átomos de carbono (nC). Los descriptores moleculares se determinaron utilizando el software comercial Dragon-7. Como una medida de la exactitud del método, se evalúan la desviación relativa promedio, la desviación relativa absoluta promedio y la máxima desviación relativa absoluta entre el dato calculado y el de la literatura.

Palabras clave: líquidos iónicos; temperatura de transición vítrea; red neuronal artificial; descriptor molecular

Estimation of the Glass Transition Temperature of Ionic Liquids using Artificial Neural Network

The capacity of artificial neural networks to correlate and predict the glass transition temperature of ionic liquids is studied and analyzed. Molecular descriptors are employed as independent variables to define the characteristics of an ionic liquids. Several network architectures and different combinations of molecular descriptors and the results are compared with data reported in the literature. The independent variables (those that could have greater effect on the glass transition) considered for training the artificial neural network were *(i)* mas connectivity index (λ); *(ii)* mass of the cation (M^+); *(iii)* mass of the anion (M^-); *(iv)* Surface area (S_A); *(v)* van der Waals volume (V_w)*; (vi)* connectivity index (X_0); y *(vii)* number of carbon atoms (nC). The molecular descriptors were determined using the commercial software Dragon-7. As a measured of the accuracy of the method the average relative deviation, the average relative absolute deviation and the maximum relative absolute deviation between calculated and literature data are calculated.

Keywords: ionic liquids; glass transition temperature; artificial neural network; molecular descriptor

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La transición vítrea es el cambio que ocurre del estado sólido a sólido amorfo, y es de interés en diversas aplicaciones el conocer la temperatura a la cual ocurre este cambio. Las importancias que tiene son: *(i)* la conductividad del coeficiente de difusión está relacionada con T_g (Greaves, 2008); *(ii)* T_g se puede utilizar para predecir la dependencia de la viscosidad sobre la temperatura (Fletcher *et al.,* 2010); *(iii)* T_g también sirve como parámetro de energía cohesiva (Ohno, 2005); *(iv)* T_g es uno de los principales criterios para la evaluación de las opciones potenciales para las aplicaciones de electrolitos (Mousavisafavi *et al.,* 2013a); *(v)* T_g es importante para fenómenos en materiales poliméricos, sólidos farmacéuticos amorfos y semiconductores (Mokadem *et al.,* 2016). Los datos de la temperatura de transición vítrea para algunos LIs están disponibles en la literatura y bases de datos como la base de datos de la IUPAC (2016), Beilstein Database (2016), Dortmund Data Bank (2016) o la compilación de Zhang *et al.* (2006, 2009). Una estimación de estas fuentes indica que debe haber alrededor de 900 valores de T_g para alrededor de 800 líquidos iónicos.

El libro de Schmelzer *et al.* (2011) presenta una discusión detallada sobre el fenómeno de transición vítrea y T_g, pero está principalmente dedicada al estado vítreo de los vidrios y no a los líquidos iónicos. Sin embargo, el fenómeno es similar y los fundamentos también son análogos. Gómez *et al*. (2015) presentan un análisis exhaustivo del comportamiento térmico de los líquidos iónicos puros y definen algunas de las temperaturas características que aparecen durante la transición entre líquido y sólido (o viceversa) de un líquido iónico: temperatura de fusión (T_m), temperatura de congelación (T_f), Temperatura de cristalización en frío (T_{cc}), transición sólido-sólido (T_{ss}) y temperatura de transición vítrea (T_g). Definen la temperatura de transición vítrea T_g *"como el punto medio de un pequeño cambio de capacidad térmica al calentarse desde el estado de cristal amorfo a un estado líquido*".

Las temperaturas de transición sólido-líquido de LIs están por lo general por debajo de la temperatura ambiente y pueden ir por debajo de -100 °C, como en los casos de [C_2mim] [dca] o [C_4mim] [$C_2F_5BF_3$]. El método más común y eficiente para determinar experimentalmente T_g es por DSC. El comportamiento térmico de los líquidos iónicos puede ser relativamente complejo y se han observado algunas características peculiares y particulares al enfriar o calentar un LI (Holbrey *et al.*, 2002; Branco *et al.,* 2002). Gómez *et al.* (2015) indican que no siempre es posible identificar correctamente las diferentes transiciones que aparecen en un termograma utilizando DSC y deben de ser incluidas técnicas adicionales. Los autores también afirman que es necesario someter el líquido iónico a diferentes velocidades de calentamiento y enfriamiento para tener una mejor interpretación de los termogramas y definir temperaturas características tales como fusión o transición vítrea. No es inusual tener líquidos iónicos con diferentes estructuras presentando el mismo o similar comportamiento térmico y líquidos iónicos con estructuras similares presentando comportamientos térmicos diferentes. Estos hechos pueden explicar las grandes diferencias encontradas en los datos experimentales reportados de T_g para el mismo líquido iónico. Como se muestra en la Tabla 1, se encuentran diferencias de hasta 38 grados Celsius (20%), tal como el caso del 1-butyl-3-methylimidazolium trifluoroacetate. Otros líquidos iónicos presentan menores diferencias pero siguen siendo importantes para el modelado y el análisis. Para el butyl-ammonium formate la diferencia es de 25ºC (16%) y para la 1-ethyl-3-methylimidazolium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide la diferencia es de 20ºC (11%).

Tabla 1: Selección de valores reportados de T_g que muestran diferencias entre distintas fuentes de literatura. Todos los datos proceden de Zhang *et al.* (2006, 2009). El valor informado más bajo se utilizó como referencia para determinar las desviaciones de los otros valores.

Casos	*Líquido Iónico*		*Catión*	*Anión*	T_g*(K)*	ΔT*(K)*
1	1-butyl-3-methylimidazolium	trifluoroacetate	[C_4mim]	[ta]	195.15 203.60 233.15	0.00 8.45 38.00
2	Alanine methyl ester	thiocyanate	[$AlaC_1$]	[SCN]	215.00 241.15	0.00 26.15
3	N-octyl-isoquinolinium	bis[(perfluoroethane)sulfonyl]imide	[C_8isoq]	[BEI]	193.75 218.15	0.00 24.40
4	Butyl-ammonium	formate	[$NHHH_4$]	[HCO_2]	153.05 178.15	0.00 25.10
5	Ethyl-ammonium	formate	[$NHHH_2$]	[HCO_2]	145.65 167.15	0.00 21.50
6	1-ethyl-3-methylimidazolium	bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide	[C_2mim]	[bti]	175.15 181.15 186.00 186.28 195.15	0.00 6.00 10.85 11.13 20.00

ISBN 978-607-8242-11-5

A pesar de las diferencias entre los datos de T_g como los mostrados en la Tabla 1, algunas propuestas han sido presentadas en la literatura para correlacionar y estimar la temperatura de transición vítrea: método QSPR por Mirkhani *et al*., (2012), contribución de grupo por Gharagheizi *et al.* (2013), QSPR lineal y no lineal por Mousavisafavi *et al.* (2013 a,b). QSPR utilizando los índices topológicos por Yan *et al*. (2013) y más recientemente un método mejorado de interacción por Mokadem *et al. (2016)*.

El análisis completo sobre la aplicación de RNA para entrenamiento, prueba y predicción de T_g para LIs, requirió de algunas definiciones y estudios específicos: *(i)* definir la arquitectura más adecuada; *(ii)* determinar y analizar las variables más influyentes que tienen efecto sobre T_g; *(iii)* estudiar y poner a prueba la capacidad predictiva del modelo de RNA; *(iv)* evaluar el efecto del catión y el anión sobre T_g; *(v)* incluir diferentes familias y sub familias de líquidos iónicos en el estudio; y *(vi)* se deben comparar los resultados obtenidos de T_g con los de la literatura. Se diseñó tres casos de estudio para determinar la arquitectura y las variables más apropiadas para entrenar la RNA.

Datos Disponibles

Como se mencionó anteriormente en la sección de introducción, los datos de T_g para líquidos iónicos se han presentado en la literatura y hay algunas bases de datos, manuales y recopilaciones de datos para la temperatura de transición vítrea de LIs (IUPAC, 2016; Beilstein Database, 2016; Dortmund Data Bank, 2016; Zhang *et al.* 2006, 2009). Nuevos datos aparecen frecuentemente en revistas y monografías. Sin embargo, varios de los valores informados de T_g para los mismos LIs pueden mostrar grandes diferencias, como también se ha explicado anteriormente (ver tabla 1). De todos los datos disponibles para T_g en la literatura abierta, el valor más alto de T_g dentro de un conjunto de datos se consideró para el estudio y los cálculos. Por ejemplo, para la del LI 1-ethyl-3-methylimidazolium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide para el que están disponibles 5 datos (número 6 en la Tabla 1) el valor seleccionado como T_g es 195,15 K.

Descriptores moleculares

Todeschini *et al.,* (2009) definen un descriptor molecular como: "*El resultado final de una lógica y procedimiento matemático que transforma información química codificada dentro de una representación simbólica de una molécula en un número útil o el resultado de un experimento estandarizado".* De los varios descriptores moleculares posibles se escogieron los siguientes, que se estima tienen mayor influencia en T_g: *(i)* índice de conectividad másica (λ); (*ii)* masa de catión (M^+); (*iii)* masa de anión (M^-); *(iv)* área de superficie (S_A); (*v)* volumen de van der Waals (V_w); (*vi)* índice de conectividad (X_0); y (*vii)* número de átomos de carbono (nC). El índice de conectividad másica (λ) es un parámetro definido por los autores Valderrama y Rojas (2010) y se calcula para cada LI. Los descriptores moleculares S_A, V_w, X_0 y nC se determinaron utilizando el software comercial Dragon-7 (Talete, 2015).

RED NEURONAL ARTIFICIAL

Una red neuronal artificial es una herramienta matemática que relaciona los valores de una determinada función dependiente F (por ejemplo, la temperatura de transición vítrea) con valores de variables independientes definidas x_1, x_2, x_3 ... x_n (por ejemplo, parámetros estructurales de la sustancia). Para encontrar una relación entre la función F y las variables x_i, la RNA debe ser entrenada. Esto significa que la red está provista de valores de F para varios valores de x_i para encontrar una relación, un patrón, en otras palabras, una dependencia de la función F sobre las variables x_i. La forma en que la RNA encuentra la relación se inspira en el comportamiento de las neuronas biológicas (Bose y Liang, 1996).

Las unidades imaginarias que simulan las neuronas se organizan en capas con un número definido de neuronas por capa, formando lo que se llama la "arquitectura" (o topología) de la red. Una capa de entrada recibe la información F-vs-x_1, x_2, x_3... x_n y realiza un procesamiento inicial de dichos datos. De hecho, la red asigna a cada variable x_i un peso y un valor base (sesgo) específico para cada neurona. Con estos valores de peso y de base, la red calcula un valor para la función de salida F y compara el resultado con el valor conocido de F. En el cálculo de F, esta función se relaciona con las variables independientes x_i mediante funciones matemáticas específicas denominadas funciones de activación. Si la desviación entre el valor de la propiedad calculada F y el valor experimental es mayor que un valor definido, los pesos y sesgos se reasignan y los cálculos se vuelven a realizar. Este método se conoce como propagación hacia atrás, y el nuevo valor de los pesos y sesgos se determinan utilizando un método de optimización.

La red almacena los valores de pesos y sesgos que dan la desviación más baja entre los valores calculados y los datos experimentales proporcionados como entrada. Estos valores de pesos y sesgos definen el modelo de RNA. Por lo tanto, la RNA no es un modelo analítico (como las correlaciones empíricas comúnmente utilizadas en muchas aplicaciones, sino que es una estructura de pesos y sesgos proporcionados como matrices. Taskinen y Yliruusi (2003) presentaron una revisión completa sobre las

 ISBN 978-607-8242-11-5

aplicaciones de las redes neuronales artificiales para la estimación de las propiedades de fluidos, pero las propiedades de los LIs no fueron incluidas en esa revisión. La arquitectura de una RNA usualmente empleada para correlacionar y predecir propiedades de LIs considera una red de propagación hacia atrás con tres o cuatro capas, es decir, una capa de entrada, una capa de salida y una o dos capas ocultas (Valderrama *et al.,* 2017). El número óptimo de neuronas en cada capa se encuentra generalmente por ensayo y error, ya que no es posible saber de antemano el número adecuado de neuronas para una aplicación dada (Valderrama *et al.,* 2014, 2017). Las desventajas de RNA cuando se utilizan para la correlación y predicción de propiedades de fluidos han sido discutido en la literatura (Livingstone *et al.,* 1996), siendo los siguientes los más importantes: *(i)* requieren de un gran conjunto de datos, dependiendo de la complejidad de las relaciones entre variables dependientes e independientes; *(ii)* es necesario conocer cuáles son las variables más influyentes x_1, x_2, x_3 ... x_n en la propiedad F (x_1, x_2, x_3 ... x_n) y; *(iii)* la red puede sufrir de sobre entrenamiento, situación en la que la red memoriza en lugar de aprender, perdiendo capacidad predictiva.

Aplicación de RNA para el cálculo de T_g

Para el desarrollo del proceso de entrenamiento, prueba y predicción de la temperatura de transición vítrea, es necesario la creación de los siguientes archivos y códigos computacionales:

i) Un archive Excel (*Tg_data.xlsx*) que contiene todos los datos disponibles para entrenar y probar la red. El archivo contiene diferentes hojas incluyendo los datos de T_g y los escogidos como variables independientes, para entrenamiento y para prueba. Las variables independientes escogidas, son los descriptores moleculares mencionados anteriormente, es decir: λ, M^+, M^-, S_A, V_w, X_0 y nC.

ii) Un código Matlab de RNA (*Tg_ann.m*) consistente en dos partes: una sección de entrenamiento y una sección de prueba, ambas presentadas en la Tabla 2. En la sección de entrenamiento el programa lee los datos (de*Tg_data.xlsx*), define la arquitectura, entrena la arquitectura definida, genera los pesos y las matrices de sesgos, y archiva los datos para la sección de prueba. Es importante hace notar que las líneas 7 y 11 de la Tabla 2, las variables dependientes e independientes, están en la hoja Excel Tg_data_xls (hojas *Read_Variables_Training y Read_Tg_Training*). La línea 34 en la Tabla 2 define el almacenamiento de los datos entrenados y la línea 36 describe el almacenamiento de la matriz de peso y sesgo

En la sección de prueba, el programa lee las matrices de peso y de sesgo (línea 44) y la hoja de Excel *Read_Variables_Testing* dentro del archivo Tg_data.xlsx, que contiene las variables para las cuales se debe probar la temperatura de transición vítrea (línea 46). Los resultados se almacenan en el mismo archivo Excel en la hoja Results_Testing (línea 51). La red óptima se elige considerando los resultados en las secciones de entrenamiento y prueba. También debe mencionarse que la versión del software utilizado en los cálculos es Matlab 2012. Para aplicar la red entrenada para estimar la temperatura de transición vítrea se debe usar el programa Tg_prediction.m incluyendo el archivo Excel Tg_prediction.xlxs y la matriz de peso w_Tg.mat. Cuando se ejecuta el código de Matlab, las variables para aquellos casos para los cuales se desea predecir la temperatura de transición vítrea se leen de la hoja Read_Variab_Prediction en el archivo Tg_prediction.xlxs. El programa lee la matriz de pesos (línea 5 de la Tabla 3) y calcula la temperatura de transición vítrea para las nuevas variables utilizando el modelo de RNA definido en la matriz w_Tg.mat. La temperatura de transición vítrea calculada se almacena en el archivo Tg_prediction.xlxs (hoja Results_Prediction).

Tabla 2: Código Matlab Tg_ann.m utilizado para entrenar y probar una RNA con datos de T_g

1	% Tg_ann.m
2	% This is the Matlab code for training an ANN with glass transition temp. data, using as independent
3	% variables (λ, M+, M-, V_w)
4	%
5	% Training Section
6	% Reading independent variables for training (λ, M+, M-, V_w) from Excel file Tg_data.xlsx
7	p = xlsread('Tg_data.xlsx','Read_Variables_Training');p=p';
8	%
9	%Reading the dependent variable for training (Tg listed in the file variables_training'
10	%
11	t = xlsread('Tg_data.xlsx','Read_Tg_Training');t=t';
12	%
13	% Normalization of all data (values between -1 y +1)
14	[pn,minp,maxp,tn,mint,maxt] = premnmx(p,t);
15	% Definition of ANN:(topology, activation functions, training algorithm)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 2 *(continuación)*

16	net=newff(minmax(pn), [4,4,4,4,1],{'tansig','tansig','tansig','purelin'},'trainlm');
17	% Definition of frequency of visualization of errors during training
18	net.trainParam.show = 10;
19	% Definition of number of maximum iterations (epochs) and global error between iterations (goal)
20	net.trainParam.epochs = 1500; net.trainParam.goal = 1e-6;
21	%Network starts: reference random weights and gains
22	w1 = net.IW{1,1}; w2 = net.LW{2,1}; w3 = net.LW{3,2}; w4 = net.LW{4,3};
23	b1 = net.b{1}; b2 = net.b{2}; b3 = net.b{3}; b4 = net.b{4};
24	%First iteration with reference values and correlation coefficient
25	before_training = sim(net,pn);
26	corrbefore_training= corrcoef(before_training,tn);
27	%Training process and results
28	[net,tr]=train(net,pn,tn);
29	after_training = sim(net,pn);
30	% Back-Normalization of results, from values between -1 y +1 to real values
31	after_training = postmnmx(after_training,mint,maxt); after_training=after_training';
32	Res = sim(net,pn);
33	% Saving results, correlated glass transition temperature in an excel file
34	xlswrite('Tg_data.xlsx',after_training,'Results_Correlation', 'D2');
35	%Saving the nerwork (weigths and other files)
36	save w_Tg.mat
37	%
38	%Testing Section
39	% This is the Matlab code for testing the ANN determined above for data not used during training
40	%
41	%Reading weight and other characteristics of the trained ANN saved in the file W
42	load w_Tg.mat
43	% Reading new data not used during training from Excel file Tg_data.xlsx
44	pnew = xlsread('Tg_data.xlsx','Read_Variables_Testing'); pnew=pnew';
45	% Normalization of all variable (values between -1 y +1)
46	pnewn = tramnmx(pnew,minp,maxp);
47	anewn = sim(net,pnewn);
48	% Transformation of the normalized exits (between -1 y +1) determined by the ANN to real values
49	anew = postmnmx(anewn,mint,maxt); anew=anew';
50	% Saving the predicted glass transition temperature in the Excel file Tg_data (sheet Results_Testing)
51	xlswrite('Tg_data.xlsx',anew,'Results_Testing', 'D2');

Tabla 3: Código Matlab Tg_prediction.m utilizado para predecir T_g para otros casos usando la RNA entrenada (w_Tg.mat)

1	% Tg_prediction.m
2	%This is the Matlab code for predicting Tg using the trained ANN model (w_Tg.mat)
3	%
4	%Reading weights and other characteristics of the trained ANN saved in the file w_Tg.mat
5	load w_Tg.mat
6	% Reading Excel file with new independent variables (λ, M(+), M(-) and Vv) to predict Tg
7	pnew = xlsread('Tg_Prediction.xlsx','Read_Variab_Prediction'); pnew=pnew';
8	% Normalization of all variables (values between -1 y +1)
9	pnewn = tramnmx(pnew,minp,maxp);
10	% Obtaining the properties for the variables provided by the Excel file Tg_Prediction.xlsx
11	anewn = sim(net,pnewn);
12	% Transformation of the normalized exits (between -1 y +1) determined by the ANN to real values
13	anew = postmnmx(anewn,mint,maxt); anew=anew';
14	% Saving the predicted Tg in the Excel file Tg_prediction.xlsx (sheet Results_Prediction')
15	xlswrite('Tg_Prediction.xlsx',anew,'Results_Prediction', 'd3');

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó en las secciones anteriores, la selección del mejor modelo consideró tres parámetros estadísticos: la desviación relativa promedio ($\%\Delta T_g$), la desviación relativa absoluta promedio ($\%|\Delta T_g|$) y la máxima desviación relativa absoluta ($|\%\Delta T_g|_{máx}$) entre el dato de la literatura y el valor calculado. Estos parámetros son los más representativos para evaluar la exactitud y la bondad de un modelo, tal y como han discutido en la literatura Valderrama y Álvarez (2005). Estos parámetros estadísticos, se definen como:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\%\Delta T_g = \frac{100}{N}\sum_{1}^{N}\left[\frac{T_g^{cal} - T_g^{lit}}{T_g^{lit}}\right]_i \quad (1)$$

$$\left|\ \%\Delta T_g\ \right| = \frac{100}{N}\sum_{1}^{N}\left|\frac{T_g^{cal} - T_g^{lit}}{T_g^{lit}}\right|_i \quad (2)$$

$$\left|\ \%\Delta T_g\ \right|_{máx} = \text{máximo valor de } 100\cdot\left|\frac{T_g^{cal} - T_g^{lit}}{T_g^{lit}}\right|_i \quad (3)$$

Los autores han presentado un detallado estudio donde analizan diferentes aspectos de modelado (Valderrama *et al.,* 2016). Se diseñaron tres casos de estudio para determinar la arquitectura más apropiada de la RNA. Caso 1: se consideraron todos los descriptores moleculares (λ, M^+, M^-, S_A, V_w, X_0, y nC) con diferentes arquitecturas para elegir el modelo más adecuado; Caso 2: se consideraron diferentes combinaciones de descriptores moleculares para buscar las variables más apropiadas; y Caso 3: se puso a prueba las capacidades de predicción del modelo de RNA, mediante la aplicación del modelo de RNA a datos no utilizados en el entrenamiento ni en la prueba de la red.

Información de la literatura indica que alrededor de un 10% de los datos es apropiado para la sección de prueba (Valderrama *et al.,* 2015, 2017). Por lo tanto, de los 248 datos, se seleccionó un grupo de 223 datos para el entrenamiento y el 25 restante se dejó para prueba. Arbitrariamente, se dejaron 18 LIs para poner a prueba la capacidad predictiva del modelo. En los tres casos de estudio, la selección de los datos para la prueba se realizó en forma aleatoria. Los números aleatorios se generaron en una planilla Excel y los 25 líquidos iónicos que muestran los números aleatorios más bajos, fueron seleccionados para la sección prueba. Como se mencionó, los descriptores moleculares considerados que tienen más influencia sobre T_g son: (λ, M^+, M^-, S_A, V_w, X_0, y nC). La Tabla 4 muestra una selección de resultados para la red [4.4.4.1] con los descriptores λ, M^+, M^-, V_w

Tabla 4: Resultados para una red [4.4.4.1] con los descriptores λ, M^+, M^-, V_w

	$\%\Delta T_g$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert_{max}$
Entrenamiento (223 datos)	0.5	4.8	25.1
Prueba (25 datos)	-0.9	7.9	21.5
Predicción (18 datos)	-2.9	9.2	26.8

LÍQUIDOS IÓNICOS DEL TIPO IMIDAZOLIUM

Los resultados mostrados en las secciones anteriores se encontraron para todos los líquidos iónicos del tipo Imidazolium para los cuales se disponía de datos de T_g. Dentro de esta gran familia de líquidos iónicos de tipo Imidazolium, hay subfamilias tales como alkyl-methyl-imidazolium, alkyl-dimethyl-imidazolium, hydroxyl-alkyl-methyl-imidazolium, benzyl-imidazolium, entre otros. Las más numerosas de estas familias son el n-alkyl-3-methyl-imidazolium para el que se dispone de 99 datos. De estos datos, 80 fueron dejados para el entrenamiento, 10 para la prueba y 9 para la predicción. De acuerdo con estudios previos de los autores que exploraron el concepto de homología química para el estudio y cálculo de las propiedades de transición de las familias líquidos iónicos (Valderrama y Campusano, 2016) se esperan mejores resultados. De hecho, este fue el caso de la familia de n-alkyl-3-methyl-imidazolium. Las desviaciones relativas promedio son inferiores al 3% con desviaciones relativas absolutas máximas inferiores al 10%. La Tabla 5 presenta algunos resultados para los líquidos iónicos del tipo n-alkyl-3-methyl-imidazolium. Se puede observar que, como se esperaba, se necesitan arquitecturas más simples para obtener una precisión similar o mejor que en los casos anteriores. Las redes con más capas y neuronas no se recomiendan para la cantidad de datos disponibles para el entrenamiento. De forma similar, se puso a prueba la capacidad predictiva para esta sub familia de LIs tipo n-alky-3-methylimiodazolium, para los 9 LIs de este tipo mostrados en la Tabla 6.

Comparación con los datos estimados en la literatura de T_g

Como se describe en la sección de introducción, algunos otros enfoques, incluidos los modelos QSPR y los métodos de contribución en grupo, se han presentado en la literatura. Mousavisafavi *et al.* (2013 a, b) correlacionaron y predijeron la temperatura de transición vítrea de líquidos iónicos del tipo 1-3-dialkyl-imidazolium que podrían ser considerados como posibles electrolitos en el futuro. Para ello, emplearon el método QSPR para producir finalmente resultados satisfactorios cuantificados siguiendo varios parámetros estadísticos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 5: Resultados para diferentes arquitecturas de LIs del tipo n-alkyl-3-methyl-imidazolium. (Descriptores moleculares utilizados: λ, M^+, M^- y V_w)

Caso	*RNA*	*Entrenamiento*			*Prueba*			*Predicción*		
		$\%\Delta T_g$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert_{max}$	$\%\Delta T_g$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert_{max}$	$\%\Delta T_g$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert_{max}$
1	(2.4.1) (7 neuronas)	0.3	3.9	19.4	0.2	1.0	1.8	6.4	6.4	19.4
2	(2.2.2.1) (7 neuronas)	0.3	4.0	16.6	1.8	4.2	6.2	6.1	6.1	16.6
3	(3.6.1) (10 neuronas)	0.1	2.6	15.0	0.2	1.5	3.2	2.5	3.1	5.0
4	(3.3.3.1) (10 neuronas)	0.2	2.6	18.4	1.3	2.6	4.9	4.7	5.6	18.4

Tabla 6: T_g predicha para LIs del tipo n-alkyl-3-methyl-imidazolium utilizando una arquitectura de 4 capas (4,4,4,1). (Descriptores moleculares utilizados: λ, M^+, M^- y V_w).

Catión	*Anión*	$T_g^{\ lit}$	$T_g^{\ cal}$	$\%\Delta T_g$	$\%\lvert\Delta T_g\rvert$
$[C_3mim]$	$[BF_4]$	259.3	195.4	-24.6	24.6
$[C_4mim]$	$[BF_4]$	193.6	176.5	-8.8	8.8
$[C_2mim]$	[Br]	218	180.7	-17.1	17.1
$[C_4mim]$	[Br]	223.2	191.6	-14.1	14.1
$[C_6mim]$	[Br]	224	182.4	-18.6	18.6
$[C_2mim]$	[Cl]	234	195.5	-16.4	16.4
$[C_4mim]$	[Cl]	204.2	179.9	-11.9	11.9
$[C_6mim]$	[Cl]	198.2	195.3	-1.4	1.4
$[C_8mim]$	[Cl]	210.9	184.4	-12.6	12.6

Yan *et al.* (2013) también aplicaron un método QSPR basado en el índice topológico general para predecir las temperaturas de transición vítrea de los líquidos iónicos. Los autores consideraron cinco tipos de LIs: imidazolium (Im), pyridinium (Py), ammonium (Am), sulfonium (Sb) y triazolium (Tr). Más recientemente, Mokadem et *al.,* (2016) estimaron T_g con un método de contribución de grupo-interacción. Se consideraron varios líquidos iónicos que incluían LIs basados en imidazolium-, pyridinium-, triazolium-, sulfonium-, pyrrolidinium-, piperidinium-, phosphonium-, oxazolidinium-, Ammonium-, morpholinium-, guanidinium-, aminoacids-, y líquidos iónicos de caprolactam-based. Los autores afirman que *"este método representa una excelente alternativa a los enfoques previos para la estimación de la temperatura de transición vítrea de diversos líquidos iónicos a partir del conocimiento de su estructura molecular".* Una comparación de los resultados de otros autores y los resultados de este trabajo se presentan en la Tabla 7.

Los resultados de la Tabla 7 se proporcionan como desviación relativa porcentual con respecto a los valores de la literatura, que es la forma en que la mayoría de los autores presentan sus resultados. Para otras propiedades (como la densidad o la capacidad calorífica), pueden ser aceptables desviaciones del 10%, ya que el efecto de distintas propiedades tiene consecuencias diferentes en diversas aplicaciones (Harg, 1983). Sin embargo, el 10% en un valor de T_g podría significar diferencias de 15 a 30ºC, una desviación que nos parece no aceptable. Diferencias de 30ºC, reducen considerablemente el rango líquido del LI, rango en el que se quiere precisamente para trabajar de forma segura durante un proceso, sin la amenaza de formación de vidrios o cristales.

Proponemos aquí que un margen aceptable para estimar el éxito en el modelado de la temperatura de transición vítrea (o cualquier temperatura de transición), éste debe ser del orden de 10ºC como máximo (3%) y desviaciones relativas promedios no superiores a 3ºC (1%). Por lo tanto, ninguna de las publicaciones disponibles, ni este trabajo, puede atribuirse aún el éxito en la predicción de la T_g. Sin embargo, los esfuerzos de investigadores como los mencionados en este trabajo deben continuar especialmente en el área de estandarizar la definición de T_g y su determinación experimental.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 7: Comparación con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis con los modelos propuestos en la literatura.

Modelo	*Tipo de Líquido Iónico*	*N*	$\%\Delta T_g$	$\%\ |\Delta T_g|_{Max}$	*Ref.*
QSPR	Diferentes tipos	112 (entrenamiento) 27(prueba)	1.2 4.0	18 13.7	Mirkhani *et al.,* 2012
CG	Diferentes tipos	396 (entrenamiento) 100 (prueba)	3.6 3.7	12 12	Gharagheizi *et al.,* 2013
CG	Diferentes tipos	109	1.9	8.6	Gharagheizi *et al.,* 2013
QSPR lineal	1,3-dialkyl-imidazolium	88 (entrenamiento) 21 (prueba)	2.4 3.2	7.1 7.6	Mousavisafavi *et al.,* 2013 (a)
QSRP no lineal	1,3-dialkyl-imidazolium (109)	10 (validación)	3.4	6.7	Mousavisafavi *et al.,* 2013 (b)
QSRP utilizando índices topológicos	5 tipos (63 imidazolium; 17pyridinium;48 ammonium; 7 sulfonium and 4 triazolium)	139	3.3	4.2	Yan *et al.,* 2013
RNA con descriptores moleculares	Imidazolium (223 entrenamiento y 25 para prueba)	18 (predicción)	9.2	26.8	Este trabajo
	alkyl-3methyl-imidazolium (95 para prueba y 5 para entrenamiento	5 (predicción)	2.5	5	
	Ammonium	15 (predicción)	3.1	8.5	
	Triazolium	3 (prueba)	-2.2	2.5	
	Pyrrolidinium	3 (prueba)	1.7	7.7	

CONCLUSIONES

Se han utilizado modelos de redes neuronales artificiales para entrenar, probar y predecir la temperatura de transición vítrea de líquidos iónicos. El estudio y los resultados obtenidos en este trabajo permiten extraer las siguientes conclusiones principales: *(i)* el método es útil para entrenar, probar y predecir la temperatura de transición vítrea; *(ii)* arquitecturas simples de tres o cuatro capas con un máximo de 13 neuronas son suficientes para entrenar, y probar el modelo de red; *(iii)* en entrenamiento y prueba, el método funciona en forma aceptable con desviaciones relativas absolutas menores a 5%; *(iv)* un modelo de red mejora si se seleccionan los líquidos por familias (emparentadas por el catión); *(v)* los descriptores moleculares utilizados (λ, M^+, M^-, V_w) parecen ser variables representativas para distinguir los datos de los diferentes líquidos iónicos; y *(vi)* no es posible garantizar la capacidad predictiva de los modelos estudiados, para sustancias completamente nuevas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) Chile, a través de la beca de investigación FONDECYT 1120162, al Centro de Información Tecnológica (CIT) La Serena-Chile, por las instalaciones informáticas y a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad de La Serena por el apoyo permanente y por una beca de postgrado especial PT15142 para uno de los autores (RAC).

REFERENCIAS

Beilstein Database. MDL Information Systems GmbH (2016)

Bose, N.K., Liang, P. Neural Networks Fundamentals with Graphs, Algorithms and Applications. In: Electrical and Computer Engineering, McGraw-Hill Series, The McGraw-Hill Companies, Inc., U.S.A. (1996)

Branco, L.C., Rosa, J.N., Moura-Ramos, J.J., Alfonso, C.A. Preparation and Characterization of New Room Temperature Ionic Liquids, Chem. Eur. J., 8, 3671-3677 (2002)

Dortmund Data Bank (DDB). http://www.ddbst.com/ddb.html. Ionic Liquids (2016)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Fletcher, S.I., Sillars, F.B., Hudson, N.E., Hall, P.J. Physical Properties of Selected Ionic Liquids for Use as Electrolytes and Other Industrial Applications, J. Chem. Eng. Data, 55 778–782 (2010)

Gharagheizi, F., Keshavarz, M.H., Ilani-Kashkouli, P., Farahani, N., Tumba, K. A Group Contribution Method for Estimation of Glass-Transition Temperature of 1,3-dialkylimidazolium Ionic Liquids, J. Therm Anal Calorim., Doi:10.1007/s10973-012-2907-0, 114 (3), 1363–1382 (2013)

Gómez, E., Calvar, N., Domínguez, A. Thermal Behaviour of Pure Ionic Liquids, Ionic Liquids - Current State of the Art, Prof. Scott Handy. In Tech (2015)

Greaves, T.L., Drummond, C.J. Protic Ionic Liquids: Properties and Applications, Chemical Reviews, 108 (1), 206-237 (2008)

Harg, M. Shortcomings in physical properties correlations. An industrial view, Fluid Phase Equilib., 14, 303-313 (1983)

Holbrey, J.D., Reichert, W.M., Reddy, R.G., Rogers, R.D. Heat Capacities of Ionic Liquids and Their Applications as Thermal Fluids, ACS Symp. Ser., 856, 121–133 (2003)

IUPAC. Physical and Biophysical Chemical Division, Ionic Liquids Database (2016)

Livingstone, D.J., Manallack D.T., Tetko, I.V. Data Modeling with Neural Networks - An Answer to the Maiden's Prayer? J. Comp. Aid. Mol. Design., 11, 135-142 (1996)

Mirkhani, S.A., Gharagheizi, F., Ilani-Kashkouli, P., Farahani, N. An Accurate Model for the Prediction of the Glass Transition Temperature of Ammonium Based Ionic Liquids: A QSPR approach, Fluid Phase Equilibria, 324, 50– 63 (2012)

Mokadem, K., Korichi, M., Tumba. K. An Enhanced Group-interaction Contribution Method for the Prediction of Glass Transition Temperature of Ionic Liquids, Fluid Phase Equilibria,425, 259-268 (2016)

Mousavisafavi, S.M., Mirkhani, S.A., Gharagheizi F., Akbari, J. A predictive Quantitative Structure–Property Relationship for Glass Transition Temperature of 1,3-dialkyl imidazolium Ionic Liquids Part 1. The Linear Approach. J. Therm Anal Calorim., 111 (1), 235–246 (2013a)

Mousavisafavi, S.M., Mirkhani, S.A., Gharagheizi F., Akbari, J. A Predictive Quantitative Structure–Property Relationship for Glass Transition Temperature of 1,3-dialkyl Imidazolium Ionic Liquids Part 2. The Nonlinear Approach. J. Therm Anal Calorim., 111(2), 1639-1648 (2013b)

NIST (National Institute of Standars and Techology), Ionic Liquids Database-LThermo (2016)

Ohno, H. Electrochemical aspects of Ionic Liquids: Wiley-Interscience, 5-23, New York, U.S.A. (2005)

Schmelzer, J. W. P., Gutzow, I. S., Mazurin, O. V., Priven, A. I., Todorova, S. V., Petroff, B. P. Introduction, in Glasses and the Glass Transition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany (2011)

Talete, Software Dragon7, Molecular Descriptors for Computational Chemistry. Talete slr. http://www.talete.mi.it, Naples, Italy (2015)

Taskinen, J., Yliruusi, J. Prediction of Physico-Chemical Properties Based on Neural Network Modeling. Adv. Drug Delivery Rev., 55, 1163-1183 (2003)

Todeschin, R., Consonni, V., Mannhold, R., Kubinyi, H., Folkers, R. Molecular Descriptors for Chemoinformatics, Volume 41 (2 Volume Set), 2nd, Revised and Enlarged Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co (2009)

Valderrama, J.O., Álvarez, V.H. Correct Way of Reporting Results when Modeling Supercritical Phase Equilibria using Equations of State, Can. J. Chem. Eng., 83, 1-4 (2005)

Valderrama, J.O., Faúndez, C.A., Vicencio, V.J. Artificial Neural Networks and the Melting Temperature of Ionic Liquids, Ind. Eng. Chem. Res., 53, 10504−10511 (2014)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Valderrama, J.O., Campusano, R.A., Toro, A. Correlation and Prediction of Saline Solution Properties for their use in mineral processing using artificial neural networks, Journal of Water Reuse and Desalination, 5 (4), 454-464 (2015)

Valderrama, J.O., R.A. Campusano and R.E. Rojas, Glass Transition Temperature of Ionic Liquids using Molecular Descriptors and Artificial Neural Networks, Comptes Rendus Chimie, 20 (5), 573-584 (2017)

Valderrama, J. O., Rojas, R.E. Mass connectivity index, a new molecular parameter for the estimation of ionic liquid properties, Fluid Phase Equilibria, 297, 107–112 (2010)

Valderrama, J.O., Campusano, R.A. Melting Properties of Molten Salts and Ionic Liquids. Chemical Homology, Correlation, and Prediction, Comptes Rendus Chimie, 19(5) 654-664 (2016)

Yan, F., Xia, S., Wang, Q., Shang, Q., Ma, P. Predicting the Glass Transition Temperature of Ionic Liquids by the Quantitative Structure Property Relationship Method Using a Topological Index, F. Phase Equil., 358, 166-171 (2013)

Zhang, S., Sun, N., He, X., Lu, X., Zhang, X. Physical Properties of Ionic Liquids: Database and Evaluation. J. Phys. Chem., 35(4), 1475-1517 (2006)

Zhang, S., X. Lu, Q., Zhou, X., Li, X., Zhang, S. Li. Ionic Liquids. Liquids Physicochemical Properties, 1st Ed., Elsevier, Oxford, U.K. (2009)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Representaciones de la Tecnología y el Desarrollo Sostenible: Un Análisis en la Comunidad Costera Wayuu Cangrejito, La Guajira, Colombia

Arroyo-De La Ossa, Miryam Yorlenis
MSc. En Manejo Integrado Costero. Facultad de Ingeniería, Univ. de La Guajira, Km. 5 salida a Maicao, La Guajira-Colombia; grupo Territorios Semiáridos del Caribe. Postulante a doctora en Desarrollo Sostenible Universidad de Manizales. E-mail: marroyo@uniguajira.edu.co

Resumen

En las zonas costeras se presentan interacciones que permiten ofrecer bienes y servicios a partir de las características naturales, económicas, sociales y culturales, así como el desarrollo de actividades como la pesca por las comunidades locales; en especial las que están habitadas por grupos indígenas que ancestralmente han ocupado el territorio marino costero fundamentados en sus derechos territoriales y formas de gobierno propio. El presente artículo analiza las representaciones de la tecnología y el desarrollo sostenible desde la mirada de los indígenas wayuu asentados en la zona costera de La Guajira colombiana. Estas representaciones están enmarcadas en la organización social y el pensamiento mítico de los wayuu; es así como en la comunidad de Cangrejito el uso de tecnología en la actividad de la pesca articulado a su mundo mítico religioso propende por la armonía hombre naturaleza mediante el desarrollo practicas sostenibles en el aprovechamiento de los recursos costeros.

Palabras clave: Representaciones, tecnología, desarrollo sostenible, indígenas wayuu.

Abstract

In the coastal zones, there are interactions that allow to offer goods and services based on natural, economic, social and cultural characteristics, as well as the development of activities such as fishing by local communities; Especially those inhabited by indigenous groups who have ancestrally occupied the coastal marine territory based on their territorial rights and forms of self-government. This paper analyzes the representations of technology and sustainable development from the perspective of the Wayuu Indians settled in the coastal area of La Guajira in Colombia. These representations are framed in the social organization and mythical thinking of the Wayuu; It is as well as in the community of Cangrejito the use of technology in the activity of the articulated fishing to its mythical religious world tends by the harmony man nature by the development sustainable practices in the use of the coastal resources.

Keywords: Representations, technology, sustainable development, Wayuu indigenous.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son ecosistemas frágiles importantes para el país, de ahí que el Ministerio del Medio Ambiente (2001) como estrategia de planificación expidió la Política Nacional de Ordenamiento Integrado de las Zonas Costeras Colombianas para orientar el manejo integrado costero, considerando los aspectos sociales, culturales, económicos y ambientales; cuyos principios básicos de política están fundamentados en la Ley 99 de 1993 como ley rectora en materia ambiental en el país, así mismo se establecen las estrategias, programas, metas, acciones y los instrumentos que permitan la vinculación de las comunidades locales y de grupos indígenas en el contexto político desde lo promulgado en la carta constitucional de 1991, donde se señala que las decisiones en territorios indígenas debe garantizar su participación en la toma de decisiones conjuntas para la administración, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales y para el caso de interés de los recursos costeros desde una visión propia del desarrollo, lo que se constituye en un tema de fundamental importancia para los procesos de manejo integrado.

En los sectores costeros se desarrollan usos y actividades que permiten la subsistencia de comunidades locales y de instituciones públicas o privadas presentes en dichas áreas generando interacciones que pueden modificar la estructura de los ecosistemas por las actividades de desarrollo; en los sectores costeros habitados por grupos indígenas como es el caso de la etnia wayuu en La Guajira colombiana se accede a los recursos marino costeros desde sus formas tradicionales, más sin embargo no desconocen que elementos tecnológicos utilizados en sus faenas de pesca contribuyen al rendimiento de sus jornadas y es así como se muestra un panorama complejo en las relaciones que se han desarrollado entre los diferentes actores que intervienen en el uso y aprovechamiento de los recursos, pues cada uno de ellos los aprovecha

 ISBN 978-607-8242-11-5

y utiliza de forma distinta; desde esta perspectiva se integran la visión ancestral de los wayuu y de la sociedad mayoritaria, es decir los alijunas (persona no wayuu) quienes tienen formas distintas de aprovechar los recursos costeros. Situación que es evidente en las zonas costeras habitadas ancestralmente por indígenas de la etnia wayuu en La Guajira colombiana, donde el sistema de formas de uso del territorio y de los recursos naturales se fundamenta en su cosmovisión: conocimientos tradicionales, saberes populares, prácticas y expresiones culturales transmitidos por los abuelos alrededor de los espacios y recursos marino costeros; y su interacción con los alijunas, instituciones y organizaciones sociales.

Estas relaciones interculturales son evidentes en el departamento de La Guajira donde según Fuentes y Sierra (2012) se tienen un área costera de 1.458 km^2 que se extiende por más de 650 km de línea de costa. Este territorio costero presenta tierras semidesérticas ocupadas ancestralmente por indígenas de la etnia wayuu, el grupo indígena más representativo del departamento y el de mayor población indígena en el país con criterio autorreconocimiento cultural. El pueblo wayuu en su estructura de organización social concibe a los wayuu pastores como ricos, ya que el ganado es un símbolo que representa riqueza y los que no poseen ganado como los pescadores se consideran pobres.

Los pescadores playeros o *apalaanshi* de *palaa* mar (Guerra, 1990) ubicados en la base de la organización social de los wayuu, han introducido la tecnología en la pesca, su principal actividad económica; complementándose así el conocimiento tradicional con el saber occidental. En este sentido Olive (2007) manifiesta que la ciencia, la tecnología y la tecnociencia son herramientas indispensables para el desarrollo cultural de los pueblos, ya que permiten generar conocimiento y aprovecharlo en su beneficio, al maximizar la capacidad de generar, apropiarse y aprovechar el conocimiento, tanto del saber tradicional como de los científicos y tecnocientíficos, manteniendo la capacidad de decidir de manera autónoma cuales son las practicas que desea modificar. Estos cambios asociados al uso de la tecnología inciden en los procesos de aculturación y la visión de desarrollo que desde la mirada occidental choca con el pensamiento mítico, el arraigo a lo propio y ancestral. En la cultura wayuu no se tiene una clara definición de desarrollo sostenible, y lo más aproximado a ello es la armonía y el bienestar entre el hombre y la naturaleza orientada por los seres sobrenaturales, quienes castigan o premian el comportamiento del wayuu. Esto es coincidente con lo expuesto por Urribarri (2011) frente al desarrollo como fenómeno social percibido de una manera determinada por cada sociedad, y en la mayoría de los idiomas indígenas se carece del concepto de desarrollo.

Considerando estas particularidades de los wayuu y su pensamiento simbólico se hizo un análisis de las representaciones de la tecnología y el desarrollo sostenible en la comunidad costera wayuu Cangrejito; para ello se aplicó el método etnográfico y se utilizaron técnicas de observación participante, encuestas, entrevistas semi-estructuradas y los grupos de discusión, que requirieron ser traducidos a la lengua nativa (*wayuunaiki*); los instrumentos aplicados fueron el diario de campo, los formatos de observación y los registros fotográficos y de audio. Se hizo revisión de estudios y planteamientos de diversos autores sobre las zonas costeras, sus usos, actividades y problemáticas asociadas, su manejo y la interdisplinariedad; las percepciones de la territorialidad y el acceso a los recursos marino costeros; los aspectos culturales de la etnia, el diálogo intercultural, el conocimiento científico y el saber popular de los indígenas como productores activos de conocimiento; combinación apropiada para generar información útil en la gestión y el manejo integrado de las zonas costeras y para la toma de decisiones que permitan al pueblo wayuu ingresar en las dinámicas de la planificación, el ordenamiento territorial ambiental y del desarrollo sostenible.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de poblamiento del territorio costero por los wayuu: La dinámica de poblamiento de los indígenas wayuu a lo largo de la Península de La Guajira colombiana en el territorio de resguardo indígena de la Media y Alta Guajira ha sido históricamente determinada por las hostilidades del territorio semidesértico y las relaciones comerciales generadas entre los wayuu y los alijunas; es así como grupos de familias que comparten un ancestro común de su mitología y una condición social conforman clanes (Guerra, 2002) y han definido un patrón de asentamiento disperso en el territorio en el cual influyen aspectos de tipo físico como las fuentes hídricas (ríos, lagunas y en las márgenes de la zona costera). Los antecedentes históricos de Cangrejito muestran que las familias pertenecientes a los clanes *Wouliyuu, Uliana, Epinayuu, Jusayuu* y *Epieyuu* migraron desde Punta Taroa (Bahía Honda en la Alta Guajira) hasta la Laguna Buenavista y las playas de Riohacha (por el sector del brazo Cangrejito). Esta primera comunidad se denominó *Kalankaala*, el cual por un fuerte invierno desapareció y éstas familias se reubicaron en cercanías de la desembocadura del brazo Cangrejito, fue así como se habitó en lugar seco o tierras relativamente secas llamado *Julujutshimana*, posteriormente este nombre fue cambiado por el de Cangrejito, debido a la gran presencia de cangrejos que había en ese entonces en la zona, sin embargo las frecuentes inundaciones de la planicie aluvial deterioraban las viviendas. Estas familias pasaban una larga temporada en la región Media y luego partían a la Alta Guajira aprovechando los vientos del oeste; a su

 ISBN 978-607-8242-11-5

regreso traían más familiares y animales y pasaban cada vez temporadas más largas (años), fue así como poblaron este territorio.

Caracterización socioeconómica y cultural: La población total de indígenas en Colombia es de 1.392.623 (3,4%) habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas [DANE]) teniendo como criterio de identificación el autorreconocimiento cultural (costumbres y tradiciones) o por los rasgos físicos. El departamento de La Guajira es el tercer departamento a nivel nacional con una población indígena de 278.212 habitantes que representan el 44,94% del total de la población (DANE, 2005). Riohacha tiene una población total wayuu de 33.647 personas, de las cuales 22.447 (4,2%) habitan áreas resguardadas (Plan de desarrollo Riohacha, 2008). Arroyo De La Ossa señalo que Cangrejito en el año 2012 tenía una población de 343 personas y 75 familias con una distribución por sexo de 168 mujeres y 175 hombres, representando una relación 1:1; para el año 2016 la comunidad (con 398 habitantes) mostró un crecimiento poblacional del 1,16% en los últimos cuatro años. Las familias asentadas en Cangrejito son pertenecientes a los clanes *Wouliyuu* (el más representativo), seguida por los *Epieyuu, Epinayuu*, y en menor proporción los *Jusayuu* y *Pushaina*; por clan se define un grupo de parentesco cuyos miembros postulan su filiación desde un antepasado común generalmente legendario o mítico (Franco y Pérez, 2003).

Relativo a la composición de la población por edades se toma como referentes los datos reportados por Arroyo-De La Ossa (2012), encontrándose que el mayor porcentaje de personas que habitan en Cangrejito lo representa el 39,1% (18-44) de la población total; por lo que se presume que la mayor parte de los miembros de la comunidad en edad productiva (pescadores) no migran con frecuencia a otros sectores para obtener otro tipo de ingresos para la subsistencia. En segundo lugar con el 26,8% (5-14) demuestra que la población de niños y jóvenes es relativamente alta por lo que se puede inferir que se mantendrá en equilibrio poblacional si la comunidad no es impactada por proyectos posibles a mediano plazo (turismo, exploración y explotación de hidrocarburos, etc.) que atraigan personas de otros lugares, a los cuales se les permita el ingreso al territorio. En tercer lugar se presentan los menores porcentajes de la población integrada por el 13,7% (1-4); el 7% (15-17); el 6,1% (0-1) y el 5,8% (45-65). La minoría es representada por los mayores a 65 años (1,5%), lo que permite presumir que la población de niños es mayor que la de adultos, lo que refleja que la población es relativamente joven.

En la dimensión económica se describen los procesos productivos y tecnológicos existentes en la comunidad de estudio. Los estudios etnográficos diferencian claramente dos formas principales en las cuales los wayuu hacen uso de los recursos naturales para su subsistencia: el pastoreo y la pesca (Correa 1993 y Guerra 1990, 2002). Cangrejito es un asentamiento *apalaanshi* donde los recursos del medio costero son aprovechados en actividades como la pesca. La pesca artesanal es la principal actividad económica de los indígenas wayuu asentados en la comunidad de Cangrejito donde el 31% (108) de la población son pescadores. El Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente [INDERENA] en el Acuerdo Nº 0054 del 11 de agosto de 1988, estableció la zona de reserva para la pesca artesanal y/ó de subsistencia para el municipio de Riohacha, con límite máximo la isóbata de las 15 brazas. Las embarcaciones con permisos de pesca industrial y comercial exploratoria, deben respetar el área que se reserva mediante el acto administrativo que creó la zona de reserva (POT Riohacha, 2002).

La pesca en Cangrejito se maneja de manera individual y colectiva; la primera es la que se realiza en lanchas o canoas de manera diaria y la segunda se realiza en lanchas de fibra de vidrio con motor fuera de borda para el beneficio común; puede decirse que es organizada pues se lleva un control en la rotación o turnos de extracción establecidos por la comunidad. Es importante señalar que los usos y derechos tradicionales se respetan y se reconocen.

Tipo de embarcaciones y tecnología. Los pescadores carecen de suficientes embarcaciones acordes a las actividades pesqueras, las faenas de pesca se realizan en su mayoría (98%) de manera tradicional en cayucos o canoas (*anua*) construidas en madera con un motor *toko-tok*o (se llaman así por el sonido que producen), y en menor proporción (2%) en embarcaciones de fibra de vidrio con motor fuera de borda. Las embarcaciones cuentan con equipos técnicos como GPS (Geo Posicionador Satelital), motor (Hp16), chalecos salvavidas, cavas con hielo, combustible (en pimpinas), cordeles, atarraya, víveres y el malambo con *chirrinchi* como amuleto.

Otras artes de pesca habituales es el palangre, línea de mano, anzuelos o cordel y el buceo a pulmón usuales en mar abierto. Los pescadores se han visto favorecidos con el cambio del arte de pesca de cordel a palangre, mejoramiento de las embarcaciones, dotación de equipos y de los arrecifes, lo que ha permitido maximizar sus ganancias.

Estructura de tripulaciones: Las embarcaciones se integran desde dos (cuando se pesca con hilo y transparente), cuatro (cuando se pesca con palangre) y seis (para buceo en arrecifes naturales y artificiales)

ISBN 978-607-8242-11-5

tripulantes; y para su reclutamiento se tiene como criterio principal la existencia de las relaciones de residencia y parentesco, los padres inician a sus hijos en las labores de pesca desde temprana edad (8 y 10 años) para su enseñanza; los abuelos también pueden participar en la formación tradicional de sus nietos compartiendo con ellos los conocimientos de las artes y los secretos de éstas y los sitios de pesca, para garantizar la continuidad de la actividad pesquera de generación en generación.

Productividad de la pesca: Los sitios más productivos son los arrecifes artificiales, la piedra sagrada de *Kalankalaishit,* con alta productividad de langostas y peces, y la piedra de *Walashkimana (*que significa cabello), esta piedra está cubierta de pastos marinos lo que la hace rica en diversidad de especies marinas como pargos (pesca con cordel), tortugas, langostas y caracoles. Es común encontrar una gran variedad de especies de peces (*jime, jima*) acordes con la temporada como: Sábalo (*yamula*), mero (malijua), tiburón (*püyüi*), bagre (*siyu, urulamai*), moluscos (*uluükath, totka, kasuuwo´u*), morena o anguila de mar (*wüipalairukujat*), pargo (*kaloushuü*), pargo rojo (*kaloushuüisho*s), robalo (*werriuü*), mojarra (*kashassas*), boca colora (*coroncono*), macabi (*joupunaa*). Durante el estudio el 80% de los pescadores manifestaron conocer la presencia del pez sapo (*jimeperrüi*) una especie invasora nueva en el sector. Las ganancias de la pesca oscilan en promedio entre 20 mil y 40 mil pesos en días normales; el 50% de éstas son para el dueño de la lancha y el restante se divide en partes iguales entre los pescadores. La comercialización del pescado se da de manera directa en la orilla de la playa y a través de los comercializadores directos e indirectos en la costa Caribe colombiana o al interior del país.

Acceso a los recursos costeros por los wayuu de Cangrejito: El sistema de acceso al territorio está determinado por los wayuu en función de los principios de precedencia*,* adyacencia y subsistencia; la precedencia está definida a partir de las reglas de donación entre vivos y de la herencia, y la adyacencia a un recurso natural determinado (Correa, 1993; Guerra 1990; Sandoval y Zuluaga, 2000). La adyacencia establece el acceso a los recursos mineros, pesqueros, de fuentes de agua, de bosques y de sabanas no individualizados en parcelas. Estos recursos son considerados comunales por los wayuu, pero su acceso es preferencial para las familias con asentamientos de adyacencia a dichos recursos, "siempre y cuando no sean enemigos" (Sandoval y Zuluaga 2000, p. 187). En opinión de Guerra (1990, p. 177) para los playeros *apalaanshi*, "(…) la adyacencia al litoral se traduce en el derecho de un grupo familiar a explotar secularmente (…) y el respeto al sitio en el mar donde un individuo coloca un palangre o una trampa en el lecho marino".

La mayoría de los habitantes de Cangrejito tienen su cementerio ubicado dentro del territorio de la comunidad, cada grupo familiar tiene el suyo, lo que indica que se aplican los principios de precedencia y subsistencia, mediante el cual señala Guerra (2002) se hace el reconocimiento social a determinado grupo como explotador de determinados recursos adyacentes a su territorio ancestral. En esta comunidad no hay conflictos territoriales, pues se tienen claros sus límites internos. Su dinámica de poblamiento evidencia que históricamente han tenido que migrar dentro del mismo territorio a causa de los fenómenos naturales que generan inundación y por consiguiente pérdida de territorio. Esta pérdida del territorio no es asumida de manera negativa por los pobladores de Cangrejito, para ellos es normal que las tierras bajas se inunden, y en época de verano cuando el terreno se seca regresan a esta área.

Por otra parte, la aplicación del principio de adyacencia en la comunidad de Cangrejito también se hace clara al analizar las formas de acceso a los recursos marítimos y pesqueros, tal como lo describe Guerra (1990). Un claro ejemplo de esto se presenta en la dinámica de explotación de la laguna costera Buenavista, ubicada en la jurisdicción de la comunidad de La Raya y que forma parte del municipio de Manaure, pero cuyos derechos de uso y acceso son también socialmente reconocidos a la comunidad de Cangrejito con la que se comparte por su ubicación adyacente. Si bien, la dinámica de poblamiento y el mapa histórico evidencian que la primera comunidad (llamada *Kalankaala*) fue ubicada muy cerca de esta laguna, vale la pena destacar que los límites territoriales planteados por la cultura occidental no existen dentro de la concepción de territorio para los wayuu, quienes se definen a sí mismos como: "una sola cultura nómada y migrante (…) hoy podemos estar aquí porque hay buena pesca y mañana podemos estar en cualquier otra parte de nuestra patria, donde algún familiar realizando otras actividades" (Enrique *Wouliyuu)*.

Desarrollo sostenible para el pueblo wayuu:

Para referirse al desarrollo sostenible hay que considerar lo planteado desde década de los ochenta donde se plantea un discurso de desarrollo asociado a un crecimiento económico el cual implica el aprovechamiento de los recursos naturales; si bien se han establecido procesos y se han regulado las formas de acceso también es cierto que éstos no garantiza que no se genere un impacto ambiental significativo sobre el medio ambiente y sobre la salud humana; es así como el aspecto social asociado de manera directa con el ambiental se involucran como ejes centrales de este postulado que promulga una armonía y equilibrio entre hombre naturaleza a partir de un uso sostenible y equitativo

 ISBN 978-607-8242-11-5

intergeneracionalmente. Inmersa en estas tres perspectivas de desarrollo sostenible, está la idea de que es necesaria la planificación, es decir, la aplicación del conocimiento científico y técnico para dirigir el cambio social, para cambiar las costumbres en cuanto al uso del territorio y los recursos naturales.

Este planteamiento de desarrollo sostenible ha sido acogido en el marco de estructuración de los procesos de planificación, es así como en la PANOACI (MMA, 2001), afirman que la zona costera requiere enfoques especiales de manejo y planificación para asegurar su conservación, su desarrollo sostenible y la preservación de los valores culturales de las comunidades tradicionalmente allí asentadas. Estos procesos de planificación dirigidos hacia esos espacios a través del MIZC, tienen como objetivo garantizar un desarrollo sostenible del territorio y una articulación entre los diferentes sectores y actores sobre el mismo; lo que se debe direccionar a través de la sostenibilidad ambiental y el ordenamiento ambiental territorial, las cuales buscan conocer y valorar los recursos naturales para reglamentar las prioridades y los usos sostenibles del territorio, así mismo establecen las instancias claras para su desarrollo dentro del proceso de administración y constituyen la base para el MIZC, y complementariamente permiten articular los planes de desarrollo, ordenamiento territorial y los planes de vida de la comunidades indígenas.

Según la PNAOCI (MMA, 2001) y Steer et al., (1997) los enfoques tradicionales, sectoriales, de manejo no han podido detener la degradación ambiental y la intervención debe ser orientada mediante planes integrados de desarrollo costero, que puedan minimizar los efectos negativos de estas tendencias y permitirá el uso y manejo adecuado de los recursos de la zona costera. Por lo que la planificación y manejo se debe sustentar en el conocimiento de la dinámica de los problemas de las zonas costeras y su tratamiento particular, participativo y dinámico. Un enfoque por ecosistemas se basa en la aplicación de las metodologías científicas adecuadas que se concentran en niveles de la organización biológica que abarcan los procesos esenciales, las funciones y las interacciones entre organismos y su ambiente. Se reconoce que los seres humanos y su diversidad cultural constituyen un complemento integral de los ecosistemas (MMA, 2001).

En la puesta de debate de actualidad surge el concepto emergente del Buen Vivir o Vivir Bien en la búsqueda de respuestas a la problematización de la relación entre la sociedad y su entorno natural ha transcendido las esferas políticas; y se ha incluido en las cartas constitucionales de Ecuador (2008) y Bolivia (2009) con gran precisión se hace referencia al Buen Vivir y en otros como Colombia en 1991 se incorpora la variable ambiental con la denominación de desarrollo sostenible antes mencionada. En este sentido Apala (2013) señala que el pensamiento filosófico de los pueblos indígenas *Abya Yala* se fundamenta en la sabiduría cósmica ancestral, que considera en su cosmovisión la complementariedad de lo material y lo espiritual permite el equilibrio y donde todo se relaciona

Diversos autores que han estudiado a los wayuu se manifiestan frente a este tema, es así como Rivera (1990) reflexiona sobre el desarrollo como una manera de construir la realidad en el caso de los wayuu de La Guajira colombiana, el autor analiza el poder en la definición de desarrollo y la relación hombre-naturaleza en el territorio étnico y los cambios en la vida de los wayuu, afirma Rivera “Paradójicamente, los wayuu tienen lo social en la base de la misma de su definición de la naturaleza; sin embargo no parecen tener una definición de desarrollo.” (1990, p. 253). Para Guerra (2012) el desarrollo desde una mirada económica es atractivo para los sectores políticos, empresarial y académico, pero para los ancestros se hace una clara lectura del arraigo a lo propio y el valor de las raíces ancestrales. Perrín en su estudio señala que “no se encuentra por lo tanto algo muy original en la actitud de los guajiros frente al progreso y la civilización” (1980, p. 267) y Rivera (1990) explica que la noción de desarrollo como crecimiento propio del pensamiento occidental fue el pilar del impacto social acompañado de la desconfianza e inseguridad en los *apushi* que vieron destruir sus pozos, casas, cementerios, etc., el deterioro ecológico y el etnocidio sobre el territorio étnico como lugar geográfico con potencialidad en sus recursos naturales.

CONCLUSIONES

Tradicionalmente en el territorio étnico se desarrollan procesos de migración interna obedeciendo a su patrón de asentamiento poliresidencial y en respuesta a las necesidades de búsqueda de agua y tierras fértiles.

La zona costera ofrece recursos de subsistencia y son propicias para el desarrollo de actividades económicas como la pesca, dada su alta productividad y biodiversidad. Es así como la mezcla entre tradición y los procesos de modernización, ha generado un autoajuste interno que integra las prácticas ancestrales con la tecnología.

ISBN 978-607-8242-11-5

Implementar acciones de sostenibilidad desde la mirada del buen vivir o vivir bien en el territorio étnico implica evaluar las percepciones de la comunidad local sobre su futuro, la existencia del plan de vida wayuu como carta de direccionamiento y desde su autonomía hacer una construcción propia del pueblo wayuu conforme sus propios valores y aspiraciones, a partir de su experiencia histórica, recursos y sus potencialidades.

REFERENCIAS

Apala, P. Formas y estrategias de trasmisión de saberes y conocimientos en las naciones y pueblos indígenas originarios: Hacia la construcción de una pedagogía propia en Machaca, G. & Zambrana, A (Eds.). *Hacia una educación intracultural, intercultural y plurilingüe: metodologías y estrategias interculturales de enseñanza y de aprendizaje.* Cochabamba: FUNPROEIB Andes. Pp. 97-109. (2013).

Arroyo-De La Ossa, M. Lineamientos para el manejo integrado costero con pertinencia étnico-cultural. Universidad del Magdalena. Tesis de Maestría en Manejo Integrado Costero. Santa Marta. 198 p. (2012).

Correa, Hernán D. "Los wuayúu: pastoreando el siglo XXI", en Encrucijadas de Colombia amerindia. Bogotá: ICAN-Colcultura. pp. 203-228. (1993).

Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE. Censo General. Disponible en: http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/index.php? . (2005).

Franco, F. y Pérez, L. M. Antropología social. Bogotá: UNAD. 274 p. (2003).

Fuentes, J. y Sierra, P. Un atlas para la zona marino-costera Guajira. En Corpoguajira e Invemar. Atlas marino costero de La Guajira. Serie de publicaciones Especiales del Invemar. No 27. Santa Marta, Colombia. Pp. 16-23. (2012).

Guerra, W. Los reglamentos de convivencia intercultural en los proyectos de desarrollo en territorios indígenas: el caso de los proyectos minero-energéticos en la península de La Guajira. Revista Wale´kure, revista de investigación en cultura y desarrollo. No 2. Pp. 26-33. (2012).

Guerra, W. La disputa y la palabra. La ley en la sociedad wayuu. Bogotá: Ministerio de Cultura. 327 p. (2002).

Guerra W. "Apalaanchi: una visión de la pesca entre los wayuu". En: Ardila Gerardo (ed.). *La Guajira. De la memoria al porvenir*. Bogotá: Universidad Nacional - FEN. pp 163-189. (1990).

Ministerio del Medio Ambiente. Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia. Dirección de Ecosistemas-MMA. Bogotá D.C. 95 p. (2001).

Olive, L. La ciencia y la tecnología en la sociedad del conocimiento. Ética, política, epistemología. FCE. México. (2007).

Plan de Ordenamiento Territorial [POT] del municipio de Riohacha. Alcaldía de Riohacha. (2002).

Perrín, M. El Camino de los Indios Muertos. Mitos y Símbolos Guajiros. *Monteavila Editores, Caracas*. (1980).

Rivera A. "El Desarrollo como una manera de construir la realidad" en Ardila Gerardo (ed.) La Guajira. Bogotá: Universidad Nacional - FEN. pp 241-256. (1990).

Sandoval, A. y Zuluaga J. "Control estatal y social de los resguardos: Los wayuu y su territorio" en Letras Jurídicas. Empresas Públicas de Medellín. Vol. 5 No. 2. Pp. 183-190. (2000).

Steer, R., et al.,. Documento base para la elaboración de la Política Nacional de Ordenamiento Integrado de las Zonas Costeras Colombianas. Documento de consultoría para el Ministerio del Medio Ambiente. Serie publicaciones especiales No.6 390 p. (1997).

Urribarrí, V. P. Cosmovisión indígena y construcción del socialismo. En revista *Diálogo de saberes. Universidad Bolivariana de Venezuela*. Año 4 No 10. Ediciones imprenta Universidad UBV. Pp. 12-28 (2010).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Solubilidad de Gases de Aire a Altas Presiones en Soluciones Salinas de Agua de Mar

José O. Valderrama[1,2], Richard A. Campusano[2,3] y Luis A. Forero[4]
(1) Univ. de La Serena, Depto. de Ing. Mecánica, Casilla 554, La Serena-Chile
(2) Centro de Inform. Tecnológica, Mons. Subercaseaux 667, La Serena-Chile
(3) Univ. de La Serena, Depto. de Física y Astronomía, Casilla 554, La Serena-Chile
(4) Univ. Pontificia Bolivariana, Fac. de Ing. Química, A.A. 56006, Medellín-Colombia
(jvalderr@userena.cl)

Resumen

Se analizan varios modelos para correlacionar la solubilidad del nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) en soluciones salinas a alta presión. La solubilidad de estos gases a alta presión es de especial importancia en aplicaciones en oceanografía. A una presión fija (por ejemplo la presión atmosférica), la solubilidad de un gas en agua y en soluciones salinas depende de la temperatura y la salinidad del agua. A presiones más altas se debe considerar el efecto de la presión. Los modelos se formulan en forma analítica y se ajustan los parámetros usando el software DataFit y se utiliza Solver de Excel para determinar la fugacidad mediante la ecuación de estado VPT propuesta por uno de los autores. El estudio se realiza usando datos de solubilidad de gases en soluciones salinas a presiones de hasta 592 atm. para N_2 y hasta 987 para O_2. Se analiza así la constante de Henry (H, para considerar el efecto de la temperatura T), el parámetro de Setschenow (k_s, para considerar el efecto del contenido de sal S), y el volumen molar parcial a dilución infinita del soluto V_1^{∞} para considerar el efecto de la presión. Se proponen diversas expresiones para dichas funciones, en el rango de temperatura de 273-393 K, salinidades de 0-260 g/kg y presiones hasta 592 atm. (N_2) y 987 atm. (O_2). Con la mejor ecuación propuesta, las desviaciones máximas de los valores dados por el modelo son inferiores al 5%.

Palabras clave: constante de Henry, solubilidad, ecuación VPT, soluciones salinas, parámetro de Setschenow

Solubility of Air Gases at High Pressures in Saline Solutions of Seawater

Abstract

Several models used to correlate the solubility of nitrogen (N_2) and oxygen (O_2) in saline solutions at high pressure is analyzed. The solubility of these gases at high pressure is of especial importance in applications of oceanography. At a fixed pressure (for instance at atmospheric pressure), the solubility of a gas in water and in saline solutions depends on temperature and salinity. At higher pressures, the effect of the pressure must be considered. The models are analytically expressed and parameters are determined using the commercial software DataFit and the tool Solver of Excel is used to determine the fugacity through the use of the VPT equation of state, proposed by one of the authors. The study is done using solubility data of gases in saline solutions at pressures up to 592 atm. for N_2 and 987 for O_2. Henry´s constants are employed to consider the effect of temperature T, Setschenow equation (k_s) to consider the salt content (S), and the partial molar volume at infinity dilution V_1^{∞} to consider the effect of pressure. Several expressions for those functions in the temperature range from 273 to 393 K, salinities from 0 to 260 g/kg and pressures up to 592 atm. (for N_2) and 987 atm. (for O_2). With the best equation the maximum deviations of calculated values are lower than 5%.

Keywords: Henry´s constants, solubility, VPT equation of state; saline solutions; Setschenow´s parameter

 ISBN 978-607-8242-11-5

Introducción

La solubilidad de gases en agua de mar y en soluciones salinas ha sido materia de estudio y análisis por varios años en distintas áreas del conocimiento como oceanografía, geoquímica, limnología y biología y se han propuesto diferentes modelos para su correlación y predicción (Sano y Takahata, 2005; Mao y Duan, 2006). Otros estudios están relacionados con procesos industriales que utilizan el agua de mar y soluciones salinas que son absorbidas en dichas aguas (Tishchenko *et al.,* 2005; Gentina y Acevedo, 2013).

El aire está formado principalmente por nitrógeno (~78 porcentaje molar) y oxígeno (~21%) y gases nobles, principalmente argón (~0.9). Otros gases tales como dióxido de carbón, neón, helio, metano, kriptón, hidrógeno, xenón y ozono completan el 0.1% restante (Wallace y Hobbs, 2006). El nitrógeno es un gas inerte a diferencia del oxígeno que reacciona químicamente con diferentes sales contenidas en el agua de mar. La solubilidad de los gases del aire es menor en el agua de mar que en el agua pura debido a la presencia de iones de diferentes tipos de sales de cloruro y sales sulfatadas formadas con diferentes minerales como magnesio, calcio y potasio (AWWA, 2011).

La solubilidad de los gases es necesaria para analizar la formación de hidratos de gas (Tishchenko *et al.*, 2005), para el cálculo de procesos en la industria pesquera (Mel'nichenko *et al.*, 2008) y para aplicaciones en procesos de separación en la industria minera, en la que se utiliza agua de mar (Rao y Finch, 1988; Kuopanportti *et al.,* 1997). La estimación de las solubilidades del oxígeno es importante para el diseño del tratamiento de aguas residuales y fermentaciones aeróbicas (Schumpe *et al.,* 1978). En aplicaciones en las industrias mineras Haarhoff y Edzwald (2013) estudiaron la importancia de la eficiencia de transferencia de aire en saturadores a presión en procesos de flotación con aire disuelto (DAF). Del mismo modo, la aplicación de la biolixiviación a la minería del cobre ha sido analizada por Gentina y Acevedo (2013) y el modelado de la lixiviación en pila de sulfuro de cobre ha sido realizado por Bennett *et al.* (2012).

Datos sobre la solubilidad de oxígeno y nitrógeno en agua y soluciones salinas han sido reportados en la literatura y hay disponibles diversos conjuntos de datos. Sin embargo, para los cálculos repetitivos en el diseño, modelado y simulación de procesos, se prefieren modelos matemáticos que permitan estimar la solubilidad. Se han propuesto modelos empíricos y semi-empíricos para estimar la solubilidad de los gases en el agua de mar en función de la temperatura, la presión y la salinidad del agua. El efecto de la temperatura se basa generalmente en la ecuación de Van't Hoff, el efecto de la salinidad en la relación de Setschenow a temperatura constante (Setschenow, 1889), y el efecto de la presión a través de relaciones termodinámicas como la de Krichevsky y Kasarnovsky (Walas, 1985).

Termodinámica sobre solubilidad de gases

En los problemas de solubilidad se sigue aplicando la ecuación fundamental del equilibrio de fases para el componente de baja composición (llamado "soluto") definida como la igualdad de fugacidad del soluto en ambas fases, aplicándose entonces la expresión: ($f_i^V = f_i^L$). Las fugacidades de cada componente en ambas fases pueden ser calculadas usando una ecuación de estado, la que relaciona las variables presión, temperatura y concentración de los componentes en ambas fases. Este es un procedimiento largo y con costos computacionales altos. Sin embargo, observaciones experimentales indican que un procedimiento más simple (pero basado en la ecuación fundamental) es más conveniente cuando se trata de gases disueltos en líquidos. La aproximación usada establece que a bajas concentraciones del soluto gas en la fase líquida, la fugacidad de dicho soluto en la fase líquida sigue un comportamiento lineal con la concentración de ese componente, es decir:

$$f_i^L = H_i \cdot x_i \tag{1}$$

Donde i es un soluto y H_i es una "constante" conocida como constante de la Ley de Henry, o simplemente constante de Henry, a T constante, que se define como:

$$H_i = \lim_{x_i \to 0} (f_i^L / x_i) \tag{2}$$

De esta definición se desprende que la constante de Henry depende de la temperatura y de la presión, ya que la fugacidad del soluto en la fase líquida depende de estas variables. La dependencia de H_i en T y P se describe en la literatura y se detalla la forma en que la ley de Henry puede aplicarse a presiones más altas (Walas, 1985). La dependencia de H de la concentración no es considerada, aunque hay propuestas para extender la ley de Henry a concentraciones más altas y que requieren considerar que H depende de la concentración del soluto en la fase gas. En estas ecuaciones (1) y (2) no hay restricciones sobre el número de componentes en la mezcla. La única consideración es que la concentración de un componente dado (podría haber más de uno) es baja en la fase líquida (que puede tener cualquier número de componentes,

 ISBN 978-607-8242-11-5

solutos o solventes). En la práctica, las constantes de Henry se evalúan a una presión de referencia dada y luego el efecto de P se introduce de forma sencilla siguiendo la relación de la fugacidad con la presión. Sin embargo, la dependencia de H_i con la temperatura es algo más compleja (debido a la inclusión de términos de entalpía) y se prefiere tener valores específicos de H para diferentes temperaturas. Se han propuesto correlaciones empíricas de H en función de la temperatura (Valderrama *et al.,* 2016).

Si la constante de Henry es calculada en forma experimental con datos isotérmicos, extrapolando (f_i^L/x_i) haciendo $x_i \to 0$, el valor obtenido corresponde a la constante de Henry, a la temperatura experimental y la presión del sistema para $x_i = 0$, que debe ser la presión de saturación del solvente (P^0). La presión de vapor P^0 puede ser calculada y ha sido propuesta por los autores en un trabajo previo (Valderrama *et al.,* 2016) utilizando Aproximantes de Padé (con T_0 =273K; $a_1 = -4.483*10^{-1}$; $a_2 = 7.152*10^{-2}$; $a_3 = -6.580*10^{-4}$; $a_4 = -2.831*10^{-6}$; y $b_2 = 4.303*10^{-3}$).

$$P^0(T,S) = \frac{a_1 + a_2 \cdot (T - T_0) + a_3 \cdot S + a_4 \cdot (T - T_0) \cdot S}{1 + b_2 \cdot (T - T_0)} \tag{3}$$

Para considerar el efecto de la presión y de la concentración sobre la constante de Henry se considera la propuesta por Krichevsky y Kasarnovsky (Walas, 1985). Por lo tanto:

$$\mathrm{Ln}\left(\frac{\bar{f}_1^L}{x_1}\right) = \mathrm{Ln}H_1\left(P^o\right) + \frac{\bar{V}_1^{\infty}}{RT}\left(P - P^o\right) \tag{4}$$

En la ec. (4), V_1^{∞} es el volumen molar parcial a dilución infinita del soluto en la solución salina. Esta propiedad depende de la temperatura, de la presión y de la salinidad de la mezcla, pero su variación puede despreciarse en muchas situaciones. También, considerando la baja solubilidad de los gases N_2 y O_2, el efecto de la concentración en la constante de Henry puede ser ignorado. El efecto de la salinidad en la solubilidad es calculado usando la propuesta de Setschenow (1889). Si S es la salinidad o el contenido de sal de la solución, x_1^0 es la fracción molar del gas o la solubilidad en el solvente puro (agua en este estudio), la solubilidad x_1 del gas en la solución salina es, según Lee (2008), la siguiente:

$$\mathrm{Ln}\left(\frac{x_1}{x_1^0}\right) = -k_s \cdot S \tag{5}$$

En la ecuación (5), k_s es conocida como la constante de Setschenow, a una temperatura dada. La ecuación (4), queda como:

$$\mathrm{Ln}\left(\frac{\bar{f}_1^L}{x_1}\right) = \mathrm{Ln}H_1\left(P^o\right) + \frac{\bar{V}_1^{\infty}}{RT}\left(P - P^o\right) + k_s \cdot S \tag{6}$$

En esta ecuación, $H_1(P^o)$ y k_s son funciones de la temperatura. En este trabajo se consideran varias expresiones para estas funciones. Se han analizado expresiones similares a las utilizadas en la literatura para la solubilidad de gases en líquidos y se consideran nuevos modelos. Aquí se propone calcular la fugacidad f_i^L utilizando la ecuación de estado VPT (Valderrama 1990) y determinar las propiedades H_1, V_1^{∞} y k_s (en función de la temperatura, la presión y la salinidad) usando datos de solubilidad obtenidos de la literatura. Hay varias formas para determinar la constante de Henry basado en las ecuaciones (2), (4) y (5):

Método 1

Usar los datos de solubilidad más bajos disponibles, graficar (f_i^L / x_i) -vs- x_i y extrapolar haciendo ($x_i \to 0$). De acuerdo a la ecuación (2) el valor límite es la constante de Henry a la presión de saturación del solvente, Hº (porque cuando $x_i \to 0$ significa que tengo solvente puro). Después de obtener H^0 el efecto de la presión se determina usando la relación de Krichevsky-Kasarnovsky (ecn. 4):

$$\mathrm{Ln}\left(\frac{\bar{f}_1^L}{x_1}\right) = \mathrm{Ln}H(P) = \mathrm{Ln}H^o + \frac{v_1^{\infty}}{RT}\left(P - P_2^s\right) \tag{7}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

En esta ecuación H^0 es conocida, de modo que V_1^∞ puede ser directamente calculado de la ecuación usando los valores de (f_i^L / x_i) determinados de la ecuación de estado. El cálculo es realizado en forma simple fijando el coeficiente de posición como LnH^0 y graficando (f_i^L / x_i) -vs- P. Se determina V_1^∞ del valor de la pendiente de la recta.

Método 2

Una forma alternativa para determinar H^0 y V_1^∞ en un solo cálculo es graficando f_i^L / x_i - vs- (P- P_2^s) a una temperatura dada, obteniendo H^0 como el coeficiente de posición y V_1^∞ a partir del valor de la pendiente (m = V_1^∞ / RT).

Resultados y discusión

La Figura 1 muestra el cálculo de H^0 (Método 1) mientras que la Figura 2 muestra el cálculo de H^0 y V_1^∞ (Método 2). Las figuras son automáticamente graficadas en Excel una vez que el programa ha importado los valores de las fugacidades de un programa especialmente diseñado para determinar estos valores usando la ecuación de estado VPT. En dicho programa se determina los parámetros de la ecuación de estado y se determina la consistencia termodinámica de los datos de solubilidad. El ejemplo dado en la Figura 1 es para la mezcla CO en [MDEA][Cl] a 313K. La constante de Henry de referencia H^0 resulta ser 327.4. Con este valor el volumen es calculado como 0.0240 (m^3/kmol). Si se usa el método 2 (la ecuación de Kritchevsky-Kasanovsky) los valores obtenidos son 326.1 para H^0 (exp de la pendiente 5.787 en la Figura 2) y 0.0254 (m^3/kmol) para el volumen (obtenido del coeficiente de posición 9.7727*10^{-4}*R*T). Los resultados para otros casos son similares a los mostradas para la mezcla CO en [MDEA][Cl] y son detallados en lo que sigue.

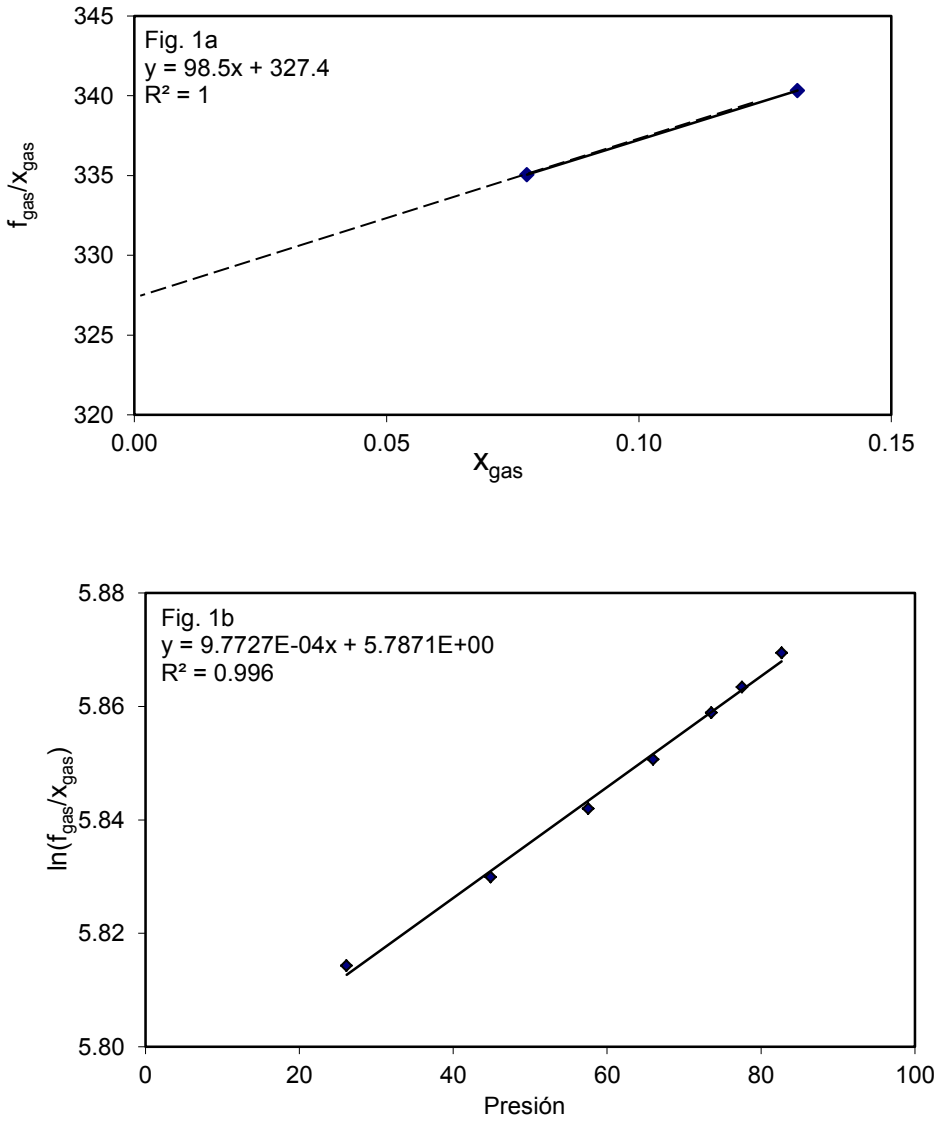


Fig. 1: Constante de Henry H_0 para CO en [MDEA][Cl] a 313K: 1a) usando método 1 y 1b) usando método 2

ISBN 978-607-8242-11-5

La exactitud de los modelos se verificó mediante la determinación de las desviaciones relativas y absolutas entre los valores calculados de la solubilidad y los datos experimentales. Los resultados se organizan en tablas en las que se muestran tres parámetros estadísticos: la desviación relativa promedio (%Δx), la desviación relativa absoluta promedio %|Δx| y la máxima desviación relativa absoluta, entre los valores calculados (x_m^{cal}) y los datos de la literatura (x_m^{lit}). Estos parámetros estadísticos son los más representativos de la exactitud del método como otros autores han discutido en la literatura (Valderrama y Álvarez 2005). Estas desviaciones se definen como:

$$\%\Delta x = \frac{100}{N}\sum_{1}^{N}\left[\frac{x_m^{cal} - x_m^{lit}}{x_m^{lit}}\right] \tag{8}$$

$$\left|\ \%\Delta x\ \right| = \frac{100}{N}\sum_{1}^{N}\left|\frac{x_m^{cal} - x_m^{lit}}{x_m^{lit}}\right| \tag{9}$$

$$\max\left|\ \%\Delta x_i\ \right| = \text{valor máximo de } 100\cdot\left|\frac{x_m^{cal} - x_m^{lit}}{x_m^{lit}}\right| \tag{10}$$

La desviación relativa promedio (%Δx) indica cómo se dispersan los resultados alrededor de los datos experimentales, mientras que la desviación relativa absoluta promedio (|%Δx|) da una indicación de cómo es la magnitud de las desviaciones. Si estos son bajos, probablemente se ha encontrado un modelo aceptable. La máxima desviación relativa absoluta (max|%Δx|) es un parámetro importante porque da la desviación máxima que se espera cuando el modelo se utiliza para predecir un valor de solubilidad.

La Figura 2a, muestra el comportamiento lineal de Ln H –vs– P, para una salinidad de 104 (g de sal / kg de solución) a diversas temperaturas para el nitrógeno. La Figura 2b, muestra el comportamiento lineal y paralelo de Ln H –vs– S para el nitrógeno a diferentes P a una temperatura de 393.15 K. El oxígeno muestra un comportamiento similar al nitrógeno.

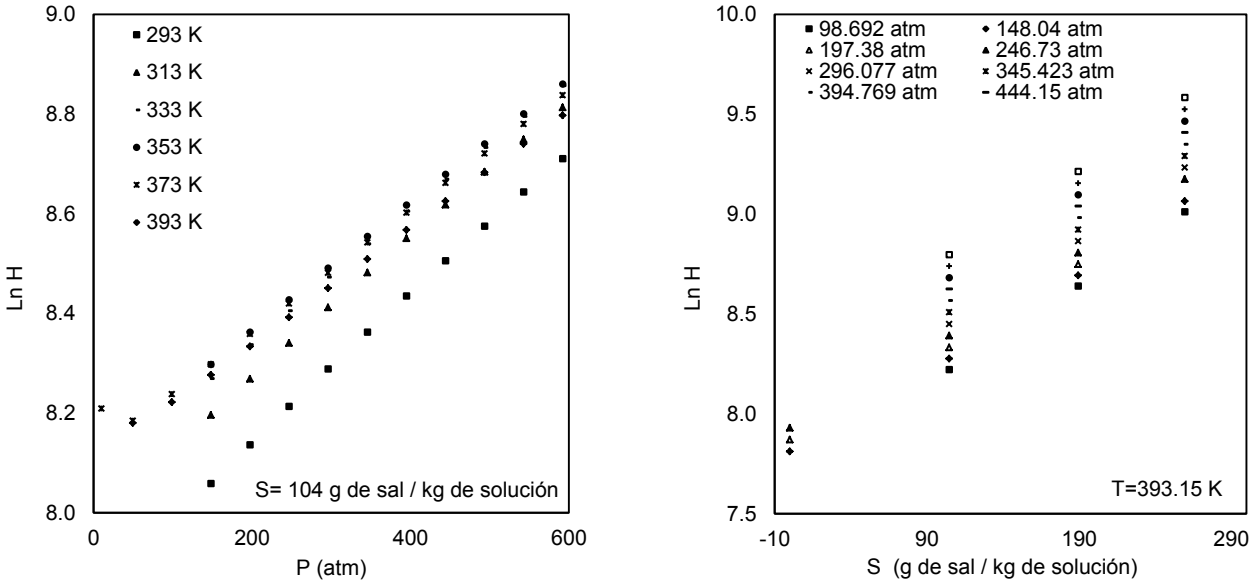


Fig. 2: Variación de Ln H del N_2: a) en función de la presión a una salinidad de 104 g de sal/kg de solución, para distintas temperaturas; b) en función de la salinidad a una temperatura de 393.15 K para diferentes presiones

Algunos resultados para los diferentes modelos considerados son presentados en la Tabla 1 para el N_2 y en la Tabla 2 para el O_2. Para el mejor modelo, las desviaciones máximas absolutas entre los valores calculados y los de la literatura están por debajo del 5%. Estas desviaciones máximas se consideran aceptables para los cálculos de ingeniería e indican que el modelo propuesto es lo suficientemente exacto y produce resultados con desviaciones inferiores a las calculadas con otros modelos. Las comparaciones con los valores calculados y modelos presentados en la literatura se presentan en la Tabla 3. Aunque los rangos de temperatura y salinidad son diferentes para cada caso, la comparación es válida para ver si el modelo propuesto tiene la capacidad de representar la solubilidad dentro de los márgenes de errores de las correlaciones comunes y modelos empíricos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Como se observa en las Tablas 1 y 2, la expansión en serie del tipo Ln H = Ln (f/x) = $f_1(T)+f_2(T)\cdot P+f_3(T)\cdot S$ es la expresión más adecuada para representar la variación de la constante de Henry con la temperatura T, la presión P, y la salinidad S (el primer modelo en ambas tablas). Este modelo da una desviación relativa promedio menor a 0.02%, una desviación relativa absoluta promedio menor a 1.8% y la máxima desviación relativa absoluta es de 4.66% para un caso del nitrógeno en soluciones salinas. El modelo final que se propone en este trabajo para la constante de Henry es entonces el siguiente:

$$LnH = \left[a + b\cdot T + c\cdot T^2\right] + \left[d + e\cdot T\right]P + \left[f + g\cdot T + h\cdot T^2\right]\cdot S \qquad (11)$$

Los parámetros específicos (a, b, c, d, e, f, g, h) son los dados para el primer modelo en las Tablas 1 y 2. Se debe observar que aunque algunos parámetros son numéricamente muy pequeños, su influencia puede ser importante por el valor que asumen las variables T, P o S. Por ejemplo para el nitrógeno, el valor de h es del orden de 10^{-7}. Sin embargo ese parámetro aparece multiplicado por T^2 y por S (T del orden de 10^4 y por S de 10^2. El conjunto de términos h*S T^2 no es un número despreciable.

Tabla 1: Resultados para el nitrógeno, usando diversos modelos, hasta presiones de 592 atm. (220 datos)

Rangos: T de 273 a 393 K; S de 0 a 260 g de sal / kg de solución; P de 148 a 592 atm.					
Modelo	*Coeficientes*		*Desviaciones*		
			%Δx	%|Δx|	%|Δx|$_{max}$
$LnH = \left[a + b\cdot T + c\cdot T^2\right] + \left[d + e\cdot T\right]\cdot P + \left[f + g\cdot T + h\cdot T^2\right]\cdot S$	a=-4.79E+00 b=6.91E-02 c=-9.55E-05 d=2.34E-03	e=-3.00E-06 f=6.94E-02 g=-3.69E-04 h=5.20E-07	0.02	1.75	4.66
$LnH = \frac{\left[a + b\cdot T + c\cdot T^2\right]}{1 + d\cdot T} + \frac{\left[e + f\cdot T\right]}{1 + g\cdot T}\cdot P + \frac{\left[h + i\cdot T + j\cdot T^2\right]}{1 + k\cdot T}\cdot S$	a=-3.50E+08 b=2.61E+06 c=-2.70E+03 d=8.68E+04 e=2.88E-01 f=2.11E-04	g=8.03E-01 h=-7.31E+07 i=4.01E+05 j=-5.90E+02 k=-3.49E+06	0.02	1.69	4.24

Tabla 2: Resultados para el oxígeno, usando diversos modelos, hasta presiones de 987 atm. (75 datos)

Rangos: T: de 273 a 393 K; S de 0 a 190 g de sal / kg de solución; P de 197 a 987 atm.					
Modelo	*Coeficientes*		*Desviaciones*		
			%Δx	%|Δx|	%|Δx|$_{max}$
$LnH = \left[a + b\cdot T + c\cdot T^2\right] + \left[d + e\cdot T\right]P + \left[f + g\cdot T + h\cdot T^2\right]\cdot S$	a=-7.77E+00 b=8.03E-02 c=-1.08E-04 d=1.00E-03	e=-2.98E-08 f=7.75E-03 g=-2.51E-06 h=3.80E-09	0.02	1.64	3.79
$LnH = \frac{\left[a + b\cdot T + c\cdot T^2\right]}{d\cdot T} + \frac{\left[e + f\cdot T\right]}{g\cdot T}P + \frac{\left[h + i\cdot T + j\cdot T^2\right]}{k\cdot T}\cdot S$	a=-2.29E+04 b=1.65E+02 c=-1.64E-01 d=5.93E+00 e=2.01E-02	f=8.36E-03 g=8.48E+00 h=1.58E+00 i=-3.90E+00 j=-5.31E+02	0.00	0.76	1.75

Además de haber calculado las desviaciones relativas en el modelado de la constante de Henry (ecn. 11), es pertinente también calcular los errores en el cálculo de la solubilidad (x) de los gases en las soluciones salinas. Con el modelo propuesto (ecn. 11) las desviaciones resultantes son: %Δx=0.02; %|Δx|=1.75 y %$|\Delta x|_{max}$ =4.66 para el nitrógeno. Para el oxígeno estos valores son %Δx=0.02; %|Δx|=1.64 y %$|\Delta x|_{max}$ =3.79. La Figura 3, muestra la solubilidad calculada versus la solubilidad experimental para los dos gases en estudio. Se puede observar una baja dispersión en los resultados al compararlos con los valores experimentales, como resultado de las bajas desviaciones máximas (menores a 5% para el nitrógeno y menores a 4.0% para el oxígeno. Igualmente importante para determinar la exactitud de los modelos propuestos es la comparación de los resultados con otras propuestas de la literatura. La Tabla 3 muestra una comparación de la exactitud, expresada como la desviación relativa absoluta máxima de algunos modelos disponibles en la literatura.

ISBN 978-607-8242-11-5

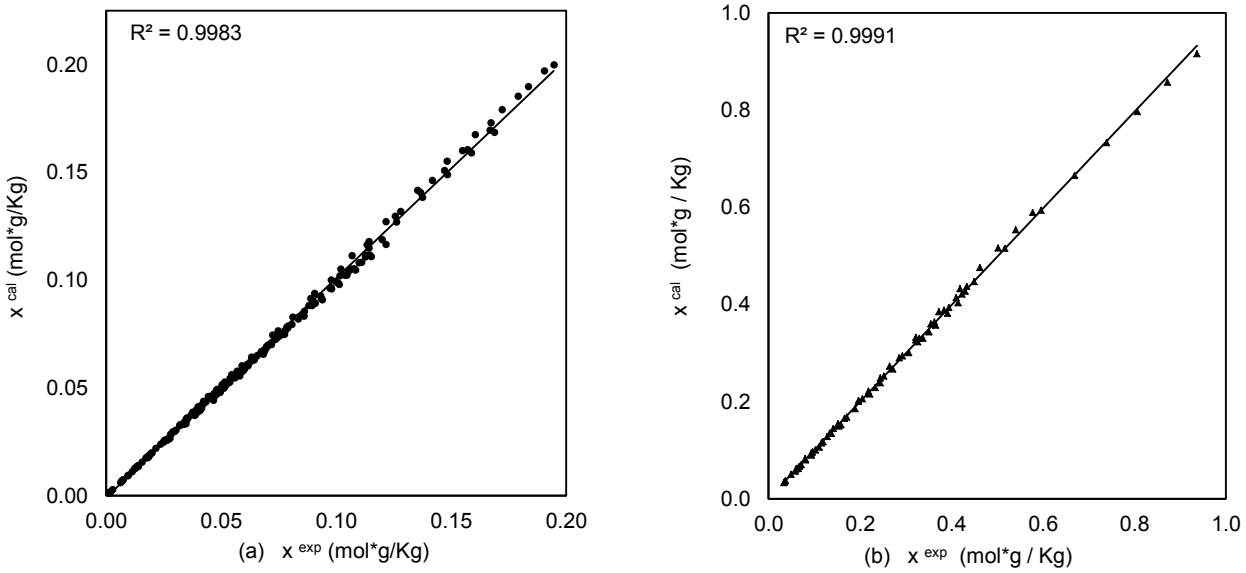


Fig. 3: Solubilidad calculada versus solubilidad experimental para: (a) nitrógeno y (b) oxígeno. La línea continua para (a) y (b) representa el ajuste lineal.

Tabla 3: Comparación de la precisión, expresada como la desviación relativa absoluta máxima de algunos modelos disponibles en la literatura. Salinidad en (g de sal / kg de solución), presión en atm. y temperatura en ºC

Referencia	*Gas*	*Presión*	*Temperatura*	*Salinidad*	*Modelo*	max|%Δx|
Murray y Riley (1970)	Ar	1	-2 a 38	1 a 40	Análisis de la curva de ajuste	2%
Weis (1970)	N_2,O_2,Ar	1	-1 a 40	0 a 20	Log en solubilidad, Pol en T	2%
Millero *et al.,* (2002)		1	25	0 a 40	Modelo termodinámico	0.8%
Hamme y Emerson (2004)	N_2,O_2,Ar	1	0 a 30	0 y 35	Log in solubilidad, polinomio cúbico en T y lineal en S	0.3%
Mao y Duan (2006)	N_2	1–600	0 a 317	0 a 100	Modelo termodinámico	7%
Mel'nichenko *et al*., (2008)		1	0 to 95	0 y 35	Exp in 1/T (hasta 8 parámetros)	3%
Debelius *et al.,* (2009)	O_2	1	5 a 35	51	Log. en solubilidad, racional en T, log. en T, cuadrática en T, cuadrática en S	3%
Geng y Duan (2010)	O_2	1-500	0 a 327	10 a 55	modelo termodinámico	3%

Conclusiones

El estudio y los resultados permiten obtener tres conclusiones principales: *(i)* el modelo mantiene la simplicidad de la ley de Henry y la contribución de Setschenow para dar cuenta de la salinidad sobre la solubilidad de los gases; *(ii)* el efecto de la presión es bien considerado por la expresión de Krichesky-Illinskaya; *(iii)* la solubilidad de cualquiera de los gases puede obtenerse con buena precisión, dando desviaciones medias absolutas inferiores al 2%; *(iv)* el efecto cruzado entre las variables (PT, TS, PTS) resulta ser adecuado para el modela propuesto en este trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) a través de la beca de investigación Anillo ACT 1201, proyecto financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad de la Región de Antofagasta en Chile. Los autores también agradecen al Centro de Información Tecnológica (CIT, La Serena-Chile) por instalaciones informáticas y bibliotecarias, a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad de La Serena, por un apoyo permanente, y a la Universidad Pontificia Bolivariana por permanente apoyo para esta colaboración internacional.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

AWWA Manual M61, Desalination of Seawater, 1st Ed., American water works association, Denver, U.S.A. (2011)

Bennett, C.R., D. McBride, M. Cross, J.E. Gebhardt, A comprehensive model for copper sulphide heap leaching: Part 1 Basic formulation and validation through column test simulation, Hydrometallurgy, 127, 150–161 (2012)

Debelius, B., A. Gómez-Parra, J.M. Forja, Oxygen Solubility in Evaporated Seawater as a Function of Temperature and Salinity, Hydrobiologia, 632, 157–165 (2009)

Geng, M., Z. Duan, Prediction of oxygen solubility in pure water and brines up to high temperatures and pressures, Geochemical et Cosmochimica Acta, 74, 5631–5640 (2010)

Gentina, J.C., F. Acevedo, Application of bioleaching to copper mining in Chile, Electronic Journal of Biotechnology, 16 (3), (1-14) (2013)

Haarhoff, J., J.K. Edzwald, Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater, Desalination 311, 90–94 (2013)

Hamme, R.C., S.R. Emerson, The solubility of neon, nitrogen and argon in distilled water and seawater, Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 51 (11), 1517–1528 (2004)

Kuopanportti, H., T. Suorsa, E., Pöllänen, Effects of oxygen on kinetics of conditioning in sulphide ore flotation, Minerals Engineering, 10(11), 1193-1205 (1997)

Lee, L., Molecular Thermodynamics of Electrolyte Solutions, World Scientific Publishing Company, 1st Ed., Singapore (2008)

Mao, S., Z. Duan, A thermodynamic model for calculating nitrogen solubility, gas phase composition and density of the N_2–H_2O–NaCl system, Fluid Phase Equilibria, 248 (2), 103–114 (2006)

Mel'nichenko, N.A., A.M., Koltunov, A.S. Vyskrebentsev, A. V. Bazhanov, The temperature dependence of the solubility of oxygen in sea water according to the Pulsed NMR Data, Russian Journal of Physical Chemistry A, 82 (5), 746–752 (2008)

Millero, F.J., F. Huang, A.L. Laferiere, The solubility of oxygen in the major sea salts and their mixtures at 25°C, Geochimica et Cosmochimica Acta, 66 (13) 2349–2359 (2002)

Murray, C.N., J.P. Riley, The solubility of gases in distilled water and sea water-III. Argon, Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, 17 (1) 203- 209 (1970)

Rao, S.R., J.A. Finch, Galvanic interaction studies on sulphide minerals, Canadian Metallurgical Quarterly, 27 (4), 253-259 (1988)

Sano, Y., N. Takahata, Measurement of noble gas solubility in seawater using a quadrupole mass spectrometer, Journal of Oceanography, 61, 465- 473 (2005)

Schumpe, A., I., Adler, W.D. Deckwer, Solubility of oxygen in electrolyte solutions, Biotechnology and Bioengineering, 20, 145-150 (1978)

Setschenow, A.Z., About the constitution of the salt solutions due to the presence of carbonic acid, Z. Physik. Chem., 4, 117-125 (1889)

Tishchenko, P., C. Hensen, K. Wallmann, S.W. Chi, Calculation of the stability and solubility of methane hydrate in seawater, Chemical Geology, 219, 37-52 (2005)

Valderrama, J.O., A Generalized Patel-Teja Equation of State for Polar and Nonpolar Fluids and Their Mixtures, Journal of Chemical Engineering of Japan, 23 (1), 87-91 (1990)

Valderrama, J.O., V.H., Álvarez, Correct way of reporting results when modeling supercritical phase equilibria using equations of state, Can. J. Chem. Eng., 83 (3), 578–581 (2005)

Valderrama, J.O., R.A. Campusano, L.A. Forero, A New Generalized Henry-Setschenow Equation for Predicting the Solubility of Air Gases in Seawater and Saline Solutions, J. Molecular Liquids, 1218–1227 (2016)

Walas, S. M., Phase Equilibria in Chemical Engineering, Butterworth Boston, U.S.A. (1985)

Wallace, J., P., Hobbs, Atmospheric science: an introductory survey, 2nd Ed., Academic Press, N.J., U.S.A. (2006)

Weiss, R.F., The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 17 (4), 721 – 735 (1970)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Diseño de un Sistema Experto Difuso para una Planta de Cromado

Carolina Ponce [1] y Bayron Rojas[2]
Fac. De Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad De La Serena, La Serena-Chile
[1] e-mail: cponce@userena.cl; [2] bayron_17@live.cl

Resumen

Se diseñó un sistema experto difuso, para modelar una planta de cromado duro. Primeramente, se realiza un análisis de la teoría general de cromado duro y se contrasta con la ejecución práctica del mismo. Se escogen las variables relevantes del proceso, las que luego son modeladas mediante lógica difusa, definiendo funciones de pertenencia, rangos específicos y una base de reglas que describe el sistema. Para construir el modelo y realizar las simulaciones que lo validen, se emplea el Fuzzy Logic Toolbox® del software Matlab®. Se utiliza un sistema del tipo Mamdani para la modelación del proceso de cromado duro. El sistema experto obtenido mostró un porcentaje de error promedio, entre el proceso real y el modelo, no superior al 10%. Se concluye que el modelo propuesto es representativo del sistema actual de cromado estudiado. Además, su implementación significaría una disminución de costos asociados tanto al ahorro en horas extras del operario de la planta, como de la eficiencia en el uso de la energía.

Palabras clave: lógica difusa; sistema experto; cromado duro; modelado de procesos.

Design of a Fuzzy Expert System for a Chrome Plating Plant

Abstract

A fuzzy expert system was designed for modeling a hard chrome plating plant. First, an analysis of the general theory of hard chrome is carried out and it is compared with the practical execution of the plating process. The most relevant process variables are selected. After that, a model using fuzzy logic is proposed. To do this, membership functions, specific ranges, and a rule base describing the system, are defined. To construct the model and to carry out the simulations that validate it, the Fuzzy Logic Toolbox® of Matlab® software is used. A Mamdani type system is used for modeling the hard chrome process. The expert system obtained show an average percent error between the actual process and the model calculations lower than 10%. It is concluded that the proposed model is representative of the current chromed system studied. In addition, its implementation would mean a decrease in costs associated with both the saving of overtime of the plant operator as well as with the efficiency in the use of energy.

Keywords: fuzzy logic; expert systems, hard chrome; process modeling.

ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El proceso de cromado, en términos generales, consiste en recubrir una pieza (Cilindros oleo hidráulicos) con una capa de cromado que oscila entre 0.05 [mm] a 0.7 [mm] (según registros). Para lograr esto, se introduce la pieza a una tina que contiene la solución electrolítica que hará posible la deposición del cromo sobre la superficie de la pieza. Una vez que se inicia el proceso, y debido a su experiencia, el operador es capaz de determinar la cantidad de corriente que se aplicará en una primera instancia al proceso de cromado. Esta decisión está basada en distintos parámetros o variables que interfieren directamente en el resultado final obtenido. La corriente aplicada depende directamente de la densidad de corriente que el operador decide utilizar, es decir, de la cantidad de corriente que atravesará una determinada área a recubrir.

El sistema experto se puede definir como aquel programa de computación, ya sea un software o hardware, que contiene el conocimiento de un especialista humano acerca de un determinado campo de aplicación. Esto es, un modelo computarizado de las capacidades de razonamiento y habilidades en resolución de problemas del especialista humano (Pino et. al, 2001). Un sistema experto basado en reglas es aquel que modela la base de conocimiento en un conjunto de reglas que se extraen como resultado de una serie de pruebas experimentales del tema estudiado. En cuanto a la base de reglas, éstas constituyen la más sencilla de las metodologías utilizadas en sistemas expertos. La base de conocimiento contiene el conjunto de reglas que definen el problema, y el motor de inferencia saca las conclusiones aplicando la lógica clásica a estas reglas. Las ventajas que otorga el uso de este tipo de sistemas es que son sencillos de programar una vez que se conoce el conjunto de reglas, y que sus respuestas son extremadamente rápidas. En cuanto a las desventajas, los sistemas expertos basados en reglas exigen un elevado esfuerzo humano para su puesta en marcha, y que una variación de las funciones de densidad y la inclusión de nuevos a elementos, precisa de un nuevo estudio y replanteamiento de las reglas (Lata et. al, 2000).

La lógica difusa es una teoría matemática que define el grado de pertenencia que tiene un objeto a una clase particular. Este grado de pertenencia es un valor entre cero y uno que indica la adherencia de un grupo a otro (Zadeh, 1965). Los conjuntos difusos son una extensión de los conjuntos clásicos, donde se añade una función de pertenencia, es decir, que a cada elemento del universo se le asocia un grado de pertenencia, definido como un número real entre 0 y 1(Johansson,1993). En tanto el grado de pertenencia sea más cercano a 1, significa que el elemento pertenece en un mayor grado a dicho conjunto. Caso contrario ocurre si el valor se acerca a 0. Así es, cómo se introduce el concepto de conjunto o subconjunto difuso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde está el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_{A(x)}$, que indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_{A(x)} \leq 1$).

En este caso se utilizan dos tipos de funciones de pertenencia la triangular y la trapezoidal. En la Tabla 1, se definen estas dos funciones de pertenencia.

Tabla1: Funciones de pertenencia triangular y trapezoidal.

Función de pertenencia triangular	Función de pertenencia trapezoidal
$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad x \leq a \\ \dfrac{x-a}{m-a} & \text{si} \quad x \in (a,m] \\ \dfrac{b-x}{b-m} & \text{si} \quad x \in (m,b] \\ 1 & \text{si} \quad x \geq b \end{cases}$	$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si} \quad (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ \dfrac{x-a}{b-a} & \text{si} \quad x \in (a,b] \\ 1 & \text{si} \quad x \in (b,c) \\ \dfrac{d-x}{d-c} & \text{si} \quad x \in (b,d) \end{cases}$
a:límite inferior a; b:límite superior; m: valor modal tal que a<m<b.	a: límite inferior ; d:límite superior ;b: límites de soporte inferior; c:límite de soporte superior c, tal que a<b<c<d.

METODOLOGIA

El concepto de lógica difusa define a la base de reglas como la manera que tiene un sistema difuso de guardar el conocimiento lingüístico, el cual le permite resolver el problema para el cual ha sido diseñado. Estas reglas son del tipo “Si-Entonces” y asocian uno o más conjuntos difusos de entrada llamados antecedentes con un conjunto difuso de salida llamado consecuente. Para el caso del modelo propuesto, se asocian los conjuntos de entrada con el operador lógico “AND” para tener un conjunto de salida o consecuente (De Negri y De vito, 2006).

ISBN 978-607-8242-11-5

Una vez establecida la base de reglas para cada una de las fases del sistema experto difuso, es necesario definir el método de inferencia y agregación que determinan la salida o respuesta del sistema. Mediante el proceso de inferencia, se obtiene el conjunto difuso de salida. Este conjunto es calculado de acuerdo a las reglas establecidas y al método de inferencia utilizado. En este caso, se emplea el método de inferencia por mínimos (Min), de Mamdami definido según la ecuación(1) (Benitez,2017).

$$\min(\mu, \mu_W(z)), \forall z \tag{1}$$

Donde μ_W es la función de pertenencia del conjunto de salida W.

El método de agregado agrupa todos los conjuntos de salida, de cada una de las reglas establecidas, para obtener un único conjunto difuso. Para el modelo experto difuso propuesto, se utiliza el método de agregación por máximos (Max), descrito por la ecuación (2),el cual agrupa los máximos valores, de cada regla asignada, que han sido obtenidos mediante el proceso de inferencia difuso.

$$C' = [(z, \mu_{C'}(z) / z \in Z] \tag{2}$$

Donde Z es igual al universo del discurso de la variable de salida y $\mu_{C'}(z) = Max(C1', C2', \ldots, Cn')$.

El proceso de defusificación consiste en un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real (Llano et. al, 2007). El conjunto que se ha obtenido del proceso de inferencia y agregación, debe ser transformado en un valor numérico que pueda ser interpretado por elementos externos. Con el fin de determinar que método de defusificación se emplearía en el modelo, se realizó un análisis previo, utilizando un conjunto menor de datos. El resultado de este análisis arrojo que el método del centroide de área posee un error porcentual más bajo. En este método, el centro de gravedad es aproximado por el centro de gravedad de un arreglo de masas puntuales, las cuales son el centro de gravedad de cada conjunto de salida correspondiente a cada regla, con masa igual al grado de pertenencia en ese punto de su centro de gravedad. Si se le llama δ_1 al centro de gravedad del conjunto difuso de salida B_l de la *l-ésima* regla, el centro de gravedad queda determinado por la ecuación (3).

$$\mu_d = \frac{\sum_{l=1}^{R} \delta_1 \mu_{B_l(\delta l)}}{\sum_{l=1}^{R} \mu_{B_l(\delta l)}} \tag{3}$$

Donde R es el número de reglas.

Las reglas que rigen la base de conocimiento corresponden a afirmaciones lógicas que relacionan dos o más objetos e incluyen dos partes, la premisa y la conclusión. Cada una de estas partes consiste en una expresión lógica del tipo “Si- entonces”, con una o más afirmaciones objeto-valor conectadas mediante los operadores lógicos ‘y’, ‘o’, ó ‘no’.

Para la categorización de las variables de entrada y salida, y tal como lo define el concepto de la lógica difusa, es necesario definir cada uno de los parámetros, rangos y funciones de pertenencia que modelarán el proceso real de cromado. Mediante la tabulación del total de datos obtenidos, se determinan los rangos mínimos y máximos de los conjuntos que conforman cada variable seleccionada. A partir de un análisis gráfico de la agrupación de los datos tabulados, se determinan tanto los rangos de los sub conjuntos difusos, como también las funciones de pertenencia. Cada una de estas funciones debe llevar su respectiva etiqueta lingüística, que cuantifican el valor de dicha función a partir del uso del lenguaje natural o coloquial.

Las variables de entrada que han sido seleccionadas son:

i. Horario: Representa el período del día (jornada laboral o sobretiempo) donde la pieza ingresa a la tina de cromado. Se han determinado cuatro subconjuntos para esta variable de entrada (Madrugada, Día, Tarde, Noche), representados con funciones de pertenencia trapezoidal y triangular.

ii. Área: El área de la superficie que se recubrirá, determina la cantidad de corriente por unidad de área que se aplicará a la solución electrolítica (Densidad de Corriente). Las funciones de pertenencia empleadas, al igual que en el caso de la variable “Horario”, corresponde a funciones trapezoidales y triangulares. Se han establecido tres subconjuntos para definir la variable área. Los rangos de cada subconjunto son: Pequeña 4.5-120 [dm^2]; Mediana 40-210 [dm^2]; y Grande 130-278 [dm^2].

iii. Espesor: Dependiendo del espesor de cromo que requiera el componente, será el tiempo que dure el proceso de cromado. Se estableció un rango de espesores que van desde los 0.05 [mm] a 0.7 [mm],

 ISBN 978-607-8242-11-5

representados por dos funciones de pertenencia trapezoidales y una. Los subconjuntos para esta variable son: Menor (0.05-0.32 [mm]), Regular (0.2-0.5 [mm]) y Mayor (0.38-0.7 [mm]).

En el caso de las variables de salida, se escogen las mismas variables para cada fase del proceso, excepto por los rangos, las funciones de pertenencia y la base de reglas que rige cada modelo. Las variables de salida que se modelan son la densidad de corriente y el tiempo que se aplica esta última durante el proceso.

Según los datos obtenidos del proceso real, el operador puede mantener una densidad de corriente constante durante todo el proceso de cromado, o bien puede variarla según su experiencia. En la mayoría de los casos, el operario hace tres variaciones de la densidad de corriente hasta terminar el proceso. Esta es la razón por la cual se diseña un sistema experto basado en tres fases o etapas, que modelan el proceso real de cromado. Cada una de ellas representa las variaciones de la densidad de corriente y el tiempo en que es aplicada en cada etapa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta una selección de los resultados obtenidos en este trabajo. Los resultados mostrados en la Figura 1, corresponden a la primera fase del proceso de cromado duro. Como se ha mencionado anteriormente, es en esta fase es donde se analizan todas las condiciones de entrada previas a la ejecución del proceso de cromado. Es decir, es necesario conocer el estado actual del componente que será cromado (acabado superficial, dimensiones de la pieza, espesor de cromo), como también las condiciones operacionales donde es ejecutado el proceso (Horario de trabajo). Cada una de estas condiciones de entrada, son ingresadas al modelo experto difuso, el cual simula la toma de decisiones que realiza el operador de la planta. La Figura 1 entrega los resultados obtenidos al modelar la densidad de corriente con respecto al horario, comparando dichos resultados con los datos reales del proceso.

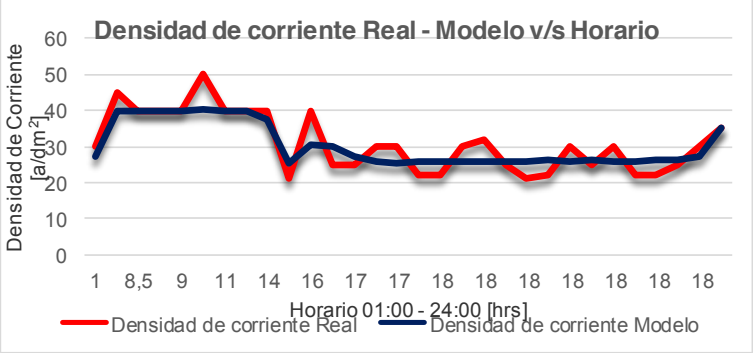


Fig 1: Densidad de corriente Real y el Modelo versus el horario. Fase 1 del proceso.

Otra de las variables modeladas es el tiempo de aplicación de la densidad de corriente. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos al modelar el tiempo de aplicación de la densidad de corriente con respecto al horario y compara dichos resultados con los datos reales del proceso.

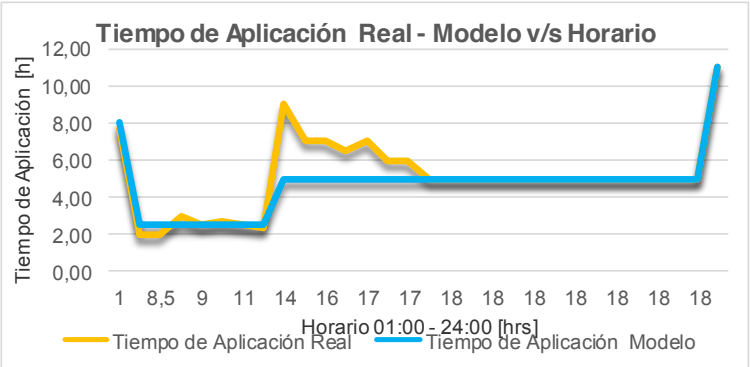


Fig. 2: Tiempo de aplicación de la densidad de corriente Real /Modelo versus el horario. Fase 1 del proceso.

En la gráfica se aprecia que la mayor diferencia entre el modelo propuesto y el proceso real se encuentra en horarios entre las 11:00 a.m. y las 18:00 p.m. Esta diferencia debe a que en el registro de los datos del proceso, existen casos puntuales donde los tiempos de cromado son muy extensos (40 [h]). Por ello las

ISBN 978-607-8242-11-5

fases donde se varía la densidad de corriente tienen un tiempo de aplicación mayor, lo que hace que existan grandes diferencias entre los tiempos de aplicación de la densidad de corriente.

Al igual que con la variable “Horario”, también se analiza el resultado de la comparación al modelar el comportamiento entre la densidad de corriente y el área. En las Figuras 3 y 4 se observa dicho comportamiento, donde la línea de tendencia del modelo y la del proceso real siguen el mismo patrón, lo que significa que el modelo propuesto es representativo del proceso real de cromado.

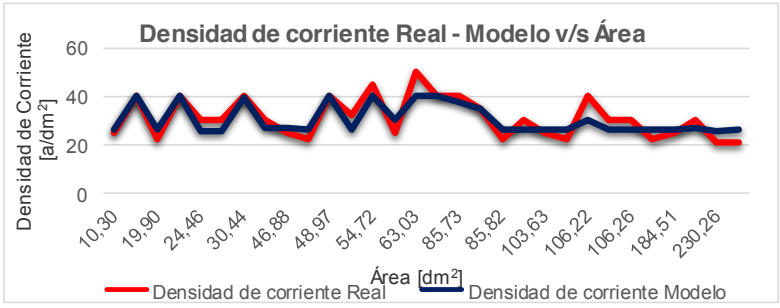


Fig.3: Densidad de corriente Real/Modelo versus el área. Fase 1 del proceso

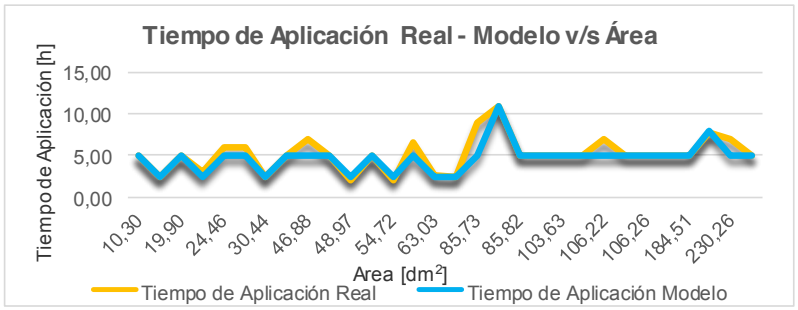


Fig.1: Tiempo de aplicación de la densidad de corriente Real /Modelo versus el área. Fase 1 del proceso.

La fase 3 corresponde a la última etapa del sistema experto difuso, aunque de acuerdo a los registros del proceso de cromado, la cantidad de veces que el operador varía la densidad de corriente supera las tres veces. Esto implicaría tener un mayor número de fases. Tal como se ha descrito anteriormente, el modelo difuso propuesto fija el proceso de cromado en tres fases, siendo esta última, la etapa que finaliza el proceso. Las condiciones de entrada de esta fase corresponden a los resultados que se obtuvieron de la segunda fase del proceso. En esta fase se obtuvieron los mejores resultados, en comparación con las otras dos fases del proceso. Sólo se produjo un 8,2% de error al modelar la densidad de corriente, comparándola con los resultados del proceso real de cromado. Las Figuras 5 y 6 muestran el comportamiento de la densidad de corriente y su tiempo de aplicación con respecto al área de la superficie a cromar. En el caso de la densidad de corriente, la línea de tendencia tiene una leve tendencia al descenso a medida que aumenta el área de cromado. No obstante, presenta algunos puntos donde, para un área similar, la densidad de corriente es muy variante. Un ejemplo de ello es el caso donde el rango del área a cromar está entre los 48 – 63 [dm^2].

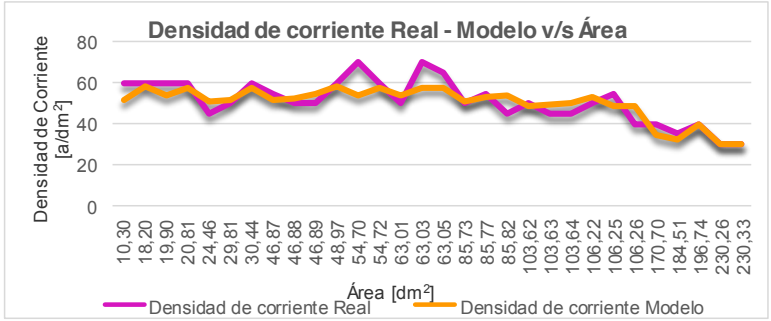


Fig. 5: Densidad de corriente Real/Modelo versus el área.Fase 3 del proceso.

En cuanto al tiempo de aplicación de la densidad de corriente, éste presenta un comportamiento estable a medida que aumenta el área de cromado. Las variaciones que presenta esta variable se deben a que el tiempo de aplicación de la densidad de corriente depende de los horarios donde se está trabajando.

ISBN 978-607-8242-11-5

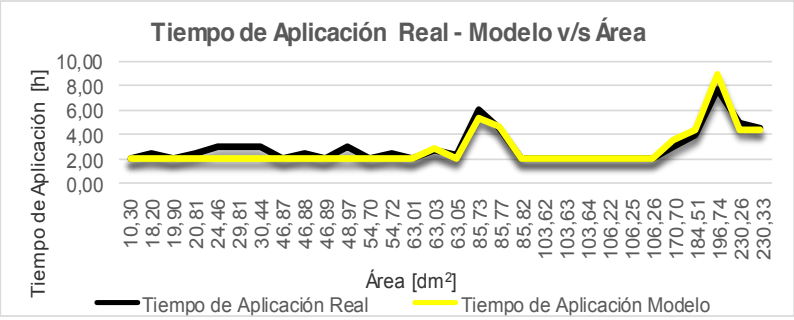


Fig. 0: Tiempo de aplicación de la densidad de corriente Real/Modelo versus el área. Fase 3 del proceso.

CONCLUSIONES

Luego de la obtención de sistema experto difuso y la comparación de sus resultados con los resultados del proceso real de cromado se puede decir lo siguiente:1) El sistema experto difuso encontrado representa adecuadamente el proceso real de cromado duro. 2) La modelación del proceso permite ajustar el número de etapas del proceso. En la ejecución del proceso de cromado existe una variación de la densidad de corriente que divide el proceso en distintas etapas. Con el uso del sistema experto se logra estandarizar el proceso de cromado duro, ajustándolo a tres etapas en la cuales se varía la densidad de corriente según las condiciones de entrada del proceso. 3) La utilización del concepto de lógica difusa, las reglas difusas, base de reglas y los operadores de Mamdami (Min-Max), ha permitido representar el conocimiento aportado por el operador de la planta, con todo el grado de incertidumbre o ambigüedad que existe ante cada decisión que él toma sobre el proceso. 4) La utilización del sistema experto difuso permitirá reducir los costos, especialmente los pagos de horas extras que realiza el operador de la planta de cromado. El uso del sistema experto eliminaría las horas extras y evitaría las sobrecargas de trabajo que actualmente tiene el operador humano. 5) La automatización del proceso de cromado permitirá al operador estar menos expuesto a los gases nocivos que se desprenden de la solución electrolítica cuando se ejecuta el proceso de cromado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo a la Dirección de investigación de la Universidad de la Serena, a través del proyecto DIDULS 102010202017.

REFERENCIAS

Benítez, C., *Inteligencia Artificial, Lógica Difusa* (en línea), Sesión 11, Universidad Tecnológica del Perú, https://es.slideshare.net/jcbp_peru/utp-ia20142s11logica-difusa. Acceso: 07 de Abril,(2017).

D' Negri, C., E. de Vito, Artículo Especial *"Introducción al razonamiento aproximado: Lógica Difusa*", Revista Argentina de Medicina Respiratoria, Instituto de Investigaciones Médicas Alfredo Lanari, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 4, 126 – 136 (2006).

Johansson, R., *System modeling and identification, Information and Systems Science series*, Prentice-Hall, New Jersey, (1993).

Llano, L., Z. German, O. Demetrio, *Sistema de Inferencia Difuso para Identificar Eventos de Falla en Tiempo Real del STE usando Registros SOE*, Revista Avances en Sistemas e Informática, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 4(2), 125-134, (2007).

Llata, J.R. y otros cuatro autores, *Aplicación de Inteligencia Artificial en Sistemas Automatizados de Producción*, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 4 Valencia, España, 10, 100-110, (2000).

Parejo, O.*, Optimización de la electrodeposición de Cromo en el recubrimiento de segmentos para motor*es, Grado en Ingeniería Industrial, especialidad Mecánica, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica (2015).

Pino, R., A. Gómez, N. de Abajo, *Introducción a la ingeniería Artificial: Sistemas Expertos, Redes Neuronales Artificiales y Computación Evolutiva*, Editorial Servicios de Publicaciones Universidad de Oviedo, Oviedo, España, 89-145 (2001).

Zadeh, L., *Fuzzy Sets, Information/Control*, 8, 338-353 (1965).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Solubilidad de Gases en Líquidos Iónicos: Modelado y Consistencia Termodinámica de Datos Experimentales

José O. Valderrama[1,2], Claudio A. Faúndez[3] y Richard A. Campusano[2,4]
(1) Univ. de La Serena, Fac. de Ingeniería, La Serena-Chile, *(jvalderr@userena.cl)*
(2) Centro de Información Tecnológica (CIT), Mons. Subercaseaux 667, La Serena-Chile
(3) Univ. de Concepción, Fac. de Cs. Fís. y Matem., Casilla 160-C, Concepción-Chile
(4) Univ. de La Serena, Fac. de Ciencias, Dpto. Física y Astronomía, La Serena-Chile

Resumen

Se presenta y discute los avances del grupo de Investigación de la Universidad de La Serena y de la Universidad de Concepción (ULS-UDEC) en Chile, sobre el análisis de consistencia termodinámica de datos experimentales de equilibrio entre fases. Los principales avances del grupo en esta línea, que son resumidos en este trabajo, consisten en la extensión de un método de consistencia termodinámica propuesto en trabajos anteriores por el grupo de La Serena al estudio de datos experimentales de sistemas binarios que contienen un líquido iónico. El método está basado en la ecuación de Gibbs-Duhem junto con una apropiada aplicación de ecuaciones de estado, reglas de mezcla y reglas de combinación. El método propuesto está diseñado para analizar datos experimentales y clasificarlos como termodinámicamente consistentes (TC; 100% de los datos pasan el test), inconsistentes (TI; más del 25% de los datos no pasan el test), y no-completamente consistentes (NCC; menos de 25% de los datos no pasan el test, pero el resto de los datos, pasa el test). Los avances son presentados en diversos casos de estudio y se concluye sobre cada caso.

Palabras clave: líquidos iónicos; consistencia termodinámica, ecuaciones de estado; solubilidad de gases; ecuación de Gibbs-Duhem

Solubility of Gases in Ionic Liquids: Modeling and Thermodynamic Consistency of Experimental Data

Abstract

The advances of the research groups of the University of La Serena and of the University of Concepción, in Chile (ULS-UDEC) on the subject of consistency analysis of gas-ionic liquid phase equilibrium data are presented. The main contributions of the group on this area that are summarized in this paper consist of the extension of a consistency method proposed earlier by the same group to treat and analyze experimental data of other type of organic and inorganic mixtures. The method is based on the Gibbs-Duhem equation and the application of appropriate equations of state, and mixing and combining rules. The method is designed to classify that data as thermodynamically consistent (TC; 100% of the data pass the test), thermodynamically inconsistent (TI; more than 25% of the data do not pass the test), and not fully consistent (NFC; less than 25% of the data do not pass the test, but the remaining data do pass the test). The advances are presented in several study cases and conclusions about each case are drawn.

Keywords: ionic-liquids; thermodynamic consistency; equation of state; gas solubility; Gibbs-Duhem equation

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCION

Los líquidos iónicos (LIs) son una clase de nuevos solventes con muy atractivas propiedades y que han recibido especial atención debido a sus numerosas aplicaciones en síntesis, procesos de separación, catálisis, solventes en electroquímica, absorción de gases, como aditivo en la fabricación de plásticos, en combustibles y lubricantes, como solventes medioambientalmente benignos y como posibles reemplazantes de los tradicionales solventes orgánicos volátiles, entre otras aplicaciones. Información detallada sobre aplicaciones de los LIs se encuentra disponible en la literatura científica (Wasserscheid y Welton, 2009; Koel, 2009). Para el desarrollo de nuevos procesos utilizando LIs, o para continuar con las investigaciones actuales, es necesario conocer las propiedades físicas, fisicoquímicas, de transporte y del equilibrio entre fases. Durante los últimos años, diferentes grupos de investigación se han esforzado por medir experimentalmente propiedades de LIs y de mezclas conteniendo LIs. En particular varios autores han reportado datos de equilibrio entre fases de mezclas que contienen un gas y un LI para aplicaciones de extracción supercrítica, para procesos de refrigeración o para captura de gases nocivos (Shariati y Peters, 2003; Kim *et al.* 2005; Ren y Scurto, 2009). Sin embargo, como ocurre en otras áreas de la termodinámica del equilibrio entre fases, los datos experimentales publicados sobre mezclas conteniendo un LI no son frecuentemente analizados desde el punto de vista de su consistencia termodinámica.

El grupo de Investigación de la Universidad de La Serena-Chile y la Universidad de Concepción-Chile, denominado de ahora en adelante Grupo ULS-UDEC, ha presentado una serie de trabajos sobre análisis de consistencia termodinámica, a diferentes tipos de mezclas y a diferentes condiciones termodinámicas. El método propuesto por nuestro grupo de investigación está basado en la ecuación de Gibbs-Duhem y una apropiada aplicación de ecuaciones de estado, reglas de mezcla y de reglas de combinación. El grupo ha realizado una serie de trabajos utilizando el método de consistencia termodinámica de datos de equilibrio entre fases tipo PTxy, PTy ó PTx. El primer trabajo del año 2004 se enmarcaba en estudios sobre extracción supercrítica donde los datos de equilibrio líquido-gas son de especial importancia. Luego vinieron una serie de aplicaciones a sistemas sólido-gas y sistemas agua-gas. En la Tabla 1 se resumen estos estudios anteriores. El creciente interés de la comunidad científica por los líquidos iónicos llevaron a varios grupos de investigadores a publicar datos de mezclas que contienen este tipo de fluidos, pero como se indicó, sin el conveniente y recomendable análisis de consistencia termodinámica. Los varios avances del grupo ULS-UDEC se han concretado en una secuencia de doce artículos presentados en la literatura internacional, de los cuales seis de ellos incluyen mezclas con líquidos iónicos. La Tabla 1 muestra los tipos de mezclas estudiadas por el grupo y las revistas donde fueron publicados los resultados. Una selección de resultados de estos casos de estudio con líquidos iónicos es presentada en este trabajo.

Tabla 1: Artículos sobre consistencia termodinámica realizados por el grupo ULS-UDEC

	Mezclas de sustancias orgánicas e inorgánicas	
1	Agua + mezclas de congéneres	J. Taiwan Institute of Chemical Engineers, 68, 15-22 (2016)
2	Mezclas de etanol + congéneres	C. R. Chimie, 18, 867-874 (2015)
3	Gas + Datos de Equilibrio del Agua	Chinese J. Chemical Eng., 21(10), 1172-1181 (2013)
4	CO_2 + mezclas de caroteno a alta presión	J. of Supercritical Fluids, 55, 609-615 (2010)
5	Datos de equilibrio gas-líquido	Thermochimica Acta,1-2, 499, 85-90 (2010)
6	Solutos sólidos y gaseosos	Fluid Phase Equilibria, 242, 93-102 (2006)
	Mezclas con líquidos iónicos	
7	Mezclas que contienen líquidos iónicos	Ind. Eng. Chem. Res., 47(21), 8416-8422 (2008)
8	Solubilidad de refrigerantes en líquidos iónicos	Int. J. of refrigeration, 26, 2242-2250 (2013)
9	Datos de solubilidad del amoníaco en LIs	Fluid Phase Equilibria, 348, 33-38 (2013)
10	Datos de solubilidad de H_2S y SO_2 en LIs	Fluid Phase Equilibria, 375, 152-160 (2014)
11	Dependencia de EoS de los métodos de consistencia termodinámica	Fluid Phase Equilibria, 449, 76–82 (2017)
12	Refrigerante R32 en líquidos iónicos	(en preparación)

CONSISTENCIA TERMODINÁMICA

En el primer trabajo del grupo (Valderrama y Álvarez, 2004) se aplicó el test de consistencia termodinámica a datos de equilibrio a altas presiones, utilizando datos experimentales en la fase gas. Más tarde, Valderrama y Zavaleta (2006) aplican el test a datos de equilibrio sólido-gas a altas presiones y Valderrama y Robles (2006) aplican el test a datos de equilibrio ternario sólido-sólido-gas. Los avances continuaron luego con aplicaciones a datos de equilibrio de mezclas binarias de agua+CO_2 y agua+varios gases a presiones altas (Valderrama *et al.,* 2008; Valderrama y Faúndez, 2010; Faúndez *et al.,* 2013). El método para análisis de consistencia termodinámica está basado en la ecuación de Gibbs-Duhem luego que los datos han sido bien correlacionados con un modelo termodinámico.

ISBN 978-607-8242-11-5

El método de la ecuación de estado (EdE) es frecuentemente usado como modelo termodinámico para la correlación y predicción del equilibrio entre fases en sistemas complejos. Reglas de mezcla y de combinación apropiadas son utilizadas para describir la dependencia de la concentración de los parámetros del modelo. De las numerosas ecuaciones de estado disponibles actualmente, las denominadas ecuaciones de estado cúbicas, derivadas a partir de la propuesta de van der Waals, tal como la de EdE de Peng y Robinson (1976), son ampliamente utilizadas para tratar este tipo de sistemas. El grupo ULS-UDEC ha incorporado distintos tipos de reglas de mezcla como las más modernas de Wong y Sandler (1992) y la modificación de Kwak y Mansoori (1986). El grupo también ha explorado recientemente el uso de la ecuación VPT, una modificación de la ecuación de Patel y Teja propuesta por uno de los autores (Valderrama, 1990). Los parámetros de estos modelos, han sido calculados usando el método de Levenberg-Marquardt, modificación del método de Newton, y que ha encontrado amplias aplicaciones en ingeniería, en particular en la correlación de datos de equilibrio entre fases. El método de consistencia ha sido presentado varias veces en la literatura por el grupo ULS-UDEC y se resume en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen del Test de Consistencia Termodinámica propuesto por los autores

A	Ecuación de Gibbs-Duhem en términos de propiedades residuales $\sum x_i d\left[\frac{G^R}{RT}\right] = -\frac{H^R}{RT^2}dT + \frac{V^R}{RT}dP$
B	En términos de coeficientes de fugacidad $\sum x_i dLn\varphi_i = -\frac{H^R}{RT^2}dT + \frac{V^R}{RT}dP$ A temperatura constante $\left[\frac{(Z-1)}{P}\right]dP = x_1 d\left(Ln\varphi_1\right) + x_2 d\left(Ln\varphi_2\right)$
C	Arreglando términos $\frac{1}{P}dP = \frac{x_1}{(Z\text{-}1)\varphi_1}d\varphi_1 + \frac{(1-x_1)}{(Z\text{-}1)\varphi_2}d\varphi_2$ $\int\frac{1}{Px_1}dP = \int\frac{1}{(Z-1)\varphi_1}d\varphi_1 + \int\frac{(1\text{-}x_1)}{x_1(Z-1)\varphi_2}d\varphi_2$
D	Áreas experimentales y estimadas: $A_P = \int\frac{1}{Px_1}dP$ $A_\varphi = \int\frac{1}{(Z-1)\varphi_1}d\varphi_1 + \int\frac{(1\text{-}x_1)}{x_1(Z-1)\varphi_1}d\varphi_1$
E	Desviación Individual porcentual en las áreas en el intervalo [-20% a +20%] $\%\Delta A_i = 100\frac{\left\|A_\phi - A_P\right\|_i}{A_P}$ Desviación Individual porcentual en la presión del sistema en el intervalo [-10% a +10%] $\%\Delta P_i = 100\left\|\frac{P^{cal} - P^{exp}}{P^{exp}}\right\|_i$

En la ec. (A) de la Tabla 2, x_i es la concentración del componente *"i"* en la fase líquida o gas. En la ec. (B) φ_i es el coeficiente de fugacidad del componente *"i"* en la fase correspondiente, H^R es la entalpía residual, V^R es el volumen residual, T es la temperatura, y P es la presión del sistema. Como se resume en la Tabla 2, el test final es reducido al cálculo de dos términos designados como A_P y A_φ (ec. D). En la ec. (D) de la Tabla 2, A_P se calcula usando datos experimentales isotermales P-x ó P-y, mientras que la ecuación de estado seleccionada es empleada para calcular A_φ. Finalmente, la ecn. (E) presenta las desviaciones individuales entre límites establecidos para las áreas y para las presiones, respectivamente. Si un conjunto de datos experimentales es considerado termodinámicamente consistente, A_P debe ser igual a A_φ dentro de algún margen de error previamente definido. Para un conjunto de datos, la desviación relativa individual porcentual, para las áreas $\%\Delta A_i$ y la desviación absoluta individual porcentual para las áreas $|\%\Delta A_i|$, entre valores experimentales y calculados son definidas como:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\%\Delta A_i = 100\left[\frac{A_\varphi - A_p}{A_p}\right]_i \quad (1)$$

$$\left|\%\Delta A_i\right| = 100\left|\frac{A_\varphi - A_p}{A_p}\right|_i \quad (2)$$

Si los datos son adecuadamente correlacionados, significa que las desviaciones entre los datos experimentales y calculados para la presión están dentro de intervalos aceptables y las desviaciones individuales en las áreas $\%\Delta A_i$ están dentro de algún margen de error previamente definido, entonces el conjunto de datos es considerado como termodinámicamente consistente. La Figura 1 describe el diagrama de flujo del método y la secuencia seguida para determinar la consistencia o inconsistencia de un conjunto de datos de equilibrio entre fases.

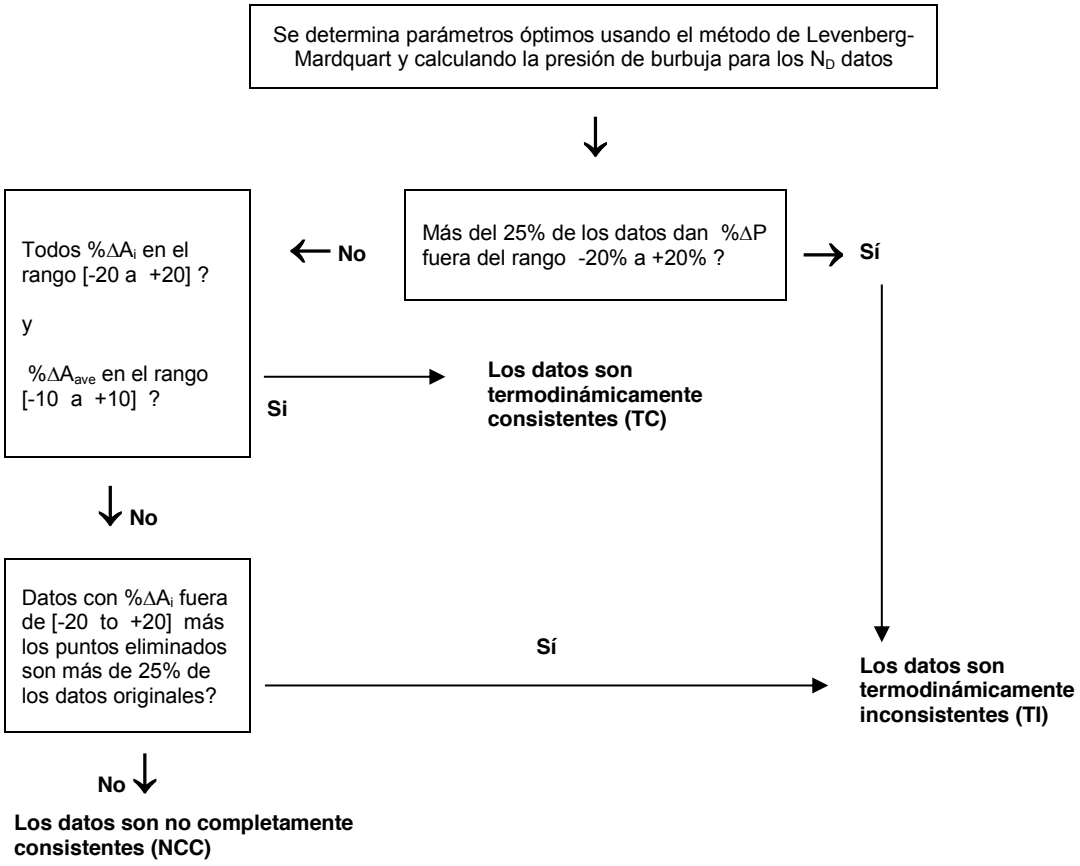


Fig. 1: Reglas para la toma de decisión en el método de consistencia termodinámica

Para evaluar las integrales dadas por las ecns. (D) en la Tabla 2, se debe definir lo siguiente: *(i)* una ecuación de estado; *(ii)* un conjunto de reglas de mezcla; y *(iii)* un conjunto de reglas de combinación. En principio, cualquier EdE y cualquier regla de mezcla y de combinación podrían utilizarse para calcular la presión. Lo importante en este aspecto es que el modelo correlacione bien los datos para la función objetivo planteada, que es comúnmente la desviación en el cálculo de la presión de burbuja. El modelo, debe utilizarse para determinar el coeficiente de fugacidad φ_i y el factor de compresibilidad Z. Una vez que el modelo es seleccionado y los parámetros óptimos son determinados a partir de datos experimentales P-T-x o P-T-y, se calcula el área A_φ. Es importante señalar que para un conjunto de N datos experimentales, en el cálculo de las áreas, los datos experimentales se toman de a pares consecutivos, obteniendo (N-1) áreas para un conjunto de N datos.

Una vez que el modelo utilizado es el apropiado, se requiere que las desviaciones individuales en las áreas definidas por la ecn. (D), estén todas entre −20% y +20% y que el modelo correlacione adecuadamente los datos experimentales. La correlación es considerada aceptable si las desviaciones individuales en el cálculo de la presión de burbuja son inferiores al 10%. Si estas dos condiciones se cumplen, el conjunto de datos es

 ISBN 978-607-8242-11-5

declarado termodinámicamente consistente (TC). Estos criterios han sido los utilizados por nuestro grupo de investigación desde hace varios años. Sin embargo, no sólo el criterio de las desviaciones es considerado para declarar un conjunto de datos como TC o TI; también la distribución de tales desviaciones es considerada. Si unos pocos datos (hasta el 25% de los datos originales) no satisfacen el test de las áreas, no hay razón para eliminar todos los datos. Por lo tanto esos puntos son eliminados del análisis y se aplica el test al resto de los datos. Si estos pasan la prueba de consistencia, este conjunto reducido de datos es declarado termodinámicamente consistente y el conjunto de datos originales es declarado no completamente consistente (NCC). Pero, si más del 25% de los datos originales, no satisface el test de las áreas, la totalidad del conjunto de datos es declarado termodinámicamente inconsistente (TI).

ALGUNOS CASOS ESTUDIADOS

Para mostrar la aplicación del método de consistencia termodinámica se ha seleccionado dos casos de los muchos estudiados y publicados por el grupo ULS-UDEC. En un primer caso se considera tres gases en un líquido iónico específico, utilizando como modelo termodinámico la EdE VPT/KM y en un segundo caso se considera un gas en tres líquidos iónicos y se usa el modelo PR/KM.

Caso 1: Tres gases en [MDEA][Cl]

Se muestra los resultados de un estudio en el que se analizaron tres gases (O_2, H_2 y CO) en [MDEA][Cl]. Los rangos de concentración y presión de los datos para cada isoterma se presentan en la Tabla 3. Las propiedades críticas necesarias para utilizar la ecuación de estado usada para los gases fue obtenida de la literatura (Reid *et al.,* 1977) y la de los líquidos iónicos fue tomada de Valderrama y Rojas (2009).

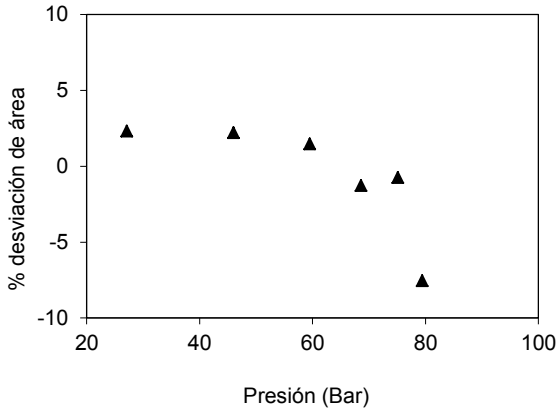
Tabla 3: Rango de temperatura, solubilidad y presión para el Sistema gas líquido iónico considerado en este estudio. Datos de Zhao *et al.* (2011)

Sistema	*T(K)*	∆x (gas en el Li)	∆P (bar)
O_2+[MDEA][Cl]	313	0.099 – 0.334	20.01 – 73.41
	318	0.099 – 0.317	21.20 – 74.11
	323	0.094 – 0.316	19.12 – 74.10
	328	0.092 – 0.291	20.23 – 69.28
	333	0.089 – 0.291	20.52 – 76.23
H_2 +[MDEA][Cl]	313	0.032 – 0.131	12.93 – 54.44
	318	0.030 – 0.125	12.82 – 58.33
	323	0.030 – 0.110	15.82 – 62.02
	328	0.030 – 0.105	16.32 – 58.99
	333	0.029 – 0.100	16.37 – 58.70
CO+ [MDEA][Cl]	313	0.078 – 0.233	26.13 – 82.68
	318	0.075 – 0.215	26.99 – 83.62
	323	0.066 – 0.205	25.03 – 81.90
	328	0.060 – 0.190	25.83 – 85.71
	333	0.057 – 0.176	25.95 – 83.88

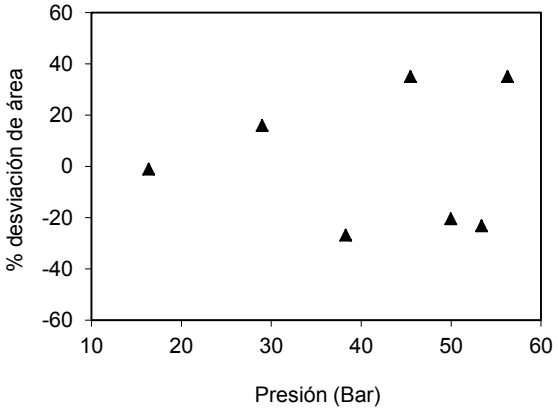
Tabla 4: Parámetros óptimos de interacción binaria k_{12}, l_{12}, m_{12}, n_{12} usando la EdE VPT/KM

Sistema	*T(K)*	k_{12}	l_{12}	m_{12}	n_{12}	$\lvert P\% \rvert$	$P_{max}\%$	$\lvert A\% \rvert$	*resultados*
O_2+[MDEA][Cl]	313	0.0935	-0.2831	0.9772	-0.2284	1.3	-3.3	9.7	TC
	318	-1.9379	-0.1677	-0.7994	-1.0891	2.8	4.6	15.2	NCC
	323	-1.4627	-0.1710	-0.3144	-1.3602	0.8	-1.9	8.1	NCC
	328	-1.3057	-0.3855	-0.1885	0.8291	1.3	-1.6	8.0	TC
	333	-0.9675	-0.2131	0.1288	-1.0606	0.5	0.9	5.5	TC
H_2 +[MDEA][Cl]	313	-0.8914	-0.4110	1.0074	0.6583	0.7	-2.1	8.0	TC
	318	-1.0617	-0.3060	0.9274	-0.8499	1.4	-4.3	12.7	NCC
	323	-1.3801	-0.4279	0.7854	0.9863	3.2	6.9	15.1	NCC
	328	-1.2594	-0.2808	0.8802	-1.5749	1.2	2.7	22.5	TI
	333	-0.6554	-0.3194	1.0469	-0.7202	1.0	3.0	13.5	TI
CO+[MDEA][Cl]	313	-0.1329	-0.2489	0.8007	-0.0584	0.4	-0.9	5.8	TC
	318	-0.3208	-0.2794	0.6323	0.3438	0.2	-0.4	2.6	TC
	323	0.6315	-0.0958	1.3610	-1.5004	0.4	-0.7	7.5	TC
	328	0.7043	-0.2612	1.3864	0.5223	0.4	0.7	5.4	TC
	333	0.0512	-0.2831	0.9072	0.4285	2.0	-3.5	7.9	TC

ISBN 978-607-8242-11-5



(2a) CO+[MDEA][Cl] a T = 318 K (TC)



(2b) H_2+[MDEA[Cl] a T = 318 K (TC)

Fig. 2: Errores en las áreas para dos conjuntos de datos (uno TC y otro TI)

Como se muestra en la Tabla 4, nueve conjunto de datos fueron declarados termodinámicamente consistentes (TC), y cuatro conjuntos de datos fueron declarados no completamente consistentes (NCC). Para el sistema H_2 +[MDEA][CI] dos conjuntos de datos, a la temperaturas 328 y 333 K son declarados termodinámicamente inconsistentes (TI). La Figura 2 muestra errores en las áreas para dos conjuntos de datos (uno TC y otro TI) como se muestra uno de ellos, a modo de ejemplo en la Fig. 2 (b).

Caso 2: H_2S en tres líquidos iónicos

El caso considera datos de tres mezclas de H_2S + LI binarias, en rangos de presión desde 0.608 hasta 96.3 bares y temperaturas entre 303 y 353 K. Las Tablas 5 y 6 dan algunos detalles sobre los datos experimentales utilizados en el estudio, incluyendo la fuente de literatura para cada conjunto de datos. En estas Tablas, N es el número de puntos de datos, T es la temperatura (expresada en kelvin), P es la presión (expresada en bar), Δx_1 es la solubilidad (en fracción molar) de sulfuro de hidrógeno en el líquido iónico.

Tabla 5: Detalles sobre los datos de equilibrio de fase para los sistemas H_2S (1) + LIs (2) considerados en este estudio.

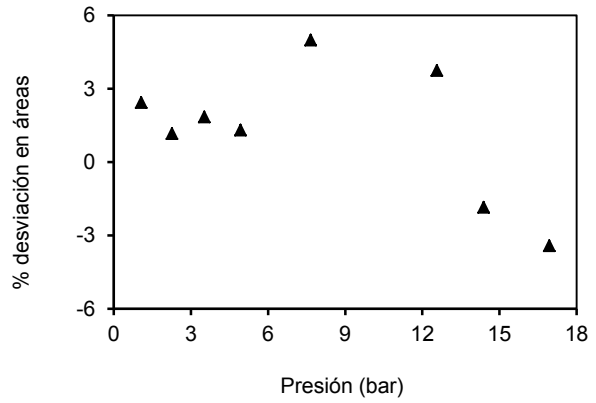
Sistema	*N*	*T/K*	*Rango de datos*	
			Rango de x_1	Rango de P/bar
H_2S (1)+[Bmim][BF_4] (2)	9	303	0.039 – 0.354	0.608 – 7.360
	9	313	0.039 – 0.354	0.608 – 7.360
	9	323	0.039 – 0.354	0.608 – 7.360
	8	333	0.039 – 0.354	0.608 – 7.360
	6	343	0.039 – 0.354	0.608 – 7.360
H_2S (1)+[Hmim][BTI] (2)	11	303	0.054 – 0.701	0.685 – 15.043
	10	313	0.050 – 0.648	0.767 – 15.740
	9	323	0.044 – 0.560	0.846 – 15.317
	9	333	0.042 – 0.536	0.924 – 17.012
	9	343	0.039 – 0.513	0.999 – 18.633
	9	353	0.037 – 0.492	1.073 – 20.168
H_2S (1)+[Emim][$EtSO_4$] (2)	6	303	0.020 – 0.118	1.137 – 9.505
	6	313	0.018 – 0.107	1.215 – 10.126
	6	323	0.034 – 0.100	2.847 – 11.122
	6	333	0.031 – 0.092	1.363 – 11.560
	6	343	0.031 – 0.088	1.431 – 12.178
	6	353	0.012 – 0.086	1.499 – 12.704

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos utilizando la EdE PR/KM. Como se observa en la tabla, once de los conjuntos de datos fueron declarados termodinámicamente consistentes (TC), como por ejemplo el sistema H_2S+[Hmim][BTI] a T= 353 K en figura (3a) y seis conjuntos de datos fueron declarados no completamente consistentes (NCC), como el sistema H_2S+[Bmim][BF4] a T= 303 K en Figura (3b) .

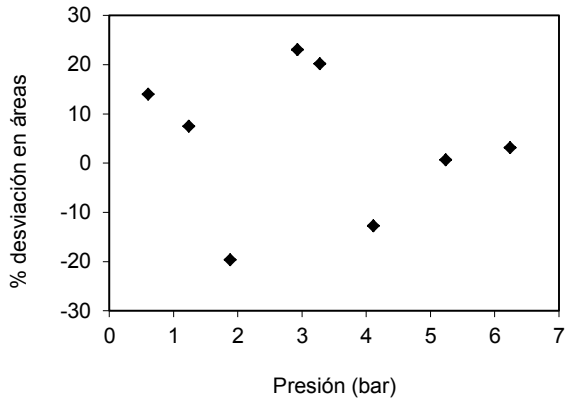
ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 6: Parámetros óptimos de interacción binaria k_{12}, β_{12}, δ_{12} usando la EdE PR/KM. En la última columna están los resultados del test de consistencia termodinámica.

Sistema	*T(K)*	k_{12}	β_{12}	δ_{12}	$\lvert\Delta P\%\rvert$	$P_{max}\%$	$\lvert\Delta A\%\rvert$	*Resultados*
H_2S (1)+[Bmim][BF_4] (2)	303	0.19405	-0.25232	0.72135	2.3	-5.2	12.6	NCC
	313	0.30944	-0.25170	0.89988	0.6	-2.4	5.5	TC
	323	-0.22979	-0.29666	0.12881	2.1	-7.6	11.3	NCC
	333	0.37715	-0.26734	1.01192	2.7	-3.7	15	NCC
	343	-0.13193	-0.32061	0.31706	0.9	-2.4	9.7	NCC
H_2S (1)+[Hmim][BTI] (2)	303	0.20212	-0.46674	0.80826	2.1	-4.2	5.6	TC
	313	0.16071	-0.46845	0.73976	1.4	-5.1	5.2	TC
	323	0.11251	-0.46864	0.65204	2.3	-9.9	5.7	TC
	333	0.00013	-0.47359	0.45649	1.3	-3.1	4.5	TC
	343	-0.01223	-0.47388	0.43866	0.9	-2.8	3.2	TC
	353	0.13421	-0.47348	0.69937	0.6	-1.4	2.6	TC
H_2S (1)+[Emim][$EtSO_4$] (2)	303	-0.03002	-0.14270	-0.44495	2.1	4.8	6.2	TC
	313	-0.01987	-0.13168	-0.44920	2.1	4.4	7.1	TC
	323	0.14660	-0.15492	0.02131	1.9	-3.9	5.7	TC
	333	0.35986	-0.18036	0.58161	1.8	6.3	9.3	NCC
	343	-0.15721	-0.11203	-0.78541	2.9	6.1	11.5	NCC
	353	0.02853	-0.18356	-0.11318	1.6	-1.5	6.3	TC



(3a) H_2S (1) +[Hmim][BTI] (2) a T = 353 K (TC)



(3b) H_2S (1)+ [Bmim][BF_4] (2) a T = 303 K (NCC)

Fig. 3: Errores en las áreas para dos conjuntos de datos (uno TC y otro NCC)

CONCLUSIONES

De los estudios realizados por los grupos de investigación ULS-UDEC sobre análisis de consistencia termodinámica de datos de equilibrio entre fases y solubilidad, se pueden obtener las siguientes conclusiones principales: *(i)* los métodos termodinámicos y numéricos explorados, permiten determinar en forma adecuada sobre la consistencia termodinámica de datos de equilibrio entre fases para este tipo de sistemas binarios compuestos por un gas+líquido iónico; *(ii)* el método de consistencia termodinámica propuesto puede ser usado para analizar datos de concentración que no cubren todo el intervalo de 0 a 1 en la fracción molar; y *(iii)* el método permite analizar datos experimentales individuales de un cierto conjunto y discriminar entre datos termodinámicamente correctos y dudosos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) Chile por su apoyo a través del proyecto Fondecyt N° 1150802 y del Proyecto Fondecyt N°1070025; y al Centro de Información Tecnológica de La Serena-Chile. C.A.F., agradece a la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción-Chile a través del Proyecto DIUC N° 211.011.054-1.0; J.O.V. y R.A.C., agradecen a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad de La Serena-Chile por el apoyo permanente.

 ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

Faúndez, C.A., F.A. Quiero y J.O. Valderrama, Thermodynamic consistency test of binary gas+water equilibrium data at low and high pressures, Chinese J. of Chemical Engineering, 21 (10), 1172-1181, https://doi.org/10.1016/S1004-9541(13)60575-3 (2013)

Kim, Y.S., W.Y. Choi, J.H. Jang, K.P. Yoo, C.S. Lee, Solubility measurement and prediction of carbon dioxide in ionic liquids, Fluid Phase Equilibria, 228/229, 439 (2005)

Koel, M. (Ed.), Ionic liquids in chemical analysis, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, U.S.A. (2009)

Kwak, T.Y. y G.A. Mansoori, van der Waals mixing rules for cubic equations of state. Applications for supercritical fluid extraction modeling, Chemical Engineering Science, 41, 1303-1309 (1986)

Peng, D.Y., D.B. Robinson, A new two-constant equation of state, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 15(1), 59-64 (1976)

Reid, R.C., J.M. Prausnitz, T.K. Sherwood, The properties of gases and liquid, 3ª Edition, McGraw Hill Book Company, New-York, U.S.A. (1977)

Ren, W., Rutz B., Scurto AM., High-pressure phase equilibrium for the hydroformylation of 1-octene to nonanal in compressed CO_2, Journal of Supercritical Fluids, 51, 142-147, DOI: 10.1016/j.supflu.2009.08.003 (2009)

Shariati, A., C.J. Peters, High-pressure phase behavior of systems with ionic liquids: measurements and modeling of the binary system fluoroform+1-ethyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate, J. Supercrit. Fluids, 25 109–117, http://doi.org/10.1016/S0896-8446(02)00160-2 (2003)

Valderrama, J.O., A generalized Patel-Teja equation of state for polar and non-polar fluids and mixtures, J. Chem. Eng. Japan, 23 87–91, http://doi.org/10.1252/jcej.23.87 (1990)

Valderrama, J.O., C.A. Faúndez, Thermodynamic consistency test of high pressure gas-liquid equilibrium data including both phases, Thermochim Acta 499 85–90, http://doi.org/10.1016/j.tca.2009.11.006 (2010)

Valderrama, J.O. y J. Zavaleta, Thermodynamic consistency test for high-pressure gas–solid solubility data of binary mixtures using genetic algorithms, The Journal of Supercritical Fluids, 39 (1), 20–29, http://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.02.003 (2006)

Valderrama, J.O. y P.A. Robles, Thermodynamic consistency of high pressure ternary mixtures containing a compressed gas and solid solutes of different complexity, Fluid Phase Equilibria, 242, 93-102 (2006)

Valderrama, J.O., A. Reategui, y W. Sanga, Thermodynamic consistency test of vapor-liquid equilibrium data for mixtures containing ionic liquids, Industrial & Engineering Chemistry Research, 47 (21), 8416–8422, http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie800763x (2008)

Valderrama, J.O., y V.H. Álvarez, A versatile thermodynamic consistency test for in- complete phase equilibrium data of high-pressure gas–liquid mixtures, Fluid Phase Equilib., 226 149–159, http://doi.org/10.1016/j.fluid.2004.07.002 (2004)

Valderrama, J.O., R.E. Rojas, Critical properties of ionic liquids. Revisited, Ind. Eng. Chem. Res. 48, 6890 – 6900, DOI: 10.1021/ie900250g (2009)

Wasserscheid, P., T. Welton, Ionic liquids in synthesis, 2nd Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, Germany (2009)

Wong, D.S. y S.I. Sandler, A theoretically correct mixing rule for cubic equations of state, AIChE Journal, 38, 671-680 (1992)

Zhao, Y., X. Zhang, H. Dong, Y. Zhen, G. Li, S. Zeng, S. Zhang, Solubilities of gases in novel alcamines ionic liquid 2-[2-hydroxyethyl (methyl) amino] ethanol chloride, Fluid Phase Equilib., 302 60-64 (2011)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Comparación de descriptores de imágenes para la clasificación de larvas de mosquitos

Zaira García Nonoal, Alejandra Sánchez Ortiz, Antonio Arista Jalife y Mariko Nakano Miyatake
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacan
Instituto Politécnico Nacional
E-mail: mnakano@ipn.mx

Resumen

Se han aplicado herramientas de procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones para la clasificación de larvas de mosquito responsables de la transmisión de enfermedades como el Dengue, Zika y Chikungunya. Se realiza la comparación del funcionamiento de tres descriptores de imágenes: Filtro Gabor 2D, Matriz de Co-ocurrencia y *Local Binary Pattern* en conjunto el clasificador Máquina de Soporte Vectorial para clasificar imágenes del carácter taxonómico denominado peine, que distingue de manera significativa entre diferentes especies. El estudio muestra el porcentaje de eficiencia de clasificación obtenido con cada uno de los descriptores. Los resultados indicaron que el Filtro Gabor 2D brinda un porcentaje de eficiencia aproximadamente del 80%, demostrando que se pueden aplicar este tipo de herramientas computacionales para automatizar el proceso de clasificación.

Palabras clave: Mosquito Aedes, Clasificación, Descriptor, Máquina de Soporte Vectorial, Entomología.

Comparison of Image Descriptors to classify mosquito larvae

Abstract

Image processing and pattern recognition are tools that can be used to classify mosquito larvae that spread the viruses that cause Dengue, Zika and Chikungunya. We compare the functionality of three image descriptors: Gabor 2D filter, Co-ocurrence Matrix and Local Binary Pattern together with the classifier Support Vector Machine to identify the most significant characteristic denominated comb, which is different in every mosquito genus. This paper presents the classification performance obtained by each one of the three descriptors. The experimental result indicates that the Gabor 2D filter provides a better performance, showing an accuracy approximately of the 80%. Based on this, we demonstrate that we be able to automate the classifying process applying this type of computational resources.

Keywords: Aedes mosquito, Classification, Descriptor, Support Vector Machine, Entomology.

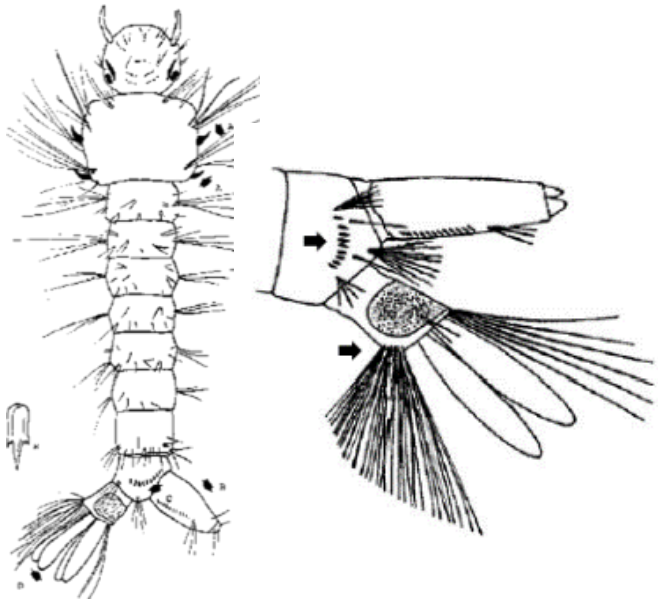
 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El Dengue, Zika y Chikungunya son enfermedades transmitidas por el mosquito de género Aedes, que buscan controlarse en distintas partes del mundo incluyendo México (Benelli y Mehlhorn, 2016). En nuestro país la transmisión de estas enfermedades se puede observar de manera más frecuente a pesar de las medidas que se han tomado para reducir los índices en que se presentan, de modo que en la actualidad los casos confirmados de Dengue continúan ocurriendo en un porcentaje mayor al 50% en algunas regiones del país.

La clasificación de larvas de mosquito que se realiza en México para determinar zonas que son habitadas por los mosquitos transmisores de dichas enfermedades, es una tarea que resulta ser poco eficiente, ya que se trata de un proceso manual realizado en laboratorios que cuentan con personal capacitado y equipo de laboratorio especifico. Además de que la recolección de muestras consume un tiempo considerable en comparación con el ciclo de vida del mosquito.

Los principales vectores de dichas enfermedades son el Aedes aegypti y Aedes albopictus los cuales desarrollan su ciclo biológico donde habita el hombre. Los mosquitos pasan por cuatro estados durante su ciclo biológico: huevo, larva, pupa y adulto (Ibañez y Martínez, 1994). Dentro del estado larvario se pueden distinguir tres regiones importantes: cabeza, tórax y abdomen, en este último específicamente en el octavo segmento se encuentra un conjunto de cerdas, denominado peine, que permite distinguir entre las distintas especies como se muestra en la Figura 1.



a) b)

Figura 1: a) Larva de mosquito Aedes. b) Octavo segmento con peine y sifón.

Actualmente existen trabajos que realizan la clasificación de manera automática utilizando descriptores y clasificadores de imágenes. Uno de ellos utiliza dichas herramientas para la clasificación de mosquitos en etapa adulta, sin embargo, utilizar el peine de la larva como característica única e irrepetible de cada género representaría una clasificación más eficiente.

El objetivo de este trabajo es optimizar la clasificación de larvas de mosquito utilizando imágenes del octavo segmento de la larva, extrayendo sus características utilizando los descriptores Filtro Gabor 2D (FG2) (Manjunath y Ma 1996), Matriz de co-ocurrencia (MC) (Baraldi y Parmiggiani, 1995), Local Binary Pattern (LBP) (Ojala y col. 2002), en conjunto con el clasificador de imágenes Máquina de soporte vectorial (MSV) (Delos Angeles y col. 2014), para realizar la comparación de eficiencia de discriminación entre los géneros “Aedes” y “Otros”.

Esto permitiría la reducción del tiempo empleado para realizar una clasificación manual de larvas, que bien puede emplearse para realizar un mayor número de clasificaciones sin la necesidad de contar con personal y equipo especializado y obtener información de apoyo para la toma de decisiones.

ISBN 978-607-8242-11-5

El presente trabajo se encuentra conformado por las siguientes secciones: Sistema propuesto, en donde se realiza una descripción detallada de los procesos y algoritmos que se emplean para llevar a cabo la clasificación de las larvas. Una vez explicado el proceso, en la sección de resultados y discusión se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados en donde se compara la eficiencia de los descriptores mencionados en conjunto con la Máquina de Soporte Vectorial. Finalmente, se presentan las conclusiones.

SISTEMA PROPUESTO

El modelo propuesto para realizar el proceso de clasificación se basa en el más utilizado comúnmente. Sin embargo, de acuerdo al tipo de imágenes a utilizar, se enfoca en encontrar los algoritmos de preprocesamiento, descripción y clasificación óptimos para cada etapa. El diagrama general del proceso de clasificación se muestra en la Figura 2.

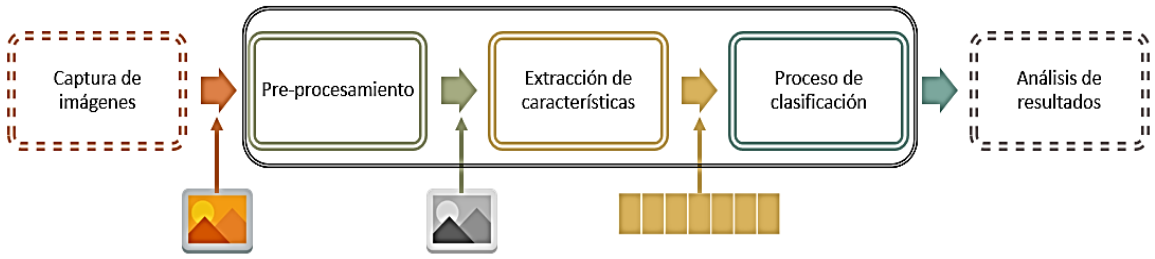


Figura 2: Diagrama general del proceso de clasificación.

Dentro de cada una de las etapas de preprocesamiento, extracción de características y el proceso de clasificación, se encuentran los algoritmos que se analizaron en forma detallada para cumplir el objetivo. La Figura 3 muestra el diagrama con la especificación de los algoritmos evaluados en el presente trabajo.

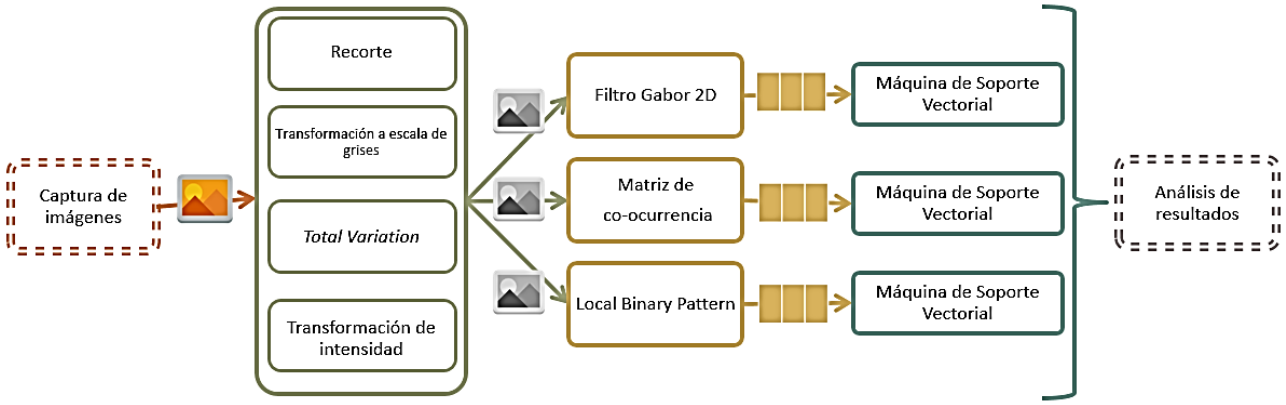


Figura 3: Diagrama con especificación de los algoritmos evaluados.

A continuación, se describe de manera más detallada en que consiste cada una de las etapas del proceso de clasificación.

Captura de imágenes

El proceso de captura se realizará de forma manual, utilizando un Smartphone en conjunto con un microscopio especial para este tipo de dispositivos, de manera que se obtengan imágenes del peine de la larva aumentadas en un porcentaje adecuado para su clara visualización.

Preprocesamiento

Las imágenes de la base de datos pueden ser recortadas sin alterar la región de interés para llevar a cabo la extracción de características, es por ello que dicha tarea se realiza para obtener nuevas imágenes

ISBN 978-607-8242-11-5

enfocadas únicamente en la región de interés. El recorte se realiza seleccionando la parte central de la región de interés, en este caso el peine de la larva, para después seleccionar los extremos, es decir, se indica la parte central del peine del mosquito y posteriormente se señala dónde empieza y donde termina.

Posteriormente se realiza la transformación a escala de grises y la reducción de ruido aplicando la técnica de *Total Variation* en conjunto con la transformación de intensidad para obtener nuevas imágenes enfocadas únicamente en la región de interés. La técnica de *Total Variation* (Yin y col.2005), consiste en la descomposición de una imagen *f*, en una parte de estructura denominada caricatura *u*, y una parte de textura *v*, denominada de la misma forma. En la ecuación (1), $\| \|_A$ y $\| \|_B$ son normas, s(.) y t(.) son cualquier función y σ es un valor constante usado como condición de optimización.

$$min\{\|s(u)\|_A \mid \|t(u,f)\|_B \leq \sigma\} \quad (1)$$

Para unificar el color del fondo y suprimir los destellos blancos de la imagen se realiza la transformación de intensidad que consiste en determinar el valor de color gris dominante haciendo uso del histograma de la imagen para reemplazar los valores mayores con el valor determinado anteriormente.

Extracción de características

La extracción de características se realizó aplicando los descriptores anteriormente mencionados: Filtro Gabor 2D (FG2) (Manjunath y Ma 1996), Matriz de Co-ocurrencia (MC) (Baraldi y Parmiggiani, 1995) y Local Binary Pattern (LBP) (Ojala y col. 2002). Cada descriptor obtiene vectores de características de diferente longitud, lo que permitirá analizar cómo afectan la cantidad y tipo de características obtenidas al porcentaje de clasificación correcta.

El descriptor FG2 consiste en 24 filtros de Gabor con 6 orientaciones y 4 frecuencias espaciales. Usando cada uno de los 24 filtros se filtra la imagen y se calculan la media μ_k y la desviación estándar σ_k, k=1…24 de las imágenes filtradas, obteniendo 48 elementos por cada vector de características.
Las siguientes ecuaciones (2) y (3), describen el cálculo realizado para la obtención de la desviación estándar y la media, donde *f* es el número de filtro, *m* el número de la imagen y *N* la cantidad de ventana del filtro.

$$\mu_{fm} = \frac{\mu_{f1} + \mu_{f2} + \ldots + \mu_{fN}}{N} \quad (2)$$

$$\sigma_{fm} = \frac{\sigma_{f1} + \sigma_{f2} + \ldots + \sigma_{fN}}{N} \quad (3)$$

El descriptor MC describe la frecuencia de un nivel de gris y de este se obtiene un vector de características de 8 elementos. La información textural en una imagen está contenida en la relación espacial que los tonos de gris tienen entre ellos. Las ecuaciones (4) a (11) describen las principales propiedades que se extraen.

La ecuación (4) corresponde al cálculo del contraste que se define como la cantidad de variaciones locales en los tonos de gris de la imagen, donde a mayor variación de los tonos de gris, mayor contraste.

$$V_{contraste} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \times (i-j)^2 \quad (4)$$

La disimilitud es muy parecida al contraste y está dada por la ecuación (5).

$$V_{disimilitud} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \times |i-j| \quad (5)$$

La ecuación (6) representa la energía, también llamada uniformidad.

$$V_{energia} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2 \quad (6)$$

 ISBN 978-607-8242-11-5

La homogeneidad se encuentra dada por la ecuación (7), esta aumenta cuando el contraste entre las parejas de píxeles desciende.

$$V_{homogeneidad} = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + |i - j|} \tag{7}$$

La varianza se calcula para las filas y columnas de píxeles de la imagen y se encuentra dada por las ecuaciones (8) y (9).

$$\sigma_r^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} (i - \mu_r)^2 P_{i,j} \tag{8}$$

$$\sigma_c^2 = \sum_{i,j=0}^{N-1} (j - \mu_c)^2 P_{i,j} \tag{9}$$

La ecuación (10) representa a entropía que se define como la medida de complejidad de la imagen, donde a mayor entropía se tiene mayor complejidad.

$$V_{entropia} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \, log_2 \, P_{i,j} \tag{10}$$

La correlación, dada por la ecuación (11) indica la dependencia lineal de los tonos de gris en una imagen.

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{(i - \mu_r)(j - \mu_c) P_{i,j}}{\sigma_r \sigma_c}, \; \sigma_r \neq 0, \; \sigma_c \neq 0 \tag{11}$$

Finalmente, el descriptor LBP es un operador de textura simple y eficiente que etiqueta cada píxel de la imagen analizando su vecindario, estudiando si el nivel de gris de cada píxel supera un determinado umbral y codificando dicha comparación mediante un número binario. Las siguientes ecuaciones (12) y (13), se utilizan para el cálculo de LBP, donde *P* es el número de vecinos que se van a considerar, *R* el tamaño del vecindario, *gc* y *gp* son los valores del pixel central y cada uno de los *p* pixeles del vecindario.

$$LBP_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} S(g_p - g_c) 2^p \tag{12}$$

$$S(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \tag{13}$$

Proceso de clasificación

Para realizar la clasificación de los vectores de características obtenidos con los descriptores anteriormente mencionados, se hizo uso del clasificador Máquina de Soporte Vectorial (MSV) (Delos Angeles y col. 2014) en el cual, dado un conjunto de ejemplos de entrenamiento (muestras), se etiquetan las clases y se entrena para construir un modelo que prediga la clase de una nueva muestra. Representa a los puntos de las muestras en el espacio, separando las clases por un espacio lo más amplio posible para que, cuando se utilicen nuevas muestras, en función de su proximidad puedan ser clasificadas en una u otra clase, dependiendo de la proximidad a cada una.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta una selección de resultados obtenidos en este trabajo. En cada análisis se utilizó una base de datos de 308 vectores de características donde 154 pertenecían al género “Aedes” y 154 a “Otros”, así como un porcentaje de entrenamiento de la MSV diferente. Para el caso de la MSV, el parámetro principal que se necesitan para su funcionamiento es determinar los porcentajes con los que se entrenará al sistema y con los que se realizarán pruebas. Principalmente se tomaron los porcentajes que se muestran en la Tabla 1.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Porcentajes de entrenamiento y pruebas utilizados.

% de Entrenamiento	% de Pruebas
50	50
60	40
70	30
80	20

Esto se realizó con el fin de identificar con qué porcentajes se presentaba una clasificación con mayor exactitud, de acuerdo con ello y con base en las pruebas realizadas se determinó que utilizar 80% de entrenamiento y 20% de pruebas era el más eficiente.

Los resultados obtenidos utilizando la base de datos de 308 vectores entrenando previamente la MSV con el 80% de los vectores y realizando pruebas con el 20% restante, derivo en la clasificación de 62 imágenes. A continuación, se muestran las matrices de confusión en las tablas 2, 3 y 4, correspondientes a la clasificación de los vectores de características obtenidos con los 3 descriptores.

Tabla 2: Matriz de confusión obtenida con FG2 y MSV para 62 imágenes.

MSV y FG2			
	Aedes	Otros	Totales
Aedes	24	7	31
Otros	6	25	31
Totales	30	32	62

$$\text{Exactitud} = \frac{24 + 25}{31 + 31} = 0.79 = 79\%$$

Tabla 3: Matriz de confusión obtenida con MC y MSV para 62 imágenes.

MSV y MC			
	Aedes	Otros	Totales
Aedes	20	11	31
Otros	13	18	31
Totales	33	29	62

$$\text{Exactitud} = \frac{20 + 18}{31 + 31} = 0.67 = 67\%$$

Tabla 4: Matriz de confusión obtenida con LBP y MSV para 62 imágenes.

MSV y LBP			
	Aedes	Otros	Totales
Aedes	21	10	31
Otros	7	24	31
Totales	28	34	62

$$\text{Exactitud} = \frac{21 + 24}{31 + 31} = 0.72 = 72\%$$

De los resultados arrojados por los 3 descriptores en conjunto con MSV, destacaron los de FG2, el cual, presentó el porcentaje más alto de clasificación exitosa con un 79%.

A continuación, en la Tabla 5 se hace una comparación de los tiempos y recursos humanos empleados en la clasificación manual y la clasificación realizada utilizando FG2 en conjunto con la MSV.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 5: Comparación entre la clasificación manual y la clasificación propuesta.

Comparativa entre tipos de clasificación de larvas de mosquito					
Tipo de Clasificación	**Número de muestras**	**Tiempo de recolección**	**Tiempo de preparación**	**Recursos humanos empleados**	**Tiempo de clasificación**
Manual	308 larvas	1 día	10 minutos	3 personas	8 horas
Automática	308 larvas	1 día	1 minuto	1 persona	7 minutos

Como se observa en la tabla anterior, el tiempo de recolección de muestras es el mismo en ambos casos, ya que, se utilizaron muestras recolectadas para un laboratorio. Sin embargo, los demás tiempos cambian de manera significativa.

El tiempo de preparación y clasificación manual puede variar dependiendo de la experiencia que los recursos humanos tengan para realizar dichas tareas, las condiciones bajo las que se trabaje en el laboratorio, es decir, la cantidad de microscopios con los que se cuenten y la capacidad de ampliación que estos tengan. Es por ello que la tabla anterior es una representación aproximada de los tiempos empleados, aun así, el tiempo empleado por el método propuesto se ve reducido de una manera significativa.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos de las clasificaciones realizadas con la Máquina de Soporte Vectorial (MSV) y los tres descriptores se concluye lo siguiente: 1) El tamaño de los vectores no es un factor que afecte de manera directa al porcentaje de clasificación, la información contenida en ellos es lo que hace la diferencia. 2) Realizar un preprocesamiento adecuado contribuye al aumento del porcentaje de clasificación exitosa, ya que se puede resaltar en mayor medida el área del peine descartando los elementos del fondo que puedan impactar de manera negativa en la extracción de las características. 3) Se encontró que el descriptor Filtro Gabor 2D (FG2) en conjunto con la MSV, presentó el porcentaje de clasificación más alto después de utilizar imágenes que se sometieron al preprocesamiento que implica la aplicación de *Total Variation.*

A partir de las conclusiones obtenidas se tienen los siguientes trabajos a futuro: Implementar otro tipo de preprocesamiento que permita obtener un porcentaje más alto de clasificación exitosa. Realizar la segmentación automática del peine de la larva utilizando Redes Neuronales Convolucionales, e implementar los algoritmos seleccionados para realizar pruebas en un sistema conformado por una aplicación móvil para la captura de imágenes, un servidor que realice la clasificación y una aplicación de escritorio que permita obtener reportes.

REFERENCIAS

Baraldi A. y F. Parmiggiani; "*An investigation of the Textural Characteristics Associated with Gray Level Cooccurrence Matrix Statistical Parameters"*, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 33(2), 293-304, (1995).

Benelli, G., & Mehlhorn, H. (2016*). "Declining malaria, rising of dengue and Zika virus: insights for mosquito vector control."* Parasitology Research, 115(5), 1747–1754.

Chang, C., Ortiz, K., Ansari, A., & Gershwin, M. E. (2016). "*The Zika outbreak of the 21st century*." Journal of Autoimmunity, 68, 1–13.

Delos Angeles, Bethsedea Joy S. , Dizon, Neil John A., Mardo, Mark Kevin N.,"*Support Vector Machine and Mel Frequency Cepstral Coefficient based Algorithm for Hand Gestures and Bidirectional Speech to Text Device"*, MIT-October 2014.

S. Ibañez-Bernal, C. Martinez-Campos, *"Clave para la identificación de larvas de mosquitos comunes en las areas urbanas y suburbanas de la república mexicana",* Folia Entomología Mexicana, vol. 92, pp. 43-73, 1994.

Leonid I. Rudin, Stanley Osher, Emad Fatemi. "*Nonlinear total variation based noise removal algorithms."* Physica D: Nonlinear phenomena. Volume 60, Issues 1-4, November 1992, Pages 259-268.

Liu Y., W. Lin, M. Paul, C. Deng, y F. Zhang, "*Just noticeable difference for images with decomposition model for separating edge and textured regions"*, IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., 20(11) ,1648–1652, (2010)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Manjunath B. S. y W.-Y. Ma; "*Texture features for browsing and retrieval of image data"*, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 18(8), 837–842, (1996).
Ojala, T.; Pietikäinen M.; Mäenpää T. "*Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with Local Binary Patterns"* , Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 24 (7).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Admisibilidad de Sistemas Descriptores LPV

Addison Ríos[1] y Flor Narciso[2]
(1) Facultad de Ingeniería, Dpto. de Sistemas de Control, Univ. de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela
(2) Fac. de Artes y Ciencias, Dpto. de Ciencias Matemáticas, Univ. de Puerto Rico, Recinto Univ. de Mayagüez, Casilla 9000, Mayagüez-Puerto Rico 00681-9018
e-mail: ilich@ula.ve, flor.narciso@upr.edu

Resumen

Cuando se combina el modelado de sistemas físicos con parámetros inciertos, surgen sistemas dinámicos que representan sistemas descriptores (SD) inciertos; de modo que el análisis de SD sujetos a incertidumbres ha sido una línea de investigación muy activa: el análisis de la estabilidad robusta (admisibilidad), la estabilización, el análisis de la controlabilidad y observabilidad robusta, el control robusto bajo las normas H_2 y H_∞, el filtrado robusto, entre otras líneas de trabajo. Así, la contribución de este trabajo está centrada en el análisis y síntesis de controladores, basados en realimentación estática de la salida (SOF), para una clase de sistemas descriptores lineales a parámetros variantes (LPV). Los SD se consideran que presentan incertidumbres paramétricas de tipo politópicas y entradas de perturbación, tal como se describe por la ecuación siguiente:

$$\mathbb{E}\dot{z}(t) = \mathcal{F}(\rho)z(t) + Bu(t), \quad h(t) = \mathcal{C}(\rho)z(t)$$

Dondeρes la variación paramétrica. A partir de una condición de existencia una aplicación inyectiva lineal, representando la inversa generalizada de la matriz $\mathbb{E}$, el sistema descriptor original, considerando los modos dinámicos y aplicación de los modos no dinámicos, es transformado a un sistema LPV. Luego, se analiza la condición para la realimentación estática de la salida sobre ese sistema LPV. La estabilidad del sistema LPV transformado se corresponde con la admisibilidad del SD original. La síntesis del controlador por SOF, para el sistema LPV transformado, se obtiene considerando índices de desempeño en H_2 y H_∞, descritos como desigualdades matriciales lineales, LMIs, como criterios para obtener la ganancia de SOF, bajo la presencia de incertidumbres y perturbaciones. Mediante simulaciones, los resultados teóricos son evaluados para en ejemplo numérico.

Admissibility of LPV Descriptor Systems

Abstract

When the modeled of physical systems with uncertain parameters is combined, dynamic systems arise that represent uncertain descriptor systems (SD); so that the subject analysis of SD to uncertainties has been a line of very active investigation: the analysis of the robust stability (admissibility), the stabilization, the analysis of the robust controllability and robust observability, the robust control under the norms H_2 and H_∞, the robust filtrate, among others lines of work. Thus, the contribution of this work is focused on the analysis and synthesis of controllers based on static output feedback (SOF), for a class of descriptor linear parameter variable (LPV) systems. Descriptors systems, called also: differential-algebraic systems, singular systems, semi-state systems or generalized state-space systems; are considered to pose parametric uncertainties of polytopic type and disturbances, as is described by the following equation:

$$\mathbb{E}\dot{z}(t) = \mathcal{F}(\rho)z(t) + Bu(t), \quad h(t) = \mathcal{C}(\rho)z(t)$$

where ρ is a parametric variation. From a condition of existence of a linear injective application, representing the generalized inverse matrix of $\mathbb{E}$, the original descriptor system is transformed to a LPV system. Then, the condition for the static output feedback on the LPV system is analyzed. Synthesis of the controller by SOF is obtained considering performance indices in H_2 and H_∞, described as linear matrix inequalities, LMIs, as criteria in order to obtain the gain of SOF, in the presence of uncertainties and disturbances.

Keywords: Descriptor systems, LPV systems, Static output feedback (SOF), H_2-H_∞ norms, Robust control

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Desde su introducción en 1977 (Luenberger 1977), los sistemas descriptores (SD), denominados también sistemas singulares, sistemas de semi-estado, sistemas diferencial-algebraicos o sistemas generalizados de estado-espacio; han sido uno de los campos principales de investigación dentro de la teoría de control, ya que son una representación natural y general de los sistemas dinámicos: a diferencia de sus contrapartes regulares en espacio de estado, un SD permitir una representación que incorpora restricciones algebraicas en sus variables físicas. Durante las últimas dos décadas, los sistemas descriptores han atraído mucha atención debido a los usos comprensivos en muchos sistemas del mundo real, tales como en la economía, como en el modelo dinámico de Leontief, en modelos sociales, en sistemas eléctricos, procesos químicos y los modelos mecánicos (robótica). Desde entonces, un considerable progreso ha sido hecho en la investigación de tales sistemas. Un problema que ha sido muy estudiado es la admisibilidad de SD, manteniendo abierta esa línea de investigación.

Por otro lado, el contexto de los sistemas lineales a parámetros variables (LPV, por sus siglas en inglés), se refiere a los sistemas dinámicos lineales cuyas representaciones en espacio de estados dependen de parámetros no estacionarios exógenos (Shamma 2012). Los sistemas LPV son una generalización de los sistemas LTV, estableciendo un modelo intermedio entre dinámicas lineales y no lineales, por lo que pueden constituirse en un modelo representativo para el control de procesos no lineales, permitiendo el uso de toda la maquinaria de control de sistemas lineales al caso de esos procesos no lineales particulares (Duan et al., 2013). Además, si el modelo no lineal se formula como un sistema lineal parametrizado, donde la parametrización es dependiente de los estados, permite que una descripción LPV represente un sistema no lineal no localmente, tomando ventaja de las consecuencias de una estabilización global. Así, la representación LPV de un sistema no lineal describe una clase de sistemas mayor que el sistema no lineal original.

Cuando se combina el modelado de sistemas físicos con parámetros inciertos, surgen sistemas dinámicos que representan SD inciertos. En efecto, como se sabe, para el modelado de muchos aplicaciones y procesos técnicos, solo se disponen modelos aproximados, de modo que el análisis de SD sujetos a incertidumbres ha sido una línea de investigación muy activa. Por ejemplo, numerosos problemas de análisis y síntesis se han abordado en la literatura: el análisis de la estabilidad robusta (admisibilidad), la estabilización, el análisis de la controlabilidad y observabilidad robusta, el control robusto bajo la caracterización de las normas H_∞-H_2, el filtrado robusto, el análisis y control real positivo, entre otras líneas de trabajo, (Yip et al.,1981, Duan 2010, Bara 2011). Los principales resultados en el análisis y síntesis de SD dependientes de parámetros se basan en funciones de Lyapunov paramétricas, que permiten minimizar el conservatismo de las funciones de Lyapunov clásicas, cuando se buscan soluciones numéricas a través de LMIs, representando una formulación que permite la resolución de los problemas de control complicados de manera muy eficiente, y con un notable grado de simplicidad (Chaabane et al., 2011, Bara 2011).

En ese contexto, en este trabajo se aborda el análisis de admisibilidad y control robusto para una clase de SD de tiempo continuo e incertidumbres de tipo politópicas en los parámetros dependientes, mediante el uso de las caracterizaciones de las normas H_2-H_∞ como LMIs, que surgen de funciones de Lyapunov dependientes de parámetros. La clase de SD a que se hace referencia, son aquellos donde existe una aplicación inyectiva lineal que permite transformar el SD dependientes de parámetros a un sistema LPV regular. La existencia de la transformación lineal garantiza que, los resultados del análisis de las propiedades del sistema LPV transformado se trasladen a los modos finitos del SD dependientes de parámetros originales. Así, el diseño del control robusto robusto, para el sistema LPV transformado, es garantía de satisfacer la admisibilidad y el desempeño robusto para el sistema SD de origen. En consecuencia, se analiza la condición para la realimentación estática de la salida sobre el sistema LPV transformado. La síntesis del controlador por SOF se obtiene considerando índices de desempeño en H_2 y H_∞, descritos como LMIs, como criterios para obtener la ganancia de SOF extendida, la cual considera una ganancia de realimentación para la salida, y una ganancia de realimentación para su derivada.

Notación. $\mathbb{R}$ es el conjunto de números reales. Para una matriz A, A^{T} denota su transpuesta. $\mathrm{tr}(\mathrm{A})$ define la traza de la matriz A. En las particiones de matrices simétricas, $\star$ denota cada uno de sus bloques simétricos. $\mathbb{I}_{\mathrm{n}}$ define la matriz identidad de dimensión n.

Preliminares Básicos

Unos resultados importantes que se deben toman en cuenta, ya que serán utilizados en el desarrollo de la técnica propuesta, corresponde a las caracterizaciones como desigualdades matriciales lineales (LMI)s extendidas de las normasH_∞ y H_2 de sistemas (Wei 2003, Pipeleersa et al.,2009). Sea el sistema LTI

$$\dot{x} = Ax + B\omega, \quad y = Cx + D\omega \tag{1}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Lema 1. *Desempeño H_2 relajado.*Considérese el sistema (1) con $\mathrm{D}=0$. Para $\mathrm{P}=\mathrm{P}^{\mathrm{T}}>0$, las siguientes declaraciones son equivalentes

i) A es estable y $\| \mathrm{C}(\mathrm{s}\mathbb{I}-\mathrm{A})^{-1}\mathrm{B} \|_2^2 < \mu$.

ii) Existen P y Z, tales que: $\mathrm{tr}(\mathrm{Z})<1$ y

$$\begin{bmatrix} \mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{P}+\mathrm{PA} & \mathrm{PB} \\ \mathrm{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{P} & -\mu\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} \mathrm{P} & \mathrm{C}^{\mathrm{T}} \\ \mathrm{C} & \mathrm{Z} \end{bmatrix} > 0 \tag{2}$$

iii) Existen P, Z y G tales que: $\mathrm{tr}(\mathrm{Z})<1$ y

$$\begin{bmatrix} -(\mathrm{G}+\mathrm{G}^{\mathrm{T}}) & \mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{A}+\mathrm{P} & \mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{B} & \mathrm{G}^{\mathrm{T}} \\ \mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{G}+\mathrm{P} & -\mathrm{P} & 0 & 0 \\ \mathrm{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{G} & 0 & -\mu\mathbb{I} & 0 \\ \mathrm{G} & 0 & 0 & -\mathrm{P} \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} \mathrm{P} & \mathrm{C}^{\mathrm{T}} \\ \mathrm{C} & \mathrm{Z} \end{bmatrix} > 0 \tag{3}$$

iv) Existen P, Z y G, tales que: $\mathrm{tr}(\mathrm{Z})<1$ y

$$\begin{bmatrix} -(\mathrm{G}+\mathrm{G}^{\mathrm{T}}) & \mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{A}+\mathrm{P}+\mathrm{G}^{\mathrm{T}} & \mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{B} \\ \mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{G}+\mathrm{P}+\mathrm{G} & -2\mathrm{P} & 0 \\ \mathrm{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{G} & 0 & -\mu\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} \mathrm{P} & \mathrm{C}^{\mathrm{T}} \\ \mathrm{C} & \mathrm{Z} \end{bmatrix} > 0 \tag{4}$$

Demostración

La equivalencia entre las tres primeras declaraciones han sido mostrada en el Teorema 3.3 de (Apkarian et al., 2001), que se basa en el lema de proyección y su recíproco. La equivalencia entre ii) y iv) es mostrada en (Wei 2003). ■

De la misma forma que para el caso H_2, existen algunos resultados para mejorar el desempeño en H_∞, tal como se muestra a continuación.

Lema 2. *Desempeño H_∞ Relajado.* Considérese el sistema (1). Con $\mathrm{P}=\mathrm{P}^{\mathrm{T}}>0$ y la matriz G, las siguientes declaraciones son equivalentes:

i) A es estable y $\| \mathrm{C}(\mathrm{s}\mathbb{I}-\mathrm{A})^{-1}\mathrm{B}+\mathrm{D} \|_\infty < \gamma$.

ii) Existe P, tal que

$$\begin{bmatrix} A^TP+PA & PB & C^T \\ B^TP & -\gamma^2\mathbb{I} & D^T \\ C & D & -\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0. \tag{5}$$

iii) Existen P y G tal que, para $\tau \gg 1$

$$\begin{bmatrix} -(G+G^T) & G^TA+P+\tau G^T & 0 & G^TB \\ A^TG+P+\tau G & -2\tau P & C^T & 0 \\ 0 & C & -\mathbb{I} & D \\ B^TG & 0 & D^T & -\gamma^2\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0. \tag{6}$$

Demostración

Las condiciones i) y ii) representan el bien conocido Lema Real Acotado. La equivalencia entre ii) y iii) puede ser vista en (Wei 2003). ■

SISTEMAS DESCRIPTORES Y SISTEMAS LPV

Sistemas Descriptores

Los sistemas descriptores (SD), denominados también sistemas singulares, sistemas de semi-estado, sistemas diferencial-algebraicos o sistemas generalizados de estado-espacio; han sido uno de los campos principales de la investigación de la teoría de control, desde su introducción en (Luenberger 1977). Durante las últimas dos décadas, los sistemas descriptores han atraído mucha atención debido a los usos comprensivos en la economía, como en el modelo dinámico de Leontief, en sistemas eléctricos, procesos químicos, y los modelos mecánicos. Desde entonces, un considerable progreso ha sido hecho en la investigación de tales sistemas (Duan 2010).

Un sistema descriptor se define, dinámicamente, por

$$\mathbb{E}\dot{\mathrm{z}}(\mathrm{t}) = \mathcal{F}\mathrm{z}(\mathrm{t}) + \mathrm{Bu}(\mathrm{t}), \mathrm{h}(\mathrm{t}) = \mathcal{C}\mathrm{z}(\mathrm{t}) \tag{7}$$

donde $\mathrm{z}(\mathrm{t}) \in \mathbb{R}^{\mathrm{n}}$ es el vector de variable descriptor (en vez de vector de estados), $\mathbb{E} \in \mathbb{R}^{\mathrm{m}\times\mathrm{n}}$, con $\mathrm{m} \leq \mathrm{n}$ y $\mathrm{rank}(\mathbb{E}) = \mathrm{r} \leq \mathrm{n}$; y $\mathcal{F} \in \mathbb{R}^{\mathrm{m}\times\mathrm{n}}$, $\mathrm{B} \in \mathbb{R}^{\mathrm{m}\times\mathrm{l}}$, $\mathcal{C} \in \mathbb{R}^{\mathrm{p}\times\mathrm{n}}$; la función control u pertenece a $\mathrm{L}_2(0,\tau;\mathbb{R}^{\mathrm{l}})$.

ISBN 978-607-8242-11-5

Si $m = n$ y si para todo $t \in [0, \tau]$, el polinomio $p(s) = \det(s\mathbb{E} - \mathcal{F})$ satisface que $p(s) \neq 0$, se dice que el par $(\mathbb{E}, \mathcal{F})$ es regular. En caso contrario, se denomina singular.

La solución y muchas de las propiedades de un SD libre ($u = 0$) se pueden caracterizar en términos de la forma canónica de Weierstraß (Losse et al., 2007, Duan 2010), la cual permite transformar la matriz $\mathbb{E}$ en una forma canónica de Jordan, con un número de autovalores finitos (modo dinámico finito), más una matriz nilpotente, en forma canónica también de Jordan, representando un número de autovalores infinitos (modo impulsivo). El índice de nilpotencia de la matriz nilpotente se denomina índice del sistema. Si $\mathbb{E}$ es no singular, se dice que el sistema tiene índice cero.

Definición 1. Sea el sistema (7), sea $\kappa = \deg(\det(s\mathbb{E} - \mathcal{F}))$; si $\kappa = r$ se dice que el SD es de impulso libre. Así, el SD (7) tiene κ modos dinámicos finitos, $r - \kappa$ modos impulsivos y $n - r$ modos no dinámicos.

Definición 2. Sea el SD dado por (7), con $\mathbb{E}, \mathcal{F} \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times l}$ y $\mathcal{C} \in \mathbb{R}^{p\times n}$. Además, sean las matrices: $\mathbb{T}$ y $\mathbb{S}$, con $\operatorname{img}\mathbb{T} = \ker\mathbb{E}^T$, $\operatorname{img}\mathbb{S} = \ker\mathbb{E}$.

i) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ se dice que el sistema es de dinámica finita estabilizable si $\operatorname{rank}[\lambda\mathbb{E} - \mathcal{F}, B] = n \forall \lambda \in C^+$;

ii) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ se dice que el sistema es controlable de impulso si $\operatorname{rank}[\lambda\mathbb{E}, \mathcal{F}\mathbb{S}, B] = n$

iii) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ se dice que el sistema es fuertemente estabilizable si se satisface i) y ii);

iv) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, \mathcal{C})$ se dice que el sistema es de dinámica finita detectable si $\operatorname{rank}[\lambda\mathbb{E}^T - \mathcal{F}^T, \mathcal{C}^T] = n \forall \lambda \in C^+$;

v) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, \mathcal{C})$ se dice que el sistema es observable de impulso si $\operatorname{rank}[\lambda\mathbb{E}^T, \mathcal{F}^T\mathbb{T}, \mathcal{C}^T] = n$;

vi) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, \mathcal{C})$ se dice que el sistema es fuertemente detectable si es de dinámica finita detectable (iv)) y observable de impulso (v)).

Un análisis de la controlabilidad para SD es presentado en (Berger et al., 2009, Klamka 2013). En ese orden de ideas, en (Leiva et al., 2016) se presenta un estudio de la condición de controlabilidad para un SD no autónomo semilineal por transformación del sistema a partir de una aplicación inyectiva lineal.

Teorema 3. Sea el sistema (7), con el par $(\mathbb{E}, \mathcal{F})$ regular; y sea $u = 0$.

1) La solución trivial $z = 0$ del sistema es estable si y solo si todos los autovalores finitos de $\lambda\mathbb{E} - \mathcal{F}$ están en el semi-plano cerrado izquierdo y los valores propios sobre el eje imaginario son simples.
2) La solución trivial $z = 0$ del sistema es asintóticamente estable si y solo si todos los autovalores finitos de $\lambda\mathbb{E} - \mathcal{F}$ están en el semi-plano abierto izquierdo. Esto significa que los modos dinámicos finitos son asintóticamente estables.

Demostración
Ver (Mehrmann et al., 2006, Yip et al., 1981). ■

La estabilidad asintótica del SD (7) se puede caracterizar por una ecuación de Lyapunov proyectada generalizada dada por:

$$\mathbb{E}^T\mathcal{X}\mathcal{F} + \mathcal{F}^T\mathcal{X}\mathbb{E} = -\mathcal{Q}, \tag{8}$$

la cual tiene una única solución $\mathcal{X}$ que es una matriz simétrica semi-definida positiva, y siendo $\mathcal{Q}$ una matriz definida positiva.

Definición 4. Sea el sistema (7). Se dice que el SD es admisible si es regular, de impulso libre y estable.

La Definición 4 permite establecer condiciones para el control de SD en el sentido de su estabilización (Chaabane et al., 2011). En efecto:

1) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ se dice que el sistema es de dinámica finita estabilizable y controlable de impulso si existe una matriz $\mathbb{K}$ tal que el par $(\mathbb{E}, \mathcal{F} + B\mathbb{K})$ es admisible.
2) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, \mathcal{C})$ se dice que el sistema es de dinámica finita detectable y observable de impulso si existe una matriz $\mathbb{L}$ tal que el par $(\mathbb{E}, \mathcal{F} + \mathbb{L}\mathcal{C})$ es admisible.

Por otro lado, si el sistema (7) es regular y de impulso libre, mediante la manipulación algebraica-diferencial de los modos no dinámicos, es posible obtener un sistema descriptor de la forma

$$E\dot{z}(t) = \mathbb{F}z(t) + \mathbb{B}u(t), h(t) = \mathcal{C}z(t) \tag{9}$$

donde $E \in \mathbb{R}^{r\times n}$, $\mathbb{F} \in \mathbb{R}^{r\times n}$ y $\mathbb{B} \in \mathbb{R}^{r\times m}$, representando los modos dinámicos del sistema original. Así, el problema de admisibilidad del sistema (7) es equivalente a la admisibilidad del sistema (9).

ISBN 978-607-8242-11-5

Sistemas LPV

Definición 5. Un sistema LPV es una dinámica en la cual las matrices contienen funciones que dependen de un vector de parámetros variantes conocidos.

De acuerdo a la Definición 5, un modelo representativo LPV es de la forma:

$$\dot{x}(t) = A(\alpha(t))x(t) + B(\alpha(t))u(t); y(t) = C(\alpha(t))x(t) \tag{10}$$

con $x(t) \in \mathbb{R}^n$ son los estados, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ son los controles y $y(t) \in \mathbb{R}^q$ las salidas medidas, y además $\alpha(t): \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}^l$. Es claro que si $\alpha(t) = t$, $l = 1$, el modelo LPV describe un sistema LTV.

Desde un punto de vista práctico, un sistema LPV tiene, al menos, dos interpretaciones interesantes (Bruzelius2004):

1) Puede ser visto como un sistema LTI con incertidumbre paramétrica, donde la incertidumbre está dada por el parámetro variante en el tiempo $\alpha(t)$.
2) Puede ser visto como un modelo LTV, o un modelo resultante de la linealización de un sistema no lineal (SNL) a lo largo de las trayectorias del parámetro α, aplicando linealización extendida, lo cual permite aplicar el análisis y síntesis de sistemas lineales muy bien conocidos.

Las restricciones típicas en los parámetros exógenos son límites en magnitudes y en sus índices de variaciones, esto es, $\forall t \geq 0$

$$\underline{\rho} \leq \alpha(t) \leq \bar{\rho}, \qquad \underline{\mu} \leq \dot{\alpha}(t) \leq \bar{\mu} \tag{11}$$

Sistemas LPV politópicos

Sea el sistema (10). Dicho sistema se puede caracterizar como un politopo si se define

$$\mathcal{P} := \begin{pmatrix} A(\alpha) & B(\alpha) \\ C(\alpha) & 0 \end{pmatrix} \in \Omega. \tag{12}$$

Donde Ω es un cojunto politópico, el cual se define como:

$$\Omega := \left\{ \mathcal{P}: \mathcal{P} = \sum_{i=1}^{l} \alpha_i \mathcal{P}_i; \quad \alpha_i \geq 0; \quad \sum_{i=1}^{l} \alpha_i = 1 \right\}; \tag{13}$$

por lo que cualquier matriz admisible $\mathcal{P}$ del sistema se puede escribir como una combinación convexa desconocida de l matrices vértices dadas, tal que

$$\mathcal{P}_i = \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & 0 \end{pmatrix} \tag{14}$$

Donde A_i, B_i, C_i, $i = 1, \dots, l$, son matrices dadas, vértices del politopo. Así, ese sistema se puede caracterizar por el hull convexo de Ω considerando los vértices del politopo, es decir

$$\mathcal{C}_o\, \Omega = \left\{ \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & 0 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} A_l & B_l \\ C_l & 0 \end{pmatrix} \right\}. \tag{15}$$

donde esos vértices matriciales son conocidos, siempre que $\alpha_i \geq 0$, $i = 1, \dots, l$, $\sum_{i=1}^{l} \alpha_i = 1$.

Así, de la dependencia de las matrices del sistema con respecto al parámetro α, y de la pertenencia de dichas matrices al politopo Ω, entonces, con $x(t_0) = x_0$:

$$\dot{x}(t) = \left(\sum_{i=1}^{l} A_i\, \alpha_i \right) x(t) + \left(\sum_{i=1}^{l} B_i\, \alpha_i \right) u(t); y(t) = \left(\sum_{i=1}^{l} C_i\, \alpha_i \right) x(t) \tag{16}$$

donde$\alpha_i \geq 0$, $i = 1, \dots, l$, $\sum_{i=1}^{l} \alpha_i = 1$.

Las condiciones de controlabilidad y de observabilidad de estos sistemas se pueden analizar en (Balas et al., 2003) y en (Ríos-Bolívar 2014). La estabilidad y la estabilización robusta de los sistemas LPV politópicos se pueden estudiar en (Bruzelius 2004, Shamma 2012), así como también en (Ríos-Bolívar 2014).

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considérese un SD de la forma (7), pero con incertidumbre paramétrica y perturbaciones, esto es:

$$\begin{gathered} \mathbb{E}\dot{z}(t) = \mathcal{F}(\rho)z(t) + \mathcal{B}_1(\rho)\omega(t) + Bu(t) \\ h(t) = \mathcal{C}(\rho)z(t) + \mathcal{D}_1(\rho)\omega(t) \\ y(t) = C_2 z(t) \end{gathered} \tag{17}$$

el cual constituye un sistema LPV descriptor. Allí, $u(t) \in \mathbb{R}^q$ son los controles; $\omega(t) \in \mathbb{R}^d$ son perturbaciones; $h(t) \in \mathbb{R}^p$ son las salidas controladas y $y(t) \in \mathbb{R}^p$ son las salidas medidas. La variación paramétrica ρ se asume que satisface las limitaciones definidas en (11). $\mathbb{E} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, y $\text{rank}(\mathbb{E}) = r < n$. Aquí se puede asumir que $r = m$, de modo que el sistema es de la forma dada por (9), con incertidumbres paramétricas. Las matrices $\mathcal{F}$, $\mathcal{B}_1$, B, $\mathcal{C}$,$\mathcal{D}$ y C_2 son de dimensiones apropiadas. Además, para todo ρ se asume que:

ISBN 978-607-8242-11-5

1) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$, el sistema es de dinámica finita estabilizable y controlable de impulso.
2) Para la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, C_2)$, el sistema es de dinámica finita detectable y observable de impulso.

Las condiciones anteriores conllevan a soluciones al problema de estabilización y desempeño robusto para el sistema (17). B y C_2 son matrices ciertas por el hecho de que ellas caracterizan, desde un punto de vista práctico, los actuadores y sensores, respectivamente, que son los dispositivos adecuadamente seleccionados en los sistemas de control.

El estudio de la estabilización robusto de SD tipo LPV ha sido reportado en (Losse et al., 2007, Bouali et al., 2008, Chadli et al.,2008). En esas contribuciones los controladores son tipo realimentación de estados y la incertidumbre se asume, por lo general, en la matriz dinámica solamente. En (Masubuchi 2007) se aplica realimentación de la salida, nuevamente en modelos con incertidumbres muy particulares. Finalmente, en (Chaabane et al., 2011, Bara 2011) se utiliza SOF para la estabilización robusta de un SD tipo politópico con la matriz $\mathbb{E}$ cierta y sin perturbaciones.

Problema de estabilización y desempeño robusto

Considérese el sistema (17) con $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, \mathrm{B})$ definiendo una dinámica finita estabilizable y controlable de impulso; y $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, \mathrm{C}_2)$ es tal que la dinámica es finita detectable y observable de impulso.

Problema 6. Diseñar un control $\mathrm{u}(\mathrm{t})$ para el sistema (17) tal que el correspondiente sistema en lazo cerrado sea admisible.

Problema 7. Diseñar un control $\mathrm{u}(\mathrm{t})$ para el sistema (17) tal que el correspondiente sistema en lazo cerrado sea admisible y el efecto de la perturbación $\omega(\mathrm{t})$ sobre la salida controlada $\mathrm{h}(\mathrm{t})$ sea mínimo en el sentido de las normas H_2-H_∞.

Para el Problema 6, referido a la estabilización robusta, se asume que $\omega(\mathrm{t}) = 0$. Enseguida, el Problema 7 demanda, además de la estabilización robusta, satisfacer un índice de desempeño robusto caracterizado bajo las normas H_2-H_∞.

CONTROL DE SISTEMAS DESCRIPTORES LPV

En esta sección se presentan los resultados principales del trabajo, los cuales consiste en proponer un control por SOF extendida que depende da la salida y su derivada. Así, sea el control de la forma:

$$\mathrm{u}(\mathrm{t}) = \mathcal{K}_0 \mathrm{y}(\mathrm{t}) + \mathcal{K}_1 \dot{\mathrm{y}}(\mathrm{t}), \tag{18}$$

donde$\mathcal{K}_0$ y $\mathcal{K}_1$ son las ganancias de realimentación, a determinar, para la salida y su derivada. En este caso, la derivada de la salida se utiliza en el contexto de la acción derivativa en controladores tipo PID. Así, el control estará dado por

$$\mathrm{u}(\mathrm{t}) = \mathcal{K}_0 \mathrm{y}(\mathrm{t}) + \mathcal{K}_1 \mathrm{C}_2 \dot{\mathrm{z}}(\mathrm{t}) \tag{19}$$

Existen algunos aspectos que dan cuenta de las ventajas de este tipo de controlador (Ríos-Bolívar, 2014):

1) Si $\mathcal{C}_2 = \mathbb{I}$, matriz identidad, se reduce a un típico control por realimentación de estados.
2) Si $\mathcal{K}_1 = 0$, corresponde a un control por SOF clásico.
3) Al utilizar las ganancias $\mathcal{K}_0$ y $\mathcal{K}_1$ muchos sistemas que no pueden ser controlados por una SOF clásico, si se estabilizan por esta vía. Además, es más fácil de implementar que un control por realimentación dinámica de la salida.

Como se puede observar en (19), el control $\mathrm{u}(\mathrm{t})$ depende de la dinámica de $\mathrm{z}(\mathrm{t})$. Para poder construir el control, se asume una clase particular de SD lineales a parámetros variantes, aquellos en los cuales se cumple la siguiente condición:

$$\det(\mathbb{E}\mathbb{E}^{\mathrm{T}}) \neq 0 \tag{20}$$

Esto significa que existe una aplicación inyectiva lineal Γ, que representa la inversa generalizada de $\mathbb{E}$, es decir, $\mathbb{E}\Gamma\mathbb{E} = \mathbb{E}$. Así, sea el cambio de variable $\mathrm{z}(\mathrm{t}) = \Gamma \mathrm{x}(\mathrm{t})$, y dado que $\mathbb{E}\Gamma = \mathbb{I}$, entonces el sistema (17) se transforma a un sistema LPV:

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}}(\mathrm{t}) &= \mathrm{A}(\rho)\mathrm{x}(\mathrm{t}) + \mathcal{B}_1(\rho)\omega(\mathrm{t}) + \mathrm{Bu}(\mathrm{t}) \\ \mathrm{h}(\mathrm{t}) &= \mathrm{C}_1(\rho)\mathrm{x}(\mathrm{t}) + \mathcal{D}_1(\rho)\omega(\mathrm{t}) \\ \mathrm{y}(\mathrm{t}) &= \mathrm{C}_2(\rho)\mathrm{x}(\mathrm{t}) \end{aligned} \tag{21}$$

donde$\mathrm{A}(\rho) = \mathcal{F}(\rho)\Gamma$, $\mathrm{C}_1(\rho) = \mathcal{C}(\rho)\Gamma$ y $\mathrm{C}_2(\rho) = \mathrm{C}_2\Gamma$. El diseño del control para el sistema original (17) se puede construir a partir del sistema transformado (21).

Proposición 8. Sea el sistema (21). Si para todo ρ el par $(\mathrm{A}(\rho), \mathrm{B})$ es controlable y el par $(\mathrm{C}_2(\rho), \mathrm{A}(\rho))$ observable, entonces el sistema (17) es finito estabilizable y controlable de impulso; y finito detectable y observable de impulso.

ISBN 978-607-8242-11-5

En efecto, la existencia de la transformación lineal Γ implica que el sistema (17) es regular y libre de impulso: si para todo ρ, existe Γse obtiene el sistema regular (21) puesto que la regularidad de (17) depende de que el par $(s\mathbb{E}, \mathcal{F}(\rho))$ sea regular, cuya condición se transforma en la regularidad del par $(s\mathbb{I}, A(\rho))$, la cual siempre se satisface. Además, (21) está caracterizado por la matriz dinámica $A(\rho)$ cuyo espectro define los modos finitos del sistema (17). Luego, de acuerdo a los resultados mostrados en (Leiva et al., 2016), las propiedades de controlabilidad (observabilidad) del sistema original se trasladan en el sistema transformado, esto es, si para todo ρ:

1) la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}(\rho), B)$ define un sistema con dinámica finita estabilizable y controlable de impulso, entonces el par $(A(\rho), B)$ es controlable;
2) la tripleta $(\mathbb{E}, \mathcal{F}(\rho), C_2)$ define un sistema con dinámica finita detectable y observable de impulso, entonces el par $(C_2(\rho), A(\rho))$ es observable.

Así, el problema de admisibilidad para SD tipo LPV se transforma en un problema de control de sistemas LPV. En consecuencia, sea el sistema (21) y considérese una ley de control dada por (19), entonces

$$u(t) = (\mathbb{I} - \mathcal{K}_1 C_2 B)^{-1}(\mathcal{K}_0 C_2(\rho) + \mathcal{K}_1 C_2 A(\rho))x(t) \tag{22}$$

Tal como se puede observar, la existencia del control depende de la invertibilidad de la matriz $\mathbb{I} - \mathcal{K}_1 C_2 B$, la cual es una condición "débil" con respecto a las condiciones para el control por SOF típico (Ríos-Bolívar2014). En definitiva, el problema de admisibilidad del sistema (17) corresponde a la síntesis de un control para el sistema (21).

Estabilización robusta

Sea el sistema (21) con el par $(A(\rho), B)$ controlable y $\omega(t) = 0$. Se asume, además, que el sistema admite una representación politópica de acuerdo a (14). Sea un control de la forma (22), entonces la matriz dinámica enlazo cerrado es:

$$A_c = A(\rho) + B\mathbb{M}^{-1}(\mathcal{K}_0 C_2(\rho) + \mathcal{K}_1 C_2 A(\rho)),$$

donde$\mathbb{M} = \mathbb{I} - \mathcal{K}_1 C_2 B$ y, para lo cual $\mathbb{M}$ es no singular, de modo que $\mathbb{M}^{-1}$ existe, la cual permite calcular $u(t)$.

Teorema 9. Sea el sistema (21) con el par $(A(\rho), B)$ controlable. Existe un control por SOF entendida de la forma (22), que estabiliza en sistema en lazo cerrado, si existe $\mathbb{M}$ no singular y la matriz $P = P^T \succ 0$, y las matrices X, Y,Z tales que la siguiente LMI es satisfecha

$$PA_i + A_i^T P + BXC_{2_i} + C_{2_i}^T X^T B^T + BYC_2 A_i + A_i^T C_2^T Y^T B^T \prec 0, \tag{23}$$

dondeA_i, C_{2_i}, $i = 1, \dots, l$, conforman los vértices del politopo; entonces, las ganancias de realimentación se obtienen de

$$\mathcal{K}_0 = \mathbb{M}Z^{-1}X \tag{24}$$

$$\mathcal{K}_1 = \mathbb{M}Z^{-1}Y \tag{25}$$

donde$PB = BZ$ y $\mathbb{M}^{-1} = \mathbb{I} + Z^{-1}YC_2B$.

Demostración

Se sabe que para la estabilidad en lazo cerrado, existe $P = P^T \succ 0$ tal que $PA_c + A_c^T P \prec 0$, entonces sustituyendo

$$PA_i + PB\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_0 C_{2_i} + PB\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1 C_2 A_i + A_i^T P + C_{2_i}^T \mathcal{K}_0^T (\mathbb{M}^{-1})^T B^T P + A_i^T C_2^T \mathcal{K}_1^T (\mathbb{M}^{-1})^T B^T P \prec 0$$

Para la linealización de la desigualdad matricial, si $PB = BZ$ y los cambios de variables $X = Z\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_0$,$Y = Z\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1$, se obtiene la LMI dada por (23). Además, como $\mathbb{M} = \mathbb{I} - \mathcal{K}_1 C_2 B$ y $Z^{-1}Y = \mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1$, entonces se obtiene la expresión para $\mathbb{M}^{-1}$, que depende de la solución numérica de la LMI (23) y de las matrices conocidas del sistema (17). ■

Se puede notar que $Z^{-1} = (B^T B)^{-1} B^T P^{-1} B$. Así, el problema de admisibilidad del sistema (17) se resuelve por estabilización robusta del sistema (21).

Estabilización y desempeño robusto

Sea el sistema (21) con el par $(A(\rho), B)$ es controlable. Dicho sistema admite una representación politópica de acuerdo a (14). Sea un control dado por (22), entonces el sistema en lazo cerrado es:

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + \mathcal{B}_c \omega(t); h(t) = C_1(\rho)x(t) + \mathcal{D}_1(\rho)\omega(t) \tag{26}$$

donde

$$A_c = A(\rho) + B\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_0 C_2(\rho) + B\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1 C_2 A(\rho), \ \mathcal{B}_c = \mathcal{B}_1(\rho) + B\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1 C_2 \mathcal{B}_1(\rho).$$

Tal como ha sido mencionado, se requiere seleccionar $\mathcal{K}_0$ y $\mathcal{K}_1$ de tal manera que A_c sea estable robustamente y que el efecto de la perturbación $\omega(t)$ sobre la salida $h(t)$ sea mínima de acuerdo a índices de desempeño en $H_2 - H_\infty$, los cuales son caracterizados por LMIs, según el Lema 1 y el Lema 2.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Diseño en H_2

Teorema 10. Sea el sistema (21) con el par $(\mathrm{A}(\rho),\mathrm{B})$ controlable y $\mathcal{D}_1(\rho)=0$, el cual admite una representación politópica con vértices definidos por $\mathrm{A_i}$, $\mathcal{B}_{1_i}$,C_{2_i} y C_{1_i}. Existe una ley de control de la forma (22), que garantiza un desempeño sub-óptimo H_2 para el sistema en lazo cerrado (26), si existen $\mathrm{G}\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{n}}$, $\mathrm{X}\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{p}}$, $\mathrm{Y}\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{p}}$, $\mathrm{P_i}=\mathrm{P_i}^{\mathrm{T}}\succ 0\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{n}}$,$\mathrm{W}\in\mathbb{R}^{\mathrm{p}\times\mathrm{n}}$ tal que $\mathrm{tr}(\mathrm{W})<1$ y se satisface

$$\begin{bmatrix}-\mathrm{G}-\mathrm{G}^{\mathrm{T}} & \Phi & \mathcal{Y}\\ \star & -2\mathrm{P_i} & \\ \star & \star & -\mu\mathbb{I}\end{bmatrix}<0,\begin{bmatrix}\mathrm{P_i} & (\mathrm{C}_{1_i})^{\mathrm{T}}\\ \mathrm{C}_{1_i} & \mathrm{W}\end{bmatrix}>0, \tag{27}$$

para $\mathrm{i}=1,\dots,\mathrm{l}$, donde $\Phi=\mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{A_i}+\mathrm{BXC}_{2_i}+\mathrm{BYC}_2\mathrm{A_i}+\mathrm{P_i}+\mathrm{G}^{\mathrm{T}}$ y $\mathcal{Y}=\mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathcal{B}_{1_i}+\mathrm{BYC}_2\mathcal{B}_{1_i}$. Las ganancias de la realimentación son:

$$\mathcal{K}_0=\mathbb{M}\mathrm{Z}^{-1}\mathrm{X} \tag{28}$$
$$\mathcal{K}_1=\mathbb{M}\mathrm{Z}^{-1}\mathrm{Y} \tag{29}$$

donde $\mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{B}=\mathrm{BZ}$ y $\mathbb{M}^{-1}=\mathbb{I}+\mathrm{Z}^{-1}\mathrm{YC}_2\mathrm{B}$.

Demostración
Aplicando el inciso iv) del Lema 1 al sistema en lazo cerrado (26), se obtienen desigualdades matriciales. Luego, para la linealización de las desigualdades matriciales se utilizan los cambios de variables $\mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{B}=\mathrm{BZ}$ y $\mathrm{X}=\mathrm{Z}\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_0$, $\mathrm{Y}=\mathrm{Z}\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1$, que por sustitución, generan la LMI (27). ■

En este caso, $\mathrm{Z}^{-1}=(\mathrm{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{B})^{-1}\mathrm{B}^{\mathrm{T}}(\mathrm{G}^{\mathrm{T}})^{-1}\mathrm{B}$, de modo que las ganancias se obtienen de la solución numérica de la LMI y de matrices conocidas del sistema original (17). En consecuencia, la admisibilidad del sistema (17), con desempeño robusto, ha sido resuelta en el sistema transformado como un problema de control robusto en H_2, mediante SOF extendida.

Diseño en $\mathbf{H}_\infty$

Teorema 11. Sea el sistema (21) con el par $(\mathrm{A}(\rho),\mathrm{B})$ controlable, el cual admite una representación politópica con vértices definidos por $\mathrm{A_i}$, $\mathcal{B}_{1_i}$, C_{2_i},C_{1_i} y $\mathcal{D}_{1_i}$. Existe una ley de control de la forma (22), que garantiza un desempeño sub-óptimo H_∞ para el sistema en lazo cerrado (26), si se satisface

$$\begin{bmatrix}-G-G^{T} & \Phi & 0 & \mathcal{Y}\\ \star & -2\tau P_i & (C_{1_i})^{T} & 0\\ \star & \star & -\mathbb{I} & \mathcal{D}_{1_i}\\ \star & \star & \star & -\gamma^2\mathbb{I}\end{bmatrix}<0, \tag{30}$$

para$\mathrm{i}=1,\dots,\mathrm{l}$, donde $\Phi=\mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{A_i}+\mathrm{BXC}_{2_i}+\mathrm{BYC}_2\mathrm{A_i}+\mathrm{P_i}+\tau\mathrm{G}^{\mathrm{T}}$ y $\mathcal{Y}=\mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathcal{B}_{1_i}+\mathrm{BYC}_2\mathcal{B}_{1_i}$; $\mathrm{G}\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{n}}$, $\mathrm{X}\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{p}}$, $\mathrm{Y}\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{p}}$, $\mathrm{P_i}=\mathrm{P_i}^{\mathrm{T}}\succ 0\in\mathbb{R}^{\mathrm{n}\times\mathrm{n}}$ y $\tau>>1$. Las ganancias de la realimentación son:

$$\mathcal{K}_0=\mathbb{M}\mathrm{Z}^{-1}\mathrm{X} \tag{31}$$
$$\mathcal{K}_1=\mathbb{M}\mathrm{Z}^{-1}\mathrm{Y} \tag{32}$$

donde$\mathrm{G}^{\mathrm{T}}\mathrm{B}=\mathrm{BZ}$ y $\mathbb{M}^{-1}=\mathbb{I}+\mathrm{Z}^{-1}\mathrm{YC}_2\mathrm{B}$.

Demostración
Considerando el sistema en lazo cerrado (26), se aplica el Lema 2. Luego, se sigue el procedimiento de linealización de las desigualdades matriciales mediante cambios de variables, tal como se ha realizado para la prueba del Teorema 10. ■

EJEMPLO NUMÉRICO

Considérese el SD del ejemplo en (Rotondo et al.,2015), el cual es regular e impulso libre. Allí la matriz $\mathbb{E}$ es singular, y $\mathrm{rank}(\mathbb{E})=2$; y aunque es regular y de impulso libre, es no admisible. Sin embargo, de los modos no dinámicos se deriva un SD equivalente descrito por:

$$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\mathrm{z}}_1\\\dot{\mathrm{z}}_2\\\dot{\mathrm{z}}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-(1+\theta)&1&0\\1&0&-(1+\theta)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{z}_1\\\mathrm{z}_2\\\mathrm{z}_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\-2\end{bmatrix}\mathrm{u}_2;\mathrm{y}=\begin{bmatrix}1&0&1\\1&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{z}_1\\\mathrm{z}_2\\\mathrm{z}_3\end{bmatrix}, \tag{33}$$

donde $\theta\in[1\ \ 2]$. En este caso, $\mathbb{E}\mathbb{E}^{\mathrm{T}}=\mathbb{I}_2$, por lo tanto, para la transformación

$\Gamma=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\\0&0\end{bmatrix}$,resultando el siguiente sistema LPV:

$$\begin{bmatrix}\dot{\mathrm{x}}_1\\\dot{\mathrm{x}}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-(1+\theta)&1\\1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{x}_1\\\mathrm{x}_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\-2\end{bmatrix}\mathrm{u}_2;\ y=\begin{bmatrix}1&0\\1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix} \tag{34}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Fácilmente se puede verificar que ese sistema es controlable, lo que significa que el sistema SD es estabilizable. Además, el sistema transformado admite un control por SOF, de modo se puede aplicar el Teorema 9, solamente para determinar la ganancia $\mathcal{K}_0$, que es suficiente, en este caso, para la estabilización robusta del sistema LPV en lazo cerrado. A partir de la solución numérica de la LMI se obtiene:

$$\mathrm{P} = \begin{bmatrix} 0.3209 & 0.0626 \\ 0.0626 & 1.4323 \end{bmatrix}, \quad \mathrm{Y} = [0.4089 \quad 0.3894];$$

por lo tanto $\mathrm{Z} = 1.4323$, luego $\mathcal{K}_0 = [0.2855 \quad 0.2719]$.

La Fig. 1 muestra los polos en lazo cerrado en función del parámetroθ, así como su proyección en el plano real-imaginario. Tal como se puede observar, dichos son estables. Así, se garantiza la admisibilidad robusta del SD.

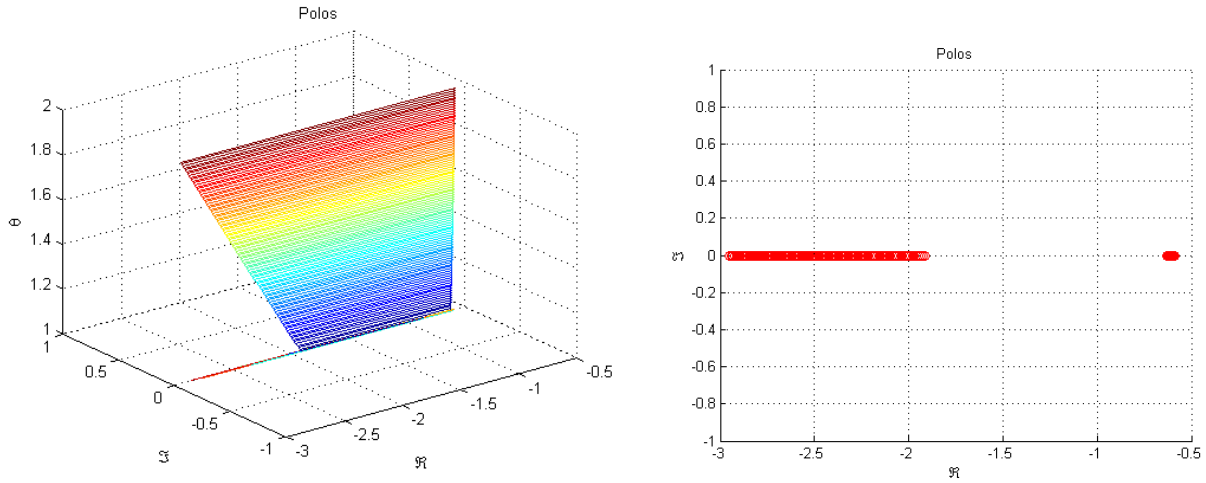


Fig. 1: Distribución de polos en lazo cerrado y su proyección en el plano.

CONCLUSIONES

Las contribuciones, producto los resultados obtenidos en esta investigación, están centradas en el análisis y síntesis de controladores para una clase de sistemas descriptores lineales dependientes de parámetros. En primer lugar, se ha considerado un modelo de sistemas descriptores lineales a parámetros variables que admite en todas las matrices que definen la dinámica del sistema. Luego, se ha presentado un análisis de admisibilidad y control robusto para una clase de sistemas descriptores con incertidumbres paramétricas tipo politópicas, definida por aquellos donde existe una aplicación inyectiva lineal que permite transformar el sistema descriptor dependientes de parámetros a un sistema LPV regular, de modo que las propiedades y condiciones del sistema original se conservan en el sistema transformado, lo cual garantiza el diseño de un control para la admisibilidad (estabilidad) y desempeño robusto. El diseño del control en el sistema transformado, es garantía de satisfacer la admisibilidad y el desempeño robusto para el sistema descriptor original. La síntesis del control se ha realizado por medio de la realimentación estática de la salida extendida, lo cual se hace por la obtención de una ganancia realimentación para la salida y una ganancia de realimentación para su derivada. Esas ganancias se derivan por estabilización y desempeño robusto de sistemas LPV, mediante el uso de las caracterizaciones de las normas H_2-H_∞ como LMIs, que surgen de funciones de Lyapunov dependientes de parámetros. La técnica de diseño permite, además, imponer especificaciones multiobjetivos.

REFERENCIAS

Apkarian P, Tuan H, Bernussou J, 2001, "*Continuous-time analysis, eigenstructure assignment, and H_2 synthesis with enhanced linear matrix inequalities (LMI) characterizations"*.IEEE Trans. on Autom. Control, 46(12):1941–1946.

Balas G. J, Bokor J, Szabó Z, 2003, "*Invariant subspaces for LPV systems and their applications"*. IEEE Trans. Automat.Control, 48:2065–2069.

Bara G. I, 2011, "*Robust analysis and control of parameter dependent uncertain descriptor systems"*. Systems & ControlLetters, 60(5):356–364.

Berger T, Reis T, 2009, "*Controllability of linear differential algebraic systems: a survey"*. Technical report, Institut für Mathematik, Technische Universität Ilmenau, Germany.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Bouali A, Yagoubi M, Chevrel P, 2008, "*Gain scheduled observer state feedback controller for rational LPV systems"*. IFAC Proceedings Volumes, 41(2):4922–4927.

Bruzelius F, 2004, "*Linear Parameter-Varying Systems: an approach to gain scheduling"*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Chaabane M, Tadeo F, Mehdi D, Souissi M, 2011, "*Robust admissibilization of descriptor systems by static output feedback: an LMI approach"*. Mathematical Problems in Engineering, 2011.

Chadli M, Daafouz J, Darouach M, 2008, "*Stabilisation of singular LPV systems"*. IFAC Proceedings Volumes, 41(2):9999–10002.

Duan G, Yu H.-H, 2013, "*LMIs in Control Systems: Analysis, Design and Applications"*. CRC Press, Center for ControlTheory and Guidance Technology, China.

Duan G. R, 2010, "*Analysis and Design of Descriptor Linear Systems"*. Springer, New York.

Klamka J, 2013, "*Controllability of dynamical systems: a survey"*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 61(2):335–342.

Leiva H, Ríos Bolívar A, Tineo Moya A, Narváez M, 2016, "*Análisis de la controlabilidad de sistemas descriptores semilineales"*. Ciencia e Ingeniería, Aceptado, Edición especial:1–10.

Losse P, Mehrmann V, Poppe L. K, Reis T, 2007, "*Robust control of descriptor systems"*. Technical report, Institut für Mathematik, TU Berlin.

Luenberger D. G, 1977, "*Dynamic equations in descriptor form"*. IEEE Trans. Autom. Control, 22(3):312–321.

Masubuchi I, 2007, Output feedback controller synthesisfor descriptor systems satisfying closed-loop dissipativity.Automatica, 43(2):339–345.

Mehrmann V, Stykel T, 2006, "*Descriptor systems: A general mathematical framework for modelling, simulation and control"*. Technical report, Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin, Germany.

Pipeleersa G, Demeulenaere B, Sweversa J, VandenberghebL, 2009, "*Extended LMI characterizations for stability and performance of linear systems"*. Systems & Control Letters,58(7):510–518.

Ríos-Bolívar A, 2014, "*Control de Sistemas Lineales: Realimentando la salida"*. Editorial Académica Española, Alemania.

Rotondo D, Nejjari F, Puig V, 2015, "*Shifting linear quadratic control of constrained continuous-time descriptor LPV systems"*. IFAC-Papers online, 48(26):25–30.

Shamma J. S, 2012, "*Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications"*, chapter An Overview of LPV Systems, pages 3–26. Springer.

Wei C, 2003, "*On applications of the projection lemma toanalysis and design of continuous-time systems"*. Master's thesis, National Sun Yat-Set University.

Yip E, Sincovec R, 1981, "*Solvability, controllability, and observabilityof continuous descriptor systems"*. IEEE Trans. on Automatic Control, 26(3):702–707.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Un método práctico para la simulación del proceso de adsorción de metales en mezclas binarias

Jordi Poch[2], F. de la Torre[1], N. Fiol[1], I. Villaescusa[1]
(1)Departament d'Informàtica i Matemàtica Aplicada
(2)Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària
Escola Politècnica Superior Universitat de Girona Campus de Montilivi 17003 Girona
e-mail: Jordi.Poch@udg.es

Resumen

La difusión intraparticular efectiva o coeficiente de difusión es un parámetro clave en la predicción del comportamiento dinámico del proceso de adsorción. La difusión de un componente de una mezcla se ve afectada por la presencia de un segundo componente. En este trabajo el residuo marro de café encapsulado en bolas de alginato cálcico se ha utilizado para la eliminación simultánea de Cr(VI) y Cu(II) en mezclas binarias. La cinética de adsorción de dichos metales se ha estudiado tanto a nivel laboratorio como planta piloto. En el laboratorio los experimentos se realizaron en tubos conteniendo 40 bolas y 15 mL de solución binaria de Cr(VI) y Cu(II) y las concentraciones iniciales de dichos metales variaron entre 0.4-0.8 y de 0-0.6 mM, respectivamente. Los experimentos en planta piloto en un reactor de 5 L. En este caso se utilizaron 2500 bolas, el volumen de la solución binaria fue de 4 L y las concentraciones iniciales de los dos metales se variaron entre 0.2-0.6 mM. Los resultados obtenidos se modelaron empleando un modelo de difusión basado en el Linear Adsorption Model (LAM). A partir de los resultados obtenidos del modelo LAM se observa que los coeficientes de difusión y la constante α del modelo varían en función de las concentraciones iniciales de los metales que forman la mezcla binaria. Se propone un modelo empírico que relaciona dichos parámetros con las concentraciones iniciales de la mezcla. El modelo LAM describe adecuadamente la cinética de adsorción de ambos metales tanto en experimentos a escala laboratorio como planta piloto. El modelo empírico propuesto describe con precisión el efecto de las concentraciones iniciales sobre los parámetros del modelo LAM. La combinación de ambos modelos permite simular las cinéticas de adsorción de ambos metales en el rango de concentraciones iniciales estudiado. Este estudio constituye una aproximación rápida y fácil al modelado de la cinética de sorción de sistemas complejos en los que tienen lugar distintos procesos de forma simultanea.

A practical approach to the simulation of metal sorption processes from binary mixtures

Abstract

Diffusivity of a component in a binary mixture is affected by the presence of a second component. The knowledge of the influence on each other component diffusivity is very useful for the prediction of sorption kinetics of binary mixtures. In this work kinetic studies of Cr(VI) and Cu(II) binary mixtures sorption onto exhausted coffee encapsulated in calcium alginate beads were carried out in both bench and pilot scale experiments. In the laboratory the experiments were carried out in stopped tubes containing 40 beads and 15 mL of Cr(VI)-Cu(II) binary mixture. The initial concentrations of Cr(VI) and C(II) in the mixtures were varied within 0.4-0.8 and 0-0.6 mM, respectively. In the case of pilot plant 4 L of binary solutions were put into contact with 2500 beads. Concentrations of both metals varied within 0.2-0.6 mM. Experimental data were fitted to the Linear Adsorption Model (LAM). An empirical quadratic model was developed to estimate LAM parameters D_e and α as a function of the initial concentration of metals in the mixture. The developed model represents a fast and easy approach to estimate D_e and α for any initial concentration of the metals in the binary mixture provided that the concentrations are in the range of the studied concentrations. The estimated parameters introduced in LAM equation allow simulating the corresponding binary mixtures sorption kinetics. This study constitutes a fast and easy approach to the modelling of sorption kinetics of complex systems in which different processes take place simultaneously.

Keywords: sorption kinetics, modelling, exhausted coffee, calcium alginate encapsulation, diffusion

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En este trabajo, residuo de café se ha encapsulado en bolas de alginate cálcico para estudiar la cinética de adsorción de Cr(VI) y Cu(II) en mezclas binarias. Es bien conocido que en los procesos de adsorción intervienen tres etapas: difusión externa del soluto a través de la capa límite que rodea las partículas sólidas, adsorción del soluto en el sorbente y difusión interna a través de los poros de la partícula (difusión porosa, difusión superficial). Dependiendo de la etapa limitante de la velocidad existen diversos modelos para simular la cinética de adsorción. El modelo de difusión de capa límite (Ponnusami et al. 2010; Sag and Aktay, 2000) describe la adsorción cuando la etapa limitante es el gradiente de concentración formado en la región interfaz entre la solución y la superficie de las partículas adsorbentes. Los modelos más utilizados cuando se considera que la etapa de adsorción es la etapa limitante son los modelos de pseudo-first order (Liu and Liu, 2008), pseudo-second order (Liu and Liu, 2008), modelo cinético de Langmuir (Placinski et al. 2009), Statistical Rate Theory (SRT) (Haerifar and Azizian, 2013; Placinski et al. 2009) y la ecuación de Elovich (Largitte and Pasquier, 2016). Cuando la difusión intraparticular es la etapa limitante los modelos utilizados son: la ecuación de Weber-Morris (Largitte and Pasquier, 2016; Liu and Liu, 2008; Sag and Aktay, 2000), el modelo de difusión de Fickian (Ponnusami et al. 2010), el modelo de Film-pore diffusion, el Modelo de Adsorción Lineal (LAM) (Chen et al. 1993; Papageorgiou et al. 2006), el modelo Shrinking Core, el de Difusión Superficial Homogénea (HSDM) (Xu et al. 2013) y el de difusión porosa y superficial (Ma et al. 1996). En un sistema multicomponente como el que se estudia en este trabajo intervienen varios procesos físicos y químicos (adsorción, reducción, intercambio iónico) el modelo adecuado es el de difusión porosa y superficial para sistemas multicomponente en el no equilibrio. Para la utilización de dicho modelo es necesario estimar un conjunto de parámetros que son difíciles de medir o que no se pueden medir y cuya estimación es difícil mediante un proceso de optimización debido al esfuerzo computacional que se requiere. Además, sería necesario hacer un diseño de experimentos con un gran número de factores a fin de obtener los datos necesarios para resolver el problema matemático.

Debido a la complejidad del modelo de difusión porosa y superficial y el gran número de experimentos que éste requiere los autores de este estudio optaron por probar modelos simplificados y con el mínimo número de parámetros que pudieran explicar la cinética del proceso global de adsorción de Cr(VI) y Cu(II) en marro de café encapsulado en bolas de alginato cálcico. Se probaron algunos modelos como el de Weber-Morris y el de Fickian y la elección final fue el modelo de Adsorción Lineal ya que éste fue el que mejor ajustó los datos experimentales. La ventaja de este modelo es que se necesitan solamente dos parámetros por componente de la mezcla, el coeficiente de difusión efectiva (D_e) y una constante relacionada con la capacidad de adsorción (α).

Estos parámetros se determinan fácilmente ya que $\alpha = C_f/(C_i - C_f)$ y D_e se obtiene resolviendo una ecuación no lineal. Una vez calculados ambos parámetros para una determinada mezcla se determinó la relación entre estos parámetros y la concentración inicial de los metales mediante un modelo de regresión.

PARTE EXPERIMENTAL

El residuo de café fue cedido por una empresa de café soluble. El residuo fue secado y tamizado para obtener un tamaño de partícula de 50-100 µm. Las bolas de alginato conteniendo el residuo de café (RC-CA) se prepararon siguiendo el procedimiento descrito en Fiol et al. (2005). Las bolas obtenidas contenían el 2% (p/v) de residuo de café. El diámetro medio de las bolas resultó ser de 3.14±0.14 mm. Los estudios de adsorción se llevaron a cabo a pH 3.0 que resultó ser el más favorable en estudios previos (Fiol et al.2008; Pujol et al. 2013; Liu et al. 2015). Se realizaron experimentos en batch a escala laboratorio y piloto. Las concentraciones de cromo y cobre en las mezclas binarias utilizadas para el estudio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Concentraciones de los metales en mM en las mezclas binarias utilizadas en los experimentos a escala laboratorio y piloto

		Escala laboratorio				**Escala Piloto**		
		Cu(II)				Cu(II)		
		0	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
Cr(VI)	0,2						x	x
	0,4	x	x	x	x	x	x	x
	0,6	x	x	x	x	x	x	
	0,8	x	x	x	x			

ISBN 978-607-8242-11-5

Para realizar los experimentos a escala laboratorio se pusieron en contacto 40 bolas RC-CA con 15 mL de disolución conteniendo ambos metales en tubos de ensayos con tapón. Los tubos se agitaron en un agitador rotatorio introducido en un incubador a 20ºC hasta alcanzar el equilibrio. Los experimentos a escala piloto se efectuaron en un reactor agitado de 5 L en el cual se introdujeron 4 L de solución binaria y 2500 bolas RC-CA. El reactor se mantuvo en agitación a 350 rpm y a la temperatura de 20± 2ºC durante 5 días. Todos los experimentos se realizaron por duplicado y el valor medio obtenido se presenta en dicho estudio.

MODELO CINÉTICO

El modelo utilizado asume las siguientes hipótesis: (i) La transferencia de masa en la capa límite se elimina por la agitación, (ii) la etapa limitante es la difusión intraparticular, (iii) las bolas son esferas homogéneas (Papageorgiou et al. 2006; Ponnusami et al. 2010) and (iv) el equilibrio local entre iones en la fase sólida y liquida puede expresarse como $q = KC$ (Crank, 1975). Con estas hipótesis el balance de materia en el interior de los poros de la partícula puede expresarse como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial C}{\partial r}\right)\right) \tag{1}$$

donde $D = \frac{D_e}{1+\frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p}K}$

y el balance de materia en la fase líquida:

$$-V\frac{dC_L}{dt} = M\frac{d\bar{q}}{dt} \tag{2}$$

donde

$$\bar{q} = \frac{3}{R^3}\int_0^R q\, r^2\, dr \tag{3}$$

Substituyendo la Ec. (3) en la Ec. (2), teniendo en cuenta que $\rho q = C$ y la Ec. (1), la Eq. (2) se puede escribir como:

$$-V\frac{dC_L}{dt} = V_p\frac{3}{R^3}\int_0^R \frac{\partial C}{\partial t}\, r^2\, dr = V_p\frac{3D}{R^3}\int_0^R \frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial C}{\partial r}\right)\, dr$$

y calculando la integral:

$$V\frac{dC_L}{dt} = -D\ 4\pi R^2 N\ \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=R} \tag{4}$$

con las condiciones iniciales:

$$\begin{array}{ll} C_L = C_0 & t = 0 \\ C = C_0 & t = 0, r = R \\ C = 0 & t = 0, r < R \end{array} \tag{5}$$

y las de contorno para la Ec. (1):

$$\begin{array}{ll} C = C_L & t > 0, r = R \\ \frac{\partial C}{\partial r} = 0 & t > 0, r = 0 \end{array} \tag{6}$$

donde *C* es la concentración de metal en la fase líquida en el interior de las bolas, *q* la cantidad de metal en la fase sólida en el interior de las bolas, C_L la concentración de metal en la solución, C_0 la concentración inicial de metal en la fase líquida, *R* el radio de las bolas, *N* el número de bolas, ε_P la porosidad de las bolas, *V* el volumen de la solución y D_e el coeficiente de difusión efectiva.

La solución analítica de la Ec. (1) con las condiciones iniciales Ec. (5) y las condiciones de contorno Ec. (6) es:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$C(t,r) = \frac{\alpha\, C_0}{1+\alpha}\left[1 + 6(1+\alpha)\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{D\, S_n^2}{R^2}t}}{9 + 9\alpha + \alpha^2\, S_n^2}\, \frac{R}{r}\, \frac{\sin\left(S_n\, \frac{r}{R}\right)}{\sin(S_n)}\right] \tag{7}$$

donde $\alpha = \frac{C_\infty}{C_0 - C_\infty}$ y S_n son las soluciones de la Ec. (8)

$$1 - \frac{S_n}{\tan(S_n)} = -\frac{\alpha}{3}\, S_n^2 \tag{8}$$

La Ec. (8) tiene infinitas soluciones de las cuales 200 se usaron para obtener una aproximación de *C*(*t*,*r*) de la Ec. (7).

El coeficiente de difusión efectiva D_e se determinó a partir de la Ec. (7) para cada uno de los conjuntos de datos (escala laboratorio y piloto) minimizando la Ec. (9) por el método de mínimos cuadrados:

$$SSR = \sum_{i=1}^{M}\left(C_i - C(t_i, R, D)\right)^2 \tag{9}$$

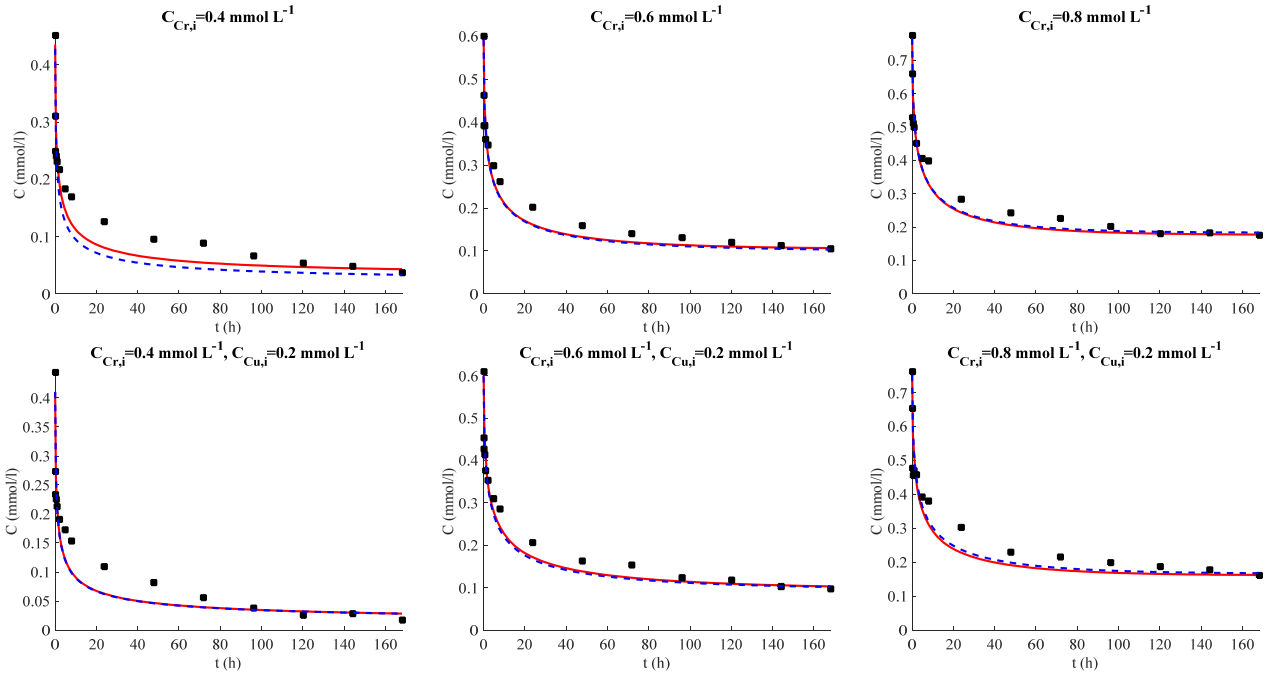
La minimización de SSR es tan simple como resolver la Ec. (10) utilizando el método de Newton- Raphson.

$$\frac{\partial SSR}{\partial D} = \sum_{i=1}^{m}\left[2\left(C(t_i) - C(t_i, D)\right)\left(-\frac{\partial C(t_i, D)}{\partial D}\right)\right] = 0 \tag{10}$$

Todos los cálculos se realizaron usando Matlab R2015a.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos experimentales de la cinética de adsorción de Cr(VI) y Cu(II) obtenidos en el laboratorio se presentan en las Fig. 1 y 2 respectivamente. Tal y como se observa la cinética de Cr(VI) es mucho más lenta que la de Cu(II). Después de 2 h la adsorción de cobre es del 90% y alcanza el valor de máxima adsorción en 5 h en todas las soluciones binarias. En el caso del cromo el equilibrio se alcanza después de 120 h y el porcentaje máximo adsorbido se encuentra en el rango 77-97% que corresponde a las mezclas con la concentración inicial de cromo más alta y ausencia de cobre y a la concentración inicial de cromo más baja y la más alta de cobre, respectivamente. Estos resultados concuerdan con el efecto sinérgico encontrado por Pujol et al. 2013 en la adsorción de Cr(VI) y Cu(II) en marro de café.



ISBN 978-607-8242-11-5

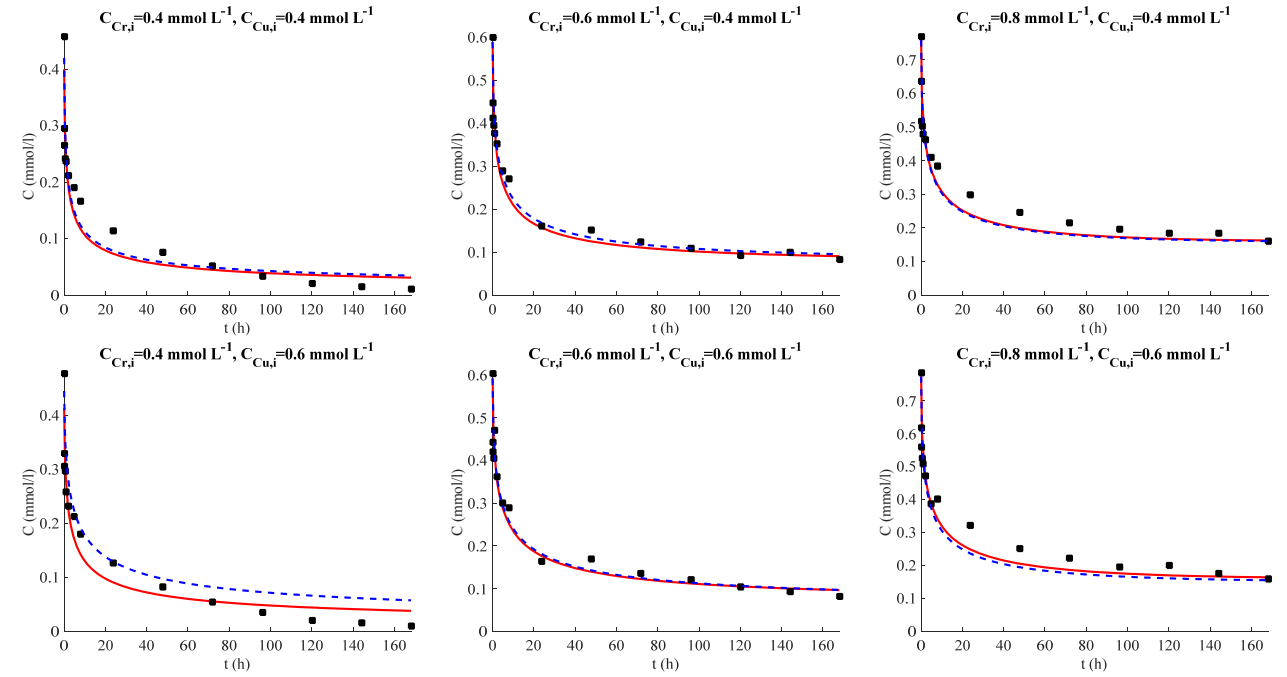


Fig. 1: Cinética de adsorción de cromo de los estudios de laboratorio. Datos experimentales (■), simulación del modelo LAM (línea continua) y simulación empírica (línea discontinua)

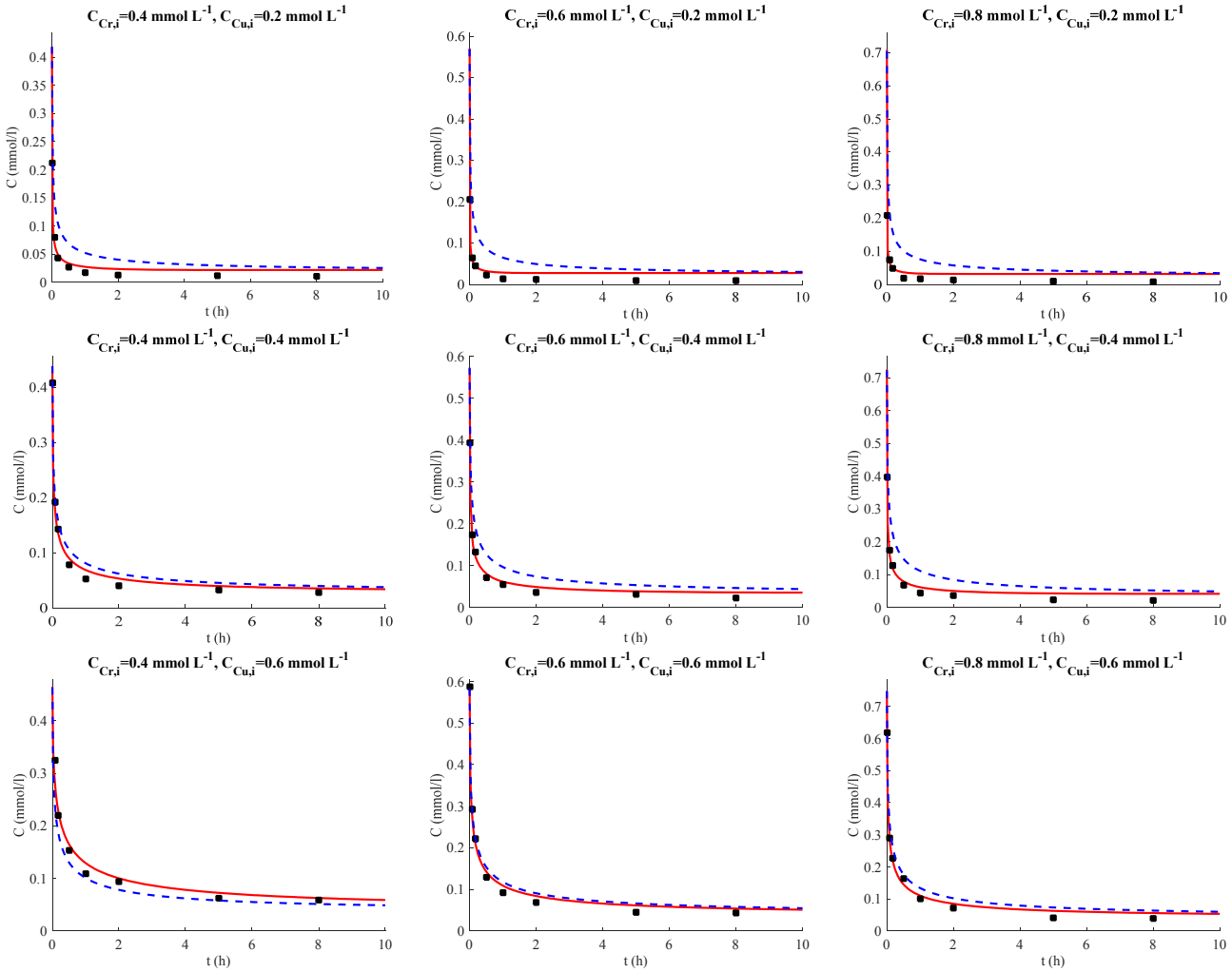


Fig. 2: Cinética de adsorción de cobre de los estudios de laboratorio. Datos experimentales (■), simulación del modelo LAM (línea continua) y simulación empírica (línea discontinua)

ISBN 978-607-8242-11-5

En las Fig. 3 y 4 se presentan las cinéticas de Cr(VI) y Cu(II) en planta piloto Como se puede ver las cinéticas son más lentas que las encontradas en los estudios en el laboratorio. Después de 120 h el cromo no alcanzó el equilibrio en ninguna de las mezclas estudiadas y fueron necesarias unas 24 h para llegar al equilibrio en el caso del cobre. Los porcentajes de adsorción fueron también más bajos y en ningún caso superaron el 75%. La explicación de estos peores resultados es que la relación entre el volumen de solución y el número de bolas es mucho más bajo en el caso del reactor que en el laboratorio. La relación usada para los estudios en el laboratorio 23.5% no era adecuada para la planta piloto debido a condiciones operacionales. El gran número de bolas necesarias para mantener el ratio (10667 bolas) requeriría de una mayor velocidad de agitación para mantener la mezcla completa y provocaría daños en las bolas.

La mayor velocidad de adsorción de cobre comparada con la de cromo es compatible con el mecanismo de intercambio iónico entre los cationes de calcio de las bolas (Cataldo et al. 2013). Cabe señalar que el Cr(VI) es reducido por efecto de los grupos funcionales del marro de café en Cr(III). El Cr(III), formado como consecuencia de la reducción fue despreciable en la solución al final del proceso. Resultados similares fueron encontrados por otros autores que estudiaron la adsoción de Cr(VI) en otros sorbentes naturales encapsulados en alginato cálcico (Escudero et al. 2017). Estos autores sugirieron que el cromo reducido permanece en la bola retenido por el alginato cálcico o por microprecipitación sobre el sorbente.

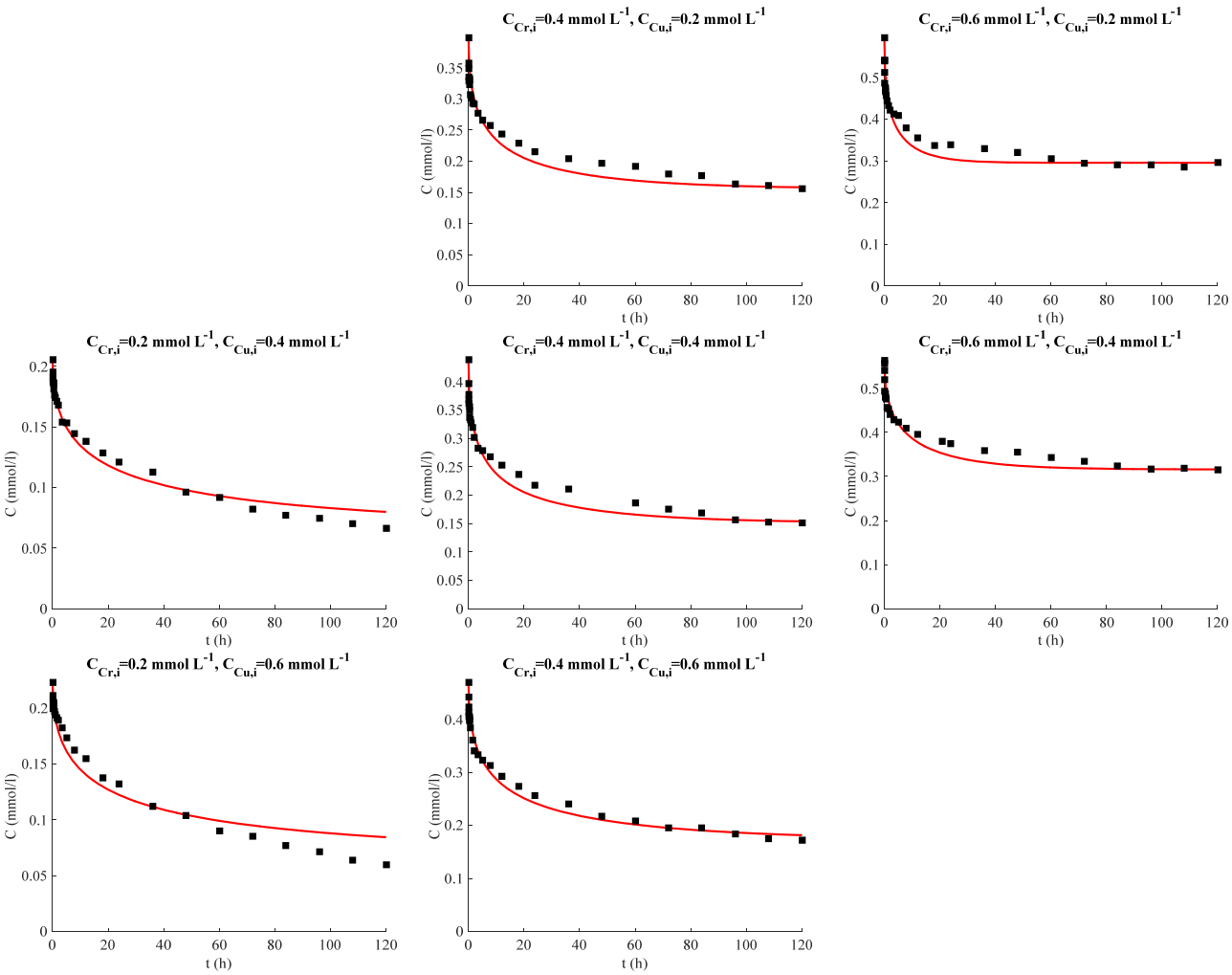


Fig. 3: Cinética de adsorción de cromo de los estudios de planta piloto . Datos experimentales (■) y simulación del modelo LAM (línea continua)

ISBN 978-607-8242-11-5

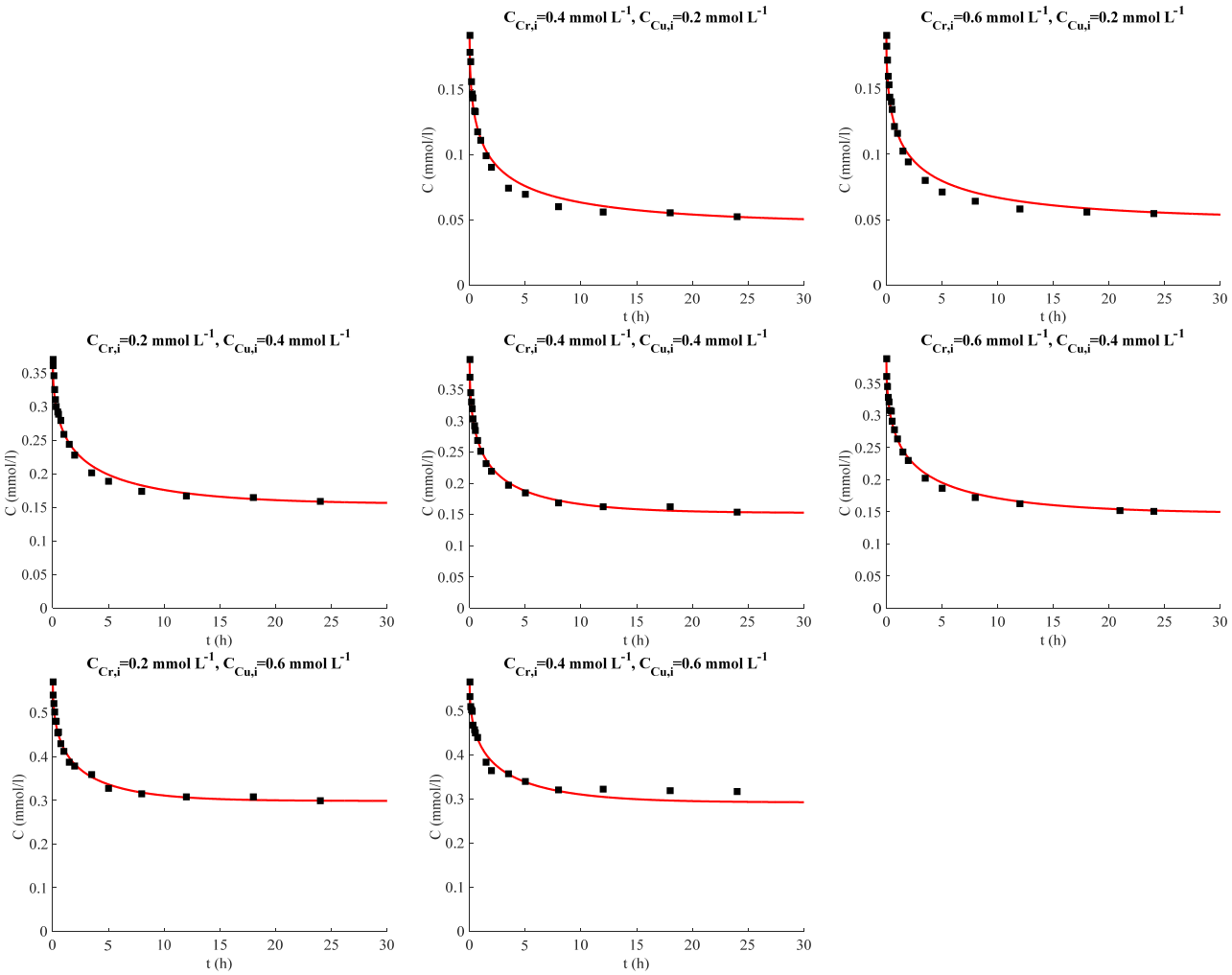


Fig. 4: Cinética de adsorción de cobre de los estudios de planta piloto . Datos experimentales (■) y simulación del modelo LAM (línea continua)

En las Tablas 2 y 3 se presentan los valores de los coeficientes D_e y α obtenidos con modelo LAM correspondientes a la cinética de adsorción de Cr(VI) y Cu(II) en el laboratorio y a escala piloto. Como puede verse en la Tabla 2, D_e y α de Cr(VI) muestran una tendencia decreciente con el incremento de la concentración inicial de Cu(II) y creciente con el incremento de la concentración de Cr(VI). En el caso de los coeficientes correspondientes al cobre no se observó para D_e una tendencia clara con el incremento de la concentración de Cr(VI). Sin embargo se observó una tendencia decreciente al aumentar la concentración inicial de cobre. En la misma Tabla 2 se puede observar que la variación α de Cu(II) con la concentración inicial de Cr(VI) sigue una tendencia opuesta a la encontrada para este mismo parámetro en el caso de Cr(VI). El incremento de la concentración inicial de un segundo metal provoca una disminución de α de Cu(II) que incrementa cuando lo hace la concentración de cobre mostrando de nuevo una tendencia opuesta a la observada para el α de Cr(VI).

En la Tabla 3 se observa que los parámetros D_e y α de Cr(VI) correspondientes a las cinéticas en planta piloto muestran las mismas tendencias que a escala laboratorio. Sin embargo en el caso del cobre D_e y α de Cu(II) no presentan tendencias definidas.

Tabla 2: Parámetros del modelo para la adsorción de Cr(VI) y Cu(II) ajustando los datos a escala laboratorio

		D_e Cr(VI) Cu (mM)				D_e Cu(II) Cu (mM)			
		0	0,2	0,4	0,6	0	0,2	0,4	0,6
Cr (mM)	0,4	2,66E-03	1,67E-03	7,30E-04	4,59E-04		9,27E-02	5,62E-02	5,53E-02
	0,6	2,84E-03	2,03E-03	2,04E-03	1,41E-03		1,12E-01	5,25E-02	4,84E-02
	0,8	2,89E-03	2,93E-03	2,42E-03	2,20E-03		8,10E-02	5,35E-02	3,99E-02

ISBN 978-607-8242-11-5

		α Cr(VI) Cu (mM)				*α* Cu(II) Cu (mM)			
		0	0,2	0,4	0,6	0	0,2	0,4	0,6
Cr (mM)	0,4	8,98E-02	3,87E-02	2,40E-02	2,21E-02		5,07E-02	7,47E-02	1,08E-01
	0,6	2,11E-01	1,88E-01	1,59E-01	1,54E-01		4,84E-02	6,15E-02	7,96E-02
	0,8	2,97E-01	2,69E-01	2,62E-01	2,56E-01		4,45E-02	5,73E-02	6,60E-02

Tabla 3: Parámetros del modelo para la adsorción de Cr(VI) y Cu(II) ajustando los datos de planta piloto

		D_e Cr(VI) Cu (mM)			D_e Cu(II) Cu (mM)		
		0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
Cr (mM)	0,2		2,52E-03	2,35E-03		3,12E-02	3,63E-02
	0,4	6,73E-03	7,68E-03	4,74E-03	3,88E-02	4,68E-02	3,81E-02
	0,6	1,77E-02	6,91E-03		3,41E-02	3,42E-02	
		α Cr(VI) Cu (mM)			*α* Cu(II) Cu (mM)		
		0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
Cr (mM)	0,2		4,76E-01	4,32E-01		8,20E-01	1,18E+00
	0,4	6,43E-01	5,28E-01	5,81E-01	4,14E-01	6,90E-01	1,30E+00
	0,6	9,83E-01	1,27E+00		4,36E-01	7,21E-01	

Con los valores de los parámetros de las Tablas 2 y 3 se simularon las cinéticas mediante el modelo LAM las cuales se presentan en las Fig. 1-4 (líneas sólidas). Tal y como se ve en las figuras en la mayoría de los casos el modelo describe muy bien las cinéticas.

Los resultados presentados en las Tablas 2 y 3 muestran que los parámetros del modelo D_e y α varían en función de la concentración de los metales en la mezcla. Una de las razones que explican dicha dependencia es que el modelo LAM fue diseñado para modelar la adsorción de un solo componente y por lo tanto no tiene en cuenta las interacciones que existen entre los metales en una mezcla binaria. Por lo tanto para simular el proceso, dadas unas condiciones iniciales no estudiadas, los parámetros D_e y α deben ser estimados o determinados experimentalmente. Con el propósito de obtener una estimación y evaluar la relación entre estos dos parámetros y las concentraciones iniciales se desarrolló un modelo cuadrático (Ec. 11-14).utilizando el método de los mínimos cuadrados para obtener los coeficientes ($k_{i,j}$ i= 1,…, 4, j ∈{0, Cr, Cu, Cr-Cu, Cu-Cu}).

$$D_{e,Cr} = k_{1,0} + k_{1,Cu}C_{Cu} + k_{1,Cr-Cu}C_{Cr}C_{Cu} \quad (11)$$

$$\alpha_{Cr} = k_{2,0} + k_{2,Cr}C_{Cr} + k_{2,Cr-Cu}C_{Cr}C_{Cu} \quad (12)$$

$$D_{e,Cu} = k_{3,0} + k_{3,Cu}C_{Cu} + k_{3,Cu-Cu}C_{Cu}^2 \quad (13)$$

$$\alpha_{Cu} = k_{4,0} + k_{4,Cu}C_{Cu} + k_{4,Cr-Cu}C_{Cr}C_{Cu} \quad (14)$$

Los coeficientes obtenidos, R^2, y su nivel de significado se muestran en la Tabla 4. Se puede ver que el R^2 es siempre mayor de 0.9 excepto en el caso de D_e de cobre.

La utilización del modelo empírico es una manera fácil de estimar D_e y α para cualquier concentración inicial de los metales de la mezcla binaria con la única restricción que las concentraciones se encuentren en el rango de concentraciones estudiadas. El conocimiento de estos parámetros permite la simulación de las cinéticas con el modelo LAM. Las cinéticas simuladas con el modelo LAM usando los valores estimados de D_e y α se presentan en las figuras 1 y 2 (líneas discontinuas).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 4: Coeficientes del modelo de estimación de D_e i α del Cr(VI) i Cu(II)

	D_e Cr					α Cr			
	Estimación	SE	tStat	pValue		Estimación	SE	tStat	pValue
k_1	2,781E-03	1,131E-04	24,589	1,46E-09	k_2	-2,751E-01	2,848E-02	-9,661	4,76E-06
$k_{1,Cu}$	-9,425E-03	9,220E-04	-10,222	2,98E-06	$k_{2,Cr}$	7,679E-01	4,776E-02	16,077	6,17E-08
$k_{1,Cr,Cu}$	1,126E-02	1,398E-03	8,053	2,10E-05	$k_{2,Cr,Cu}$	-1,592E-01	4,163E-02	-3,823	4,07E-03
R^2	0,935				R^2	0,966			
	D_e Cu					α Cu			
	Estimación	SE	tStat	pValue		Estimación	SE	tStat	pValue
k_3	1,780E-01	2,699E-02	6,597	5,83E-04	k_4	2,637E-02	4,597E-03	5,737	1,22E-03
$k_{3,Cu}$	-4,923E-01	1,496E-01	-3,291	1,66E-02	$k_{4,Cu}$	2,131E-01	2,223E-02	9,586	7,37E-05
$k_{3,Cu}$	4,576E-01	1,821E-01	2,514	4,57E-02	$k_{4,Cr,Cu}$	-1,884E-01	3,067E-02	-6,142	8,53E-04
R^2	0,868				R^2	0,950			

Con el fin de comprobar que el modelo empírico da una buena estimación de los parámetros D_e y α del modelo LAM se han representado los valores calculados frente a los valores estimados (Fig. 9). Los valores de la coordenada en el origen cercana a cero y de la pendiente próxima a uno confirman que el modelo cuadrático ajusta adecuadamente.

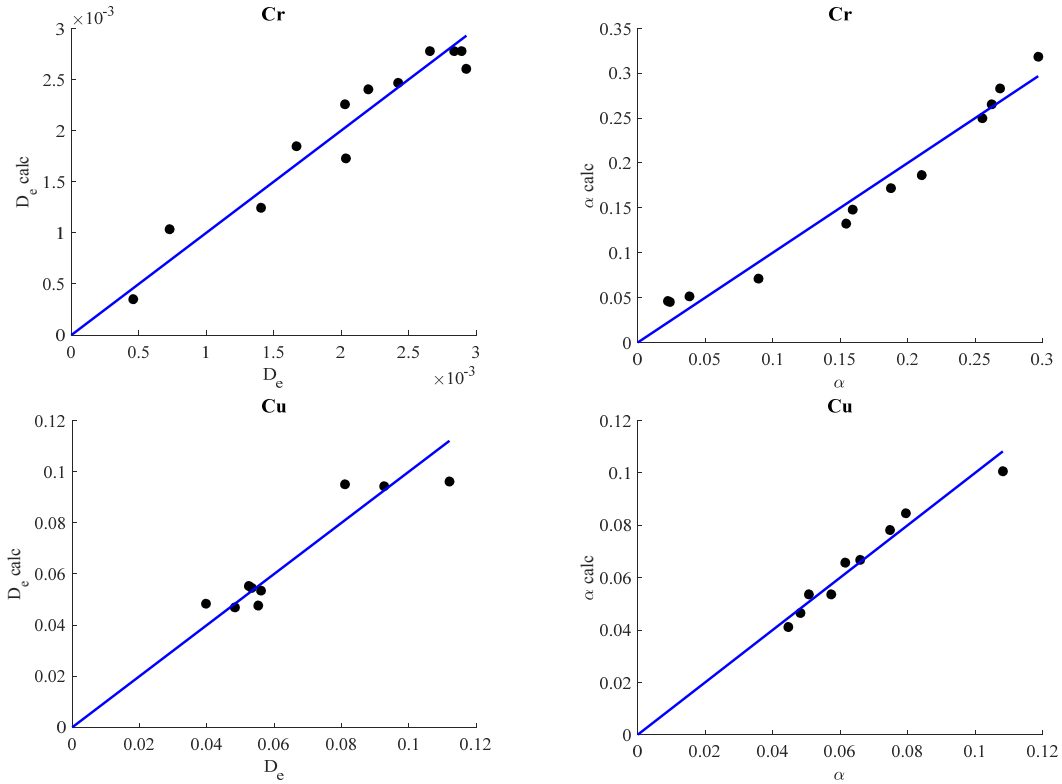


Fig. 5: Coeficientes D_e y α estimados por el modelo cuadrático vs. coeficientes obtenidos por el modelo LAM

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que un modelo de difusión simplificado basado en el modelo de Adsorción Lineal es útil para describir la cinética de sistemas de adsorción complejos como lo es la adsorción simultánea de Cr(VI) y Cu(II) utilizando marro de café encapsulado en bolas de alginato cálcico. La complejidad del proceso global recae en los diversos mecanismos físicos y químicos que tienen lugar simultáneamente (adsorción, reducción, intercambio iónico).

La mayor contribución de este trabajo es el desarrollo del modelo empírico que combinado con el modelo LAM resulta ser una manera sencilla y rápida para describir la cinética de mezclas binarias. El modelo desarrollado permite estimar los parámetros del modelo LAM siempre y cuando las concentraciones iniciales estén comprendidas en el rango de concentraciones estudiadas. Los valores estimados de los parámetros introducidos en el modelo LAM permiten simular las cinéticas de las mezclas binarias.

ISBN 978-607-8242-11-5

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación como parte del proyecto CTM2015-68859-C2-1-R (MINECO-FEDER) y por la Universidad de Girona MPCUdG2016/024.

REFERENCIAS

Cataldo, S., Cavallero, G., Gianguzza, A., Lazzara, g., Pettignano, A., Piazzese, D., Villaescusa, I., *"Kinetic and equilibrium study for cadmium and copper removal from aqeuous solutions by sorption onto mixed alginate/pectin gel beads"*, J. Env. Chem. Eng. 1, 1252-1260 (2013)

Chen, D, Z. Lewandowski, F. Roe y P. Surapaneni; *Diffusivity of Cu^{2+} in calcium alginate gel beads*, Biotech. & Bioeng.: 41,755-760 (1993)

Crank, J., *"The Mathematics of diffusion"*, 2ond. edition. Clarendon Press, Oxford, London (1975).

Escudero, C., N. Fiol, I. Villaescusa, J.C. Bolllinger, (2017) *"Effect of chromium speciation on its sorption mechanism onto grape stalks entrapped into alginate beads"*, Arabian Journal of Chemistry, 10, S1293-S1302 (2017)

Fiol, N., C. Escudero, I. Villaescusa,*"Re-use of exhausted ground coffee waste for Cr(VI) sorption"*, Sep. Sci. Technol. 43, 582-596 (2008).

Fiol, N., J. Poch, I. Villaescusa, (2005) *"Grape stalks wastes encapsulated in calcium alginate beads for Cr(VI) removal from aqueous solution"*, Sep. Sci. Technol, 40, 1013-1028 (2005).

Haerifar, M., S. Azizian, *"An exponential kinetic model for adsorption at solid/solution interface"*, Chem. Eng. J., 215-216, 65-71 (2013).

Largitte, L., R. Pasquier, *"A review of kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon"*, Chem. Eng. Res. Design, 109, 495-504 (2016).

Liu, C, D. Pujol, M.A. Olivella, F. de la Torre, N. Fiol, J. Poch, I. Villaescusa, *"The role of exhausted coffee compounds on metal ions sorption"*, Water, air and Soil Pollution, 226, 289-299 (2015).

Liu, Y. Y-J Liu, Biosorption isotherms, kinetics and thermodynamics, Separation and Purification Technology, 61, 229-242 (2008).

Ma, Z., R.D. Whitley, N.H.L. Wang, *"Pore and surface diffusion in multicomponent adsorption and liquid chromatography systems"*, AIChE Journal, 42(5), 1244-1262 (1996).

Papageorgiou, S. K., F.K. Katsaros, E.P. Kouvelos, J.W. Nolan, H. Le Deit, N.K. Kanellopoulos, *"Heavy metal sorption by calcium alginate beads from Laminaria digitata"*, J. Haz. Mat., B137, 1765-1772 (2006).

Placinski, W., W. Rudzinski, A. Placinska, *"Theoretical model of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review"*, Advances in Colloid and Interface Science, 152, 2-13 (2009).

Ponnusami, V., K.S. Rajan, S.N. Srivastava, *"Application of film-pore diffusion model for methylene blue adsorption onto plant leaf powders"*, Chem. Eng. J., 163: 236-242 (2010)

Pujol, D., M. Bartrolí, N. Fiol, F. de la Torre, I. Villaescusa, J. Poch, J. *"Modelling synergistic sorption of Cr(VI), Cu(II) and Ni(II) onto exhausted coffee wastes from binary mixtures Cr(VI)-Cu(II) and Cr(VI)-Ni(II)"*, Chem. Eng. J., 230, 396-405 (2013).

Sag, Y., Y. Aktay, *"Mass transfer and equilibrium studies for the sorption of chromium ions onto chitin"*, Process Biochemistry 36, 157-173 (2000)

Xu, Z., J. Cai, B. Pan, B. *"Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems"*, Journal of Zhejiang University Science (Applied Physics & Engineering) 14(3), 155-176 (2013).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo de Simulación de un Sistemade Control de Producción Pull como EstrategiaEducativa bajo la Metodología del Aprendizaje Basado en Problemas-ABP

Jaime A. Giraldo[1], Esteban Galvis[1], Julián D. López[1] y Juan F. Montes[1].
(1) Fac. de Ingeniería y Arquitectura, Dpto. de Ingeniería Industrial, Univ. Nacional de Colombia, Sede Manizales

Resumen

Se presenta un modelo de simulación de un proceso de fabricación metalmecánico cuyo control es del tipo Pull (Halar). Se propone la utilización de dicho modelo como una herramienta didáctica de soporte al aprendizaje basado en problemas (ABP) en asignaturas relacionadas con la gestión de sistemas de producción industrial. El principal objetivo es que, mediante la interacción con el modelo, los estudiantes comprendan las principales relaciones causa-efecto de dicho proceso. La interacción se da a través de Excel bajo el cual el estudiante puede modificar los valores de un conjunto de variables de decisión tales como; tiempos de operación, numero operarios, tiempos de arribo, cantidad de materias primas por arribo y número de equipos/maquinas/operarios. A partir de la modificación de dichas variables se mide el efecto en la medida de desempeño principal que es el cumplimiento del tiempo de entrega de los pedidos y otras medidas de desempeño como la tasa de utilización de máquinas y operarios. Lo que se busca con la implementación de esta herramienta es que los estudiantes asimilen y apropien los conocimientos a partir de su aplicación en sistemas de producción teniendo como ventaja que al ser un modelo de simulación no se incurre en costos y brinda la posibilidad de aprender mediante experimentación virtual.

Palabras clave: simulación; sistema Pull; didáctica; tiempos de entrega; tiempos de operación; tiempos de arribo; sistemas de producción

Abstract

A simulation model is presented of a metalworking industry manufacturing process was obtained which works under a Pull system. It is proposed to use this model as a didactic tool supported under the problem based learning system (PBL) in subjects related to the management of industrial production systems. The main objective is that through interaction with the model, students understand the main cause-effect relationships of the process. The interaction is given through Excel where the student can modify the values of a set of decision variables such as; operating times, number of operators, arrival times, quantity of raw materials by arrival and number of locations. From the modification of the decision variables, the main performance measure will be affected which is the delivery time fulfillment of the order sand affect other measures of performance as the utilization rate of machinery and operators. What is sought with the implementation of this tool is that students assimilate and appropriate know ledge from its application in production systems having the advantage that being a simulation model does not incur costs and provides the possibility of learning through trial and error.

Keywords: simulation: pull system; didactics; delivery times; operating times; arrival times; production systems

 ISBN 978-607-8242-11-5

Introducción

En los últimos años de este siglo hemos presenciado una serie de procesos de cambio que ineludiblemente hacen parte de una era distinta, una nueva era, una era de cambio. Como lo menciona Inés Aguerrondo para la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) (Aguerrondo, 1999), es evidente la importancia que adquiere para esta nueva era el saber científico y tecnológico, debido a que las nuevas demandas del medio que emergen a través del tiempo solo podrán ser solventadas a partir del desarrollo y adaptación del conocimiento. Como lo mencionan Toffler (Toffler, 1955) "*Todos los sistemas económicos descansan sobre una base de conocimientos*", por ende se hace indispensable que para la construcción de sociedades integrales con altos niveles de desarrollo, la educación se adapte a los cambios del medio y establezca nuevas estrategias que propicien las transformaciones en la sociedad.

Actualmente el modelo de educación superior está basado en un método tradicional, el cual trabaja mediante la acumulación de conocimientos de diversas disciplinas, en donde el profesor tiene la función de suministrar los conocimientos necesarios para resolver una determinada problemática, creando así un comportamiento mecánico y poco crítico en el estudiante, sesgándolo al uso de una sola metodología de resolución. Sin embargo en la actualidad tal como lo establece Troye y Nordkvellei (Nordkvellei, 2004) "*con el advenimiento de la tecnología electrónica, la influencia tecnológica en la educación ha sido inmensa*." Este fenómeno debe ser aprovechado a fin de adaptar los sistemas educativos con las nuevas tecnologías. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) (Unesco, 1996) establece que 1 Si bien las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) por si solas no generan un impacto en la enseñanza, es claro que sus potencialidades invitan a la creación de espacios formativos ya sean presenciales o virtuales, que propicien la interacción personal, el sentido crítico y propositivo, la pluralidad de puntos de vista y las relaciones directas entre maestros y alumnos, creando así espacios aptos para el desarrollo del conocimiento. Por otro lado, como lo menciona Flavio Fernández y Julio Duarte (Duarte, 2013) los beneficios de las TIC para el caso de la ingeniería, "*implican la utilización de plataformas en internet para el desarrollo de actividades de formación, laboratorios virtuales y experimentación remota, interfaces web para visualizar contenidos, junto con herramientas de simulación específicamente diseñadas para desarrollar habilidades y destrezas en los futuros ingenieros*."

Los nuevos paradigmas sociales, la evolución de los procesos de aprendizaje, la inserción de las tecnologías de información y comunicación en la educación hace que los procesos educativos se deban re-conceptualizar, formulando nuevas metodologías de enseñanza a fin de promover en el estudiante un sentido participativo y de esta manera permitir que "*tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética*", tal como lo menciona Miguel Fortea Bagán (Bagán, 2009). Por otro lado, Linda Harasim (Harasim, 2000), plantea que "*el énfasis tiene que estar en el propio proceso del alumno y en el aprendizaje en colaboración*"; de allí, es posible entender que el papel del docente se ha modificado debido a que ha pasado de ser el protagonista en el proceso de enseñanza, para ser un guía, el cual brinda herramientas y hace seguimiento a los estudiantes a fin de evaluar su progreso. Para el caso de los estudiantes, el proceso de autoaprendizaje toma un papel relevante ya que para ser competentes es necesario aprender a aprender y lograr desenvolverse en problemáticas complejas desafiantes que lo lleven a la búsqueda de soluciones innovadoras.

Ahora bien, cuando se habla de autoaprendizaje y aprendizaje activo es importante referirnos al aprendizaje basado en problemas (ABP), el cual según Howard y Barrows (Barrows, 1986) está definido como *"un método de aprendizaje basado en el principio de usar problemas como punto de partida para la adquisición e integración de los nuevos conocimientos*". En esta metodología los protagonistas del aprendizaje son los propios alumnos, que asumen la responsabilidad de ser parte activa en el proceso. Para Márquez et al. (2011), el ABP es una metodología constructivista y didáctica que se aplica en los centros de enseñanza, y que pretende que el estudiante resuelva un desafío que se le presenta de manera autónoma y creativa, mediante la búsqueda de la información que él crea pertinente.

Si bien el ABP incluye el desarrollo del pensamiento crítico en el mismo proceso de enseñanza - aprendizaje, no lo incorpora como algo adicional, sino que es parte del mismo proceso de interacción para aprender. El ABP tiene como objetivo que el alumno comprenda y profundice adecuadamente en la respuesta a los problemas utilizados para aprender abordando aspectos de orden filosófico, sociológico, psicológico, histórico, práctico, tal como lo menciona el ITESM (ITESM, 2000). Esto con el fin de darle un sentido integral al aprendizaje, tal como es requerido para la formación profesional.

Para el caso particular de la Ingeniería Industrial, uno de los focos más importante es la identificación y comprensión de los distintos procesos productivos bajo los cuales trabajan las empresas debido a que como lo menciona (ídem) Adolfo Acevedo Borrego y Martha Linares Barrantes (Adolfo Acevedo Vorrego, 2012) el

 ISBN 978-607-8242-11-5

ingeniero industrial, define situaciones problemáticas, entiende los problemas del entorno a través de la elaboración mental de una visión global y completa de la problemática de la organización, sobre la cual se sustenta su posterior análisis y propuestas de solución a las situaciones problemáticas. Por ende, es indispensable entender la esencia de los procesos productivos a fin de lograr definir estrategias de solución acorde a las necesidades propias de cada organización.

Una de las herramientas ingenieriles para la comprensión de procesos productivos existentesen la actualidad y que surge como resultado de la influencia de la tecnología en la educación, es la simulación de procesos. Este instrumento como lo menciona Guillermo Orsi (Orsi, 2011) permite que al simular un sistema o proceso, se tenga una rápida y económica evaluación del funcionamiento del mismo, su performance (desempeño) y respuesta ante distintas situaciones, impacto, valores, y cambio de costos, validando las mejoras propuestas y reduciendo la resistencia al cambio radicada en la incertidumbre de los resultados. Por otro lado, dependiendo de las características de los sistemas a simular y de los atributos, variables de decisión y medidas de desempeño a representar, es posible utilizar uno de los muchos softwares de simulación existente; entre los que se destacan, HYSYS, ProModel, Witness, Flexsim, PlantSimulation, entre otros.

Teniendo en cuenta los planteamientos desarrollados anteriormente, se plantea la construcción de un modelo de simulación en el Software ProModel, en el cual se represente la dinámica de un proceso productivo de una industria metalmecánica que trabaja bajo el sistema de control de producción tipo Pull, y el cual sirva de herramienta didáctica en forma conjunta con aplicaciones metodológicas del Aprendizaje Basado en Problemas y que permita incidir positivamente en la formación de los estudiantes de un programa de Ingeniería Industrial.

Metodología

Para la construcción del modelo de simulación se siguió la metodología propuesta por Jaime Giraldo (Giraldo, 2014), con base en lo expuesto por Banks et al. (2009), Kelton y Law (2007), Harrell et al. (2004), Shanon (1988) y Gordon (1978).

Las principales etapas se describen a continuación:

1. Definición del sistema/proceso a modelar.

Se seleccionó un sistema de control de producción tipo Pull de fácil comprensión, en el que no intervengan demasiados procesos, pero que permita asimilar todos los conocimientos inherentes a este tipo de sistemas, es por esto que se tuvieron en cuenta dos productos en los cuales intervienen tres procesos con maquinaria y un proceso de ensamble, los cuales se explican a continuación.

El primer producto es el soporte compresor, para el cual se cuentan con dos líneas de producción, la primera es para la parte metalmecánica en la cual se tiene una maquina cizalladora y una maquina troqueladora en la cual se procesan laminas galvanizadas. Y otra línea de procesamiento de plástico en donde se cuenta con una maquina inyectora en la cual se transforma el polipropileno para adquirir bandejas plásticas. Finalmente se ensamblarán las partes obtenidas en las dos líneas.

En cuanto al panel de fondo, se tiene una única línea definida, en la cual existe una maquina cizalladora para el corte de láminas, y dos troqueladoras, una es utilizada para formar las láminas cortadas y otra para hacer el marcado de las piezas formadas. Finalmente se ensamblan estas piezas con las láminas de cartón previamente almacenadas en el área de ensamble.

A continuación, en la *figura 1* se presenta el modelo grafico del proceso de producción para el soporte compresor.

ISBN 978-607-8242-11-5

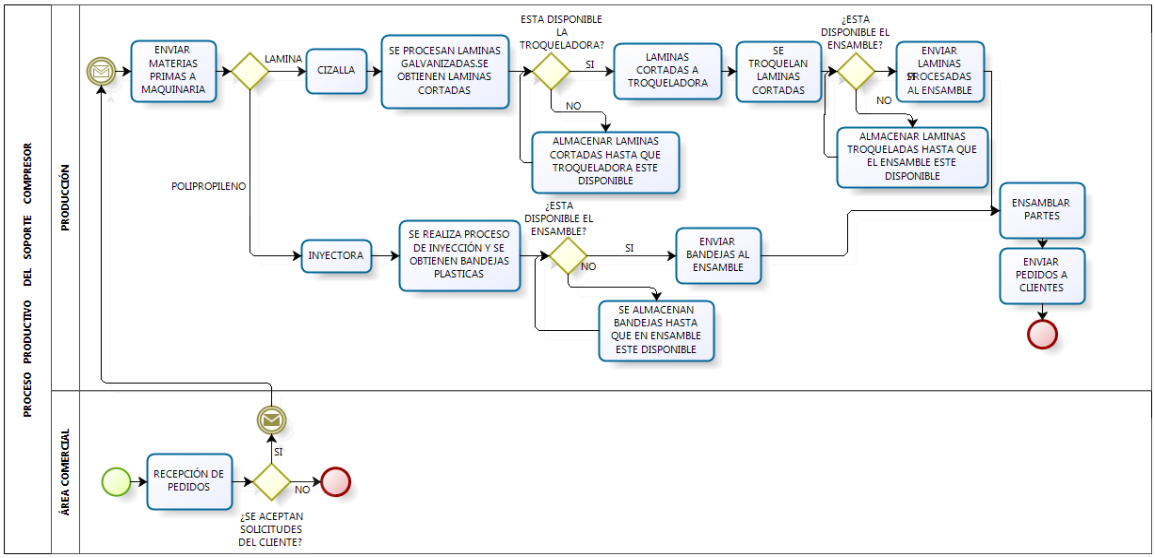


Figura 1: Modelo del proceso productivo del soporte compresor. Fuente: Elaboración propia mediante software Bizagi.

2. *Construcción del modelo de simulación.*

Una vez definida la estructura de los productos y la secuencia del proceso de fabricación, se desarrolló un modelo conceptual representado gráficamente en la *figura 2*, el cual se codificó posteriormente empleando el software de simulación ProModel 2014, para el modelamiento de sistemas de producción, teniendo en cuenta las variables de la situación a representar y sus relaciones en términos de causa- efecto. Igualmente se verificó que el modelo codificado se correspondiera con el modelo conceptual y se validó que el comportamiento del modelo se aproximara al comportamiento del sistema representado. En la *figura 3,* se presenta gráficamente el modelo simulado, en el lado izquierdo se encuentran las dos líneas para el soporte compresor, y a la derecha la línea para el panel de fondo.

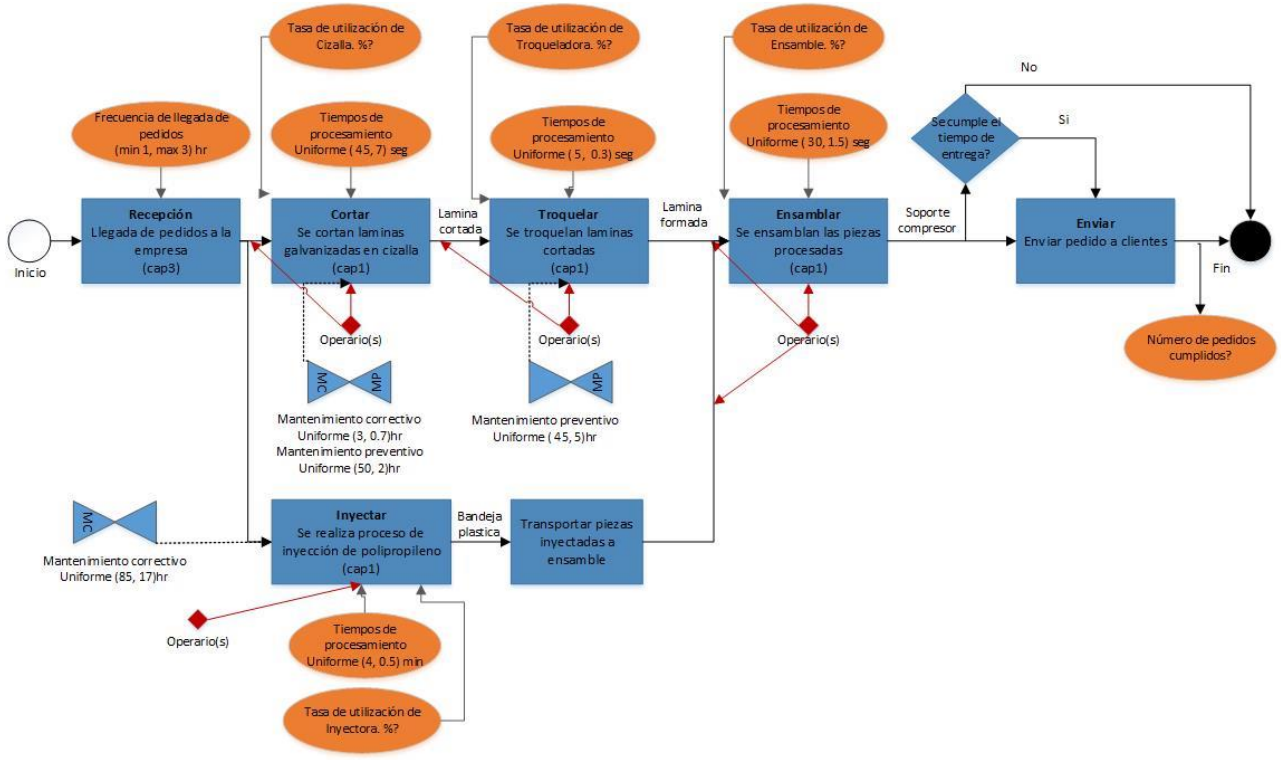


Figura 2: Modelo conceptual del proceso de fabricación del soporte compresor. Fuente: propia realizado en Microsoft Visio basados en Educator Workshop: Teaching Simulation Using Flexsim

ISBN 978-607-8242-11-5



Figura 3: Representación gráfica del modelo de simulación. Fuente: elaboración propia.

3. Definición del modelo de decisión.

La expresión (1) denota el modelo lógico-matemático simbolizado en la simulación. En este las m variables respuesta (efecto) y_j dependen de relaciones lógico/matemáticas de hasta n_j variables de decisión $X_{i,j}$ descritas por la función $f_j(x_{i,j})$. La función f_j es representada por el modelo de simulación. Los valores de las n_j variables de decisión $X_{i,j}$ serían los niveles de decisión que estarían directamente relacionados con la medida de desempeño del sistema y_j que se quiere estudiar, cabe resaltar que al sistema tener dos productos independientes, esta expresión aplica para cada uno de los productos independientemente.

$$y_{j=}f_j(x_{i,j})\ donde\ 1 \leq i \leq n_j; 1 \leq j \leq m \quad (1)$$

Las expresiones siguientes presentadas en la *tabla 1* son posibles instancias del modelo de decisión de la expresión (1), con aplicación práctica en la medición del cumplimiento de pedidos del sistema de producción de soporte compresor. Dentro de los datos presentados en la tabla (véase *tabla 1*), se encuentran descritas variables probabilísticas las cuales son representadas mediante sus respectivos parámetros. Para el caso de la distribución normal (N), se trabajó con la media y la desviación estándar y para el caso de la distribución uniforme (U), se trabajó con el valor mínimo y el máximo.

Xi,j	Variables de decisión **X**i,j		Medida de desempeño **Y**j
X1,1	Tiempos de corte soporte compresor	N (45,7) seg	Y1 (Cantidad de pedidos cumplidos para el soporte compresor con n=13
X2,1	Tiempos de troquelado soporte compresor	N (5,0.3) seg	
X3,1	Tiempo de inyección soporte compresor	N (4,0.5) seg	
X4,1	Numero de operarios corte	3	
X5,1	Numero de operarios troquel	3	
X6,1	Numero de operarios inyección	3	
X7,1	Numero de operarios ensamble	3	
X8,1	Cantidad de lámina galvanizada	1000	
X9,1	Cantidad polipropileno	U (1,3) min	
X10,1	Frecuencia de pedidos	U (1,3) min	
X11,1	Cantidad de cortadoras	1	
X12,1	Cantidad de troqueladoras	1	
X13,1	Cantidad de inyectoras	1	

Tabla 1: Representación del modelo de decisión en la simulación para línea de soporte compresor.

ISBN 978-607-8242-11-5

4. Diseño experimental

Al finalizar las etapas anteriores se puede correr el modelo de simulación, para ello el estudiante deberá establecer los tiempos de procesamiento para las distintas materias primas en su respectiva máquina. Además, el estudiante deberá establecer la cantidad de recursos (número de operarios y cantidad de materias primas) destinados para las dos líneas de producción. Finalmente establecerá la frecuencia de pedidos que dinamizará la producción de este modelo de empresa. Por tal razón el estudiante contará con una interfaz en Excel en la que podrá digitar dichos datos. En algunos casos al tratarse de valores aleatorios, estos deberán ser representados por medio de distribuciones de probabilidad con sus respectivos parámetros. Para el caso de los tiempos de procesamiento se trabajará con la distribución normal, donde es necesario registrar la media y desviación estándar de los tiempos tal como se muestra en la *figura 4*, y para el caso de la frecuencia de los pedidos se trabajará con la distribución uniforme en la que se deberán registrar los parámetros de máximo y mínimo en su respectiva tabla (véase *figura 5*). En el caso de los recursos, estos se digitarán como valores enteros en la sección de recursos de la tabla de ingreso de datos (véase *figura 5*).

TIEMPOS DE PROCESAMIENTO

Señor usuario, en la siguiente tabla es necesario que digite los valores medios (en la columna con nombre Media) de cada uno de los tiempos de procesamiento de materias primas y productos en proceso que se dan en su respectiva locación de operación. En la columna siguiente es necesario digitar la desviacion estandar correspondinte a cada operación de procesamiento.
NOTA: Estos valores se deben digitar en minutos, y en caso de ser valores reales, los decimales deberan ser separados por un punto.

ENTIDAD	*LOCACIÓN*	*MEDIA*	*DESVIACIÓN ESTANDAR*
PROCESO SOPORTE COMPRESOR			
Lamina Galvanizada	Cizalla	0,75	0.1167
Lamina Cortada	Troqueladora	0.083	0.005
Polipropileno	Inyectora	4	0.5
Lamina Troquelada y Bandeja	Ensamble	0.5	0.025
PROCESO PANEL DE FONDO			
Lamina	Cizalla	0.4167	0.0333
Lamina Cortada	Troqueladora	0.1167	0.0133
Lamina Troquelada	Troqueladora Estampado	0.0967	0.0033
Carton y Lamina Estampada	Ensamble	1,7	0.2

Figura 4: Interfaz de usuario para ingreso de tiempos de procesamiento.

RECURSOS		**FRECUENCIA DE PEDIDOS**		**MATERIA PRIMA**	
En las siguientes celdas se debe digitar el nùmero de operarios por cada puesto de trabajo. Recordar que la empresa trabaja tres turnos al dia en los horarios de 6am a 2pm, de 2pm a 10pm y de 10pm a 6pm, por ende se recomienda utilizar mùltiplos de tres para denotar el nùmero de operarios; tener en cuenta que tres operarios significa un operario para cada uno de los turnos.		En las siguienes celdas se debe digitar el mayor y el menor tiempo en horas en el que los clientes realizan los pedidos a la empresa.		En las siguientes celdas se debe digitar la cantidad en kilogramos de materia prima que arriba a la empresa para cada uno de los procesos	
PROCESO SOPORTE COMPRESOR		*PROCESO SOPORTE COMPRESOR*		*PROCESO SOPORTE COMPRESOR*	
NOMBRE	***NÙMERO***	***MÀXIMO***	***MÌNIMO***	***NOMBRE***	***CANTIDAD***
Operario de Cizalla	3	3	1	Lamina Galvanizada	1000
Operario de Troquel	3				
Operario de Inyectora	3				
Operario de Ensamble	3			Polipropileno10kg	2000
Cantidad de troqueladoras	1				
Cantidad de Inyectoras	1				
Cantidad de cizallas	1				
PROCESO PANEL DE FONDO		*PROCESO PANEL DE FONDO*		*PROCESO PANEL DE FONDO*	
NOMBRE	***NÙMERO***	***MÀXIMO***	***MÌNIMO***	***NOMBRE***	***CANTIDAD***
Operario de Cizalla	3	6	3	Lamina Cold	850
Operario de Troquel	3				
Operario de Troquel Estampad	3			Cartón	8500
Operario de Ensamble	3				
Cantidad de cizallas	1				
Cantidad de troqueladoras	1				
Cantidad de estampadoras	1				

Figura 5: Interfaz de usuario para ingreso de niveles de las variables de decisión.

ISBN 978-607-8242-11-5

Resultados y discusión

Según la metodología propuesta por el ABP, para que los estudiantes adquieran en forma eficiente conceptos y conocimientos, se debe partir de una problemática y cada uno de ellos debe indagar y profundizar en conceptos requeridos que lo lleven a su solución. Para el caso del modelo de sistema Pull trabajado y tomando elementos descritos en la metodología del ABP, la instancia del problema con el que se va a experimentar se describe a continuación. (Véase *tabla 2*).

Enunciado del problema	¿Cuáles deben ser los tiempos de procesamiento adecuados de las materias primas en su respectiva máquina y la cantidad de recursos necesarios para aumentar el número de pedidos entregados a tiempo?
Conocimientos previos	El estudiante debe tener conocimientos básicos sobre sistemas de producción, maquinaria y materias primas, producción productiva, estandarización de procesos, etc.
Conocimientos sobre los que el estudiante debe profundizar	El estudiante deberá indagar los tiempos de procesamiento de las materias primas en su respectiva máquina y expresarlos en la distribución de probabilidad solicitada, además debe consultar acerca de las características y conceptos metodológicos de un sistema de control de producción Pull.
Motivo de interés para los estudiantes	El estudiante estará interactuando con un sistema virtual que le permitirá experimentar con un modelo de empresa que trabaja bajo un sistema Pull, en el que podrá modificar variables
Objetivos del aprendizaje	Interiorizar conceptos sobre tiempos de arribos, manejo de pedidos en un sistema Pull, tiempos de procesamiento probabilísticos de material por determinada maquinaria, disponibilidad y manejo de recursos.
Complejidad del modelo vs sistemas de la vida real	La complejidad del sistema refleja las distintas situaciones a las que se puede enfrentar una persona en el manejo de una empresa que trabaja con un sistema productivo tipo Pull, lo cual obligara al estudiante a construir pensamiento crítico el cual lo lleve a la soluciónmás eficiente del problema.

Tabla 2: Descripción de la instancia del problema a resolver

Para darle solución al problema planteado anteriormente se establecieron dos escenarios posibles de solución en los cuales se modificaron los valores de algunas de las variables de decisión y así poder observar el comportamiento de la medida de desempeño frente a estos escenarios. Dentro de los datos presentados en la tabla (véase *tabla 3*), se encuentran variables probabilísticas las cuales son descritas mediante sus respectivos parámetros. Para el caso de la distribución normal (N), se trabajó con la media y la desviación estándar y para el caso de la distribución uniforme (U), se trabajó con el valor mínimo y el máximo.

ISBN 978-607-8242-11-5

El modelo brinda la posibilidad de probar muchas instancias de solución debido a que cuenta con dos líneas de producción representadas con trece variables de decisión por línea, pero para ejemplificar los efectos en el comportamiento de la medida de desempeño a raíz del cambio de valores de las variables se decidió trabajar con dos escenarios para la línea de producción de soporte compresor tal como se observa a continuación. (Véase *tabla 3*).

$X_{i,j}$	Variables de decisión	Escenario 1	Escenario 2
X1,1	Tiempos de corte soporte compresor	N (45,7) seg	N (70,6) seg
X2,1	Tiempos de troquelado soporte compresor	N (5,0.3) seg	N (8,0.7) seg
X3,1	Tiempo de inyección soporte compresor	N (4,0.5) min	N (6.5,0.6) min
X4,1	Numero de operarios corte	3	6
X5,1	Numero de operarios troquel	3	6
X6,1	Numero de operarios inyección	3	6
X7,1	Numero de operarios ensamble	3	6
X8,1	Cantidad de lámina galvanizada	1000	1500
X9,1	Cantidad polipropileno	2000	2500
X10,1	Frecuencia de pedidos	U (1,3)	U(1,3)
X11,1	Cantidad de cortadoras	1	2
X12,1	Cantidad de troqueladoras	1	2
X13,1	Cantidad de inyectoras	1	2

Tabla 3: Escenarios de simulación.

Después de realizar la simulación de los escenarios se podrá verificar a través del programa Output Viewery en una hoja de Excel los valores de las medidas de desempeño, con el fin de que puedan ser modificadas las variables de decisión y mejorar dichas medidas. A continuación, se presentan en la *tabla 4* los resultados de la medida de desempeño para ambos escenarios simulados.

J	Medidas de desempeño	Escenario 1	Escenario 2
1	Cantidad de pedidos cumplidos para el soporte compresor	4	11

Tabla 4: Resultados de la simulación de los escenarios.

De los resultados anteriores se puede deducir que, aunque los tiempos de procesamientos de materias primas en cada una de las maquinas tenidas en cuenta en las variables de decisión aumentaron, es posible incrementar el número de pedidos cumplidos si la empresa adquiere maquinaria y aumenta la cantidad de materia prima comprada pero además incrementa el número de operarios a laborar tal como se presentó en el escenario número 2. Con estas variaciones se logró incrementar en siete unidades el número de pedidos cumplidos, mejorando considerablemente el comportamiento de la medida de desempeño, pero es claro que los recursos utilizados fueron mayores, lo que representaría un incremento en costos considerable para la empresa. Algo que muchos no considerarían posible por lo que habría que reconsiderarse la modificación de las variables a fin de obtener posibilidades más óptimas.

De lo anterior es posible observar que el modelo permite realizar un análisis integral del comportamiento de la medida de desempeño y obliga al estudiante a preguntarse cuales son los motivos que llevan al sistema a obtener determinados resultados, lo que finalmente se convertirá en un aprendizaje con un enfoque empresarial real.

Conclusiones

- El aprendizaje basado en problemas en forma conjunta con la simulación es actualmente un método practico de enseñanza tanto para los distintos programas de ingeniería industrial como para la academia en general, debido a que le permite al estudiante interactuar con múltiples instancias de un problema, le exige su experimentación y lo motiva a la búsqueda de información importante que lo conduzca a la solución óptima de la problemática.

ISBN 978-607-8242-11-5

- El modelo de simulación desarrollado al tratarse de un sistema interactivo, tiene como característica transmitir un ambiente empresarial, con el que el estudiante pueda reflejar las posibles situaciones a enfrentar en el ámbito laboral y de esta manera incidir en la formación de profesionales integrales.

Referencias

Adolfo Acevedo Vorrego, M. L. (2012). El enfoque y rol del ingeniero industrial para la gestión y decisión en el mundo de las organizaciones. Revista de la Facultad de Ingenieria Industrial, 19-24.

Aguerrondo, I. (1999). El nuevo paradigma de la Educación para el siglo. Buenos Aires.

Bagán, M. Á. (2009). Metodologías didácticas para la enseñanza/aprendizaje de competencias. España: Univesidad Jaume I.

Barrows, H. (1986). A Taxonomy of problem-based learning methods, in Medical education. Illinois.

Claudia Márquez, I. U. (2011). Satisfacción académica con el ABP en estudiantes de licenciatura de la Universidad de Coloma, Mexico. Revista Intercontinental de Psicología y Educación , 29-44.

Duarte, F. F. (2013). EEl Aprendizaje basado en Problemas como Estrategia para el Desarrollo de Competencias Específicas en Estudiantes de Ingeniería. Scielo.

Giraldo, J. (2014). Simulación de sistemas de producción y de servicios. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, facultad de Ingenieria y Arquitectura.

Harasim, L. (2000). Redes de Aprendizaje. Barcelona.

ITESM, Instituto Tecnologico de Estudios superiores de Monterrey. I. T. (2000). El Aprendizaje Basado en Problemas como técnica didáctica. Dirección de Investigación y Desarrollo Educativo, Vicerrectoría Académica Monterrey.

Nordkvellei, T. (2004). Didactica y tecnología.

Orsi, G. (2011). Beneficios de la modelización y Simulación de Procesos. Industria y Empresa.

Toffler, A. T. (1955). La creación de una nueva civilización . Barcelona: Plaza y Janes Editores.

Unesco. (1996). La educación encierra un tesoro. Madrid.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo de simulación de un sistema de distribución logístico como plataforma virtual para el aprendizaje basado en problemas

Jaime A. Giraldo[1], Edgar L. Giraldo[1] y Jorge A. Valderrama[1]

(1) Fac. de Ingeniería y Arquitectura, Dpto. de Ingeniería Industrial, Univ. Nacional de Colombia, Sede Manizales

Resumen

Se ha desarrollado una plataforma virtual de simulación de sistemas de producción industrial, enfocada en el análisis de la operación de un sistema de distribución logístico de pequeña escala, dirigida especialmente a aquellos estudiantes y futuros profesionales involucrados en el diseño, planeación y operación de los sistemas logísticos. La plataforma está basada en la metodología "Aprendizaje Basado en Problemas" (ABP), la cual presenta un conjunto de problemas construidos de forma estructurada por grupos de profesores, los cuales requieren de investigación por parte del estudiante para discutir, producir explicaciones tentativas de la problemática y proponer soluciones fundamentadas. Esta herramienta enfrenta una de las limitaciones que caracteriza los sistemas tradicionales de enseñanza, referente a la dificultad que tienen los mismos para propiciar los escenarios suficientes que permitan a los estudiantes aplicar los conocimientos adquiridos mediante la experimentación y análisis de diferentes situaciones cercanas a la realidad empresarial y que obstaculizan los procesos de adopción de habilidades y competencias necesarias para la toma de decisiones asertiva por parte de los profesionales. Se ha seguido una metodología universalmente aceptada para el desarrollo de modelos de simulación, realizando las adaptaciones necesarias al adoptar un enfoque desde el ámbito educativo. La plataforma permite realizar aplicaciones en el campo de la logística a través de la interacción diferenciada de los tutores y estudiantes con el sistema modelado y queda en manos de los mismos el diseño experimental que permita realizar una aplicación amplia de la herramienta en el entorno educativo.

Palabras clave: Sistemas de distribución logístico; simulación; ABP; ProModel, modelado de procesos; enseñanza, plataforma virtual

Simulation model of a logistic distribution system as a virtual platform for problem-based learning

Abstract

A virtual platform for simulation of industrial production systems has been developed, focused on the analysis of the operation of a small-scale logistic distribution system, aimed especially at those students and future professionals involved in the design, planning and operation of logistics systems. The platform is based on the "Problem-Based Learning" (PBL) methodology, which presents a set of problems constructed in a structured way by groups of teachers, which require research by the student to discuss, produce tentative explanations of the and propose substantiated solutions. This tool faces one of the limitations that characterizes the traditional systems of education, referring to the difficulty they have in order to provide sufficient scenarios that allow students to apply the acquired knowledge through the experimentation and analysis of different situations close to the business reality and that hinder the processes of adoption of skills and competencies necessary for assertive decision making by professionals. A universally accepted methodology for the development of simulation models has been followed, making the necessary adaptations when adopting an approach from the educational field. The platform allows applications in the field of logistics through the differentiated interaction of tutors and students with the modeling system and remains in the hands of the same the experimental design that allows a wide application of the tool in the educational environment.

Keywords: Logistic distribution systems; simulation; ABP; ProModel, process modeling; teaching, virtual platform.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La dinámica empresarial que se desarrolla en el mundo globalizado, requiere de la adopción y aplicación de competencias profesionales que respondan de forma oportuna y asertiva a los rápidos procesos de cambio en las organizaciones. En este sentido, es necesario que la formación de aquellos individuos que estarán involucrados en los procesos de toma de decisiones, esté orientada de forma apropiada y alineada con la realidad empresarial. Si bien, la oferta académica es cada vez mayor para todos los niveles formativos, es evidente que los procesos de enseñanza-aprendizaje no han sufrido una transformación reconocible en función de las necesidades que actualmente requiere el mundo globalizado, las cuales crecen a un ritmo acelerado y son cada vez más especializadas.

El qué y el cómo se aprende y el qué y cómo se enseña continúa siendo en buena medida terreno intocado. Este cuestionamiento se ha evitado tanto en la pedagogía como en el análisis sociológico del aparato escolar. En verdad el tema del saber, ese conjunto de recursos simbólicos que incluyen dimensiones tanto de conocimientos como de valores, habilidades instrumentales y disposiciones, debería estar en el centro de la problemática de la calidad y de la preocupación política por la Educación Superior (Como se cita en Parra, 2006, p. 117)

En este sentido, y teniendo en cuenta que no es posible pretender que se produzca una transformación completa de los métodos de enseñanza tradicionales empleados de forma extensa en la mayoría de los escenarios educativos, deben generarse mecanismos que permitan una mejor articulación con las demandas del entorno y que a su vez aporten de forma paulatina a una reestructuración del sistema. Según Parra (2006), la diferencia fundamental entre el método de enseñanza tradicional y el moderno se centra en que, en el primero, el proceso de enseñanza-aprendizaje es estático, lineal y rígido, mientras en el segundo, el mismo proceso implica una continua retroalimentación, es abierto y dúctil y sus componentes adquieren significado en el contexto sociocultural en el que el alumno está inmerso. La adopción de nuevos enfoques implica que la información transmitida sea relevante para el estudiante, reconociendo su utilidad y aplicabilidad hacia sus necesidades particulares y su relación con el entorno empresarial.

*El proceso de aprendizaje, debe estar de frente a los retos del avance vertiginoso y diversificado de la ciencia y las tecnologías y su aplicabilidad a través de la práctica de la profesión. Por ello el conocimiento y el ejercicio de nuevas experiencias en los procesos de formación, son tan importante*s (ACOFI, 2008). Al referirse a nuevas experiencias se habla de aquellas estrategias que permiten al estudiante construir su perfil profesional a partir de la experiencia práctica, propiciando el pensamiento crítico-reflexivo bajo la confrontación de situaciones que se asemejen a problemas reales de su profesión. Atendiendo a lo anterior, durante los últimos años, ha surgido una tendencia enfocada en el desarrollo de metodologías educativas centradas en el aprendizaje del estudiante, dentro de las cuales se encuentra el ***Aprendizaje Basado en Problemas (ABP o, del inglés, PBL, problem-based learning),*** una metodología que reconoce al estudiante como un actor fundamental y responsable de su propio proceso de aprendizaje. El ABP presenta un conjunto de problemas construidos de forma estructurada por grupos de profesores, los cuales requieren de investigación por parte del estudiante para discutir, producir explicaciones tentativas de la problemática y proponer soluciones fundamentadas. (Norman y Schmidt, 1992).

Ahora bien, desde el enfoque de los sistemas logísticos, ha de reconocerse que la toma de decisiones de forma asertiva en torno al diseño, planeación y operación de los mismos, por parte de los profesionales de ingeniería y administración, posee un nivel de importancia crítico y estratégico, ya que genera un impacto directo sobre el desempeño de las compañías. Cada sistema, por su naturaleza, presenta características diferentes e involucra un número de variables extenso, de las cuales, cada una puede afectar de forma importante el comportamiento del mismo y cuya aleatoriedad e interdependencia genera un número de escenarios y situaciones ilimitadas. Elegir una solución precisa para una problemática que se presente, no resulta sencillo y dependiendo de la envergadura del sistema, evaluar el impacto de la misma puede ser inaccesible debido a las implicaciones de costos que representa la alteración del funcionamiento normal del sistema.

Para enfrentar estas dificultades una de las herramientas que se ha empleado de forma extensa es la utilización de las TIC's, especialmente de los modeladores o simuladores de procesos. Esta, es una técnica que permite imitar o simular la operación de diferentes clases de instalaciones o procesos del mundo real o hipotético haciendo uso de las computadoras (Como se cita en Giraldo, 2014, p. 1), con lo cual es posible obtener información clave del sistema en diferentes escenarios, sin necesidad de perturbarlo. Partiendo de esto, es posible reducir el riesgo al tomar decisiones fundamentadas en la experimentación, anticipando en alguna medida los efectos que éstas tendrían sobre el desempeño del sistema real. Las aplicaciones desarrolladas para este objetivo son variadas y en muchas ocasiones orientadas al análisis de sistemas o

 ISBN 978-607-8242-11-5

áreas de estudio específicas. En el ámbito de la ingeniería y los procesos de manufactura, una de las herramientas más representativas es ProModel, software ofrecido por ProModel Corporation. Esta herramienta combina la flexibilidad de los lenguajes de simulación de propósito general y las características de fácil uso de los simuladores.

Partiendo de los planteamientos anteriores se ha elaborado un modelo de simulación por eventos discretos, basado en el proceso de fabricación y distribución de productos tangibles realizado por una compañía para 10 clientes ubicados en diferentes ciudades. La plataforma permite modificar diferentes variables que afectan el funcionamiento del sistema a través de una interfaz de Microsoft Excel, entre los cuales se incluyen el tiempo entre pedidos, número de unidades requeridas por cliente, tiempo de procesamiento, tiempo de cargue y descargue, velocidad de los vehículos, entre otros. En base a estos se pueden obtener diferentes resultados para diferentes escenarios y a partir de ello determinar cambios que son necesarios para mejorar el desempeño del sistema estudiado. Se espera que con esta herramienta tanto estudiantes como tutores experimentan y analizan diferentes situaciones problemáticas, con el fin de fortalecer los conocimientos de los estudiantes acerca de los sistemas logísticos y las habilidades para la solución de problemas acorde con la metodología ABP, contribuyendo al mejoramiento de los procesos de enseñanza aprendizaje que se emplean en la actualidad.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la plataforma de simulación del sistema de distribución logístico a pequeña escala se ha tomado como base la metodología propuesta por Giraldo (2014), la cual describe las etapas que conforman el procedimiento de la planeación y experimentación de un modelo de simulación.

Formulación del problema

Siguiendo el enfoque planteado para el modelo como herramienta de enseñanza-aprendizaje basada en la metodología ABP, la formulación de un problema específico no es delimitada de forma estricta, ya que estará determinada en función del mismo o bien del caso de estudio planteado por el usuario o tutor que decida implementar la herramienta. Sin embargo, para el desarrollo del aplicativo se parte de la situación actual de la empresa de interés y a partir de esta se analizan diversas problemáticas según la lógica causa efecto alrededor de la logística de distribución que pueden originar la problemática identificada y que podrían ser evaluadas mediante la utilización de la plataforma desarrollada.

La situación actual enfrentada es la siguiente: *La empresa presenta problemas para atender las órdenes de pedido todos los clientes de forma oportuna. Esta situación ha generado diversos inconvenientes con los clientes, generando una reducción en la frecuencia en los pedidos, con lo cual disminuyen los ingresos de la organización y se ve considerablemente afectada la percepción que se tiene de la empresa en la región.*

Algunas de las causas posibles identificadas que originan la problemática son las siguientes:

- El tiempo actual de procesamiento por unidad es considerablemente alto, esto genera que cada pedido ocupe la capacidad de la planta por un tiempo muy alto y las órdenes que lleguen deban esperar la disponibilidad del procesador.
- Existe una capacidad limitada de producción debido al número insuficiente de procesadores, generando tiempos de espera obligatorios para cada orden.
- La capacidad de las camionetas está siendo utilizada casi en su totalidad, por lo tanto, en algunos momentos no hay vehículos disponibles en la empresa para transportar los pedidos.
- Los mantenimientos preventivos se están realizando con una frecuencia incorrecta y requieren tiempos muy altos que retrasan las órdenes. Además, no se están realizando de forma correcta, propiciando fallos constantes en el sistema.
- El tiempo de cargue y descargue por pedido es muy alto, retrasando la salida de los pedidos y el regreso de los vehículos a la compañía.

Establecer los objetivos

En relación al punto anterior, el propósito del estudio de simulación estará alineado con la formulación del problema y puede responder a diferentes finalidades relacionadas con el análisis del desempeño y capacidad del sistema, la comparación de diferentes configuraciones de los elementos del sistema y su optimización a través de las mismas. En este sentido los objetivos propuestos son los siguientes:

 ISBN 978-607-8242-11-5

Objetivo general

Reducir en un porcentaje determinado el número de órdenes rechazadas de los clientes en una zona geográfica específica, logrando establecer la capacidad de la planta necesaria para atender la demanda actual de la empresa y mejorar el desempeño general de todos los procesos de la cadena, desde la fabricación, hasta la distribución del producto.

Objetivos específicos

- Determinar el número de procesadores necesario para aumentar la capacidad de la planta.
- Identificar el nivel de mejoramiento necesario en los tiempos de procesamiento para lograr la reducción esperada en el número de órdenes rechazadas.
- Determinar el número de vehículos necesarios que garanticen disponibilidad de transporte para suplir la demanda de la empresa en el momento en que se procesan los pedidos.
- Reducir los tiempos de cargue y descargue de pedidos a través de la regulación de dichos procesos.

Definición y conceptualización del sistema a modelar

Se ha seleccionado como sistema de interés para la simulación una empresa ubicada en la ciudad de Manizales, Colombia, dedicada a la fabricación y distribución de productos en el Departamento de Caldas. La empresa cuenta con la capacidad para atender gran parte del mercado existente en el departamento, llegando a 10 diferentes municipios desde su lugar de origen en la ciudad de Manizales: Aguadas, Anserma, Chinchiná, Filadelfia, La Dorada, Manzanares, Neira, Pensilvania, Riosucio y Salamina. Las características del sistema hacen que sea clasificado como un sistema discreto.

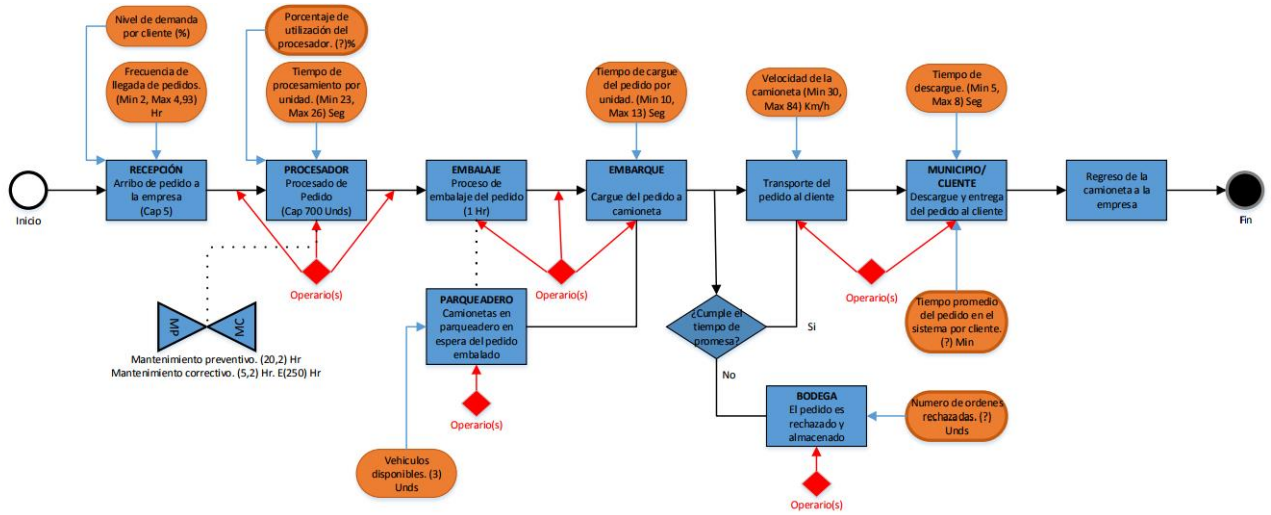


Fig. 1: Modelo conceptual proceso de fabricación y distribución realizado en Microsoft Visio basados en Educator Workshop: Teaching Simulation Using Flexim 2011 (Greenwood & Beaverstock)

El proceso en la empresa inicia en el momento en que un cliente realiza la compra de un número específico de unidades. La orden de compra generada es trasladada a la fábrica en función del momento de llegada (FIFO). El proceso de fabricación inicia en el momento en el cual la orden es recibida en la fábrica, en caso de que se esté procesando una orden, la orden nueva debe esperar la disponibilidad de la línea de producción. Debido a las características del producto, algunos clientes requieren mayores cantidades y, por lo tanto, la proporción de pedidos realizado por cada uno, así como la cantidad asociada a cada pedido, es variable y aunque están definidas por defecto en el modelo, estas pueden ser modificadas según criterios propios del usuario. Cada pedido es procesado de forma independiente y el total de las unidades de cada orden es embalado como una sola unidad que será finalmente enviada al cliente. La empresa adopta un tiempo de promesa para cada orden requerida en el momento en que se realiza la solicitud, en caso de que el tiempo de procesamiento de la orden supere el tiempo de promesa, se asume que la orden es rechazada por el cliente y las unidades procesadas serán enviadas a una bodega como inventario disponible para suplir una nueva orden. En el momento en que se completa la orden se solicita una camioneta al parqueadero de la compañía, la cual será la encargada de realizar la entrega de los productos. El tiempo de cargue y de descargue de la mercancía depende del número de unidades que compongan el pedido. De esta manera el tiempo de cargue es generalmente más alto que el tiempo de descargue. Cuando se termina

 ISBN 978-607-8242-11-5

el descargue en el lugar de destino la camioneta regresará de forma inmediata al parqueadero de la compañía y estará disponible para realizar un nuevo viaje.

Recolección de datos

Debido a la dificultad que representa realizar un análisis estadístico profundo que tenga como resultado una representación totalmente confiable del comportamiento de las diferentes variables que afectan el sistema, se ha adoptado la estimación como mecanismo base para determinar la distribución teórica de probabilidad y los valores iniciales para poner en marcha el modelo. Un ejemplo claro son las distancias existentes entre el lugar de origen y la localización de cada uno de los clientes, los cuales fueron obtenidos a través de la herramienta Google Maps y relacionados directamente con la herramienta a través del trazado de redes sobre un mapa a escala utilizado como fondo para la aplicación:

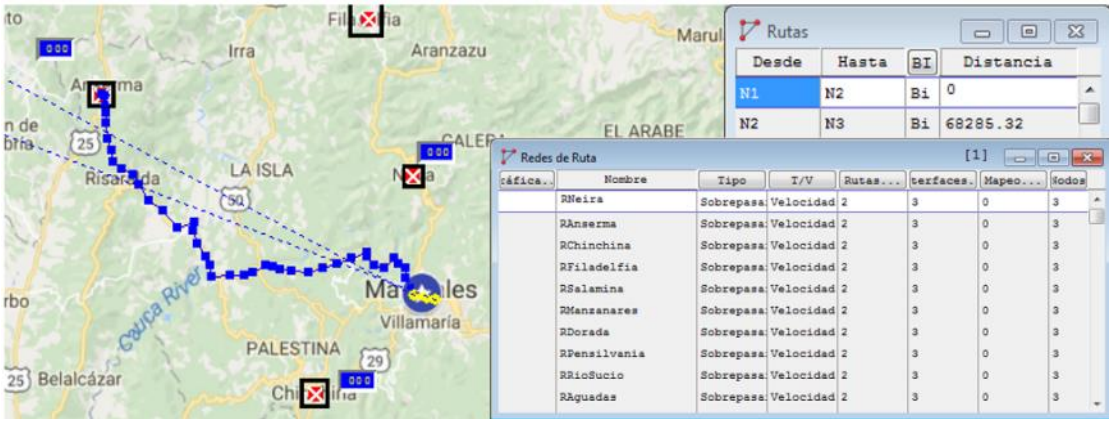


Fig. 2. Trazado de redes de ruta sobre mapa a escala en el software ProModel.

Cada uno de los valores de entrada necesarios para experimentar con el modelo, fueron establecidos inicialmente en función de las estimaciones encontradas, sin embargo, para hacer el modelo una herramienta práctica, se ha desarrollado una interfaz en Microsoft Excel que permite modificar cada uno de los parámetros a criterio de cualquier usuario que no tenga conocimiento avanzado en el uso de la herramienta ProModel.

TIEMPO ENTRE PEDIDOS (Horas)	
Mínimo	Máximo
2	4,93

NUMERO DE PROCESADORES
1

TIEMPO PROCESAMIENTO POR UNIDAD (Seg)	
Mínimo	Máximo
23	26

TIEMPO MANTENIMIENTO PREVENTIVO (Horas)	
Promedio	Desviación
20	2

TIEMPO MANTENIMIENTO CORRECTIVO (Horas)	
Promedio	Desviación
5	2

NUMERO DE CAMIONETAS
3

VELOCIDAD CAMIONETA (Km/h)		
Mínimo	Frecuente	Máximo
30	60	84

TIEMPO CARGUE UNIDAD (Seg)	
Mínimo	Máximo
10	13

TIEMPO DESCARGUE UNIDAD (Seg)	
Mínimo	Máximo
5	8

FRECUENCIA FALLOS (Dist Exponencial)
250

TIEMPO DE PROMESA ESTANDAR (Min)
575,9

REGISTRO DE CLIENTES			
Cliente	Probabilidad de hacer	Nivel de demanda	
		Mínima	Máxima
Filadelfia	4	300	400
Neira	5	300	450
Anserma	5	300	500
Aguadas	9	300	450
Pensilvania	9	300	475
Riosucio	10	300	520
Manzanares	12	300	550
Salamina	12	300	630
La Dorada	16	300	660
Chinchiná	18	300	700
TOTAL	100		

Fig. 3 Interfaz gráfica de interacción con ProModel diseñada en Microsoft Excel para modificar los niveles de las variables según los modelos de experimentación.

Codificación del modelo

Para traducir el modelo definido y conceptualizado en el modelo informático necesario para la experimentación se utilizó el software ProModel, paquete de simulación que aunque facilita el diseño y desarrollo del modelo a través de una interfaz gráfica, requiere la implementación de comandos específicos

ISBN 978-607-8242-11-5

diseñados para la aplicación. En especial, los comandos de código son empleados durante el enrutamiento y definición de las fases del proceso que deben seguir todos los elementos de entrada según el flujo establecido en el sistema.

```
Orden    Procesador
             Inc WIP, aUnidades
             Inc WIP_PROC, aUnidades

             If aUnidades>vInventario Then
             {
               vTiempoProceso = U[Arr1[3],Arr2[3]]
               vTP = vTiempoProceso*aUnidades
               Wait vTP sec
             }
             Else
             {
               Dec vInventario, aUnidades
```

```
If  vTTP > vTempPromesa Then

{
  vRetraso = vTTP - vTempPromesa

  Xwrite Retraso, Format(vRetraso, 6, 2)
  Writeline Retraso, '"

  #Display "Se retraso el pedido por" $ vRetraso

Inc vOrdenes_Rechazadas, 1

aCamioneta = 11

#Display "La orden fue rechazada"
```

Fig. 4 Ejemplo de código utilizado para procesamiento en el Software ProModel.

Verificación del modelo

Para comprobar que el modelo desarrollado tuviera todos los elementos propuestos y que su funcionamiento se ajustara al diseño previsto se emplearon varios mecanismos. En primer lugar desde el inicio del proyecto se trabajó con rigurosidad para realizar un refinamiento del modelo pasa a paso. Como premisa, la construcción se llevó a cabo siguiendo las fases del proceso establecidas de forma preliminar, la recepción de la orden, su procesamiento, embalaje y transporte. Inicialmente se diseñó el modelo para abastecer un solo cliente y progresivamente se agregaron elementos de mayor complejidad como la inclusión de los demás clientes (10 en total), el manejo de órdenes rechazadas como inventario y la utilización de camionetas como recursos para entregar los productos. ProModel al ser una herramienta diseñada específicamente para la simulación facilita al usuario realizar de forma constante una revisión visual observando el comportamiento de la animación y además cuenta con ventanas de seguimiento y depuración que proveen información textual detallada de qué está ocurriendo durante la simulación en caso de encontrar un error. De forma paralela en cada una de las fases programadas se incluyeron mensajes emergentes a través del comando “Display” que evidenciaban eventos ocurridos y ofrecían información del comportamiento del sistema en tiempo real

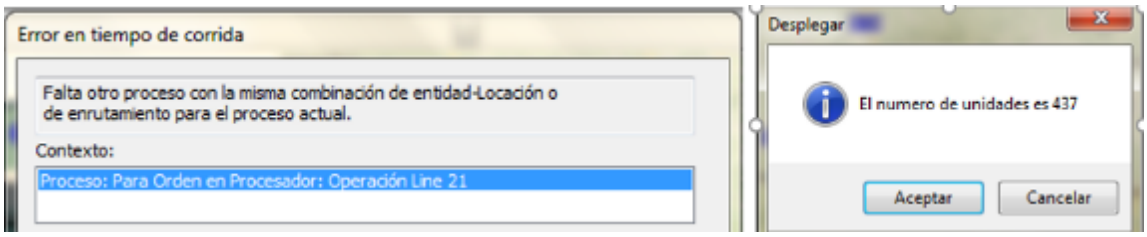


Fig. 5 Ejemplos de ventana de depuración y mensaje emergente programado para verificación durante el proceso de construcción del modelo.

Validación del modelo

Si bien a través de la simulación no es posible realizar una representación exacta del sistema de interés, debe garantizarse que el modelo desarrollado refleje el comportamiento del sistema. La animación generada a través del Software ProModel se considera una herramienta efectiva para determinar que el modelo representa la realidad, al menos en su aspecto visual, apoyado en la presentación en pantalla de variables e indicadores, y por lo tanto, fue el método seleccionado para realizar la validación del modelo.

ISBN 978-607-8242-11-5

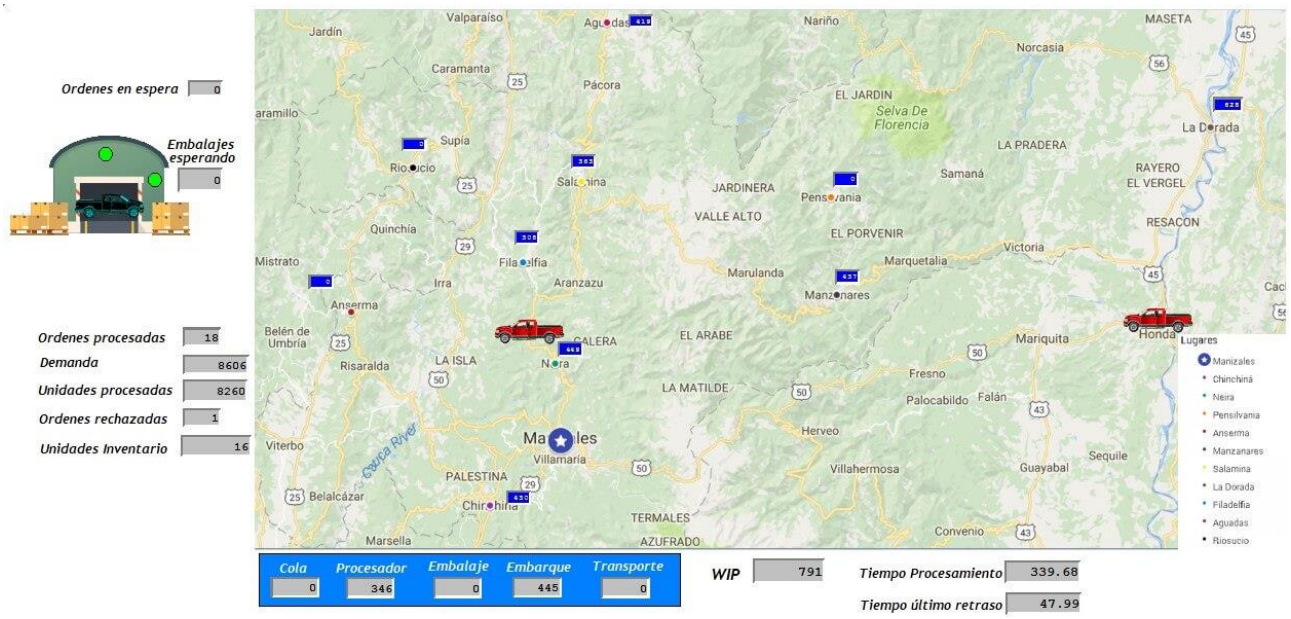


Fig. 6 Representación gráfica del modelo de simulación desarrollado en ProModel.

Diseño experimental

Al ser el modelo desarrollado una herramienta basada en la metodología de enseñanza aprendizaje ABP diseñada especialmente para la experimentación, las alternativas o escenarios a ser simulados son ilimitados y por lo tanto dependen específicamente de la problemática o caso de estudio propuesta. Debe tenerse en cuenta que modificar los niveles de una o más variables tiene como consecuencia la generación de un nuevo escenario, cada uno de los cuales responde a un modelo de decisión que representa el efecto sobre las medidas de desempeño del sistema que tienen dichas modificaciones. La expresión (1) indica el modelo lógico-matemático representado a través de la simulación. En este los niveles de las *m* variables de respuesta o medidas de desempeño *(yi)* dependen de las relaciones lógicas de las *nj* variables de decisión *(Xi,j)* descritas por la función *fj(Xi,j)*

$$y_j = f_j\left(x_{i,j}\right) \; donde \; 1 \leq i \leq n_j; 1 \leq j \leq m \qquad (1)$$

En la tabla 1 se presentan posibles instancias del modelo de decisión enunciado en la expresión (1), las cuales son de aplicación práctica en el análisis de desempeño de un sistema de distribución logístico.

Tabla 1: Posibles instancias del modelo de decisión.

Xij	Descripción de la variable de decisión	Medida de desempeño
$X_{1,1}$	Frecuencia de llegada de pedidos	Y_1 Porcentaje de utilización procesador
$X_{2,1}$	Nivel de demanda por cliente	
$X_{3,1}$	Tiempo de procesamiento por unidad	
$X_{4,1}$	Numero de procesadores en el sistema	
$X_{1,2}$	Tiempo estandar de promesa	Y_2 Numero de ordenes rechazadas
$X_{2,2}$	Tiempo de procesamiento por unidad	
$X_{3,2}$	Numero de vehiculos disponibles	
$X_{4,2}$	Frecuencia de llegada de pedidos	
$X_{5,2}$	Frecuecia de fallos en el sistema	
$X_{6,2}$	Tiempo necesario mantenimiento correctivo	
$X_{7,2}$	Tiempo necesario mantenimiento preventivo	
$X_{1,3}$	Numero de vehiculos disponibles	Y_3 Tiempo promedio de orden en el sistema por cliente
$X_{2,3}$	Velocidad de los vehiculos	
$X_{3,3}$	Tiempo de procesamiento por unidad	
$X_{4,3}$	Tiempo de cargue	
$X_{5,3}$	Tiempo de descargue	

ISBN 978-607-8242-11-5

Atendiendo al modelo de decisión, se han establecido parámetros iniciales de corrida del modelo, que a través de las estimaciones realizadas se ajustan a la situación problemática encontrada. Estos parámetros propuestos fueron sujetos a evaluación y análisis antes de ser modificados a través de la interfaz de Microsoft Excel que se provee junto con el modelo desarrollado y con ello evaluar diferentes escenarios que dieran respuesta a los objetivos planteados para la simulación. Los escenarios que satisfacen las condiciones propuestas son variados, sin embargo, atendiendo a las características del documento y a la practicidad del desarrollo, se plantean entonces dos escenarios alternativos alterando los niveles de las variables que se consideraron oportunas para atender a los objetivos propuestos.

Tabla 2: Niveles de las variables de decisión para cada uno de los escenarios estudiados

Variable de decisión	Escenario original	Escenario 1	Escenario 2
Número de procesadores	1	▲ 2	→ 1
Tiempo mínimo de procesamiento por unidad (Seg)	23	23	▼ 20
Tiempo máximo de procesamiento por unidad (Seg)	26	26	▼ 23
Número de camionetas disponibles	3	3	▲ 4
Tiempo mínimo de cargue (Seg)	10	10	▼ 6
Tiempo máximo de cargue (Seg)	13	13	▼ 8
Tiempo mínimo descargue (Seg)	5	5	▼ 3
Tiempo máximo descargue (Seg)	8	8	▼ 5

Análisis de salida

La fase final de la metodología adoptada se enmarca en el análisis de los resultados obtenidos mediante la experimentación al implementar diferentes configuraciones del modelo desarrollado. Estos resultados están asociados a las medidas de desempeño del sistema y su fin último es lograr que den respuesta a los objetivos planteados para la simulación. De acuerdo a lo anterior se presenta a continuación un resumen con algunas medidas de desempeño claves para el caso analizado generadas para cada uno de los escenarios planteados de forma previa.

Tabla 3. Resumen de resultados de la simulación extraídos de la plataforma Output Viewer ofrecida por ProModel

Medida de desempeño del sistema	Escenario original	Escenario 1	Escenario 2
Ordenes procesadas	202	▲ 207	▲ 203
Tiempo de espera promedio de la orden	9,48	▼ 6,8	▼ 1,5
Tiempo promedio de una orden en el sistema	463,24	▼ 444,6	▼ 403,1
Porcentaje de utilización procesador	76,03	▼ P1- 62,16 ▼ P2- 26,18	▼ 74
Numero de ordenes rechazadas	**22**	▼ **0**	▼ **11**

Análisis escenario 1

En el primer escenario propuesto se realizó únicamente la modificación del número de procesadores del sistema, entendido como las líneas de producción con las que cuenta la empresa. Se obtuvieron resultados experimentando con dos procesadores y se logró una reducción total del número de órdenes rechazadas alcanzando el objetivo propuesto para la simulación. Si bien esta configuración es satisfactoria, debe considerarse que realizar el montaje de una línea de producción adicional implica la inversión de una cantidad de recursos significativos y por lo tanto no será siempre una opción viable para solucionar la problemática. Además, como se observa en la tabla 3, al mantenerse los niveles de demanda constante, el número de órdenes procesadas no se incrementará de forma importante y por lo tanto se crea una capacidad ociosa en el sistema, observada en el porcentaje de utilización de ambos procesadores de 62% y 27%, la cual de no ser aprovechada genera costos fijos para la organización. Por otro lado, se observa que el número de procesadores no está siendo un factor determinante en el tiempo que permanece una orden en el sistema, ya que la reducción de tiempo es únicamente del 4%.

ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis escenario 2

Atendiendo a lo anterior se considera oportuno evaluar otros escenarios modificando parámetros diferentes al número de procesadores del sistema. Para ello en un segundo escenario se han propuesto varios cambios. En primer lugar, se busca la reducción de los tiempos de procesamiento a través de la implementación de estrategias de optimización. Por otra parte, la contratación de un vehículo adicional para satisfacer los procesos de distribución junto con un auxiliar para los procesos de cargue, con lo cual se aumenta la disponibilidad de vehículos y se reducen de forma considerable los tiempos de cargue de las órdenes en la empresa. Realizar estas modificaciones en el sistema, al igual que el escenario propuesto anteriormente, es una configuración satisfactoria. Sin embargo, al realizar un comparativos de las implicaciones económicas que tendría la implementación de cada una de las opciones, resulta viable adoptar la segunda opción propuesta. Se logró una reducción en las órdenes rechazadas de un 50%, con lo cual se alcanza y sobrepasa el objetivo propuesto. Por otro lado, fue posible reducir en un 13% el tiempo de permanencia de una orden en el sistema, en donde se evidencia que esta medida de desempeño presenta mayor dependencia del número de vehículos con los cuales cuenta actualmente la compañía para realizar los procesos de distribución. Por último, teniendo en cuenta que los niveles de demanda y la frecuencia de llegada de pedidos se mantienen constantes, mejorar los tiempos de procesamiento tiene como consecuencia una atención más rápida de las ordenes, aunque la utilización del procesador se mantiene estable.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que enfoque adoptado se orienta hacia el desarrollo una herramienta de experimentación que soporte estrategias de enseñanza-aprendizaje basada en la metodología ABP y que el carácter del modelado y la simulación no permite hacer una abstracción exacta del sistema real, se ha logrado desarrollar un modelo válido y funcional que refleja los atributos principales de un sistema de distribución logístico y permite a los interesados comprender la dinámica de los diferentes actores sistema, así como el efecto que tiene sobre el mismo la modificación de ciertos parámetros y variables involucrados en el desempeño del mismo. Además, gracias al diseño de la interfaz a través de Microsoft Excel, se ha dotado a la herramienta de un carácter práctico y versátil que permite a cualquier interesado con un conocimiento mínimo en software de simulación realizar la experimentación y evaluación de escenarios completamente diferenciados.

En este sentido, los resultados que pueden ser obtenidos a través de la simulación son amplios y permiten determinar diferentes medidas de desempeño del sistema analizado. Como se evidencio a través de la implementación de la plataforma fue posible realizar la comprobación de diferentes configuraciones de los parámetros del sistema, así como confrontar los efectos de diferentes decisiones que no siempre resultan ser las de mayor conveniencia y que de no ser evaluadas podrían generar efectos secundarios no deseados en el sistema o inclusive alterar negativamente el desempeño del mismo.

REFERENCIAS

Beaverstock, M., Greenwood, A., Lavery, E., & Nordgren, W. (2011). *Applied simulation: modeling and analysis using FlexSim*. BookBaby.

Duque, M. (2008). Ciencia e ingeniería en la formación de ingenieros para el siglo XXI: fundamentos, estrategias y casos. ACOFI, Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería

Giraldo, J. G. (2014). Simulación de sistemas de producción y de servicios. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Norman, G. R., & Schmidt, H. G. (1992). The psychological basis of problem-based learning: A review of the evidence. Academic medicine, 67(9), 557-65.

Parra, E. C. (2006). Mediadores cognitivos en educación superior investigación de didácticas para el pensamiento crítico. Universidad de Cartagena

 ISBN 978-607-8242-11-5

Optimización del Proceso Secuencial Coagulación-Floculación -Electro-Oxidación para el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil

Edison GilPavas[1,2a], Paula Arbeláez[1], Carlos M. Gómez[1], José Medina[1], Izabela Dobrosz-Gómez[1,2b], Miguel-Ángel Gómez-García[1,2a]

(1) GIPAB: Grupo de Investigación en Procesos Ambientales. Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad EAFIT, Cr 49 #7 sur 50, Medellín-Colombia. (e-mail: egil@eafit.edu.co, parbela2@eafit.edu.co, cgomezat@eafit.edu.co, jmedin11@eafit.edu.co

(2) PRISMA: Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados. [a]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [b]Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(e-mail: idobrosz-gomez@unal.edu.co; magomez@unal.edu.co)

Resumen

La industria textil utiliza una gran cantidad de compuestos químicos durante su proceso de producción. Entre ellos se encuentran: colorantes, detergentes, ceras, tensoactivos, disolventes, sales y otros compuestos orgánicos. Como consecuencia, las aguas residuales textiles contienen alta carga de contaminantes orgánicos, representado en altos valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (COT), así como baja biodegradabilidad, expresada en una baja relación entre la el Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y DQO (DBO_5/DQO). Esto implica la necesidad de efectuar un tratamiento químico antes de que las aguas residuales sean descargadas al ambiente o a una planta de tratamiento biológico. La degradación de los contaminantes recalcitrantes puede lograrse mediante los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO´s), entre ellos los Procesos Avanzados de Oxidación Electroquímicos (PAOE´s), una importante alternativa para el tratamiento de una amplia gama de contaminantes no biodegradables, tales como: herbicidas, lixiviado de vertederos, aguas residuales de la industria textil, entre otros (Brillas y Martínez-Huitle, 2015; GilPavas *et al.*, 2016). Los PAO´s son basados en la generación de especies altamente reactivas y no selectivas, principalmente los radicales hidroxilo ($^{\bullet}OH$), responsables de la oxidación del sustrato. El tratamiento convencional para aguas residuales textiles consta del proceso de Coagulación-Floculación (C-F) seguido por filtración (Amor *et al.*, 2015). Sin embargo, esta etapa sólo puede eliminar materia orgánica en suspensión, mientras que los compuestos orgánicos solubles no se ven afectados. Esto implica la necesidad de introducir una etapa de tratamiento posterior. Así, la coagulación es un proceso efectivo de "pretratamiento". El acople del proceso C-F con el de Electro-oxidación (EO) puede ser una alternativa apropiada para lograr alto grado de descontaminación de aguas residuales.

Este trabajo presenta la evaluación del proceso secuencial C-F-EO para el tratamiento de efluentes textiles de una instalación industrial ubicada en Medellín (Colombia). Para este propósito, inicialmente, el proceso C-F se optimizó mediante el test de Jarras. Posteriormente, se empleó la Metodología de la Superficie de Respuesta (MSR) acoplada a un diseño estadístico de experimentos Box-Behnken (DBB) con el objetivo de optimizar las condiciones de operación del proceso EO, en términos de la eficiencia de la degradación de la materia orgánica. El proceso C-F removió el 88% del color, 48% de la DQO y 42% del COT, con una dosis de coagulante ($Al_2(SO_4)_3$) de 600 mg/L a pH natural (8.2). Posteriormente, el efluente del proceso C-F se trató mediante el proceso EO, eliminando completamente el color, el 94% de la DQO y el 75% del COT en 45 minutos de electrólisis, a pH natural, conductividad 4.7 mS/cm y densidad de corriente 15 mA/cm^2.

Referencias

Amor, C., De Torres-Socías, E., Peres, y otros 4 autores. Mature landfill leachate treatment by coagulation-flocculation combined with Fenton and solar photo-Fenton processes. J. Hazard. Mater. 286, 261–268 (2015).

Brillas, E., Martínez-Huitle, C.A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An Update. Rev. Appl. Catal. B Environ. 166–167, 603–643 (2015).

GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., Gómez-García. Electrochemical degradation of acid yellow 23 by anodic oxidation–optimization of operating parameters. J. Environ. Eng. (ASCE) 142, 5 (2016).

ISBN 978-607-8242-11-5

Procesos Electroquímicos para el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil: Optimización de las Condiciones de Operación

Edison GilPavas[1,2a], Paula Arbeláez[1], Carlos M. Gómez[1], José Medina[1], Izabela Dobrosz-Gómez[1,2b], Miguel-Ángel Gómez-García[1,2a]

(1) GIPAB: Grupo de Investigación en Procesos Ambientales. Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad EAFIT, Cr 49 #7 sur 50, Medellín-Colombia. (e-mail: egil@eafit.edu.co, parbela2@eafit.edu.co, cgomezat@eafit.edu.co, jmedin11@eafit.edu.co)

(2) PRISMA: Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados. [a]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [b]Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(e-mail: idobrosz-gomez@unal.edu.co; magomez@unal.edu.co)

Resumen

Las aguas residuales de la industria textil son mezclas de tal complejidad que hace de su tratamiento un verdadero desafío. Los Procesos biológicos, que son poco intensivos en el consumo de energía, son especialmente empleados para el tratamiento efluentes contaminados con materia orgánica biodegradable. Sin embargo, la naturaleza recalcitrante de diversos colorantes, junto con su toxicidad para los microorganismos, hace que el tratamiento biológico sea inadecuado (Verma *et al*., 2012). Otros métodos de oxidación, como los procesos Fenton, foto-químicos, electro-oxidación, con ozono, han demostrado gran versatilidad. Sin embargo, su implementación para el tratamiento de aguas residuales textiles es bastante costosa. Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO´s), entre ellos los Electroquímicos (PAOE´s), se han constituido en una opción para el tratamiento de este tipo de contaminantes. Con ellos es posible generar *in situ* radicales hidroxilos (•OH) capaces de oxidar compuestos orgánicos de forma no selectiva y con altas velocidades de reacción, alcanzando la mineralización completa de los contaminantes o su degradación en sustancias más fácilmente biodegradables (Brillas y Martínez-Huitle, 2015). Por todo lo anterior, el desarrollo de métodos de tratamiento combinados (v.g., EC-EO) podría ser una opción para superar las desventajas de los procesos individuales (GilPavas *et al*., 2016).

En esta investigación se evaluó una metodología sistemática para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil mediante la implementación de un proceso hibrido de electro-coagulación (EC)/electro-oxidación (EO) para el tratamiento de efluentes textiles de una instalación industrial ubicada en Medellín (Colombia). Se tiene como objetivo garantizar la máxima eficiencia de degradación de contaminantes y materia orgánica, uso de equipos compactos, menor consumo de energía, costos de operación bajos, facilidad en la implementación y manipulación y que sean "amigable con el ambiente". Para tales propósitos, se empleó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) acoplada a un diseño estadístico de experimentos Box-Behnken para optimizar las condiciones de operación del proceso. A las condiciones óptimas, el proceso EC eliminó el 94% del color, 45% de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 40% del Carbono Orgánico Total (COT), al pH natural (9.28) del agua residual, con una densidad de corriente (j) de 5 mA/cm^2, 60 RPM de agitación, y utilizando ánodo de Fe y cátodo de diamante dopado con boro (DDB), durante 10 minutos de electrolisis. Al acoplarlo al proceso de EO, después de 30 minutos de electrolisis, se alcanzó una degradación total de color, 88% de la DQO y 79% de la COT, bajo las siguientes condiciones de operación: pH = 3, j =10 mA/cm^2, 240 RPM de agitación, ánodo de DDB y cátodo de Fe. Los costos totales de operación, incluyendo costos de los reactivos químicos y electrodos, consumo de energía y disposición de lodos, fue de 3.75 USD/m^3.

Referencias

Brillas, E., Martínez-Huitle, C.A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An Update. Rev. Appl. Catal. B Environ. 166–167, 603–643 (2015).

GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., Gómez-García. Electrochemical degradation of acid yellow 23 by anodic oxidation–optimization of operating parameters. J. Environ. Eng. (ASCE) 142, 5 (2016).

Verma, A.K., Dash, R.R., Bhunia, P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. Journal of Environmental Management, 93, 154-168 (2012).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Detección de variabilidad en procesos hospitalarios aplicando minería de procesos

Dr.C Arturo Orellana García[1,3], Dra.C Vivian Estrada Sentí[2] y Dr.C Damián Pérez Alfonso[3]
(1) Centro de Soluciones de Informática Médica, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.
(2) Dirección de Postgrado Internacional, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.
(3) Grupo de Investigación de Minería de Procesos. Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.

Resumen:
Los sistemas de información hospitalaria cuentan con un volumen importante de datos, sin embargo, carecen de mecanismos que permitan analizar la ejecución de sus procesos e identificar variabilidad. La variabilidad puede observarse en prácticamente cada paso del proceso asistencial y a varios niveles de agrupación: poblacional e individual. Desde un punto de vista poblacional se comparan tasas de realización de un procedimiento clínico, como pueden ser intervenciones quirúrgicas o ingresos hospitalarios en un período de tiempo. Las técnicas de minería de procesos analizan los datos reales de sistemas informáticos y son útiles para la detección de variabilidad en la ejecución de los procesos de negocio. La presente investigación propone la aplicación de técnicas de minería de procesos, seleccionadas a partir de un riguroso estado del arte para el análisis de los procesos hospitalarios desde sus sistemas de información y materializadas en un modelo computacional. El Modelo para la Detección de Variabilidad MDV se instrumentó exitosamente en el sistema XAVIA HIS desarrollado por la Universidad de las Ciencias Informáticas UCI, donde fueron adaptadas e integradas las técnicas de minería de procesos; de esta forma el modelo MDV contribuye al proceso de informatización de la salud en Cuba. La solución propicia la utilización de una tecnología emergente en áreas como la industrial y empresarial en el entorno sanitario. Esta beneficia importantes funciones gerenciales como la gestión, control y planificación de recursos y servicios sanitarios.

Palabras clave: Sistema de información hospitalaria, minería de procesos, modelo de proceso, variabilidad.

Introducción

Los procesos sanitarios están sometidos frecuentemente a entornos cambiantes y regidos por profesionales con formación y criterios dispares, que condicionan el transcurrir de cada ejecución con sus decisiones [1]. Los análisis de procesos en instituciones sanitarias suelen ser subjetivos, además de costosos en tiempo y recursos [2][3][4]. Por lo general estos análisis no tienen en cuenta la variabilidad existente en la ejecución de los procesos.

Dos factores que contribuyen a la existencia de errores en la industria de la salud son el alto grado de variabilidad del proceso de unidad a unidad (se refiere a pacientes y recursos) y las dificultades para la identificación de la misma [5]. Según [6] la variabilidad en los procesos hospitalarios está presente, cada vez que se repite un proceso y hay ligeras variaciones en las distintas actividades realizadas que, a su vez, generan variaciones en los resultados de cada ejecución.

La variabilidad impacta negativamente sobre importantes funciones gerenciales como la planificación, la gestión y el control de los recursos [7] [8] [1]. Además, propicia la ocurrencia de errores médicos en el diagnóstico y tratamiento de pacientes, insuficiencias en la calidad de los servicios, malas prácticas clínicas y la aparición de eventualidades o anomalías en el proceso de atención [9] [10] [11] [12].

La variabilidad en los procesos de negocio se clasifica, según la literatura consultada en causa común (identificable) o causa especial (aleatoria). La variabilidad de causa común o identificable existe cuando no presenta un comportamiento estadístico y no son previsibles las salidas. Mientras que la variabilidad de causa especial o aleatoria se manifiesta al existir un comportamiento estadístico y predecible; sobre esta se puede ejercer un control estadístico [13] [14].

Se realizaron 11 entrevistas a especialistas de la gestión hospitalaria (Asesores de Registros Médicos, Estadísticos y Médicos Administrativos) en instituciones cubanas. Estas instituciones fueron: Hospital Hermanos Ameijeiras (4), Hospital Militar Central Doctor Carlos Juan Finlay (1), Hospital Naval Luis Díaz Soto (1), Clínica Central Cira García (2), Hospital Pediátrico Doctor Juan Manuel Márquez (1) y el Centro Nacional de Cirugía de Mínimo Acceso (2). Al respecto, los entrevistados plantean que la variabilidad en la ejecución de los procesos hospitalarios ha incidido negativamente sobre el gasto del sector en Cuba, además:

Afirman que para Cuba sería importante detectar y reducir la variabilidad en sus procesos en función de aumentar la calidad de los servicios médicos y beneficiar la economía del país.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Consideran necesario analizar alternativas para el ahorro de recursos y la optimización de los servicios que se brindan

Afirman que en los procesos hospitalarios de Cuba se manifiesta la variabilidad Identificable y Aleatoria, sin embargo, consideran que se debe prestar mayor atención a la variabilidad aleatoria en función del flujo de actividades y los tiempos de ejecución.

En [5] se plantea que las investigaciones sobre la variabilidad en procesos de salud constituyen una prioridad, donde los métodos y herramientas de análisis de datos pueden desempeñar un papel importante y fundamental. Respecto al uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones los entrevistados:

- Sugieren crear alternativas basadas en fuentes de información no subjetivas, que ayude a detectar la variabilidad en los procesos hospitalarios.

- Consideran pertinente y novedoso utilizar los sistemas de información de salud para analizar los procesos hospitalarios, debido a que pueden ser útiles para detectar variabilidad.

- Consideran novedoso, actual y estratégico la aplicación de tecnologías emergentes para los análisis de datos y procesos en instituciones sanitarias.

Una tecnología de impacto creciente en esferas como la industrial y empresarial lo constituye la minería de procesos [15] [16]. Posibilita entender cómo son ejecutados en realidad los procesos en sistemas automatizados. Su aplicación ayuda a identificar cuellos de botella, anticipar problemas, registrar violaciones de políticas, recomendar contramedidas, y simplificar procesos para la mejora del funcionamiento del negocio.

Aunque la aplicación de esta tecnología es reciente, las empresas, centros e instituciones a nivel mundial la están incorporando a sus aplicaciones con el objetivo de descubrir, monitorear y mejorar sus procesos de negocio [16] [17]. De igual forma, se observa el desarrollo de soluciones informáticas para la mayoría de los sectores sociales, no así en la rama hospitalaria, la cual tiene una influencia alta en la calidad de vida de los ciudadanos [18] [19].

El profesor Will van der Aalst precursor de la minería de procesos, en la entrevista: "Could BPM and Process Mining Save US Healthcare 600 Billion Dollars? " plantea que: "Tenemos un interés particular en la salud porque los procesos son mucho más caóticos que en otras industrias, y los ahorros potenciales son enormes (…) Esto ilustra que la asistencia sanitaria es un dominio de aplicación muy difícil, y por lo tanto interesante para BPM y la minería de procesos" [20]. En esta entrevista se afirma que es posible ahorrar 600 billones de dólares a la economía estadounidense si se aplica BPM (Business Process Management, por su nombre en inglés) y la minería de procesos en su sector sanitario.

A partir de las entrevistas y el análisis documental realizado se identificaron un conjunto de insuficiencias o limitaciones relacionadas a la detección de variabilidad en los procesos hospitalarios, entre las que se destacan:

- Poca rapidez, flexibilidad y objetividad en la toma de decisiones sobre la ejecución de los procesos hospitalarios, pues las decisiones en su mayoría se basan en elementos subjetivos.

- Insuficiente efectividad en las técnicas y métodos para analizar los procesos del sector de la salud y detectar variabilidad en su ejecución.

- Escaso aprovechamiento de los datos almacenados en sistemas de información de salud, limitando el acceso a una importante fuente de conocimientos.

- Insuficientes herramientas informáticas en el sector hospitalario que permitan detectar efectivamente la variabilidad y el análisis de sus procesos.

Teniendo en cuenta los elementos analizados, la presente investigación se propone desarrollar un modelo computacional para la detección de variabilidad en procesos hospitalarios utilizando técnicas de minería de procesos.

Selección de técnicas de minería de procesos

Se realizó una revisión de las investigaciones de minería de procesos dirigidas al entorno hospitalario. Para ello la búsqueda se centró en tres bases de datos generales: "Web of Science", "PubMed" y "Google Scholar",

 ISBN 978-607-8242-11-5

utilizando las frases "minería de procesos", "process mining", "salud" y "healthcare". En la "Web of Science" fueron identificadas 32 investigaciones de interés, en el caso de "PubMed" 17 y en "Google Scholar" más de 60. Fueron identificados además, un conjunto de 59 casos de estudio, en el repositorio de análisis de procesos hospitalarios, en la Universidad de Eindhoven en Holanda.

Los análisis de procesos en instituciones sanitarias, han sido orientados a la frecuencia de ejecución, detección de fraudes, análisis de tiempo, detección de desviaciones, identificación de cuellos de botella, desviación típica, varianza, entre otros [2] [21] [22]. Desde la minería de procesos estos análisis se evidencian en [18] [23] [24] [25].

Para la presente investigación, los elementos descritos anteriormente se proponen como criterios para la selección de técnicas de minería de procesos para detectar variabilidad en procesos hospitalarios. La decisión es apoyada a partir de los análisis que se realizan en la práctica clínica y las opiniones de expertos del dominio entrevistados. En las investigaciones realizadas se evidencia como estos criterios son abordados desde la minería de procesos para obtener conocimientos de la ejecución de los procesos hospitalarios.

Las técnicas más utilizadas para el análisis de procesos hospitalarios son Heuristics Miner, identificada en 19 investigaciones para análisis de control de flujo y obtener una vista global del proceso [26] [27] [28]. Y La técnica Fuzzy Miner, utilizada en al menos 15 investigaciones para el agrupamiento (clustering) de actividades, tratamiento del ruido y de excepciones y los análisis de frecuencia de ejecución [28] [29] [30]. Son utilizadas además las técnicas Trace Clustering [29]; [31] [32], Performance [29] [33] Alpha Miner [34], Dotted Charts [35], Genetic Miner [36], Inductive Miner [28] y otros [33] [37].

En la presente investigación se incluye además dos nuevos criterios a tener en cuenta: la comprensión de los modelos y el uso de los valores por defecto de los parámetros de configuración de las técnicas de minería de procesos, orientados a la usabilidad de las mismas por usuarios del dominio sanitario. La evaluación de los dos criterios se basó en una encuesta desarrollada por [38] en la red LinkedIn, la cual solicitó a usuarios y expertos de la minería de procesos identificar cuáles son las técnicas que más utilizan para realizar análisis de procesos. Los resultados destacan, entre más de 600 técnicas existentes, Heuristics Miner, Fuzzy Miner y los análisis de tiempo con Dotted Chart Analyzer.

Así mismo, se les solicitó a los encuestados que indicaran cuáles técnicas según su experiencia, son intuitivas, fáciles de entender, confiables, rápidas y si los valores predeterminados se pueden utilizar garantizando un buen resultado. Los encuestados favorecieron las técnicas Alpha, los análisis de tiempo a partir de Dotted Chart, Fuzzy Miner, Heuristics Miner y Replay e log on Petri Net for Conformance Analysis.

La técnica Inductive visual Miner (IvM) es desarrollada en 2014 [39]; actualmente es considerada una de las más usadas en las investigaciones de minería de procesos [28]. Genera modelos de procesos animados en una notación inspirada en la BPMN, lo cual contribuye a mejorar el entendimiento de los mismos por parte de los usuarios ajenos a la Minería de procesos. Estos modelos permiten apreciar con mayor facilidad la formación de cuellos de botella y las desviaciones de los procesos que se modelan, además de las actividades frecuentes e infrecuentes que los componen.

La Minería de Variantes (Variants Miner) es desarrollada en 2014 y posee un enfoque diferente al de otras técnicas de minería de procesos, al proponer varias descomposiciones alternativas para el mismo subproceso, utilizando diferentes operadores de control de flujo. Esto permite controlar el impacto estructural del ruido y la ausencia de información en la construcción de las alternativas. Las alternativas se construyen al descartar o considerar comportamientos poco frecuentes que están contenidos en el registro de eventos. También en dicha construcción se asumen comportamientos ausentes del registro [40]. Debido a las características de los procesos hospitalarios, en cuanto a las variaciones que poseen, esta técnica se considera interesante por su capacidad de mostrar las diversas variantes alternativas de la ejecución de un proceso.

La técnica Replay a log on Petri Net for Performance/Conformance (en lo adelante “Replay P/C “) es una técnica de chequeo de rendimiento y conformidad que contribuye a identificar las desviaciones en el tiempo de cumplimiento de los diferentes procesos. Está directamente relacionada con el análisis temporal y clasifica las actividades según su desviación con respecto al tiempo medio de estancia de las transiciones [41]. Entre sus características se encuentra: extraer información de tiempo, detectar problemas, detectar cuellos de botella y generar modelos integrados mostrando información de los tiempos de ejecución, estadía, espera y desviación típica.

La Tabla I muestra cinco técnicas seleccionadas a partir de los análisis anteriores y evaluadas con los criterios definidos.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla I. Técnicas de minería de procesos evaluadas con los criterios más frecuentes para el análisis de procesos hospitalarios. Fuente: elaboración propia

Criterios	Técnicas de minería de procesos				
	Heuristics Miner	Fuzzy Miner	Inductive visual M.	Variants Miner	Replay P/C
Análisis de frecuencia	X	X	X	X	
Análisis de subprocesos	X	X	X	X	
Detección de desviaciones	X	X	X		
Detección de fraudes		X	X		
Análisis de tiempo		X	X	X	X
Cuellos de botella			X		X
Vista global del proceso	X		X	X	X
Comprensión	X	X	X	X	X
Valores por defecto	X	X	X	X	X

Según sus características Heuristics Miner es útil para obtener una vista global del proceso. Por su parte Fuzzy Miner permite obtener una vista de la frecuencia de ejecución de las actividades de procesos, así como la detección de desviaciones. Inductive visual Miner es una de las técnicas más recientes, sin embargo, es utilizada frecuentemente en análisis de tiempo y es considerada por los expertos como una de las más intuitivas. Variants Miner, por su parte permite realizar análisis de las variantes alternativas del proceso, además es posible incorporarle análisis basados en tiempo, lo cual enriquece el modelo que se obtenga. Replay P/C es útil para identificar cuellos de botella y realizar análisis de rendimiento. Todas las técnicas son multicriterios lo que propicia realizar análisis desde diferentes perspectivas.

MDV: Modelo para la detección de variabilidad

Los enfoques científicos empleados en el diseño del modelo propuesto son los siguientes:

- Mejora continua: el perfeccionamiento continuo, la iteración, permanente mejora, según necesidades internas y variaciones del contexto interno y externo.

- Enfoque sistémico: se expresa en el modelo propuesto a través de la interacción entre sus componentes de forma coherente para funcionar como un todo, con el objetivo de contribuir a la detección de variabilidad en la ejecución de procesos hospitalarios aplicando técnicas de minería de procesos.

- Integralidad: debido a que los componentes del modelo cubren de manera integrada y coherente la mayoría de los elementos necesarios para la detección de variabilidad en procesos hospitalarios.

- Estratégico: se expresa en la generación de los registros de eventos de sistemas de información de salud para el análisis en función de detectar, evaluar, predecir, descubrir y recomendar acciones que apoyen la toma de decisiones como parte de la retroalimentación del modelo. Los análisis constituyen un aspecto estratégico para contribuir a la mejora de importantes funciones gerenciales como la planificación, el control y la gestión de los recursos, así mismo favorecer la ejecución de los procesos de negocio en las organizaciones sanitarias.

Las premisas con vistas a la aplicación del modelo propuesto son:

- La calificación necesaria de los administrativos y analistas de procesos para el uso eficiente del modelo propuesto para detectar variabilidad.

- La voluntad institucional y la visibilidad de los recursos necesarios para apoyar la aplicación del modelo.

- La existencia de tecnologías para almacenar datos de eventos en forma de trazas de ejecución en los sistemas de información de salud.

- La calidad de los datos contenidos en los registros de eventos en los sistemas de información de salud para detectar variabilidad en sus procesos.

Los componentes del modelo elaborado son:

- Generación de registros de eventos

ISBN 978-607-8242-11-5

- Técnicas de minería de procesos para la detección de variabilidad

El esquema de la Fig. 1 representa una gráfica con la interacción de estos componentes y la interrelación que se produce entre ellos.

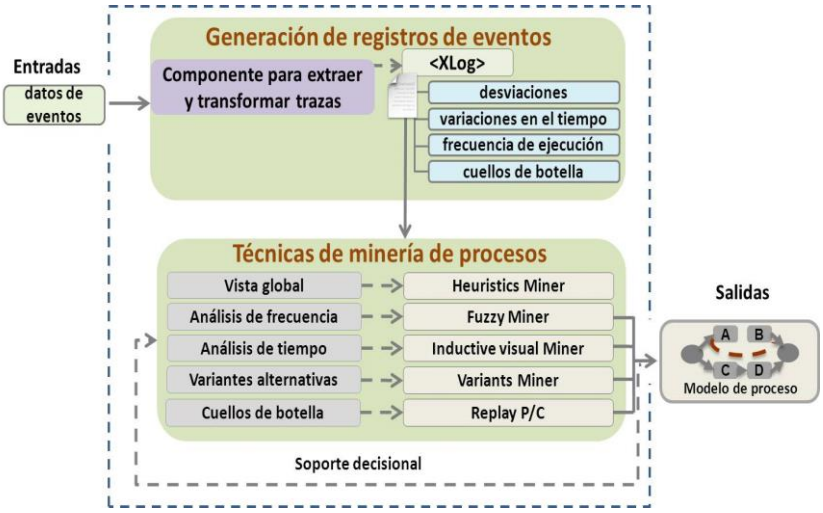


Figura 1. Modelo computacional para detectar variabilidad basado en técnicas de minería de procesos. Elaboración propia.

Las entradas del modelo son los datos de eventos referentes a los pacientes, los profesionales de la salud, administrativos o directivos y los recursos.

Las salidas son los modelos de proceso obtenidos a partir de las distintas configuraciones y los análisis basados en los registros de eventos. El objetivo del modelo es integrar un conjunto de técnicas, componentes y conceptos asociados a la minería de procesos y la detección de variabilidad en la ejecución de procesos hospitalarios en sistemas de información de salud.

El flujo conceptual del modelo comienza con la utilización de las trazas de ejecución de las actividades hospitalarias, contenidas en sus sistemas de información, tanto especializados como integrales.

La disponibilidad de las trazas de ejecución permite su extracción y transformación en registros de eventos de formato estándar XES. Los registros de eventos almacenan información de variabilidad como desviaciones, variaciones en el tiempo, frecuencia de ejecución o cuellos de botella. El componente de Generación de registros de eventos extrae las trazas de sistemas de información de salud, genera registros de eventos y propicia el análisis por las técnicas de minería de procesos. Las técnicas de minería de procesos reciben los registros de eventos y generan como salida modelos de la ejecución de los procesos.

El modelo parte de las necesidades de las instituciones sanitarias y se retroalimenta de los casos analizados, los resultados de su instrumentación y cuando se identifican nuevos factores que influyen en este proceso a partir de:

- La incorporación de nuevas técnicas de minería de procesos a partir del desarrollo tecnológico y las necesidades de análisis, esto es posible dada la flexibilidad del modelo.

- Los reajustes de las configuraciones técnicas propuestas a partir de los análisis realizados y sus resultados.

- La propia evaluación del impacto de los resultados sobre la institución sanitaria.

El modelo cuenta, además, con un conjunto de estadísticas hospitalarias, obtenidas a partir de un grupo focal y entrevistas a especialistas de la gestión hospitalaria. La aplicación del grupo focal permitió conocer los criterios e introducir mejoras en la propuesta, a partir del intercambio con personas que pueden aportar criterios y valoraciones importantes. La Tabla II resume las estadísticas incluidas al modelo al aplicar los métodos antes mencionados. La muestra estuvo conformada por 11 especialistas y dos personas que no tienen relación directa con la investigación, para que participaran como observador y que llevara la relatoría de una forma imparcial.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla II. Indicadores estadísticos de MDV.

Indicadores	
Estadía hospitalaria	Tiempo de estadía mínimo Tiempo de estadía máximo Tiempo de estadía promedio Desviación típica
Tiempo de espera	Tiempo de espera mínimo Tiempo de espera promedio Tiempo de espera máximo Desviación típica
Tiempo de servicio	Tiempo de ejecución mínimo Tiempo de ejecución máximo Tiempo de ejecución promedio Desviación típica
Tiempo restante	Tiempo restante mínimo Tiempo restante máximo Tiempo restante promedio Desviación típica

Instrumentación de MDV en el sistema de información hospitalaria XAVIA HIS

El Sistema de Información Hospitalaria XAVIA HIS, desarrollado por el Centro de Informática Médica de la UCI permite la recolección, almacenamiento, procesamiento e interpretación de los datos clínicos y administrativos, para todas las actividades relacionadas con la institución de salud. El XAVIA HIS como sistema de información posee un número considerable de datos almacenados, entre los que se encuentran los datos de eventos, que son aprovechados al ser convertidos en información útil para la toma de decisiones.

La propuesta consiste en la implementación del modelo MDV sobre el sistema antes descrito. Para la instrumentación se desarrolló un módulo de extracción y transformación de trazas en registro de eventos y la integración de las técnicas de minería de procesos definidas en el modelo MDV al XAVIA HIS. En este sentido fue necesario adaptar las técnicas a las tecnologías de desarrollo definidas para el sistema XAVIA HIS. El lenguaje de programación propuesto es Java, el Entorno Integrado de Desarrollo Eclipse 3.4.2, el marco de trabajo JBoss Seam 2.1.1 y para el mapeo de los datos se propone Hibernate 3.3. Las técnicas de minería de procesos utilizarán los datos almacenados en la base de datos del sistema para generar los modelos de proceso.

El módulo para generar registros de eventos [42] [43] se conecta a la bitácora del sistema para realizar la extracción y transformación de trazas. De la tabla jbpm_processdefiniton, se extrae el identificador del proceso seleccionado y el atributo name_. De la tabla jbpm_processinstance se selecciona el identificador de las instancias de proceso pertenecientes al proceso analizado.

En la tabla jbpm_taskinstance se selecciona el identificador de las instancias de las tareas realizadas por los usuarios y los atributos: name_, actorid_ y create_. Para finalizar, en la tabla jbpm_pooledactor se obtiene el atributo actorid_, el cual representa los departamentos a los que pertenecen los usuarios que interactúan con el sistema en análisis. La salida de la ejecución de este componente es un registro de eventos que cumple con el estándar XES. La Fig. 2 representa el modelo relacional de las tablas de la bitácora mencionadas.

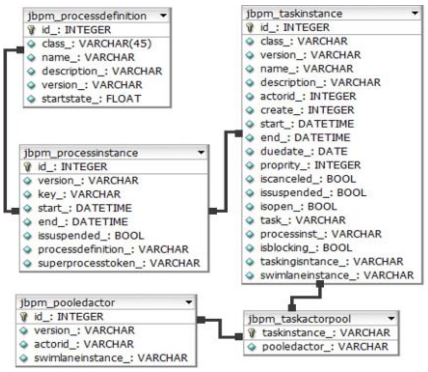


Figura 2. Modelo Relacional de las tablas utilizadas para obtener registros de eventos en el sistema XAVIA HIS. Fuente: elaboración propia.

ISBN 978-607-8242-11-5

El componente, además, permite configurar los parámetros para generar el registro de eventos, tales como nombre de proceso y rango de fecha (fecha inicial y final). Seguidamente se selecciona el tipo de análisis donde se encuentran las opciones: Vista global del proceso, Análisis de frecuencia, Análisis de tiempo [44], Variantes alternativas del proceso e Identificación de cuellos de botella, las cuales son instanciaciones de las técnicas de minería de procesos propuestas en el modelo MDV. Por último, se genera y muestra un modelo de proceso.

Para la instanciación de las técnicas en el sistema se tuvo en cuenta las características de los usuarios del entorno sanitario, ganar en comprensión y usabilidad. Para ello se desarrollaron un conjunto de tablas estadísticas, gráficos, leyendas y elementos necesarios para favorecer los análisis que se realizan.

Teniendo en cuenta la experiencia adquirida, la aplicabilidad del modelo en otros sistemas de información de salud es viable si:

- Se cumplen las premisas para aplicar el modelo MDV.
- Se ajusta el componente para la extracción y transformación de trazas en registros de eventos al sistema sobre el cual se desee detectar variabilidad en sus procesos.
- Se puedan instanciar las técnicas de minería de procesos con las modificaciones y mejoras propuestas por MDV.
- Son compatibles las arquitecturas del sistema hospitalario y las técnicas.
- Se emplea como lenguaje de programación Java.

La capacidad del modelo para detectar variabilidad en procesos hospitalarios queda demostrada en diferentes estudios de caso publicados [44] [45] [46] [47] [48].

El instrumento de validación de la investigación basado en la instanciación del modelo en el sistema XAVIA HIS construido ex profeso contó con 36 reactivos, 13 tipo Iadov, 10 tipo Likert, 5 para coeficiente de competencias y 8 para el Grupo Focal. La confiabilidad del instrumento fue validada al aplicar la técnica Alpha de Cronbach y el procedimiento dos mitades con la Correlación de Pearson y la Corrección de Spearman-Brown.

Para conocer la opinión de los expertos sobre la contribución del modelo elaborado para la detección y análisis de variabilidad en procesos hospitalarios, fue aplicado el escalamiento de Likert. La escala psicométrica creada por Rensis Likert en 1932 fue aplicada en esta investigación a partir de un cuestionario con el objetivo de conocer el nivel de acuerdo o desacuerdo con las características, principios y componentes del modelo MDV. Se definieron una serie de aspectos para valorar los siguientes elementos:

- Principios del modelo.
- Estructura general del modelo.
- Estructura detallada del modelo.
- Factibilidad de aplicar el modelo.
- Pertinencia del modelo.

Los expertos seleccionados pertenecen a las instituciones sanitarias: Hospital “Hermanos Ameijeiras”, Clínica Central Cira García, Hospital provincial “Camilo Cienfuegos”, Dirección Provincial de Salud Pública Sancti Spíritus y la Dirección Municipal de Salud Pública Sancti Spíritus. De una cantidad inicial de 32 posibles expertos estuvieron dispuestos a participar y colaborar con la investigación 21, siendo todos seleccionados debido a que su coeficiente de competencias estuvo igual o superior a 0,7 [49]. El cálculo del Coeficiente de competencias se efectúa a partir de la opinión mostrada por el experto sobre su nivel de conocimiento acerca del problema de investigación, así como de las fuentes que le permiten argumentar el criterio establecido [49].

De los expertos, 20 obtuvieron un coeficiente de competencia alto y 1 de ellos medio. La muestra estuvo compuesta por 2 asesores de registros médicos, 8 estadísticos, 4 funcionarios de salud pública, 4 directores de instituciones hospitalarias y 3 especialistas en economía.

Para el procesamiento de los resultados se empleó un método que consiste en identificar la frecuencia en cada categoría de la escala de Likert definida en la encuesta realizada y se calculan los por cientos de concordancia de cada categoría de acuerdo a las características propuestas por el autor. Luego se calcula en un índice porcentual (IP), que integra en un solo valor la aceptación del grupo de evaluadores sobre las características del modelo, como indica la Fórmula I.

$$IP = \frac{5\,(\%\ de\ MA) + 4\,(\%\ de\ DA) + 3\,(\%\ de\ SI{-}NO) + 2\,(\%\ de\ ED) + 1\,(\%\ de\ CD)}{5} \quad \text{(I)}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Donde (MA) significa muy de acuerdo, (DA) de acuerdo, (Sí-No) ni de acuerdo ni en desacuerdo, (ED) en desacuerdo y (CD) completamente en desacuerdo.

La Figura 3 muestra un gráfico con el índice porcentual de los expertos en cada una de las preguntas, que como se observa sobrepasan el valor de 80. La alta confiabilidad de las respuestas fue validada usando el coeficiente Alpha de Cronbach (con apoyo de la herramienta estadística SPSS 22.0), obteniéndose como resultado 0,78.

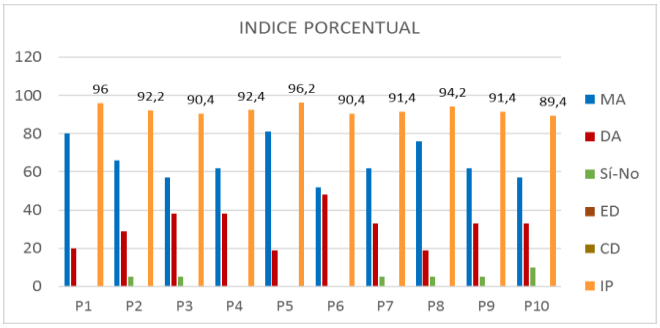


Figura 3. Resultados de la aplicación de la escala de Likert. Fuente: elaboración propia.

El procesamiento realizado a través del escalamiento de Likert evidencia que tanto los elementos teóricos como las características y las funciones de los componentes del modelo, así como sus principios, tienen una alta valoración por parte de los expertos.

Para medir la satisfacción de usuarios potenciales, con relación al modelo para detectar variabilidad en la ejecución de procesos hospitalarios, los autores de esta investigación usaron la técnica Iadov. La técnica de Iadov se basa en el análisis de un cuestionario que tiene una estructura interna determinada que sigue una relación entre tres cuestionamientos cerrados y el análisis posterior de dos cuestiones abiertas. La relación entre las preguntas cerradas se establece a través del denominado "Cuadro Lógico de Iadov".

Para medir la satisfacción se tomó una muestra de 27 usuarios potenciales, teniendo en cuenta los años de experiencia en la gestión hospitalaria. Todos los especialistas consultados son profesionales de la salud vinculados a la gestión hospitalaria, las encuestas se aplicaron de enero a marzo del 2016 en cinco hospitales y clínicas. La muestra estuvo dirigida a asesores de registros médicos, estadísticos y subdirectores generales, los cuales son decisores de las instituciones a las que pertenecen. La Tabla III detalla la distribución de usuarios por años de experiencia.

Tabla III. Distribución de los usuarios por escalas de años de experiencia en el trabajo que desempeñan.

Años de experiencia	Cantidad de usuarios
Entre 0 y 5 años	4
Entre 5 y 10 años	9
Entre 10 y 15 años	6
Más de 15 años	8

La Figura 4 muestra los resultados de la aplicación de la técnica Iadov. El Índice de Satisfacción Grupal (ISG) obtenido fue 0,87, lo que indica satisfacción de potenciales usuarios con respecto al modelo propuesto.

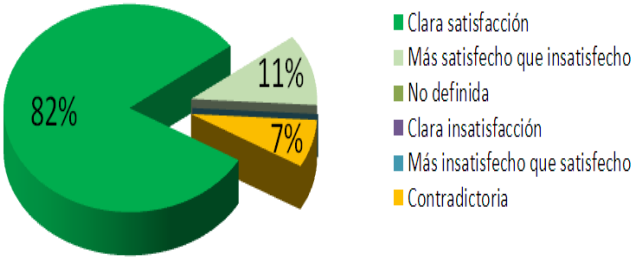


Figura. 4. Resultados de la aplicación de la técnica de Iadov y valor del índice de satisfacción grupal (ISG). Fuente: elaboración propia.

ISBN 978-607-8242-11-5

Conclusiones

La selección de las técnicas de minería de procesos está acorde a las necesidades de análisis en el entorno sanitario; se verificó que son las de preferencia internacional por su facilidad de uso y la confiabilidad de los resultados. Con los elementos teóricos y prácticos más actuales de las ciencias informáticas y teniendo en cuenta el diagnóstico realizado, se desarrolló un modelo para la detección de variabilidad en procesos hospitalarios, utilizando las técnicas de minería de procesos seleccionadas. La instrumentación del modelo en el sistema cubano XAVIA HIS demostró su aplicabilidad y viabilidad, además contribuye al proceso de informatización de la salud en Cuba.

Referencias

[1] Fernández-Maya, J. (2015). Variabilidad de la práctica clínica en la manipulación del reservorio subcutáneo en los hospitales de día de España. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, España.

[2] Hernández, A., Medina, A., Nogueira, D., & Marqués, M. (2010). El uso del case mix como un método de reducción de programas de producción hospitalaria y herramienta de apoyo a la gestión y mejora de procesos. Recuperado de http://www.eumed.net/ce/2010a/nlrl.htm

[3] Hernández, A., Medina, A., & Nogueira, D. (2010a). Criterios para la elaboración de mapas de procesos. Particularidades para los servicios hospitalarios. Ingeniería Industrial, vol. 30 no. 2.

[4] Mans, R., van der Aalst, W. M.P. & Vanwersch, R. J. (2015). Process Mining in Healthcare: Evaluating and Exploiting Operational Healthcare Processes, Springer.

[5] Loxton, M. (2015). Using MAXQDA in Healthcare Research: Process Discovery. MAXQDA. The Art of Data Analysis. [En línea] 23 de Noviembre de 2015. [Citado el: 30 de Noviembre de 2015.] http://www.maxqda.com/process-discovery-maxqda.

[6] Hernández, A. et al. (2013) Inserción de la gestión por procesos en instituciones hospitalarias. Concepción metodológica y práctica. Revista de Administração-RAUSP, vol. 48, no 4, p. 739-756.

[7] Perkins, G. D., & Cooke, M. W. (2012). Variability in cardiac arrest survival: the NHS Ambulance Service Quality Indicators. Emergency medicine journal, Vol. 29 no. 1, p. 3-5.

[8] Kim, S. H., & Whitt, W. (2014). Are call center and hospital arrivals well modeled by nonhomogeneous Poisson processes? Manufacturing & Service Operations Management, Vol. 16 no. 3, p. 464-480.

[9] Petersen, L. A., Simpson, K., SoRelle, R., Urech, T., & Chitwood, S. S. (2012). How variability in the institutional review board review process affects minimal-risk multisite health services research. Annals of internal medicine, Vol. 156 no. 10, p. 728-735.

[10] Tolga, M., Sezen, B., & Atwat, K. M. (2012). Application of Six Sigma methodology to a diagnostic imaging process. International journal of health care quality assurance, Vol. 25 no. 4, p. 274-290.

[11] De Regge, M., Gemmel, P., Verhaeghe, R., Hommez, G., Degadt, P., & Duyck, P. (2015). Aligning service processes to the nature of care in hospitals: an exploratory study of the impact of variation. Operations Management Research, Vol. 8 no. 1-2, p. 32-47.

[12] Busby, J., Purdy, S., & Hollingworth, W. (2015). A systematic review of the magnitude and cause of geographic variation in unplanned hospital admission rates and length of stay for ambulatory care sensitive conditions. BMC health services research, Vol. 15, no. 1, p. 1.

[13] Escudero, V., Ramón, A., Duart, M. J., Perez, J. J., & Valenzuela, B. (2012). Farmacocinética poblacional de doxorubicina aplicada a la personalización de su dosificación en pacientes oncológicos. Farmacia Hospitalaria, vol. 36 no. 4, p. 282-291.

[14] La Rosa, M., van der Aalst, W. M., Dumas, M., & Milani, F. P. (2013). Business process variability modeling: A survey.

[15] van der Aalst, W M. P. (2011). Process mining: discovery, conformance and enhancement of business processes, Springer Science & Business Media.

[16] van der Aalst, W. M. P. (2012). Process mining: overview and opportunities. ACM Transactions on Management Information Systems, Vol. 3 no. 2, p. 7.

[17] De Weerdt, J., Schupp, A., Vanderloock, A., & Baesens, B. (2013). Process mining for the multi-faceted analysis of business processes-A case study in a financial services organization. Computers in Industry, Vol. 64 no. 1, p. 57-67.

[18] Rebuge, Á. & Ferreira, D. R. (2012). Business process analysis in healthcare environments: A methodology based on process mining, Information Systems, Vol. 37 no. 2, p. 99-116.

[19] Rojas, E., Munoz-Gama, J., Sepúlveda, M., & Capurro, D. (2016). Process mining in healthcare: A literature review. Journal of biomedical informatics, 61, 224-236.

[20] van der Aalst, W. M. P. (2013). Could BPM and Process Mining Save US Healthcare 600 Billion Dollars? The Healthcare Business Process Management Blog. United States, 23 de Enero de 2013.

[21] Marinov, M., Mosa, A.S.M., Yoo, I. & Boren, S. A. (2011). Data-mining technologies for diabetes: a systematic review, Journal of Diabetes Science and Technology, Vol. 5, no. 6, p. 1549-1556.

ISBN 978-607-8242-11-5

[22] Hernández, A., et al. (2014). La caracterización y clasificación de sistemas, un paso necesario en la gestión y mejora de procesos. Particularidades en organizaciones hospitalarias. DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, vol. 81 no.184, p. 193-200.
[23] Dunkl, R., Froschl, K. A., Grossmann, W. & Rinderle-Ma, S. (2011). Assessing medical treatment compliance based on formal process modeling, in: Information Quality in e-Health - 7th Conference of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society, USAB 2011, Graz, Austria, p. 533-546.
[24] Bouarfa, L. & Dankelman, J. (2012) Workflow mining and outlier detection from clinical activity logs, Journal of Biomedical Informatics, Vol. 45 no. 6, p. 1185-1190.
[25] Suriadi, S., Mans, R. S., Wynn, M. T., Partington, A., Karnon, J. (2014). Measuring patient flow variations: A cross-organisational process mining approach, in: Asia Pacific Business Process Management, p. 43–58.
[26] Fei, H., Meskens, N., et al. (2008). Discovering patients care process models from event logs. The 8th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM 2008, Vol. 10, p. 10-12.
[27] Lang, M., Burkle, T., Laumann, S. & H. Prokosch. (2008) Process mining for clinical workflows: Challenges and current limitations. eHealth Beyond the Horizon - Get IT There, Proceedings of MIE2008, The XXIst International Congress of the European Federation for Medical Informatics, G¨oteborg, Sweden Vol. 136 of Studies in Health Technology and Informatics, IOS Press, p. 229-234.
[28] Mans, R., van der Aalst, W. M.P. & Vanwersch, R. J. (2015). Process Mining in Healthcare: Evaluating and Exploiting Operational Healthcare Processes, Springer.
[29] Günther, C., Rozinat, A., van der Aalst, W.M.P. & van Uden. K. (2008) Monitoring deployed application usage with process mining, PM Center Report BPM, p.1-8.
[30] Kirchner, K., Herzberg, N., Rogge-Solti, A. & M. Weske. (2012). Embedding conformance checking in a process intelligence system in hospital environments. Process Support and Knowledge Representation in Health Care - BPM 2012 Joint Workshop, ProHealth 2012/KR4HC 2012, Vol. 7738 of Lecture Notes in Computer Science, p. 126-139.
[31] Caron, F., Vanthienen, J., Vanhaecht, K., Van Limbergen, E., Deweerdt, J., Baesens, B., et al. (2014). A process mining-based investigation of adverse events in care processes, Health Information Management Journal, Vol. 43 no. 1, p. 16-25.
[32] Delias, P., Doumpos, M., Grigoroudis, E., Manolitzas, P. & Matsatsinis, N. (2015). Supporting healthcare management decisions via robust clustering of event logs, Knowledge-Based Systems. Vol. 84 p. 203-213.
[33] Partington, A., Wynn, M., Suriadi, S., Ouyang, C., Karnon, J. (2015). Process mining for clinical processes: A comparative analysis of four australian hospitals, ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS), Vol. 5 no. 4, p. 1-19.
[34] Riemers, P. (2009). Process improvement in healthcare: a data-based method using a combination of process mining and visual analytics, Ph.D. thesis, Master's thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
[35] Staal, J., (2010). Using process and data improving techniques to define and improve standardization in a healthcare workflow environment, Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
[36] Lang, M., Burkle, T., Laumann, S. & H. Prokosch. (2008) Process mining for clinical workflows: Challenges and current limitations. eHealth Beyond the Horizon - Get IT There, Proceedings of MIE2008, The XXIst International Congress of the European Federation for Medical Informatics, G¨oteborg, Sweden Vol. 136 of Studies in Health Technology and Informatics, IOS Press, p. 229-234.
[37] Meneu, T., Traver, V., Guillen, S., Valdivieso, B., Benedi, J. & Fernandez-Llatas, C. (2013). Heart cycle: Facilitating the deployment of advanced care processes, in: Proceeding of the 35th Annual International Conference of the IEEE, Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), p. 6996-6999.
[38] Claes, J., & Poels, G. (2013). Process mining and the ProM framework: an exploratory survey. In Business Process Management Workshops. Springer Berlin Heidelberg, p. 187-198.
[39] Leemans, S. J., Fahland, D., & van der Aalst, W. M. (2014). Process and Deviation Exploration with Inductive Visual Miner. In BPM (Demos), p. 46.
[40] Pérez, D. (2015). Método para el diagnóstico de procesos de negocio a partir de registros de eventos con ruido y ausencia de información. Tesis Doctoral, Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba.
[41] Adriansyah, A. & van der Aalst, W.M.P. (2012) Replaying history on process models for conformance checking and performance analysis. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, Vol. 2, no. 2, p. 182-192.
[42] Orellana, A., Larrea O. U., and Pérez-Alfonso, D. (2015). "Generador de Registros de Eventos para el análisis de procesos en el Sistema de Información Hospitalaria xavia HIS." Convención Salud 2015.
[43] Orellana, A., Pérez-Alfonso, D., & Larrea., O. U. (2015). Analysis of Hospital Processes with Process Mining Techniques. MEDINFO 2015: EHealth-enabled Health: Proceedings of the 15th World Congress on Health and Biomedical Informatics. Vol. 216, pp. 310-314. 978-161449-564-7
[44] Orellana, A., Larrea, O.U, Pérez, Y.E., and Pérez, D. (2016). Inductive Visual Miner Plugin Customization for the Detection of Eventualities in the Processes of a Hospital Information System. Latin America Transactions, IEEE, Vol. 14 no. 4, pp.1930-1936
[45] Orellana, A., Sosa, A., Pereiras, K. & Pérez-Alfonso, D. 2016 Análisis de frecuencia de ejecución de procesos hospitalarios aplicando la técnica Fuzzy Miner de minería de procesos. In 14 LACCEI Latin

 ISBN 978-607-8242-11-5

American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2016) "Engineering Innovations for Global Sustainability". Indexed in EBSCO.

[46] Orellana, A., Reyes, A.M. & Abreu, M. 2016. Análisis del comportamiento principal de procesos hospitalarios aplicando la técnica Heuristics Miner de minería de procesos. In III Congreso Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas en Latinoamérica, La Habana, Cuba.

[47] Orellana, A., Ramírez, D., Nodarse, A. 2016. Componente para la predicción basada en tiempo de los procesos en ejecución del sistema XAVIA HIS. In III Congreso Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas en Latinoamérica, La Habana, Cuba.

[48] Orellana, A., Pérez, D., Lorenzo-Luaces, P & Álvarez, M. 2016. Análisis del proceso Realizar estudio del sistema de ensayos clínicos: Clínicas, aplicando minería de procesos. In VI Taller Internacional de Ensayos Clínicos, La Habana, Cuba.

[49] Barroso Osuna, J. M., & Cabero Almenara, J. (2013). La utilización del juicio de experto para la evaluación de TIC: el coeficiente de competencia experta. Bordón. Revista de Pedagogía, Vol. 65, no 2, pp. 25-38.

ISBN 978-607-8242-11-5

Cinéticas de los parámetros de color en el freído por inmersión de ahuyama (*Cucúrbita máxima*) con previa deshidratación

Jhonatan A. Rodríguez Manrique[1], Armando Alvis Bermudes[2] y Carlos S. Cohen Manrique[1]
(1) Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura. CECAR, Sincelejo (Colombia).
(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Montería (Colombia)
e-mail: jhonatan.rodriguez@cecar.edu.co; aalvis2@hotmail.com; carlos.cohen@cecar.edu.co.

Resumen

En la industria de alimentos, el color es uno de los principales atributos sensoriales para la aceptación o rechazo de un producto por parte de los consumidores. Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar las cinéticas de los cambios de color de la ahuyama sometida a un proceso de fritura por inmersión con previa deshidratación osmótica en una solución ternaria y sin la aplicación previa de la osmodeshidratación como pretratamiento. Metodológicamente, la ahuyama fue sometida a procesos de acondicionamiento hasta formar paralelepípedos de 1x1x4cm^3, luego se procedió a realizar la osmodeshidratación de algunas muestras utilizando una solución ternaria constituida por estevia, cloruro de sodio (NaCl) y agua en proporciones de 35% del edulcorante y 5% de la sal y 60% de agua, para una concentración de sólidos del 40% p/p en la solución. Finalizada la deshidratación, se procedió al freído por inmersión de las muestras de ahuyama obtenidas y de las muestras de ahuyama sin la aplicación del pretratamiento osmótico. Experimentalmente, se utilizaron como temperaturas de referencia en el freído de 130, 150 y 170°C y tiempos de proceso de 30, 90, 150 y 210 segundos. Todos los parámetros de color siguieron reacciones de orden cero para los productos donde se aplicó deshidratación osmótica previa, igual resultado se obtuvo en aquellos donde no se aplicó el pretratamiento. Además, se obtuvieron energías de activación para los parámetros de L* a* y b* en las ahuyamas con previa deshidratación osmótica de 14.8123, 22.9583 y 17.4079 KJ /mol respectivamente y de 28.6738, 50.1821, 38.4584 KJ /mol para los productos que solo se les aplicó el proceso de fritura por inmersión.

Palabras clave: Luminosidad, absorbancia, transmitancia, fritura, ahuyama.

Kinetics of the color parameters in frying by immersion of squash (*Cucúrbita máxima*) with previous dehydration

Abstract

In the food industry, the color is one of the main sensory attributes for the acceptance or rejection of a product by consumers. Therefore, the objective of the present study was to determine the kinetics of the change of color of the squash subjected to a frying process by immersion with previous osmotic dehydration in a solution ternary and without the prior application of the osmodeshidratación as a pretreatment. Methodologically, the squash was subjected to the processes of packaging to form parallelepipeds of 1x1x4 cm^3, then proceeded to perform the osmodeshidratación some samples using a solution ternary composed of stevia, sodium chloride (NaCl), and water in proportions of 35% of the sweetener and 5% of the salt and 60% water, to a concentration of solids 40% p/p in the solution. Complete the dehydration, undertook the frying by immersion of the samples of squash obtained and samples of squash without the application of osmotic pretreatment. Experimentally, were used as reference temperatures in frying of 130, 150 and 170°C and process times of 30, 90, 150 and 210 seconds. All the color parameters continued reactions of zero order for products where you applied osmotic dehydration after, the same result was obtained in those where there was applied the pretreatment. In addition, were obtained energies of activation for the parameters of L*, a* and b* in the squashes with previous osmotic dehydration of 14.8123, 22.9583 and 17.4079 KJ /mol respectively and 28.6738, 50.1821, 38.4584 KJ /mol for the products that only applied to them the frying process by immersion.

Keywords: Luminosity, absorbance, transmittance, frying, squash.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la tendencia de crecimiento del sector hortofrutícola para los próximos años le apunta a fortalecer productos como aguacate, mango, fresa, piña, frutales cítricos, plátano, entre otros, al igual que al desarrollo de productos procesados y de cuarta gama, cuyo potencial productivo es una alternativa de crecimiento para el sector de frutas y hortalizas (Asohofrucol, 2015). La ahuyama forma parte activa de este sector, en el país comúnmente se cultiva en huertos caseros y las variedades utilizadas presentan alta variabilidad referente a aspectos de forma, tamaño, textura y color (Montes et al., 2004). La ahuyama en diversos países también es conocida como fruto de zapallo, los principales problemas que afronta durante el almacenamiento poscosecha corresponden a las condiciones de humedad del medio y a la putrefacción al interior del producto, lo cual tiene un impacto considerable en todas sus cualidades sensoriales (Bekaert y Harvey, 1997); Durante el periodo de almacenamiento, ocurren procesos microbiológicos referentes a la degradación del almidón, incremento en los niveles de los azucares, degradación de polisacáridos y proteínas, lo cual repercute en las condiciones finales del producto al momento de su consumo (Kami et al., 2011), por ello es recomendable realizar procesos de transformación que permitan controlar dicha afección y aporten valor al producto a dicha hortaliza (El-Mageed et al., 2016).

Dado este panorama, puede mencionarse que investigaciones en métodos de conservación y desarrollo tecnológico como la deshidratación osmótica y la fritura por inmersión contribuyen a la generación de alternativas de procesamiento que podrían potencializar los usos y aplicaciones de la ahuyama, mencionando que su contenido de humedad se encuentra alrededor del 90%, lo que la hace sensible al ataque de microorganismos (Neumark, 1970; Ortiz, 2006). A razón de lo anterior, es posible considerar el uso de este procedimiento en ahuyama, ya que se ha establecido que la deshidratación osmótica es un pretratamiento que permite extender la vida útil de vegetales, frutas y hortalizas (Shi y Le, 2002), puesto que dicho proceso busca reducir la actividad de agua de una matriz alimentaria conservando en lo posible las propiedades naturales como la textura, color y sabor (Ayala et al., 2010). Por su parte, la fritura es un proceso que también puede contribuir al procesamiento de esta hortaliza, a la solución de sus problemas de almacenamiento y a la escaza industrialización actual (Rodríguez et al., 2016). Debido a que es un procedimiento que genera cambios en la matriz alimentaria procesada, permitiendo obtener productos gustosos con corteza crujiente, aromas tentadores y atractivo visual (Arias et al., 2013). Dichos cambios se originan por una serie de reacciones complejas como oxidación, hidrólisis, isomerización y polimerización, que ocurren por efecto del calor en función del medio convectivo de calentamiento (Zhang et al., 2012). Por tanto, la forma en cómo se desarrollen dichas reacciones y las características de calidad del producto final a obtener se verá influenciado por las condiciones del proceso contempladas para el freído (Neethu et al., 2016).

Debe recalcarse, que en los procesos de fritura uno de los parámetros de calidad de mayor importancia para el consumidor es el color del producto final, ya que permite relacionar de forma visual la calidad organoléptica del mismo, considerando que este parámetro en la superficie de un alimento es la primera sensación que el consumidor experimenta y tiene como criterio para decidir entre rechazar o aceptar un producto (Dhaiban et al., 2014, Du y Sun, 2004). Cabe subrayar, que la medición del color se puede desarrollar por dos métodos, uno por medio de visión humana utilizando inspección visual y el otro por medio de un instrumento de medición. Actualmente, se utilizan espacios de color en conjunto de valores numéricos que son utilizados para representar tonalidades en dos y tres dimensiones espaciales (Trussell et al., 2005). En la industria de los alimentos, el color se mide utilizando coordenadas L*, a* y b*, o coordenadas CIELab, donde L* es la luminosidad y oscila entre 0 y 100 indicando que tan oscuro o luminoso puede ser el producto, el parámetro a* se denomina absorbancia, el cual va de verde (-) a rojo (+), y el parámetro b* es la transmitancia que va de azul (-) a amarillo (+), estos se denominan componentes cromáticos (Yam y Papadakis, 2004). Se debe mencionar, que el color en el freído está condicionado por algunos parámetros del proceso como el tiempo de inmersión del producto en el medio de calentamiento, el tipo de aceite utilizado para realizar el proceso y las diferentes temperaturas de operación que se utilicen para efectos de la cocción (Arreola y Rosas, 2007), por lo que se hace necesario considerar la influencia de parámetros críticos de operación para procesos de modelado que permitan estimar o predecir los cambios en este atributo de calidad durante el freído por inmersión (Yildiz et al., 2007). A razón de lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar las cinéticas de los cambios de color de la ahuyama sometida a un proceso de fritura por inmersión con previa deshidratación osmótica en una solución ternaria y sin la aplicación previa de la osmodeshidratación como pretratamiento.

ISBN 978-607-8242-11-5

MATERIALES Y METODOS

Acondicionamiento de la ahuyama

Se adquirieron ahuyamas procedentes del mercado local de la ciudad de Sincelejo (Colombia), estas fueron seleccionadas de acuerdo a su apariencia física, daños mecánicos, peso, forma y tamaño. Luego, las hortalizas fueron transportadas al laboratorio del Grupo de Investigación de Procesos de Agroindustria y Vegetales (GIPAVE) de la Universidad de Córdoba, donde se realizaron procedimientos de acondicionamiento como lavado, desinfectado y pelado, para posteriormente formar geometría de paralelepípedos de 1x1x4cm^3 con ayuda de un sacabocados.

Proceso de deshidratación osmótica

Una vez obtenidas las muestras, se procedió a realizar un proceso de deshidratación osmótica utilizando como agente deshidratante una solución ternaria constituida por estevia, cloruro de sodio (NaCl) y agua en proporción de 35% del edulcorante, 5% de la sal y 60% agua para una concentración de sólidos del 40% p/p en la solución, el tiempo de proceso utilizado fue de 180 minutos y agitación constante a 100 rpm. La relación producto-solución que se empeló fue de 1:20 p/v. Las muestras obtenidas se escurrieron en papel absorbente, se empacaron en bolsas y se introdujeron al desecador para los procesos posteriores.

Proceso de freído por inmersión

Finalizado el proceso de deshidratación, se procedió al proceso del freído por inmersión de las muestras procedentes de este pretratamiento y para las muestras de ahuyama que no fueron sometidas a la deshidratación osmótica, se utilizó una freidora comercial marca GMC® de capacidad de 5 litros y equipada con un controlador de la temperatura de rango entre 5 y 200°C. Experimentalmente, se utilizaron como temperaturas de referencia en el freído de 130, 150 y 170°C y tiempos de proceso de 30, 90, 150 y 210 segundos, como medio convectivo de calentamiento se utilizó una mezcla de aceites vegetales a base de oleína de palma y de soya bajo una relación producto-aceite de 1:100 p/v, se realizaron tres réplicas para cada tratamiento.

Medición y modelamiento de los parámetros de color

Para la determinación del color, se utilizó un colorímetro ColorFlex EZ Marca HunterLab y se realizaron lecturas por cada tratamiento de freído realizado. Para el modelamiento de los parámetros de color se utilizó el método de Singh (1994).

$$\pm\frac{dC}{dt} = kC^n \tag{1}$$

Donde, C es el atributo de calidad, t el tiempo (min), k es una constante y n es el orden de la ecuación. La ecuación. Para la mayoría de los alimentos se ha establecido que las relaciones de dependencia del tiempo pueden describirse utilizando modelos de orden cero o modelos de primer orden (Chen y Ramaswamy, 2002). En las relaciones de orden cero, se ha determinado que prevalece una relación linear entre el atributo evaluado y el tiempo, por lo tanto, si se hace *n*=0, se obtiene:

$$\frac{-dC}{dt} = k \tag{2}$$

Integrando la ecuación (2), se obtiene:

$$C = C_0 - kt \tag{3}$$

Por su parte, si la relación es de primer orden el atributo de calidad y el tiempo la relación entre seguirán una relación exponencial, debido a que se hace *n*=1 obteniéndose:

$$-\frac{dC}{dt} = -kt \tag{4}$$

Si se integra la ecuación (4) se obtiene la expresión (5).

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\ln\frac{C}{C_0} = -kt \tag{5}$$

Debe mencionarse, que la constante de velocidad depende generalmente de la temperatura y la relación puede ser modelada en una relación de Arrhenius (6).

$$k = k_0 \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] \tag{6}$$

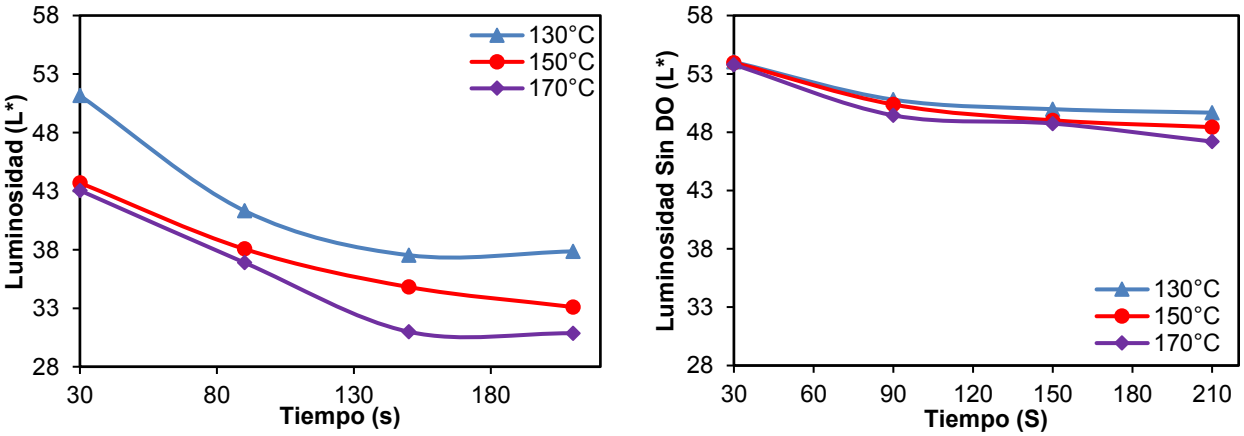
Donde, k es la constante cinética que depende de la temperatura, k_o es el factor de frecuencia de colisiones, E_a es la energía de activación, R es la constante universal de los gases (8.1416 J/mol K) y T es la temperatura absoluta. Con los datos obtenidos, se realizaron las gráficas respectivas a las cinéticas de los parámetros de color para la ahuyama frita con previa deshidratación osmótica y sin la aplicación de este pretratamiento. La exactitud del ajuste fue calculada mediante el porcentaje del error cuadrático medio (%RMS) mediante la ecuación 7.

$$\%RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\left[\sum_{1}^{N}\left(\frac{C_{Exp} - C_{Cal}}{C_{Exp}}\right)^2\right]} \times 100 \tag{7}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1, se ilustran las cinéticas obtenidas para los parámetros del color correspondiente al proceso de freído por inmersión de la ahuyama con previa deshidratación osmótica y sin la aplicación de este pretratamiento. Con respecto a la luminosidad, se puede observar que a medida que se incrementa la temperatura de freído y el tiempo de proceso, se presenta un descenso en los valores medios de este parámetro en ambos tratamientos (con deshidratación osmótica previa al freído y sin la aplicación del mismo). Este resultado puede explicarse debido a que el incremento de la temperatura de freído representa mayor fuerza impulsora sobre la matriz alimentaria en proceso (Salazar et al., 2017), lo cual ocasiona mayor salida de agua en forma de vapor por efecto del cambio de este componente cuando entra en contacto con el aceite caliente, ello significa mayor concentración de sólidos en la superficie externa de la ahuyama, la cual se torna más oscura por efecto de la cocción de los almidones presentes en ella y por efecto del calor transmitido por el medio de calentamiento convectivo que está en contacto con el producto durante todo el tiempo del proceso (Gazmuri y Bouchon, 2009). De forma similar, en las muestras de ahuyama donde solo se realizó el proceso de freído, el resultado obtenido referente a este parámetro indicó una tendencia a la disminución en sus valores medios a medida que el tiempo de proceso trascurrió. Además, se puede observar que la temperatura de freído de 170°C fue la que representó mayor efecto negativo sobre la luminosidad del producto, indicando tonalidades más oscuras y valor mínimo (47.19) cuando se detuvo el proceso a los 210 segundos.

En términos generales, con la aplicación del proceso de deshidratación osmótica previa al proceso de freído por inmersión, se contribuye de forma negativa a la luminosidad de la ahuyama frita, lo cual se puede explicar por el efecto de pardeamiento no enzimático que ocurre por la presencia del edulcorante que se concentra en la superficie de la matriz en estudio como consecuencia del fenómeno de transferencia de masa que se desarrolla durante el proceso de osmosis al poner en contacto a la muestra con la suspensión hipertónica (Krokida et al., 2001; Gazmuri y Bouchon, 2009).



ISBN 978-607-8242-11-5

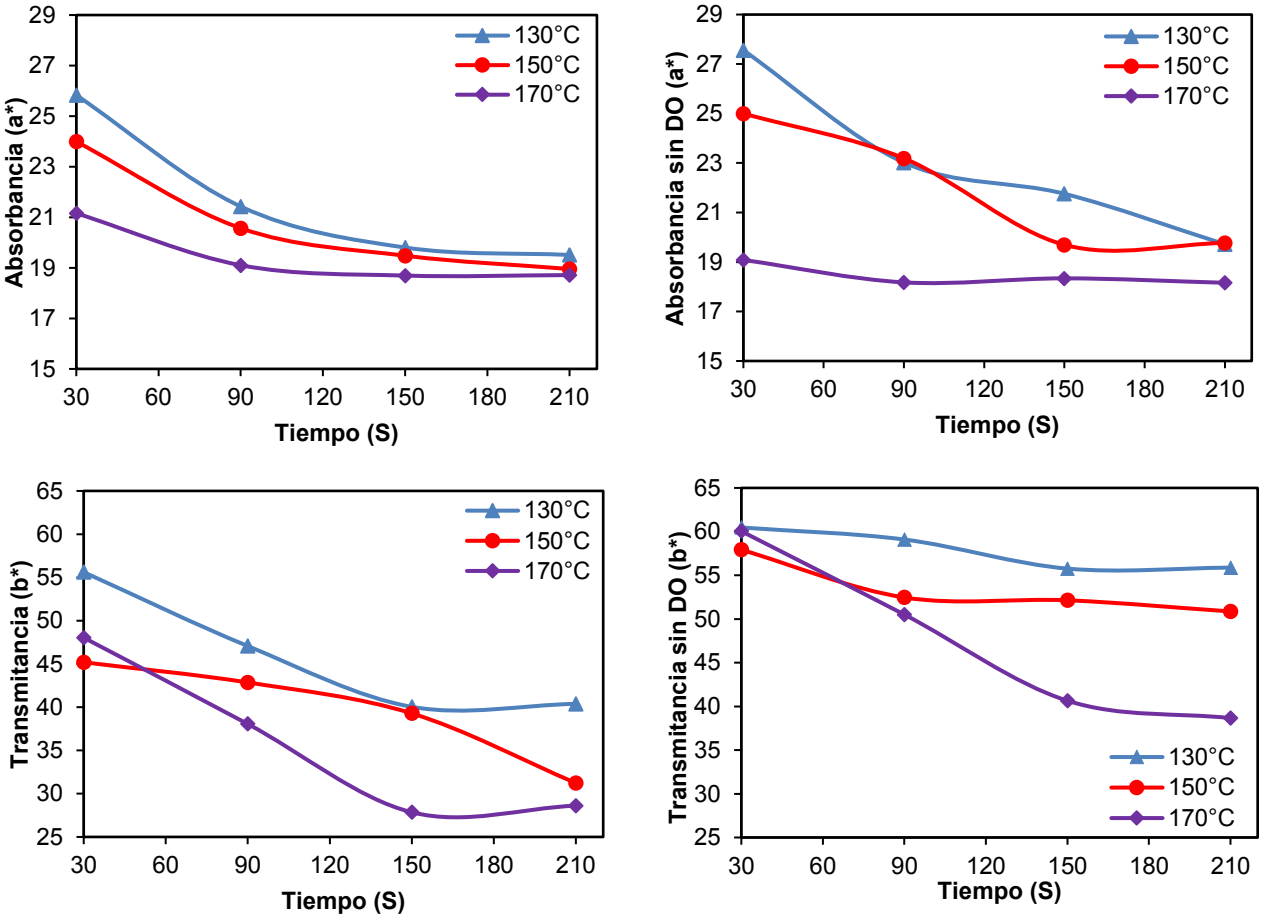


Fig. 1: Cinéticas de los parámetros del color (L*, a* y b*) correspondientes al proceso de freído por inmersión de la ahuyama con previa deshidratación osmótica y sin la aplicación de este pretratamiento.

Con respecto a la absorbancia, los resultados obtenidos fueron similares a lo ocurrido con luminosidad, la tendencia indicó disminución en los valores medios de este parámetro a medida que se incrementó la temperatura y el tiempo de proceso, todos los valores finales obtenidos resultaron ser positivos y el procesamiento arrojó como consecuencia tonalidades menos rojizas y más tendientes hacia el color caramelo, este fenómeno se puede atribuir al contenido de azucares reductores presente en la matriz alimentaria que contribuye a la reacción de caramelización de Maillard que se efectúa al poner en contacto la ahuyama con el calor presente en el freído, (Gökmen y Şenyuva, 2007). Por su parte, los valores más bajos de absorbancia se obtuvieron con la aplicación de 170°C y 210 segundo en ambos tratamientos, sin embargo la aplicación del proceso de deshidratación osmótica previo al freído por inmersión representó un valor muy cercano (18.71) al valor final de absorbancia en el tratamiento donde no se aplicó la deshidratación osmótica (18.16), por lo que la adición de la estevia a la ahuyama mediante el proceso de osmosis, no tiene un efecto negativo en el color rojizo de la matriz que pueda afectar la presentación del producto final, obteniéndose un producto con similar calidad visual y color dorado oscuro característico (Altunakar et al., 2004).

En lo referente a la transmitancia (b*), se observa que para todos los tratamientos (con deshidratación previa o sin deshidratación previa) los valores menores obtenidos fueron con los niveles de 210 segundos con las temperaturas de 130, 150 y 170°C respectivamente, lo cual indica que a medida que el tiempo de freído transcurre los valores medios de esta variable se reducen, indicando tonalidades menos amarillas, todas las muestras procesadas mantuvieron valores positivos para este parámetro después de ser procesadas, tanto en el proceso de freído por inmersión donde se utilizó deshidratación osmótica como tratamiento previo, como también en aquellos donde no se utilizó este procedimiento, lo cual contribuyó a la formación de colores naranja oscuros. Resultados similares fueron obtenidos en tofu durante el proceso de freído por inmersión, donde los valores de la transmitancia disminuyeron en los periodos finales del proceso donde se aplicaron los mayores tiempos de freído (Baik y Mittal, 2003).

En la figura 2, se ilustra el grafico de las constantes de velocidad de Arrhenius para los cambios de color durante el freído por inmersión con la aplicación de deshidratación osmótica previo y sin la aplicación de este

ISBN 978-607-8242-11-5

pretratamiento, referente al rango de temperatura de 130-170°C utilizado. Los resultados del coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de error medio estándar (%RMS) evaluado entre los valores experimentales y el modelo de predicción determinado se ilustran en la tabla 1.

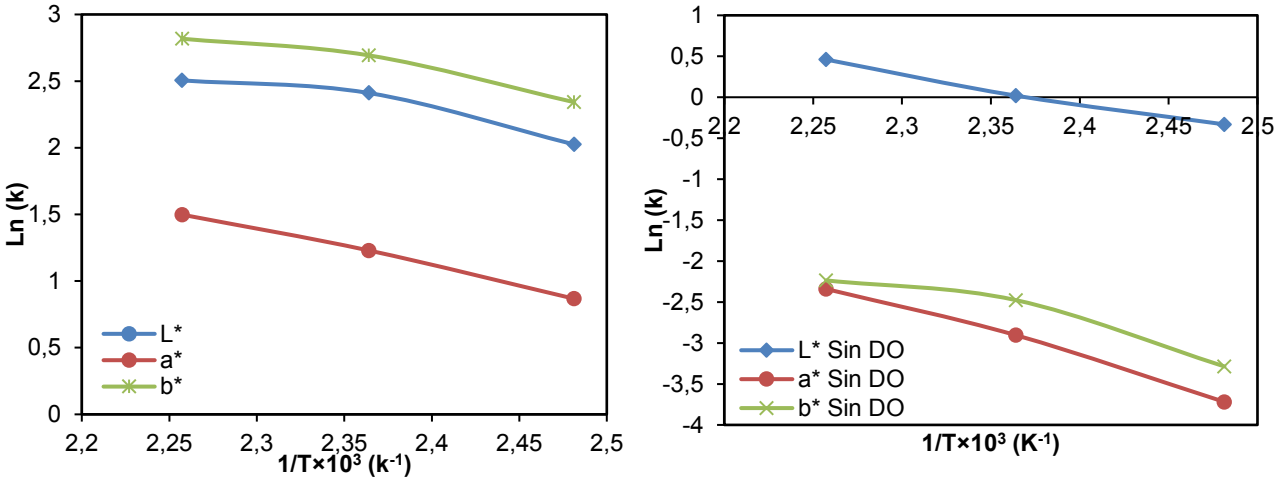


Fig. 2: Grafica de las constantes de velocidad de Arrhenius para los cambios de color durante el freído con la aplicación de deshidratación osmótica previo y sin la aplicación de este pretratamiento.

En la tabla 1, se ilustran un resumen de los resultados obtenidos de la cinética de color de ahuyama durante el freído por inmersión para los tratamientos donde se aplicó deshidratación osmótica previa y para los que no se empleó el pretratamiento.

Tabla 1: Resumen de la cinética de color de ahuyama durante el freído por inmersión para los tratamientos donde se aplicó deshidratación osmótica previa y para los que no se empleó el pretratamiento.

Parámetro	*Orden de la reacción*	*Ea (KJ/mol)*	*K_o*	*R^2*	*%RMS*
L*	Cero	14.8123	$7.515x10^5$	0.99	0.37
a*	Cero	22.9583	$2.629x10^6$	0,90	0.66
b*	Cero	17.4079	$2.164x10^6$	0.94	0.06
L* Sin DO	Cero	28.6738	$4.395x10^6$	0.99	0.08
a* Sin DO	Cero	50.1821	$1.096x10^8$	0.99	0.69
b* Sin DO	Cero	38.4584	$5.002x10^6$	0.92	0.26

Para la Luminosidad, absorbancia y transmitancia en los tratamientos donde se aplicó la deshidratación osmótica previa al freído los valores de energía de activación (Ea) determinados para los paralelepípedos de ahuyama fueron 14.8123, 22.9583 y 17.4079 KJ /mol respectivamente, mientras que para los tratamientos donde no se aplicó la osmodeshidratación previa al freído los valores obtenidos fueron 28.6738, 50.1821 y 38.4584 KJ /mol para la luminosidad, absorbancia y transmitancia respectivamente, notándose un incremento en los valores de este parámetro cuando no se aplicó el pretratamiento, lo cual se explica por la relación que tiene el incremento en la energía de activación con la formación de tonalidades marrón, donde a mayor degradación de estas tonalidades a compuesto incoloros, mayor será el valor de la energía de activación (Taiwo et al., 2001; Ciurzyńska et al., 2016). Todos los valores estimados de luminosidad, absorbancia y transmitancia siguieron reacciones de orden cero (n=0) debido a que se obtuvo menor porcentaje de error medio estándar con este modelo.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que se determinaron las cinéticas de los cambios de color de la ahuyama sometida a un proceso de fritura por inmersión con previa deshidratación osmótica en una solución ternaria y sin la aplicación previa de la osmodeshidratación como pretratamiento. Para los parámetros de estudio de luminosidad, absorbancia y transmitancia se obtuvieron tendencias a la disminución en sus valores a medida que se incrementó la temperatura y el tiempo de fritura, alcanzando los valores finales de 30.86, 18.71, 28.62 respectivamente para los tratamientos con deshidratación osmótica y de 47.19, 18.16 y 38.66 respectivamente para los tratamientos donde no se aplicó la deshidratación

ISBN 978-607-8242-11-5

osmótica previa, con tiempos de 210 segundos y temperaturas de 170°C. La cinética del cambio de color en el proceso de freído por inmersión aplicado a los paralelepípedos de ahuyama fue resuelta utilizando ordenes de reacciones clásicas y la relación de Arrhenius, donde la luminosidad, absorbancia y transmitancia, siguieron reacciones de orden cero para los tratamientos con y sin la aplicación de la deshidratación osmótica y los valores de energía de activación obtenidos fueron 14.8123, 22.9583, 17.4079 KJ /mol y 28.6738, 50.1821, 38.4584 KJ /mol para la luminosidad, absorbancia y transmitancia respectivamente.

REFERENCIAS

Altunakar, B., S. Sahin, y G. Sumnu, *"Functionality of batters containing different starch types for deep-fat frying of chicken nuggets"*. Eur Food Res Technol, 218(4):318-322 (2004).

Arias-Mendez, A., A. Warning, A. K. Datta, y E. Balsa-Canto, *"Quality and safety driven optimal operation of deep-fat frying of potato chips"*. J. Food Eng., 119(1), 125-134 (2013).

Arreola, S. y M. Rosas, *"Aplicación de vacío en la deshidratación osmótica de higos (Ficus carica)".* Información tecnológica, 18(2), 43-48 (2007).

Asohofrucol, *"Los productos horticfruticolas jalonarán el desarrollo agrícola nacional"*. Revista de la Asociación Hortifrutícola de Colombia, 40,1-5 (2015).

Ayala, A., C. Giraldo, y L. Serna, *"Cinéticas de Deshidratación Osmótica de Pitahaya Amarilla"*. Interciencia, 35(7), 539-544. (2010).

Baik, O. y G. Mittal, *"Kinetics of tofu color changes during deep-fat frying"*. LWT-Food Sci Technol., 36(1):43-48. (2003).

Bekaert, G., y C. R. Harvey, *"Emerging equity market volatility"*. J Financ Econ., 43(1), 29-77 (1997).

Chen, C. R., y H. S. Ramaswamy, *"Color and texture change kinetics in ripening of bananas".* Lebensm Wiss Technol, 35, 415–419. (2002).

Ciurzyńska, A., H., Kowalska, K. Czajkowska y A. Lenart, "*Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food"*, Trends Food Sci Tech, 50, 186- 192 (2016)

Dhaiban, Abdullah A., S. M-Emad, y M. G. El-Sebaie. *"Finite element modeling and experimental results of brass elliptic cups using a new deep drawing process through conical dies"*. J. Mater Process Tech., 204(1), 828-838 (2014).

Du, C. J., y D. W. Sun, *"Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation"*. Trends Food Sci. Tech., 15(5), 230-249 (2004).

El-Mageed, T. A., W. M. Semida, G. F. Mohamed, y M. M. Rady, *"Combined effect of foliar-applied salicylic acid and deficit irrigation on physiological–anatomical responses, and yield of squash plants under saline soil"*. S. Afr. J. Bot., 106, 8-16 (2016).

Gazmuri, A. M., y P. Bouchon, *"Analysis of wheat gluten and starch matrices during deep-fat frying".* Food Chem, 115(3), 999-1005 (2009).

Gökmen, V. y I. Senyuva, *"A non-contact computer vision based analysis of color in foods".* Int J Food Eng 3(5):23-28 (2007).

Kami, D., T. Muro, y K. Sugiyama, *"Changes in starch and soluble sugar concentrations in winter squash mesocarp during storage at different temperatures"*. Sci. Hortic-Amsterdam, 127(3), 444-446 (2011).

Krokida, M., V. Oreopoulou,, Z. Maroulis, y D. Marinos-Kouris, *"Effect of osmotic dedydration pretreatment on quality of french fries"*. J. Food Eng., 49(4):339-345. (2001).

Montes, R., Vallejo, F. y Baena, G. *"Diversidad genética de germoplasma colombiano de zapallo (Cucúrbita moschataduchesne ex poir)"*. Acta Agronómica, 50(1), 43-50 (2004).

Neethu, K. C., Sharma, A. K., Pushpadass, H. A., Emerald, F. M. E. y Manjunatha, M. *"Prediction of convective heat transfer coefficient during deep-fat frying of pantoa using neurocomputing approaches",* Innov. Food Sci. Emerg., 34, 275-284 (2012).

Neumark, H., *"Low utilization of carotene by sheep"*. [En línea] Disponible en: http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/afris/refs/365, [Último acceso: 20 09 2015], (1970).

Ortiz, G. *"Estudio de la habilidad combinatoria general y especifica en lineas endogamicas S2 de Zapallo Cucurbita moschata Duch"*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis doctoral (2006).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Rodríguez-Manrique, J., A. Alvis-Bermúdez, F. Castellanos-Galeano, L. Gutiérrez-Mosquera, W. Díaz-Ávila, y A. Chávez-Salazar, *"Pérdidas de humedad y absorción de aceite en ahuyama sometida a osmodeshidratación y fritura"*. Agronomía Colombiana, 34 (1Supl), S332-S335 (2016).

Salazar, A., F. Galeano, y L. Hernandez. "*Effect of process variables in the production of fried green plantain in vacuum"*. Vitae, 24(1), 47 (2017).

Shi, J. y Le, M. *"Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects"*. Food Rev. Int., 18(4), 305-335 (2002).

Singh, R. P. *"Scientific principles of shelf-life evaluation".* In C. M. D. Man, & A. A. Jones (Eds.), Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, 3–26 (1994).

Taiwo, K. A., A. Angersbach, y D. Knorr, "*Effects of pulsed electric field on quality factors and mass transfer during osmotic dehydration of apples"*. J Food Process Eng., 26,31-48 (2003).

Trussell, H. J., Saber, E. y M. Vrhel, *"Color image processing: Basics and special issue overview"*. J. Food Eng., 76(4), 524-530 (2005).

Yam, K. L., y S. E. Papadakis, *"A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces"*. J. Food Eng., 61(1), 137-142 (2004).

Yildiz, A., T. Palazoglu, y F. Erdogdu, *"Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices"*. J. Food Eng., 79(1),11-17 (2007).

Zhang, X. H., Bin, T. A. N. G., Zhang, X. L., Kou, H. C., LI, J. S. y Lian, Z. H. O. U. *"Microstructure and texture of commercially pure titanium in cold deep drawing"*. T. Nonferr Metal Soc., 22(3), 496-502 (2012).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de Perfil de Textura de ahuyama (C*ucúrbita máxima*) sometida a freído atmosférico por inmersión

Jhonatan A. Rodríguez-Manrique[1], Armando Alvis-Bermudes[2] y Carlos S. Cohen-Manrique[1]
(1) Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura. CECAR, Sincelejo (Colombia).
(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Montería (Colombia)
e-mail: jhonatan.rodriguez@cecar.edu.co; aalvis2@hotmail.com; carlos.cohen@cecar.edu.co

Resumen

La ahuyama es una hortaliza considerada como una buena fuente de alimentación en diversas regiones de América, Europa y Asia, debido a que su consumo representa un aporte significativo de provitamina A, vitaminas C, E, B2, hierro, fósforo, calcio, carotenoides y alto contenido de fibra. Gracias al potencial agrícola que tiene esta hortaliza, es recomendable ampliar su utilización y pensar en diferentes actividades de procesamiento. Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar la influencia de la temperatura de freído y el tiempo de proceso del freído por inmersión sobre las características de textura de la ahuyama frita. Metodológicamente, la ahuyama fue caracterizada frente a sus propiedades bromatológicas mediante técnicas analíticas, luego, se realizó un proceso de freído por inmersión donde las temperaturas de proceso utilizadas fueron 130, 150 y 170°C, los tiempos de procesamiento empleados fueron 40, 80, 120 y 160 segundos. Se manejó una relación producto-aceite de 1:100 p/v. Finalmente, se realizó un análisis de perfil de textura para la determinación de las características de dureza, cohesividad, adhesividad, elasticidad, y masticabilidad del producto obtenido. Se concluye que los factores temperatura y tiempo de proceso actuando de forma conjunta modifican los atributos de dureza y adhesividad, a mayor temperatura y tiempo de proceso se obtienen ahuyamas menos duras y menos adhesivas. Para la cohesividad, las temperaturas de 150 y 170°C permiten obtener productos con mayor resistencia a la fragmentación y los tiempos de procesamiento utilizados representan igualdad en la fuerza de unión entre las partículas de la ahuyama frita. Para la elasticidad, se obtuvo que las temperaturas y tiempos utilizados permiten que se rompa igual estructura del alimento y para la masticabilidad las temperaturas de proceso empleadas permiten obtener productos que requerirán igual energía para ser desmenuzado por los dientes, con el tiempo de proceso de 160 segundos se logra la menor masticabilidad.

Palabras clave: Textura, ahuyama, freído, análisis de perfil de textura.

Profile analysis of texture of squash (*Cucurbita maximum*) subjected to atmospheric frying by immersion

Abstract

The squash is a vegetable considered as a good source of power in various regions of America, Europe and Asia, due to their consumption represents a significant contribution of provitamin A, vitamins C, E, B2, iron, phosphorus, calcium, carotenoids and high fiber content. Thanks to the agricultural potential that has this vegetable, it is recommendable to extend their use and think in different processing activities. Therefore, the objective of the present study was to determine the influence of the temperature of frying and the processing time of frying by immersion on the characteristics of the texture of the squash fried. Methodologically, the squash was characterized in front of their properties qualitative characteristics through analytical techniques, then, was a process of frying by immersion where temperatures of process used were 130, 150 and 170°C, the processing times employees were 40, 80, 120 and 160 seconds. Is handled a relation product-Oil 1:100 p/v. Finally, an analysis was made of texture profile for the determination of the characteristics of hardness, cohesiveness, adhesiveness, elasticity, and chewiness of the product obtained. It is concluded that the factors temperature and process time acting jointly modify the attributes of hardness and stickiness, at higher temperature and process time are obtained squashes less harsh and less sticky. For the cohesiveness, temperatures of 150 and 170°C allow to obtain products with greater resistance to the fragmentation and the processing times used represent equality in the strength of connection between the particles of the squash fried. For the elasticity, was obtained that the times and temperatures used allow breaking the same structure of the food and for the chewiness temperatures of process used to obtain products that require equal energy to be shredded by the teeth, with the processing time of 160 seconds is achieved the lowest chewiness.

Keywords: Texture, squash, frying, analysis of texture profile.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La ahuyama es una hortaliza perteneciente a la familia de las Cucurbitáceas, es considerada una buena fuente de alimentación humana en diversas regiones de América, Europa y Asia, debido a que su consumo representa un aporte significativo de provitamina A, vitaminas C, E, B2, hierro, fósforo, calcio, carotenoides y alto contenido de fibra (Gajewski et al., 2008). Es un producto de bajo costo, con disponibilidad permanente, sensible al frio, de fácil almacenamiento y de consumo masivo (Roura y Moreira 2003; Dutta et al., 2006). En cuanto a estadísticas de producción, para el año 2013, Colombia figuró como el cuarto productor de ahuyama más importante a nivel de Sudamérica con 102.596 toneladas, debajo de países como Perú con 232.888 toneladas, Argentina con 302.324 toneladas y Venezuela con 119.852 toneladas (Faostat, 2013). Dicha producción en el país se destinó principalmente para el consumo en fresco, para elaboración de cremas y como ingrediente en la preparación de sopas (Duque, 2013).

Debido a la variabilidad de las características físicas de la ahuyama referentes a peso, forma y tamaño, ha resultado complicado lograr estandarizar sus procedimientos de recolección, manejo, empaque, transporte, comercialización y distribución (Habibunisa et al., 2001). A pesar de ello y gracias al potencial agrícola que tiene esta hortaliza referente a la versatilidad para el uso alimenticio y medicinal, es recomendable ampliar su utilización y pensar en diferentes actividades de procesamiento para lograr un mejor aprovechamiento agroindustrial, que permita generar valor agregado, desarrollo tecnológico y elaborar productos novedosos (Rodríguez et al., 2016). En este sentido, el freído por inmersión es un proceso que puede contribuir con el desarrollo requerido por la agrocadena de la ahuyama, ya que es un procedimiento muy utilizado en cocinas y restaurantes, considerándose como uno de los métodos de cocción con mayor aceptación a nivel mundial (Arias et al., 2013). El freído es una operación que involucra procesos de transferencia de calor y transferencia de masa, incluyéndose reacciones químicas que ocurren de forma simultánea a estos fenómenos, donde se producen atributos deseables de calidad en el producto referentes al color, sabor, olor y textura (Morales y Vélez, 2011). Estos efectos se generan por la aparición de una costra que crece y se forma en la parte externa de la matriz procesada, con la cual, se regula la pérdida de humedad, la ganancia de aceite y los cambios microestructurales al interior de la matriz (Aguilera, 1997; Sagui et al., 1998; Gökmen, 2007).

Posterior al proceso de freído por inmersión, uno de los atributos de calidad sensorial que usualmente evalúan los consumidores es la textura. Este parámetro puede definirse como el conjunto de las propiedades reológicas, de estructura geométrica y de superficie de un producto que se ve determinada por los mecanoreceptores, receptores táctiles, receptores visuales y en algunos casos receptores auditivos (Pedreschi y Moyano, 2005a). Experimentalmente, se ha demostrado que los tratamientos térmicos generan cambios en la microestructura de los alimentos y por ende modifican sus parámetros de textura (Nisha et al., 2006). Para analizar dichos cambios en los alimentos procesados y con el propósito de determinar las propiedades viscoelásticas y texturales, se pueden llevar a cabo pruebas de puntura y doble compresión, (Ramos et al., 2003; Kahyaoglu y Kaya 2006; Nisha et al., 2006). En este sentido, la prueba de doble compresión se conoce como “Análisis de Perfil de Textura”, este ensayo se determina de forma instrumental y busca simular el proceso de masticación humana (Szczesniak 1975; Rosenthal 2010). Actualmente, se realiza con la ayuda de un equipo analizador de textura conocido como texturómetro, se fundamenta principalmente en la doble compresión del alimento para intentar aparentar un mordisco y la acción de los dientes (Hleap y Velasco, 2010; Tavera-Quiroz et al., 2012). Por ello, para obtener una aproximación textural ideal en el producto final, se debe considerar la selección adecuada de aspectos como el tiempo de freído, las condiciones de enfriamiento, la temperatura del medio convectivo de calentamiento, la composición y tipo de material de recubrimiento, contenido de agua y cantidad de proteínas que el alimento posee (Shieh et al., 2004). A raíz de lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar la influencia de la temperatura de freído y el tiempo de proceso del freído por inmersión sobre las características de textura de la ahuyama frita.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo experimental del proyecto, se adquirieron ahuyamas (*Cucúrbita máxima*) con índice de madurez comercial en un almacén de cadena de la localidad de Sincelejo (Colombia). Las ahuyamas fueron sometidas a procedimientos de recepción y acondicionamiento. Inicialmente, fueron lavadas con una solución hipoclorito de sodio en una concentración de 5000 partes por millón durante 1 minuto, luego, se pelaron y se cortaron hasta obtener paralelepípedos de dimensiones de 1x1x4 cm^3 con ayuda de un sacabocados. Luego se empacaron en bolsas resellables y se introdujeron al desecador hasta iniciar los análisis posteriores.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Caracterización de la ahuyama.

Para la caracterización bromatológica de la ahuyama, se realizaron las siguientes técnicas analíticas: en la humedad se utilizó la NTC 572 hasta alcanzar peso constante, para el análisis de proteína se siguió el método de extracto nitrogenado, para el análisis de grasa se utilizó la AOAC 960.39, para la determinación de fibra a través de digestión ácido-base y carbohidratos por diferencia de los componentes determinados, todos los análisis se realizaron por triplicado.

Proceso de freído por inmersión.

Para el desarrollo del proceso de freído por inmersión, las muestras de ahuyama fueron procesadas utilizando una freidora comercial marca GSM® de 5 litros de capacidad y equipada con controlador de captura de temperaturas de rango entre 5-200±2C. Se manejó una relación producto-aceite de 1:100 p/v, como medio convectivo de calentamiento se utilizó una mezcla de aceite vegetal (soya y oleína de palma) con antioxidantes (TBHQ o BHT) y ácido cítrico como sinergista, las temperaturas de proceso utilizadas fueron 130, 150 y 170°C, los tiempos de procesamiento empleados fueron 40, 80, 120 y 160 segundos. Finalizado el proceso de freído, las muestras se escurrieron en papel absorbente durante 60 segundos, luego, se empacaron en bolsas resellables previamente rotuladas y se introdujeron al desecador hasta iniciar los análisis posteriores. Todas las actividades de freído se realizaron bajo presión atmosférica (aproximadamente 101.325 Kpa) y por triplicado.

Análisis de perfil de textura.

Las muestras provenientes del proceso de freído por inmersión fueron sometidas a un análisis de perfil de textura utilizando un texturómetro TA.Xplus. Experimentalmente, se realizó una doble compresión uniaxial con ayuda de un plato de diámetro de 3.8 cm y a una velocidad de 1 mm/s hasta un 30% de su altura inicial. Se determinaron las características de dureza, cohesividad, adhesividad, elasticidad y masticabilidad en la ahuyama frita.

Análisis estadístico de los datos.

Para el análisis de los datos se realizó un experimento factorial bajo arreglo completamente al azar con dos factores, el primer factor fue la temperatura de freído con tres niveles (130, 150 y 170°C) y el segundo factor fue el tiempo de proceso con cuatro niveles (40, 80, 120 y 160 segundos), se realizaron tres replicas para cada tratamiento para un total de 36 unidades experimentales. Además, se realizó un análisis de varianza ($\alpha<0.05$) para detectar diferencia significativa entre los valores medios de las características del perfil de textura y un test de comparaciones múltiples de Student Newman Keuls (SNK) para obtener el mejor tratamiento conforme al comportamiento de las variables de respuesta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1, se ilustran los resultados obtenidos referentes al valor medio con la respectiva desviación estándar de las propiedades bromatológica de la ahuyama en fresco.

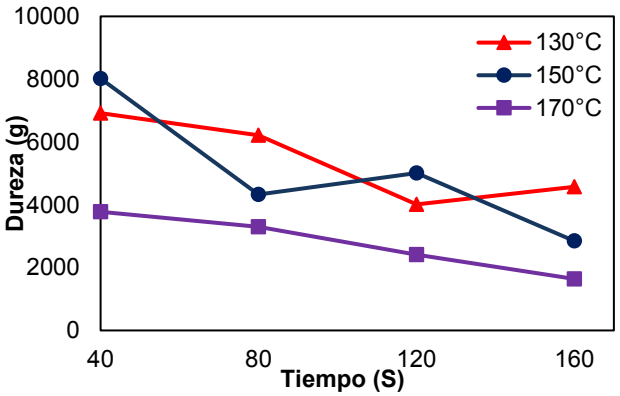
Tabla 1: Resultados de características bromatológicas de la ahuyama en fresco.

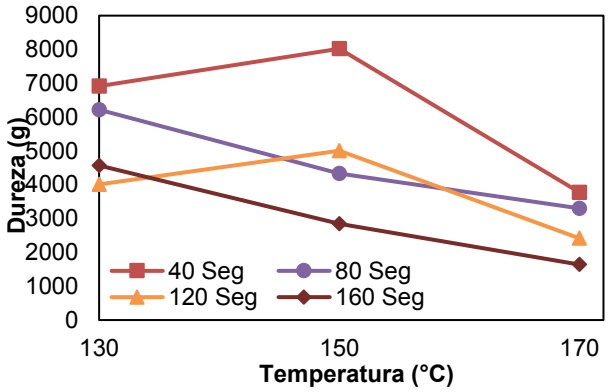
Tipo de análisis	*Valor medio obtenido*
% Humedad	*87.753±0.055*
% Carbohidratos	*0.66±0.0037*
% Proteínas	*1.130±0.069*
% Grasa	*0.070±0.030*
% Fibra	*3.167±0.231*
% Cenizas	*0,767± 0.307*

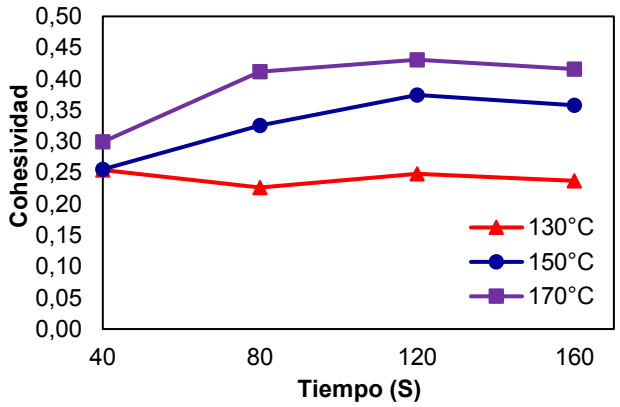
La humedad con un 87.753±0.055% es el componente de mayor predominancia en la ahuyama, el valor obtenido está conforme con lo que se ha reportado en la literatura, oscilado entre 79 y 93% (Aguilar et al., 2006; Jacobo et al., 2008; Aziah y Komathi, 2009). Por su parte, el contenido de carbohidratos y proteínas obtenido fue de 0.66±0.0037% y 1.130±0.069% respectivamente, el valor obtenido de proteínas se encuentra dentro del rango de 0.97 a 1.41% reportado por Lee et al., (2002). Con respecto al porcentaje de grasa, se obtuvo un 0.070±0.030%, lo cual se está entre lo reportado por See et al., (2007) y por Jacobo et

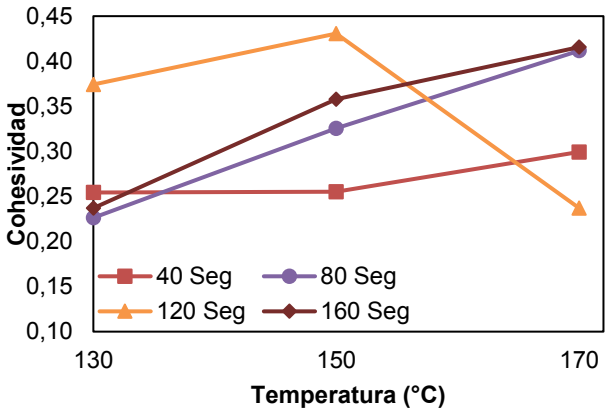
 ISBN 978-607-8242-11-5

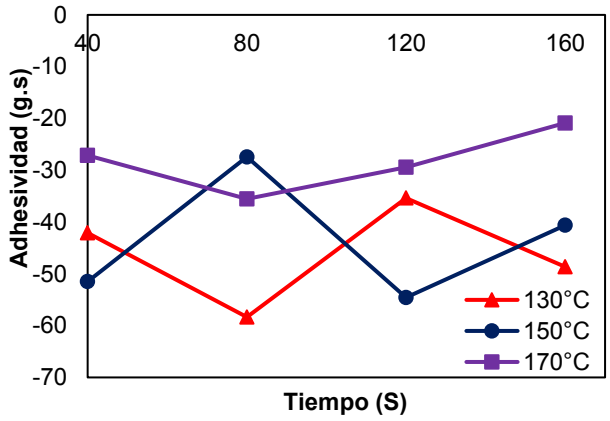
al., (2008) de 0.07-0.16%. Respecto al porcentaje de fibra, el valor conseguido fue de 3.167±0.2310%, este se supera lo reportado por Jacobo et al., (2008) y por See et al., (2007), quienes mencionaron un intervalo de 0.56–1.56% referente a fibra cruda Lee et al., (2002) reportaron un rango de 0.57–0.89% para las cenizas en esta hortaliza, la muestra estudiada está dentro de estos valores.

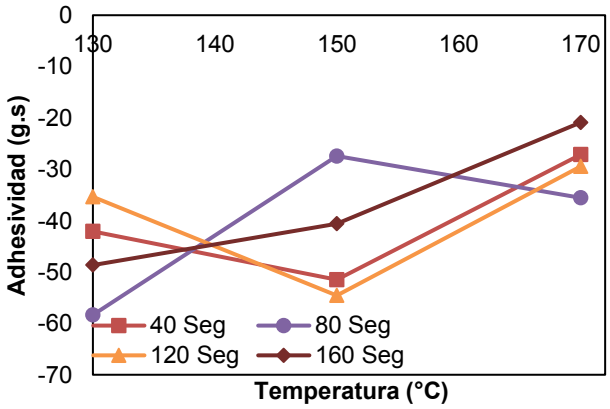


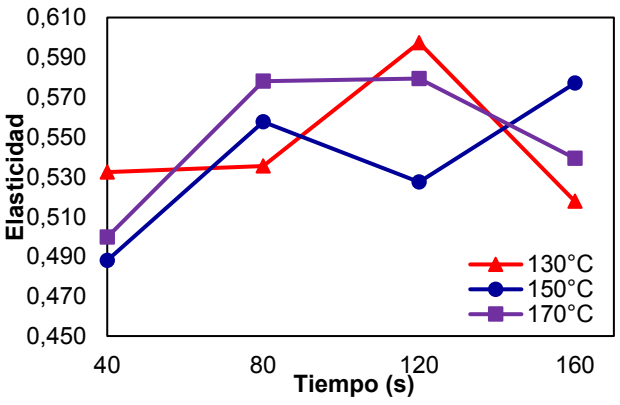


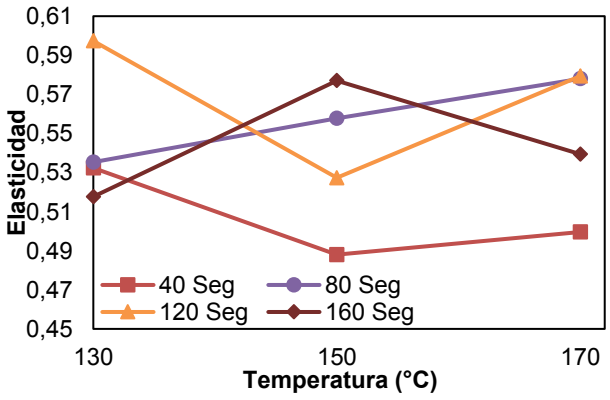












ISBN 978-607-8242-11-5

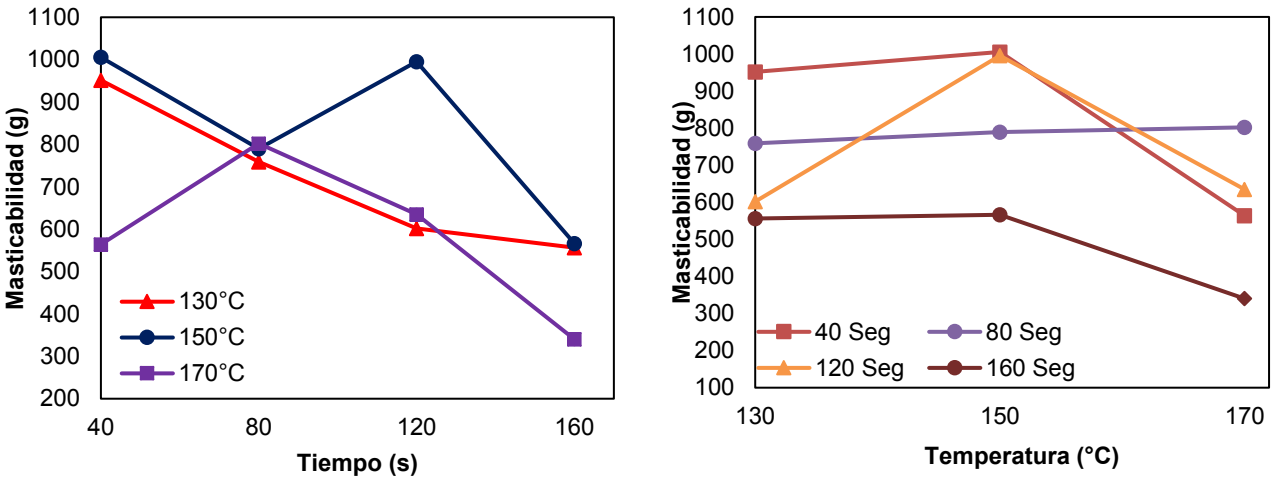


Fig. 1: Gráficos de interacción del diseño factorial para los parámetros de textura de la ahuyama frita.

En la figura 1, se puede observar que las tendencias de las líneas de los factores temperatura de freído y tiempo de proceso con respecto a las variables de respuesta del análisis de perfil de textura referentes a dureza, adhesividad, elasticidad, cohesividad y masticabilidad no son iguales ni tienen tendencias similares, por tanto, se puede inferir que existe interacción entre los factores de estudio frente a las variables de respuesta de los parámetros del perfil de textura en la ahuyama frita. Con el fin de verificar esta aseveración, en la tabla 2, se ilustra un resumen de los resultados del análisis de varianza realizado para los factores de estudio (Temperatura y Tiempo) actuando por separado e interactuando conjuntamente frente a las variables de respuesta de los parámetros del análisis de perfil de textura referentes a dureza, adhesividad, elasticidad, cohesividad y masticabilidad.

Como se puede observar en la tabla 2, se obtuvieron P-valores<0.05 para la interacción Temperatura-Tiempo de las variables de respuesta dureza y adhesividad. Por tanto, a un nivel de significancia del 5% existe suficiente evidencia estadística para afirmar que los valores medios obtenidos para estas variables son diferentes y están influenciados por los factores de estudio actuando de forma conjunta. Caso contrario se obtuvo para las variables de cohesividad, elasticidad y masticabilidad, donde los P-valores obtenidos superan el nivel de significancia establecido e indican que la variabilidad en las respuestas referentes a los valores medios de estas variables no depende directamente de los factores actuando de forma conjunta, pero si actuando de forma independiente, por lo que es necesario analizar el efecto de los factores por separado.

Tabla 2. Resumen del análisis de varianza para las características de dureza, cohesividad, adhesividad, elasticidad y masticabilidad de la ahuyama frita.

Variable de respuesta	*P-valores Factores e interacciones*		
	Temperatura (C)	*Tiempo (s)*	*Temperatura-Tiempo*
Dureza (g)	*0.000003*	*0.000008*	*0.041760*
Cohesividad	*0.000050*	*0.074770*	*0.447790*
Adhesividad (g·s)	*0.002390*	*0.901390*	*0.029180*
Elasticidad	*0.851740*	*0.102850*	*0.388320*
Masticabilidad (g)	*0.069240*	*0.034620*	*0.513470*

Para aquellas variables que mostraron significancia en la interacción Temperatura-Tiempo, se procedió a realizar el test de comparaciones múltiples de Student Newman Keuls para determinar los tratamientos que presentaron diferencias en sus valores medios, los resultados obtenidos se ilustran detalladamente en la tabla 3. Para las variables donde la interacción Temperatura*Tiempo no resultó ser significativa se procedió a analizar la influencia de los factores por separado, los resultados q8e se obtuvieron para este análisis se ilustran en la tabla 4.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 3. Resultados del Test de Student Newman Keuls (SNK) de los parámetros de textura de la ahuyama frita para los que la interacción Temperatura-Tiempo resultó significativa.

Variable	*Factores*	*Tiempo (s)*			
	Temperatura (C)	*40*	*80*	*120*	*160*
Dureza (g)	*130*	*6918.75±1250aA*	*6219.03±1463.9aAB*	*4013.85±997.57abB*	*4569.24±994.2aB*
	150	*8021.37±1329.7aA*	*4329.82±380.5abB*	*5007.80±1359.5aB*	*2847.54±1148abB*
	170	*3777.29±970.5bA*	*3302.04±713.2bA*	*2416.40±482.2bA*	*1640.07±835.4bA*
Adhesividad (g·s)	*130*	*-42.10±21.34aA*	*-58.35±12.47bA*	*-35.37±8.18abA*	*-48.65±1.83bA*
	150	*-51.49±3.85aAB*	*-27.41±5.68aA*	*-54.56±13.44bB*	*-40.62±12.7abAB*
	170	*-27.13±10.15aA*	*-35.53±19.66abA*	*-29.43±10.40aA*	*-20.87±6.4aA*

Medias con letras diferentes en filas (mayúsculas, comparación entre tiempos para cada temperatura) y columnas (minúsculas, comparación entre temperaturas para cada tiempo) indican diferencias significativas (P≤0.05).

Analizando los resultados obtenidos para la variable dureza, puede inferirse que con el nivel de tiempo de proceso de 40 segundos, el nivel de temperatura de freído que permitió disminuir la dureza de la ahuyama fue el de 170°C, igual tendencia se obtuvo con los niveles de 60, 120 y 160, donde interactuando con la temperatura de 170°C fue donde se obtuvieron menores valores medios en esta característica de textura. De igual forma, analizando los niveles de tiempo dentro de los niveles de temperatura, se puede deducir que con la temperatura de 130°C, el nivel de tiempo que permitió disminuir los valores de dureza fue el de 120 segundos, pero no siendo diferente estadísticamente con el nivel de 160 segundos. Similar resultado se obtiene con el nivel de temperatura de 150°C, donde a mayor tiempo de proceso se obtuvo menor dureza, por último, con el nivel de 170°C y 160 segundos se obtuvo la menor dureza en la ahuyama, pero siendo estadísticamente igual con los otros niveles de tiempo de proceso. De forma general, puede inferirse que en el proceso de freído por inmersión de la ahuyama, la variable dureza disminuye a medida que incrementa la temperatura y el tiempo de proceso, permitiendo obtener productos menos duros por efecto del mayor ablandamiento por cambios en los enlaces de amilosa y amilopectina de los almidones, ocasionando mayor gelatinización cuando entran en contacto con un aceite más caliente y por mayor tiempo de exposición al intercambio másico (Andersson et al., 1994; Pedreschi y Moyano, 2005b; Granados et al., 2014).

Con respecto a la variable adhesividad, se infiere que con el nivel de 30 segundos de proceso es indiferente utilizar cualquier nivel de temperatura de freído, puesto que los valores medios de esta variable permanecen estadísticamente iguales. Con el nivel de 80 segundos, el nivel de temperatura de 150°C fue el que permitió obtener el mayor valor de adhesividad, resultado diferente se obtuvo con el nivel de tiempo de 120 y 160 segundos, donde a mayor temperatura de proceso (170°C) se obtuvieron los valores más elevados de adhesividad en la ahuyama frita. Con el análisis de los niveles de tiempo dentro de los niveles de temperatura se puede deducir que con el nivel de 130°C los valores de adhesividad a los diferentes tiempos de proceso resultan estadísticamente iguales, al nivel de 150°C la mayor adhesividad se obtiene con el nivel de 80 segundos de procesamiento y finalmente con el nivel de 170°C con todos los niveles de tiempo de proceso se obtienen iguales valores de esta variable. De lo anterior se afirma que, el tratamiento de 170°C de temperatura de freído interactuando con el nivel de tiempo de 160 segundos fue el que permitió obtener el mayor valor medio de adhesividad, indicando productos mucho menos pegajosos y con menor valor medio de trabajo requerido por parte del consumidor para lograr despegar la ahuyama de una superficie, ya sea de los molares o el paladar. Esto puede atribuirse a que con el incremento de la temperatura y del tiempo de proceso en el freído por inmersión, se obtienen productos más secos y con menos pegajosidad por efecto de la formación de la costra resultante de la deshidratación de las células de la superficie externa de la ahuyama procesada (Bordin et al., 2013).

Tabla 4. Resultados del Test de Student Newman Keuls (SNK) de los parámetros de textura de la ahuyama frita para los que la interacción Temperatura-Tiempo no resultó significativa.

Temperatura (C)				*Tiempo (s)*			
Ref.	*Cohesividad*	*Elasticidad*	*Masticabilidad (g)*	*Ref.*	*Cohesividad*	*Elasticidad*	*Masticabilidad (g)*
130	*0.243±0.02b*	*0.547±0.05a*	*717.2±258.2a*	*40*	*0.271±0.03a*	*0.507±0.04a*	*840.28±312.8a*
150	*0.329±0.06a*	*0.538±0.04a*	*839.2±282.8a*	*80*	*0.323±0.09a*	*0.558±0.04a*	*783.57±219.8ab*
170	*0.389±0.09a*	*0.550±0.06a*	*585.3±282.7a*	*120*	*0.352±0.11a*	*0.568±0.06a*	*744.22±333.7ab*
-	*-*	*-*	*-*	*160*	*0.335±0.09a*	*0.545±0.03a*	*487.66±169.54b*

Medias con letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (P≤0.05).

ISBN 978-607-8242-11-5

Referente a la cohesividad de la ahuyama frita, en la tabla 4 se puede observar que con las temperaturas de 150 y 170°C fue donde se obtuvo el mayor valor de esta variable, revelando que después de efectuado dicho tratamiento la ahuyama conservó la mayor unión entre las partículas que conforman la matriz, presentando la mayor resistencia a la fragmentación del producto por efecto de la acción mecánica del equipo de textura, con los tiempos de procesamiento utilizados no se encontraron diferencias significativas entre los valores medios de cohesividad, indicando igualdad en la fuerza de unión entre las partículas de la ahuyama frita. De forma general, los resultados obtenidos apuntan a que la ahuyama tiende a recuperar su estructura máximo un 38% referente a su estado inicial posterior a la primera compresión realizada, significando que el proceso de freído logra disminuir la fuerza con las que las partículas estructurales de la ahuyama están unidas (Szczesniak, 2002; Guzmán et al., 2015).

Por otro lado, en la variable elasticidad se obtuvo que los diferentes niveles de temperatura y de tiempo utilizados no afectaron representativamente esta variable como para obtener diferencias entre ellos, por tanto, con cualquiera de las temperaturas de freído o los tiempo de proceso evaluadas en este estudio representa igual capacidad de recuperación de la altura del paralelepípedo de ahuyama frita por inmersión posterior a la primera compresión y por tanto, permite que se rompa igual valor estructura original del alimento (Rosenthal, 1999). Finalmente, para la variable masticabilidad se obtuvo que con las temperaturas de proceso empleadas no se marcaron diferencias estadísticas entre los valores del requerimiento energético necesario para masticar el producto a base de ahuyama y desintegrarlo hasta que pueda ser ingerido por el consumidor (Gonzales et al., 2015); con respecto a los niveles de tiempo de proceso se puede inferir que a medida que el tiempo de proceso transcurrió los valores de masticabilidad fueron disminuyendo hasta marcar diferencias significativas, el valor que permitió obtener un menor valor más bajo de esta variable fue el tiempo de proceso de 160 segundos, permitiendo obtener un producto que requerirá menor energía por parte de la acción de los molares del consumidor para triturar la ahuyama frita y desintegrarla hasta que se pueda ingerir totalmente (Gonzáles et al., 2015).

CONCLUSIONES

De forma general, realizar cambios en la temperatura y en el tiempo de proceso del freído por inmersión produce cambios en los parámetros de textura de la ahuyama frita, ocasiona que la dureza disminuya a medida que incrementa la temperatura y el tiempo de proceso, permitiendo obtener productos menos duros y produce mayor gelatinización cuando entran en contacto con un aceite más caliente y por mayor tiempo de exposición al intercambio másico. Referente a la adhesividad, el tratamiento de 170°C de temperatura de freído interactuando con el nivel de tiempo de 160 segundos fue el que permitió obtener el mayor valor medio de adhesividad, indicando productos mucho menos pegajosos. En la cohesividad, las temperaturas de 150 y 170°C permiten obtener productos con mayor resistencia a la fragmentación por efecto de la acción mecánica del equipo de textura, con los tiempos de procesamiento se obtuvo igualdad en la fuerza de unión entre las partículas de la ahuyama frita. Para la elasticidad se obtuvo que los diferentes niveles de temperatura y de tiempo utilizados permiten que se rompa igual estructura del alimento. Finalmente, para la masticabilidad se obtuvo que las temperaturas de proceso empleadas permiten obtener productos que requerirán igual energía para ser masticados y desintegrados hasta que pueda ser ingerido por el consumidor, de igual forma con el tiempo de proceso de 160 segundos se logra el menor valor de masticabilidad.

REFERENCIAS

Aguilar-Gutiérrez, F., J. J. Zazueta-Morales, y I. L. Camacho-Hernández, "*Metodología de superficie de respuesta en la obtención de hojuelas pre-cocidas deshidratadas de calabaza (Cucúrbita Moschata D.) Cehualca*". Tesis de licenciatura. Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa (2006).

Aguilera, J.M., *"Fritura de Alimentos. Temas en Tecnología de Alimentos. Volumen I"*, Alfaomega, 187-214 (1997).

Andersson, A., V. Gekas, I. Lind, F. Oliveira, R. Öste y J. M. Aguilfra, *"Effect of preheating on potato texture*", Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 34(3), 229-251 (1994).

Arias-Méndez, A., A. Warning, A. K. Datta, y E. Balsa-Canto, *"Quality and safety driven optimal operation of deep-fat frying of potato chips",* Journal of Food Engineering, 119(1),125-134 (2013).

Aziah, A. y C. Komathi, *"Physicochemical and functional properties of peeled and unpeeled pumpkin flour"*, Journal Food Sci, 74(7), S333 (2009).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Bordin, K., M. Kunitake, K. Aracava, y C. Trindade, *"Changes in food caused by deep fat frying-A review",* Arch Latinoam Nutr, 63(1),5-8 (2013).

Habibunisa B, R. Prasad y K. Shivaiah, *"El comportamiento de almacenamiento de calabaza mínimamente procesados (Cucúrbita máxima) en las condiciones de envasado en atmósfera modificada",* European Food Technology Research, 212,165-169 (2001).

Duque M., *"Prácticas en el consumo de frutas y hortalizas en hogares de dos comunidades de la zona rural del municipio de turbo",* 1-45 (2013).

Dutta, A., U. Rauchaudhuri, y R. Chakraborty, *"Rheological characteristic and thermal degradation kinetics of beta – carotene"*. Journal of Food Engineering 76(1), 538-546 (2006).

Faostat, *"Statistical yearbook 2013: World food and agricultura"*. FAO Food Agric. Organziation UN Rome Italy (2013).

Gajewski M., J. Radzanowska, H. Danilcenko, E. Jariene y J. Cerniauskiene, *"Quality of pumpkin cultivars in relation to sensory characteristics",* Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 36(1),73 (2008).

Gökmen V y H. Şenyuva, *"Acrylamide formation is prevented by divalent cations during the Maillard reaction",* J. Agric. Food Chem, 103(1), 196-203 (2007).

González, A., A. Alvis, y G. Arrázola, *"Efecto del Recubrimiento Comestible en las Propiedades de Trozos de Batata (Ipomoea Batatas Lam) Fritos por Inmersión: Parte 1: Textura",* Información tecnológica, 26(1), 95-102 (2015).

Granados, C., D. Acevedo, A. Cabeza y A. Lozano, *"Análisis de perfil de textura en plátanos pelipita, hartón y topocho".* Información Tecnológica 25(5), 35-40 (2014).

Guzmán, L., D. Acevedo, y D. Tirado, *"Deshidratación osmótica de pulpa de tamarindo (Tamarindus indica l.): influencia de la temperatura y la concentración*", Revista Udca Actualidad & Divulgación Científica 17(1), 123-130 (2015).

Hleap, J. I. y V. A. Velasco, *"Análisis de las propiedades de textura durante el almacenamiento de salchichas elaboradas a partir de tilapia roja (oreochromis sp.)",* Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, 8(2), 46-56 (2010).

Jacobo-Valenzuela, N., J. Zazueta-Morales, V. Pérez-Castañeda, I. Camacho-Hernández, J. Gallegos-Infante y N. Rocha-Guzmán, *"Rediscovering winter squash (Cucúrbita moschata d.) cv. cehualca as a magic food in sinaloa state"*, Revista Salud Pública Y Nutrición 1:219 (2008).

Kahyaoglu, T. y S. Kaya, *"Modeling of moisture, color and texture changes in sesame seeds during the conventional roasting"*. Journal of Food Engineering 75(2):167-177 (2006).

Lee, C. H., J. K. Cho, S. J. Lee, W. Koh, W. Park y C. H. Kim, *"Enhancing βcarotene content in Asian noodles by adding pumpkin powder"*. Cereal Chemistry, 79 (4), 593–595 (2002).

Morales J y J.Vélez "Estudio del Efecto Combinado del Secado y Freído en las Propiedades de Tortillas Tostadas". Inf. Tecnol, 22(2), 55-68 (2011).

Nisha, P., R. S. Singhal, y A. B. Pandit, *"Kinetic modelling of texture development in potato cubes (Solanum tuberosum L.), green gram whole (Vigna radiate L.) and red gram splits (Cajanus cajan L.)",* Journal of Food Engineering 76(4), 524-530 (2006).

Pedreschi F. y P. Moyano, *"Oil uptake and texture development in fried potato slices".* Journal of Food Engineering, 70(4), 557-563 (2005a).

Pedreschi, F. y P. Moyano, *"Effect of pre-drying on texture and oil uptake of potato chips",* LWT-Food Science and Technology, 38(6), 599-604 (2005b).

Ramos, I. N., T. R. S. Brandao y C. L. M. Silva, *"Structural changes during air drying of fruits and vegetables"*. Food Science and Technology International 9(3), 201-206 (2003).

Rodríguez-Manrique, J., A. Alvis-Bermúdez, F. Castellanos-Galeano, L. Gutiérrez-Mosquera, W. Díaz-Ávila, y A. Chávez-Salazar, *"Pérdidas de humedad y absorción de aceite en ahuyama sometida a osmodeshidratación y fritura"*. Agronomía Colombiana, 34(1Supl), S332-S335 (2016).

Rosenthal, A. J., *"Relation between instrumental and sensory measures of food texture. Food texture: Measurement and perception",* 1-17 (1999).

Rosenthal, A. J., *"Texture profile analysis–how important are the parameters?",* Journal of Texture Studies, 41(5), 672-684 (2010).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Roura S. y M. Moreira, *"Periodo de validez de la calabaza listo para su uso en cubos fresco parecido"*, Revista de Calidad de los Alimentos, 27, 91-101(2003).

Sagui I., G. Ufheil y S. Livings, *"Oil uptake in deep-fat frying. Review",* OCL, 5(1), 30-35. En: Transport Phenomena in Food Processing, J. Welti-Chanes (1998).

See, E., W. Abdullah, W. Nadiah, y A. Abdul, *"Physico-chemical and sensory evaluation of breads supplemented with pumpkin flour",* Asean Food Journal 14(2),123-130 (2007).

Shieh, C. J., C. Y. Chang, C. S. Chen y D. Kilcast, *"Improving the texture of fried food. Texture in Food: Volume 2: Solid Foods*", 501-523 (2004).

Szczesniak, A., *"Texture is a sensory property".* Food Quality and Preference 13(4),215-225 (2002).

Szczesniak, N. S., *"General foods texture profile revisited-ten years perspective".* Journal of Texture Studies, 6(1), 5-17 (1975).

Tavera-Quiroz, M. J., M. Urriza, A. Pinotti, y N. Bertola, *"Plasticized methylcellulose coating for reducing oil uptake in potato chips",* Journal of the Science of Food and Agriculture, 92(7),1346-1353 (2012).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelado de variables que afectan el microclima de la sandía (*Citrullus Lanatus*) en la región Sabana del departamento de Sucre, Colombia

Carlos S. Cohen Manrique[1], Jhonatan A. Rodríguez Manrique[1] y Rodrigo D. Salgado Ordosgoitia[1]
(1) Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura. CECAR, Sincelejo (Colombia)
E-mail: carlos.cohen@cecar.edu.co, jhonatan.rodriguez@cecar.edu.co, rodrigo.salgado@cecar.edu.co

Resumen

La sandía es una cucurbitácea que produce grandes frutos jugosos protegidos por una corteza dura, actualmente presenta carencias de suministro y sostenimiento hídrico. Por ello, el objetivo del presente estudio fue modelar las variables que afectan de manera directa el microclima en un cultivo de sandía en el departamento de Sucre, a través de un estudio de simulación como alternativa de control automático para sistemas de riego. Metodológicamente, se utilizaron los modelos de Penman-Monteith y de balance hídrico para analizar el requerimiento hídrico del cultivo. Como estrategia de control se utilizaron controladores de tipo PID y difuso para comparar su comportamiento y establecer la mejor opción frente a las dificultades de recurso hídrico del cultivo bajo las condiciones climáticas de la sabana del departamento de Sucre. Se concluye que del modelamiento aplicado, el controlador PID arrojó mejor rendimiento (aproximadamente de 3.3 veces) frente al controlador difuso en términos de un ciclo de trabajo de 24 horas. Además, se obtuvieron mejores resultados en términos de consumo energético, cantidad de líquido y estabilidad del sistema, frente al controlador difuso.

Palabras clave: Modelamiento, Microclima, Sistemas de Riego, Controlador Automático

Modeling of variables that affect the microclimate of the watermelon (*Citrullus lanatus*) in the region Sabana of the department of Sucre, Colombia

Abstract

The watermelon is a cucurbitacea that produces large fruits juicy protected by a hard rind, currently presents shortages of supply and sustaining water. Therefore, the objective of the present study was to model the variables that affect directly the microclimate in a crop of watermelon in the department of Sucre, through a simulation study as an alternative to automatic control for irrigation systems. Methodologically, we used the models of Penman-Monteith and water balance to analyze the requirement of water in your cultivation. As control strategy was used drivers of type PID and fuzzy logic to compare their behavior and to establish the best option in the face of the difficulties of water resource of the crop under the climatic conditions of the sabana of the department of Sucre. It is concluded that the modeling applied, the PID controller showed better performance (approximately 3.3 times) in front of the fuzzy controller in terms of a work cycle of 24 hours. In addition, better results were obtained in terms of energy consumption, the amount of fluid and stability of the system, in front of the fuzzy controller.

Keywords: Modeling, Microclimate, Irrigation Systems, Automatic Controller.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La Sandía es una Cucurbitácea, herbácea rastrera o trepadora, que produce frutos grandes y jugosos protegidos por una corteza dura (Everts et al. 2014). Es originaria de la zona tropical de África, los pobladores europeos fueron quienes la trajeron a América donde se extendió por todo el continente donde actualmente cuenta con más de 50 variedades. Organolépticamente, su color rojo característico se atribuye a un pigmento natural denominado licopeno, éste componente en ella oscila entre 3.38 y 11.34 mm/100gr, el cual tiene una repercusión apreciable en la salud humana, ya que reduce el riesgo de enfermedad muscular degenerativa, contribuye a la oxidación de lípidos séricos, disminuye el riesgo de cáncer de pulmón y afecciones por enfermedades cardiovasculares (Giovannucci et al., 2002; Perkins-Veazie, et al., 2006; Soteriou et al., 2014). La sandía es una de las frutas más extendidas por el mundo, siendo los principales países productores Turquía, Grecia, Italia, España, China y Japón. En Colombia, la tendencia de producción indicó un incremento cercano al 86% en la producción entre los años 2010 y 2014, pasando de 51.500 toneladas a 95.000 toneladas (Agronet, 2017). Así mismo, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural menciona que la sandía está incluida en la lista de los diez cultivos de mayor impacto económico y social por su área sembrada, lo que demuestra su frecuente cultivo e importancia en el renglón agrícola del país.

Por otro lado, Colombia al igual que la mayoría de los países de América latina es un país de regiones, por lo que su diversidad de climas es beneficiosa para el crecimiento de este tipo de plantas frutales. Sin embargo, el cambio climático ha ocasionado problemas de sequía por largas temporadas e inestabilidad en las condiciones climáticas, sumado a ello, la erosión causada por la deforestación y la poca tecnificación implementada en las prácticas agrícolas, complican la mayor expansión de este tipo de cultivos. Por lo cual, se requieren estrategias para la implementación y posterior optimización de sistemas de riego, con el propósito de suministrar la cantidad de líquido y elementos suplementarios necesarios para el crecimiento y desarrollo óptimo de un cultivo. Ya que la sandía dentro de sus prácticas de labranza necesita una larga temporada de crecimiento y riego cercana a los 80 días en tierra caliente, para que la semilla pueda germinar y crecer (Nabavi-Pelesaraei et al., 2016). Para definir dichos requerimientos, es necesario modelar los elementos del microclima de cada planta, considerando la influencia de las variables climatológicas como la evapotranspiración, la edad fenológica del cultivo, la interacción de la humedad y tipo de suelo, su permeabilidad y velocidad de infiltración, entre otros. En ese mismo sentido, para el adecuado crecimiento de la planta, es fundamental alcanzar el balance en la cantidad exacta de agua que se debe proporcionar a la plantación mediante el riego, para esto, resulta fundamental la incorporación de tecnologías de control moderno, el modelamiento matemático y las técnicas de simulación. A razón de lo anterior, el objetivo del presente estudio fue modelar las variables que afectan de manera directa el microclima en un cultivo de sandía en el departamento de Sucre, a través de un estudio de simulación como alternativa de control automático para sistemas de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodológicamente, se realizó la simulación del modelamiento del sistema llamado microclima de la planta de sandía (*Citrullus lanatus*) mediante el concepto de balance hídrico, es decir las iteraciones que resultaron entre el subsistema clima-cultivo-suelo. Se consideraron como variables previas de estudio el comportamiento de la evapotranspiración, la interacción de la humedad y tipo de suelo, su permeabilidad y el periodo de crecimiento del cultivo (Rahangadale y Choudhary, 2011). Así mismo, se tomó como base de estudio para la evapotranspiración el modelo matemático de Penman-Monteith (1) avalado por la FAO (Allen et al., 2006), que en su estructura hace uso de los principales factores climáticos que afectan directamente el consumo por evaporación metabólica en la planta, tales como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Estos datos fueron suministrados por la estación meteorológica satelital de Puerta Blanca, que perteneciente a la Universidad de Sucre, ubicada en municipio de Sincelejo en latitud 09°12' N y longitud 75°23'W. En principio, los datos seleccionados fueron 17.280, utilizándose lecturas horarias y agrupando las diferentes variables en matrices de datos de [24 x 30], es decir, 24 muestras horarias para 30 días de cada mes, durante los meses de marzo, abril, mayo y junio, fechas calendario que concuerdan con las fechas de cultivo de la sandía en la sabana sucreña y sus alrededores (Corpoica, 2012).

Para calcular la evapotranspiración se utilizó el método combinado de Penman-Monteith (P-M) como procedimiento estándar para la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Donde, ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm/día), Rn es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m² día), R_a es la radiación extraterrestre (mm/día), G es el flujo del calor de suelo (MJ/m² día), T es la temperatura media del aire a dos metros de altura (°C), U_2 es la velocidad del viento a dos metros de altura (m/s), e_a es la presión real de vapor (Kpa), e_s-e_a es el déficit de presión de vapor (Kpa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (Kpa/°C) y finalmente γ es la constante psicrométrica (Kpa/°C). A continuación se describen los procedimientos necesarios para calcular la ET_o en el área de estudio (Walter et al., 2005). Inicialmente, para determinar la constante psicrométrica se utilizó la ecuación (2).

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} \tag{2}$$

Donde C_p es el calor específico del aire en el área de medida (1.013x10-3 KJ/Kg C), P es la presión atmosférica (Kpa), λ calor latente de evaporización (Kpa/°C), ε es la relación del peso molecular del vapor del agua y el aire seco (0,622 para zonas cálidas) (FAO, 2011). Como λ expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua, su valor varía en función de la temperatura (Villalobos et al., 2009), para calcularla se utilizó la ecuación 3.

$$\lambda = 2.501 - (2.361 * 10^{-3}) * T \tag{3}$$

Experimentalmente, se observó que al determinar cada una de estos parámetros, se están definiendo valores únicos del modelo para cada región geográfica. Por lo cual, para determinar la presión atmosférica se consideró la ecuación 4 (FAO, 2011).

$$P = 101.3 * \left(\frac{(273.16 + T) - 0.0065\,z}{273.16 + T} \right)^{5.26} \tag{4}$$

Donde, z es la elevación del lugar de medida con respecto al nivel del mar (213 metros para la sabana sucreña) (POT, 2012), T es la temperatura del aire (°C). El valor de Δ se calculó utilizando la temperatura media diaria del aire (Murray, 1967).

$$\Delta = \frac{4098 * \left(0.6108 * e^{\left(\frac{17.27 * T}{T + 237,3} \right)} \right)}{(T + 237,3)^2} \tag{5}$$

Según Allen (2006), la presión de vapor de saturación de la temperatura instantánea del aire, se define como:

$$e_s = 0.6108 * \exp^{\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right)} \tag{6}$$

Donde, e_s se evaluó tanto para T_{Max} como para T_{Min}, de manera que pueda definir la presión de vapor de saturación media horaria. Así mismo, la presión real de vapor e_a dependió de e_s y del porcentaje de humedad relativa.

$$e_a = e_s * \frac{HR}{100} \tag{7}$$

La radiación neta se calculó mediante la diferencia entre R_{ns} y R_{nl}, así:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \tag{8}$$

Donde, R_{ns} es la radiación solar neta o de onda corta (MJ/ m² día) (Xu y Singh, 2002) y se modeló con:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \tag{9}$$

Donde, α es albedo o coeficiente de reflexión del cultivo (0.23 para sandia) (Allen et al., 2006) y R_S es la radiación solar (MJ/ m² día). R_{nl}, define la radiación de onda larga (MJ/ m² día), que es la radiación solar absorbida por la tierra y se convierte en energía térmica. Por su parte, R_{nl} se modeló como:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] \left(0,34 - 0,14\sqrt{e_a} \right) \left[1,35 \frac{R_S}{R_{SO}} - 0,35 \right] \quad (10)$$

Donde, σ es la constante de Stefan-Boltzmann (4,903 x 10-9 MJ/K m^2 día), T_{Max} es la temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas, T_{Min} es la temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas, e_a es la presión de vapor real (Kpa), R_s/R_{so} es la radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1,0) (adimensional), R_s es la radiación solar medida o calculada (MJ/K m^2 día) y la R_{so} es la radiación en un día despejado (MJ/K m^2 día) (Allen et al.,1994). La FAO define R_{SO} como:

$$R_{SO} = \left(0.75 + 2 * 10^{-5} * z \right) * R_a \quad (11)$$

La radiación extraterrestre absorbida (R_a) según Hargreaves y Samani (1985) se modeló por:

$$R_a = \frac{R_s}{K_{RS} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}}} \quad (12)$$

K_{RS} es 0,19 debido a que la zona de estudio es costera (Allen et al., 2006). R_S, fue tomada de los valores horarios entregados por la estación meteorológica (W/m^2), y el modelo de evapotranspiración de Penman-Monteith utiliza la radiación neta (MJ/m^2 día), para ello el factor de conversión utilizado fue 0,0864 (Roepstorff, y Nansen, 1998). Una vez definidos los diferentes modelos matemáticos y la utilización de las variables climatológicas medidas en la estación meteorológica, se alcanzó el valor de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Pero para distintos cultivos los valores de la evapotranspiración serían diferentes, y son definidos a través de una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de cultivo (K_c), quien depende del crecimiento de la planta y que ha sido calculado de acuerdo al método de Pruitt y Droorenbos (1977). Utilizando éste parámetro se pudo calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c), que se definió como la suma de la cantidad de agua utilizada en un cultivo específico y en la transpiración para construcción de tejidos, más el agua que se evapora del suelo donde se desarrolla la planta (De Carlos et al., 2008).

$$ET_C = K_C ET_O \quad (13)$$

Dónde, ET_c es la evapotranspiración del cultivo, ET_o es la evapotranspiración de Referencia, K_c es el coeficiente de desarrollo del cultivo que varía según su etapa fenológica. Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo de la sandía (figura 1), se requirieron tres valores de K_c correspondientes a la etapa inicial (K_{cini}), la etapa de mediados de temporada (K_{cmed}) y la etapa final del cultivo (K_{cfin}). Estos valores se obtuvieron analíticamente según la metodología propuesta por Allen et al., (2006), posteriormente fueron validados por la experiencia de agricultores y profesionales del área agrícola en la región de las sabanas del departamento de Sucre.

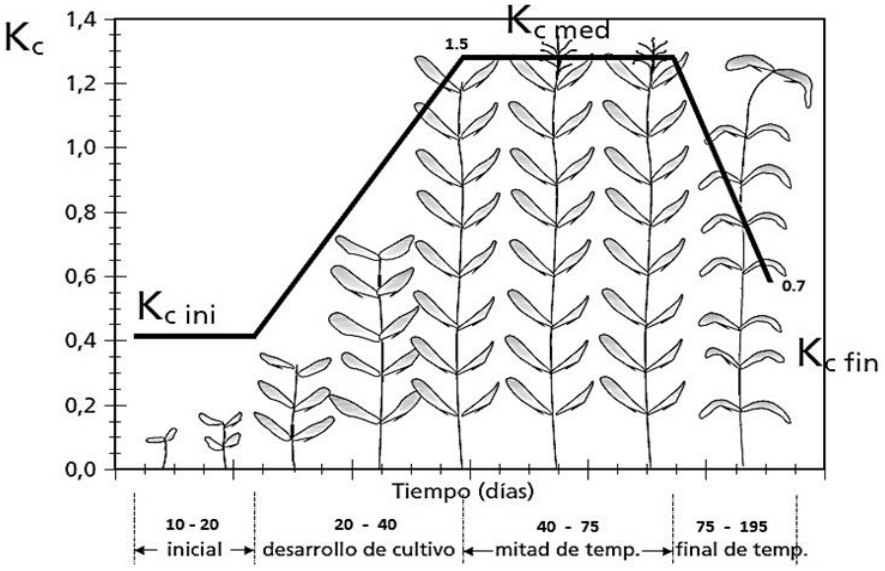


Fig. 1: Curva generalizada del coeficiente del cultivo de la Sandía (K_c).
Fuente: FAO modificada por los Autores.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Adicional al modelamiento de la pérdida de líquido mediante el proceso de evapotranspiración, se calculó el balance hídrico siguiendo la metodología de Laio (2001) y Rodríguez-Iturbe y Porporato (2007), considerándose el medio poroso como una estructura de pequeños conductos interconectados de diámetro *n* y teniendo en cuenta el flujo laminar expresado por la Ley de Darcy (Sánchez, 2011) de modo que:

$$nZ_r \frac{ds(t)}{dt} = \varphi[s(t);t] - \chi[s(t)] \quad (14)$$

Dónde, *n* es la porosidad del suelo, Z_r es la profundidad activa de la zona radicular de la planta, s(t) es el contenido relativo de humedad del suelo en términos porcentuales ($0 \leq s(t) \leq 1$), φ[s(t);t] es la tasa de infiltración, χ[s(t)] es la tasa de pérdida de humedad desde la zona radicular. Para considerar el efecto sobre la vegetación, la profundidad del suelo que se estimó en el volumen de control consistió en la profundidad de las raíces para un cultivo determinado (Z_r), debido a que es la capa en la cual el agua está disponible (agua fácilmente aprovechada, AFA) para ser absorbida por la planta. Según Hernández (2010), la tasa de infiltración φ[S(t); t] es el componente estocástico del balance y representa la parte de la precipitación que cae directamente sobre la columna de suelo. En el modelo de balance puntual se expresa como:

$$\varphi[s(t);t] = R(t) - I(t) - Q[s(t);t] \quad (15)$$

Donde R(t) es la tasa de precipitación, I(t) es la cantidad de precipitación interceptada por la cobertura vegetal y Q[S(t);t] es la tasa de escorrentía superficial, S(t) denota la ocurrencia de lluvia para el caso de la escorrentía. Los otros componentes solo dependen del instante de tiempo t considerado. La tasa de pérdida de humedad desde la columna del suelo se representó como:

$$\chi[s(t)] = E[s(t)] + L[s(t)] \quad (16)$$

Dónde, E[s(t)] es la tasa de evapotranspiración, medida con periodicidad horaria por la estación meteorológica (mm/día) (1) y L[s(t)] es la tasa de percolación profunda. Las ecuaciones (15) y (16) son simplificaciones matemáticas para la agilización del modelamiento, que a pesar de ser simplificaciones han brindado orientaciones fundamentales en cuanto a la relación entre la dinámica y las propiedades interdependientes del sistema clima–suelo–vegetación (Nuttle, 2002).

Estrategia de control

Para el diseño de la estrategia de control, inicialmente se consideró que los factores que determinan los requerimientos totales de agua de un cultivo son la evapotranspiración, tipo de suelo, permeabilidad del suelo y periodo de crecimiento del cultivo (Rahangadale y Choudhary, 2011). Se ha definido que para una sesión de riego algunos de estos parámetros son fijos (el tipo de planta, tipo de suelo y la etapa de crecimiento). Sin embargo, existen otros que varían con las características propias de la región de estudio, como la evapotranspiración, el perfil hídrico del cultivo y los niveles de absorción de agua por el suelo. En este estudio se consideró, un ciclo completo de riego para el crecimiento y desarrollo de la plantación de sandía. Así mismo, se estimó que normalmente para los sistemas de control en distritos de riego, además de considerar el perfil del suelo como homogéneo, es común definir el período de irrigación tomando como base el agua disponible total del suelo, esto es el agua útil o disponible para las plantas (AUP) (17) (Flores y Ruíz, 1998; Ortiz, 2006). Por lo tanto, el controlador debe funcionar de tal manera que pueda mantener estable el porcentaje de humedad en el suelo, cuyo rango se conoce como modelo de estimación para el agua útil en plantas (Lop y Peiteado, 2005). Entre ambos parámetros se estableció la zona de trabajo (figura 2), llamada agua útil o disponible.

$$AUP = CC - PMP \quad (17)$$

Donde, AUP es el agua disponible para las plantas, CC es la capacidad de campo y el PMP es el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente se determinaron en el laboratorio sometiendo muestras disturbadas o indisturbadas a equilibrio con presiones correspondientes a 0.3 bares para la CC y 15 bares para la PMP (Gurovich, 1999).

ISBN 978-607-8242-11-5

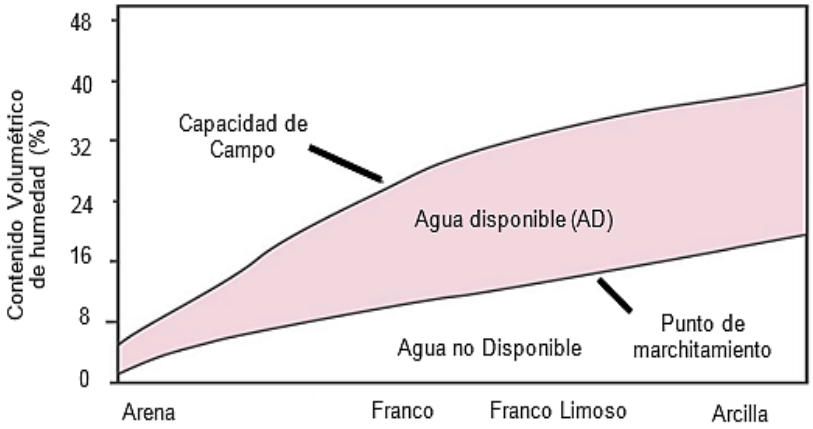


Fig. 2: Relación entre el contenido volumétrico de humedad y los tipos de suelo tomada de Dukes et al., (2010) y Osuna y Ramírez (2013).

Así mismo, para el modelamiento de la infiltración se contempló que los suelos no absorben linealmente el agua que les proveen las lluvias y/o los sistemas de riego, por lo cual para la obtención de la velocidad de infiltración del agua en el suelo se contempló el modelo de Kostiakov-Lewis ($I = k \times t^{-n}$), para n=-0.48 y ajustada en el parámetro *k* dependiendo del tipo de suelo del cultivo (Gavande, 1972). En la tabla 1, se ilustran los modelos propuestos por Moreno y Osorno (1999) para determinar la capacidad de campo del suelo y la densidad aparente en términos del porcentaje de humedad (%H) in situ, según el tipo de suelo.

Tabla 1: Modelos para los suelos en la región de estudio

Tipo de Suelo	*Modelo para Capacidad de Campo*	*Modelo Experimental para la Densidad Aparente (gr/cc)*
Arcilloso	CC=120,67-0,067(%Arena)-0,048(%Limo)-6,53(%Mat. Orgánica)-53,57DA	DA=1.577–0,0103*%H
Franco	CC=120,12+0,149(%Arena)+0,075(%Limo)+0,56(%Mat. Orgánica)-80,11DA	DA=1.4696-0.0083*%H
Franco Arcilloso	CC=162,43+ 0,022(%Arena)+0,014(%Limo)+1,696(%Mat. Orgánica)-103,17DA	DA=1.472–0.0086*%H

Como valores de referencia, se consideró que para el suelo arcilloso, la arena varía entre 43-51%, el limo entre 30-37% y la materia orgánica entre 2.03-2.5%. Para el suelo franco, la arena varía entre el 19-22%, limo entre el 34-40% y la materia orgánica 1.29-2.33%. Por último, para el suelo franco arcilloso, la arena está entre 29-39%, limo entre 31-46% y materia orgánica varía entre 1.14-2.07% (Moreno y Osorno, 1999). Con la tabla 1, se modelaron las características del suelo en cuanto a la absorción y capacidad de retención, incluyendo variables como la capacidad de campo (CC), definida como el volumen de agua que un suelo puede retener después de saturarlo y dejarlo drenar libremente durante 48 horas (WWF, 2005; Keller y Hakansson, 2010). Para la validación en el controlador, se consideró la metodología de Moreno-Osorno (1999) y Peralta (2010), para calcular el valor específico del punto de marchitez permanente (PMP) en la zona de estudio, donde se utilizó la ecuación 18.

$$PMP = 0.56 * CC \tag{18}$$

Así mismo, el modelo de humedad deseada utilizado fue definido por Flórez y Ruíz (1998), donde H es la máxima capacidad de almacenamiento de agua dentro del área radical en el día *i* expresada en milímetros (para el modelo de control, Humedad Deseada), P_{ri} es el crecimiento radicular para el día i (cm) y D_a es la densidad aparente del suelo.

$$H_{DESEADA} = \frac{CC - PMP}{100} * \mathrm{P}_{ri} * Da \tag{19}$$

Para la estimación del crecimiento radicular, se utilizó la función indicada por Norero (1976), que define la profundidad típica de enraizamiento sin impedimento físico para cualquier tipo de suelo en centímetros.

ISBN 978-607-8242-11-5

$$P_{ri} = 1.8 * \left(\frac{t_i}{t_{final}} \right) * \left(1.5 - \frac{t_i}{t_{final}} \right) * z \quad (20)$$

En la cual, t_i es el tiempo que transcurre en el desarrollo del cultivo (horas), t_{final} es el tiempo que demora el desarrollo del cultivo (horas) y z es la profundidad máxima que alcanzan las raíces del cultivo (cm).

La dinámica del proceso de riego fue descrita mediante el modelo de balance hídrico descrito en la ecuación (14). Este modelo establece que cualquier cambio en el almacenamiento de agua durante un tiempo dado y en una localidad específica, es el resultado de la resta del flujo de entrada de agua (riego, lluvia, acenso capilar) menos el flujo de salida de agua (evaporización, transpiración de la planta, escurrimiento de agua, percolación profunda), esto hace referencia a las ecuaciones (15) y (16) de manera que, utilizando las ecuaciones (18) y (19) para luego reemplazarlas en (17), obtendríamos el modelo de humedad actual definido por Flórez y Ruíz, (1997)

$$H_{REAL} = (q_i + H_i) - (I + ET_c + D) \quad (21)$$

Donde el agua drenada D, está expresada en términos de la tasa de infiltración I, la humedad del suelo una hora antes de la medición (H_i) y la humedad máxima permitida del suelo H_{MAX}.

$$D = (I + H_i) - H_{MAX} \quad (18)$$

Para un controlador, el objetivo fundamental es que H_{REAL} (21) sea lo más parecido posible a $H_{DESEADA}$ (19), de modo que el error tienda a ser cero. Y para ello, el sistema de riego debe estar activo y disponible para proveer proporcionalmente el líquido, de modo que pueda garantizar las exigencias del cultivo en todas sus etapas fenológicas y/o de producción. En la figura 3, se ilustra el esquema general del sistema de control utilizado.

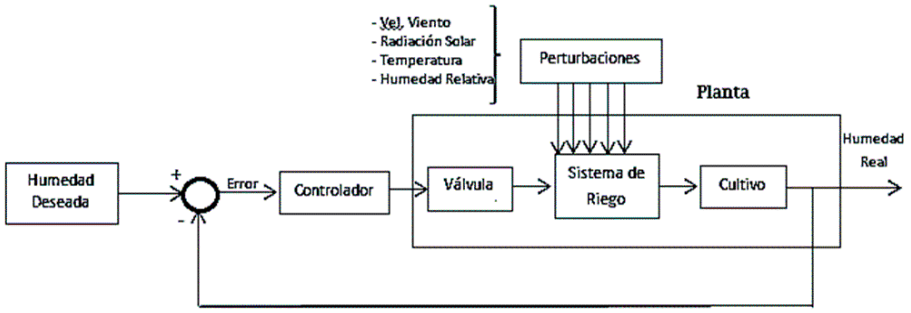


Fig. 3: Diagrama de bloques del controlador

Para la implementación de los controladores, se utilizó un controlador PID basado en su forma clásica, utilizando la ganancia respectiva (K_p) y sintonizando las variables propias del diseño, relacionadas con el controlador proporcional, integral y derivativo K_p, K_i y K_d. El método heurístico utilizado para optimizar el controlador fue la sintonización de Ziegler–Nichols. Además, se utilizó un controlador difuso previamente configurado utilizando base a reglas para estudiar sus rendimientos (Rahangadale y Choudhary, 2011). Los modelos mencionados fueron trabajados y simulados en el software Matlab® y su herramienta Simulink® (Klee y Randal, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4, se ilustra el resultado del modelo paramétrico de evapotranspiración ajustado a las condiciones climatológicas de la región, lo cual es congruente a los resultados obtenidos en distintas partes del mundo (Gong y Xu, 2005; Nandagiri y Kovoor, 2006; Nghi, 2008; Mundo-Molina, 2008; Howell, 2010; Adeboye y Osunbitan, 2010). Lo anterior demuestra la correcta aplicación del modelo de Penman–Monteith basado en los parámetros climatológicos circunscritos a la región Sabanas del departamento de Sucre. Por otro lado, la salida de los controladores está definida por la diferencia entre la humedad real del sistema y la humedad deseada, por ello en la figura 5 observándose el comportamiento del controlador difuso (señal azul) y del PID (señal roja), se infiere la relación entre la humedad deseada y real del sistema para ambos controladores, presentándose un margen del error tendiente a cero en el controlador PID (0,6% como máxima amplitud),

 ISBN 978-607-8242-11-5

mientras que para el controlador difuso el error aunque bajo, se muestra en el orden del 1.5% que según Rahangadale y Choudhary (2011) y Pivoňka (2006) es un valor válido para el desempeño del regulador, sobre todo para aplicaciones agrícolas donde los tiempos de respuesta de las variables que interactúan con el sistema, no requieren altas velocidades y/o extremada precisión.

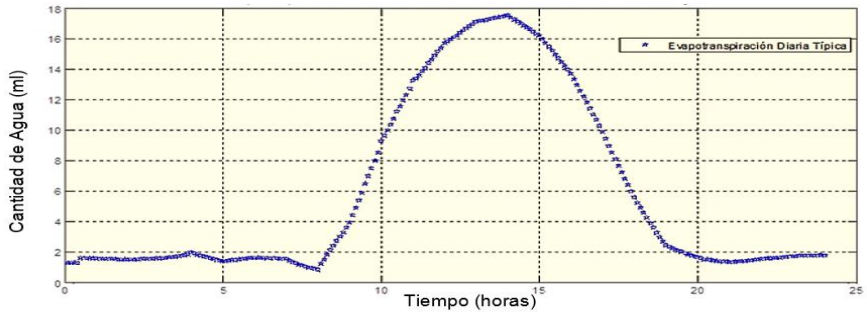


Fig. 4: Comportamiento de la Evapotranspiración en la zona de estudio

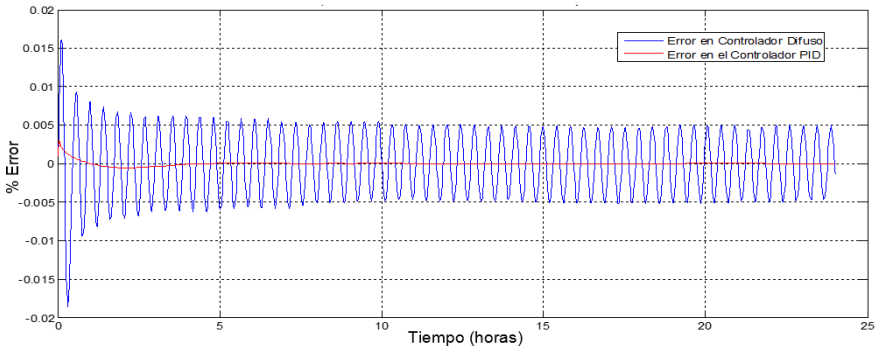


Fig. 5: Comparación entre el error en el controlador PID y Difuso

En la figura 5, se observa que el error del modelo de irrigación basado en el controlador PID es mucho menor que el difuso. El valor promedio de la señal de error en el PID durante las veinticuatro horas del día es de 1.047×10^{-5}, es decir del orden del 0.001% aproximadamente. Mientras que para el difuso, el valor promedio del error durante este mismo período de tiempo es del orden del 3.4379×10^{-5}, es decir 0.0034% aproximadamente. Es evidente que ambas magnitudes del error, son bastante bajas, pero aun así, el error en el controlador difuso es aproximadamente 3.3 veces mayor que el error transitorio en el controlador PID durante un día de trabajo de 24 horas. En la figura 6, se ilustra la comparación del consumo de energía, en base a los comportamientos de los controladores relacionando al trabajo realizado por el controlador PID y Controlador difuso para mantener estable el sistema.

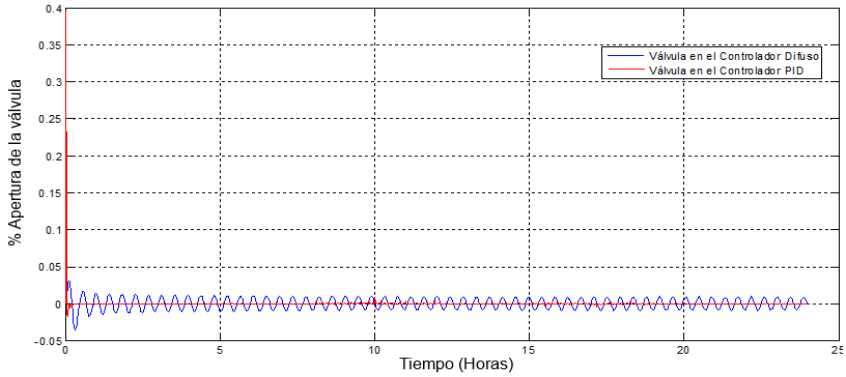


Fig. 6: Trabajo del Controlador PID y Difuso

Así mismo puede observarse que en términos de apertura de la válvula para determinar el riego (acción del controlador), ambos en un inicio entregan el mayor esfuerzo, 3.07% de apertura para el difuso y 39.65% de apertura para el PID. Aunque el sistema de irrigación basado en el controlador difuso muestra un valor de apertura inicial diez veces más pequeño que el requerido por el controlador PID, durante el resto del día mantiene un comportamiento oscilante alrededor de cero con una amplitud de ±1.08% y período de oscilación aproximada de 2.4 ciclos/hora, y con una media cercana al 0.11% de trabajo. Mientras que el controlador PID, luego del pico inicial cercano al 40% se estabiliza de tal manera que durante el resto del riego su accionar es cercano a cero, de modo que su valor medio de trabajo en cuanto a la señal de control para la apertura de la válvula es del orden de 0.0062%, lo que muestra largos períodos de inactividad. Es decir, que el trabajo del

ISBN 978-607-8242-11-5

controlador difuso es 17.7 veces mayor con respecto al controlador PID, esto se podría explicar porque la estabilidad del controlador difuso no está asegurada en las mismas proporciones del controlador difuso, por lo que sería recomendable ampliar la base de reglas en dicho controlador.

CONCLUSIONES

Se concluye que los modelos utilizados para estimar la evapotranspiración de las plantas, los volúmenes de agua para riego, el proceso de balance de flujo, el estudio de suelos en la sabana de Sincelejo y la velocidad de infiltración del agua en el suelo referentes al microclima del cultivo de sandía, pueden ser adaptados para recrear los requerimientos hídricos globales de las plantas de la manera más aproximada posible a la realidad y demostrando que éste es un proceso totalmente controlable en el tiempo y utilizable para estudios orientados a la producción agrícola en pequeña y gran escala. Además, dichos modelos son totalmente ajustable a los diferentes tipos de suelos existentes en la región de cobertura del estudio y en cualquier otra. Por su parte, desde el punto de vista del control puede considerarse como un método flexible y/o adaptativo para ser utilizado en cualquier tipo de cultivo hortofrutícola. En cuanto a los controladores, el PID arrojó un mejor rendimiento, de aproximadamente 3.3 veces frente al controlador difuso en términos de un ciclo de trabajo de 24 horas. Además, también se obtuvieron mejores resultados en término de consumo energético, cantidad de líquido y estabilidad del sistema frente al controlador difuso.

REFERENCIAS

Adeboye, O. y J. Osunbitan, "*Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and Temperature Based Models in Estimating Reference Evapotranspiration Using Complete and Limited Data, Application to Nigeria*", Ile-Ife, Nigeria: Department of Agricultural Engineering, (2010).

Agronet, "*Con base en Evaluaciones Agropecuarias - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural".* [En línea] disponible en: http://www.agronet.gov.co/agronet/Paginas/Mapa-del-sitio.aspx, (2017).

Allen, R. G., M. Smith, L. S. Pereira y A. Perrier, *"An update for the calculation of reference evapotranspiration"*, ICID bulletin, 43(2), 35-92 (1994).

Allen, R., L. Pereira, D. Raes, y M. Smith, *"Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos"*. Roma, Italia: FAO (2006).

Corpoica, *"El Cultivo de la Sandía o Patilla Citrullus Lanatus en Colombia. Villavicencio"*, Meta: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2012).

De Carlo, G. R, R. C. Salvador, J. T Arturo, F. V. Pedro, y V. S. César, *"Necesidades hídricas de los principales cultivos en el Estado de Baja California"* (2008).

Dukes, M. D., L. Zotarelli, y K. T. Morgan, *"Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida".* HortTechnology, 20(1), 133-142 (2010).

Everts, K. L., D. S. Egel, D. Langston, y X. G. Zhou, *"Chemical management of Fusarium wilt of watermelon"*. Crop Protection, 66, 114-119 (2014).

FAO, "*Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura*". Roma: FAO, Fiat Panis (2011).

Flóres, H. E., y J. A. Ruíz, *"Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico"*. Terra Latinoamericana, 16(3) (1998).

Gavande, S. A, *"Física de suelos".* Limusa. México, (1972).

Giovannucci, E., Rimm, E. B., Liu, Y., Stampfer, M. J., y Willett, W. C. A prospective study of tomato products, lycopene and prostate cancer risk. Journal of National Cancer Institute, 94, 391–398 (2002).

Gong, L., y C. Xu, *"Sensitivity of the Penman–Monteith Reference Evapotranspiration to Key Climatic Variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin"*, Basin, China: Uppsala University (2005).

Gurovich, L. *"Riego Superficial Tecnificado".* Ciudad de México, México: Alfaomega (1999).

Hargreaves, G. H., y Z. A. Samani, *"Reference crop evapotranspiration from temperature"*. Applied engineering in agriculture, 1(2), 96-99 (1985).

Hernández Tórres, G. *"Modelamiento eco-hidrológico de la humedad del suelo en el valle del río cauca".* Bogotá: (Doctoral dissertation. Universidad Nacional de Colombia), (2010).

Howell, T. *"The Penman - Monteith Method",* Bushland, USA: USDA - Agricultural Research Service, (2010).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Keller, T., y I. Hákansson, *"Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content"*. Geoderma, 154(3), 398-406 (2010).

Klee, H., y A. Randal, *"Simulation of Dynamic Systems with Matlab and Simulink"*. Boca Ratón, Florida: CRC Press (2011).

Laio, F. *"Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress"*. New York, USA: Adv. Water Resour (2001).

Lop, A., y C. Peiteado, *"Curso Riego para Agricultores: Proyecto de Autogestión del Agua en la Agricultura".* Madrid, España: WWF (2005).

Moreno, F., y J. Osorno, *"Estudio Comparativo de los Métodos de Laboratorio para la determinación de Capacidad de Campo y Obtención de Ecuaciones"*, Sincelejo, Sucre: Universidad de Sucre. (1999).

Mundo-Molina, M. *"Estandarización de las Ecuaciones para Estimar la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia"*. RIIT FI - UNAM, 125-135 (2008).

Murray F.W, *"On the computation of saturation vapor pressure"*, J. Appl. Meteor, 6:203-204 (1967).

Nabavi-Pelesaraei, A., R. Abdi, y S. Rafiee, *"Neural network modeling of energy use and greenhouse gas emissions of watermelon production systems"*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 15(1), 38-47 (2016).

Nandagiri, L., y Kovoor, G. M. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. Journal of irrigation and drainage engineering, 132(3), 238-249 (2006).

Nghi, V., *"Potencial Evapotranspiration Estimation and its effect on Hydrological Model Response at the Nong Son Basin"*. VNU Journal of Science, 213 – 223 (2008).

Norero, A. *"Evaporación y Transpiración: Serie Suelos y Climas"*. Mérida, Venezuela: CIDIAT (1976).

Nuttle, W. *"Is Ecohydrology one idea or many?"*, Journal-des Sciences Hydrologiques, 805 - 807 (2002).

Osuna, F. D., y S. Ramírez, *"Manual para cultivar cebolla con fertirriego y riego por gravedad en el estado de Morelos"* (2013).

Plan de Ordenamiento Territorial, disponible para consulta web en: http://www.alcaldiadesincelejo.gov.co/Ciudadanos/ProyectosNormatividad/Plan%20de%20Desarrollo%20Municipal%202016%20-%202019.pdf,(2017).

Peralta Buelvas, E. R. *"Determinación de ecuaciones de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en suelos del municipio de Corozal, Sucre"* (2010).

Perkins-Veazie, P., J. K. Collins, A. R. Davis y W. Roberts, *"Carotenoid content of 50 watermelon cultivars".* Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54, 2593–2597 (2006).

Pivoňka, P. *"Comparative Analysis of Fuzzy PI/PD/PID Controller Based on Classical PID Controller Approach"*. Brno, Czech Republic: Brno university of Tech (2006).

Pruitt, W. O., y J. Doorenbos, *"Empirical Calibration: A Requisite for Evapotranspiration Formulae Based on Daily Or Longer Mean Climate Data?"*. The Committee (1977).

Rahangadale, V., y D. Choudhary, "On Fuzzy Logic Based Model for Irrigation Controller Using Penman - Monteith Equation". Gondia, India: MIET (2011).

Roepstorff, A., y P. Nansen, *"Food and Agriculture Organization of the United Nations; Rome: 1998. Epidemiology, diagnosis and control of helminth parasites of swine"*. FAO Animal Health Manual, (1998).

Sánchez, J. *"Ley de Darcy-Conductividad Hidráulica"*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca (2011).

Rodríguez-Iturbe, I., y Porporato, A., *"Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics",* Cambridge University Press (2007).

Soteriou, G. A., M. C. Kyriacou, A. S. Siomos, y D. Gerasopoulos, *"Evolution of watermelon fruit physicochemical and phytochemical composition during ripening as affected by grafting".* Food Chemistry, 165, 282–289 (2014).

Villalobos, Francisco J. Mateos, Luciano. Orgaz, Francisco. Fereres, Elías. FITOTECNIA: Bases y Tecnologías de la Producción Agrícola. Segunda Edición. Ediciones Multi Prensa. México. p 113 -115 (2009).

WWF, "*Curso de Riego para Agricultores: Proyecto de Autogestión del Agua en la Agricultura"*. Recuperado el 16 de 03 de 2013, disponible en: http://assets.wwf.es/downloads/curso_de_riego_definitivo.pdf, (2005).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Xu, C. Y., y V. P. Singh, *"Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland"*. Water Resources Management, 16(3), 197-219 (2002).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Aplicación y optimización de control implementado en sistemas de riego basado en modelos de microclima de cultivos tropicales

Carlos S. Cohen Manrique[1], Jhonatan A. Rodríguez Manrique[1] y Rodrigo D. Salgado Ordosgoitia[1]
(1) Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura. CECAR, Sincelejo (Colombia)
e-mail: carlos.cohen@cecar.edu.co, jhonatan.rodriguez@cecar.edu.co, rodrigo.salgado@cecar.edu.co

Resumen

Se presenta un estudio de simulación orientado al control de sistemas de riego, cuyo objetivo principal fue evaluar el desempeño en términos de estabilidad de controladores basados en lógica difusa y PID, los cuales tienen como característica la emulación del conocimiento humano y la utilización tradicional en aplicaciones industriales respectivamente. Ambos sistemas de control, interactuaron con los diferentes modelos y submodelos relacionados con el microclima de las plantas, de manera que, su propósito fundamental fue mantener la humedad del suelo y los requerimientos hídricos del cultivo. Como estrategia de control, se definió como señal de entrada la diferencia entre el nivel de humedad soportado por el tipo de suelo existente y el nivel de humedad real medida en cada instante de tiempo a través de sensores electrónicos. Como estrategia para modelar estos niveles de humedad se empleó la ecuación del balance hídrico, es decir, la interacción entre los subsistemas clima, cultivo y suelo. Los cuales se parametrizaron bajo las condiciones climáticas de la zona de estudio y adaptados a los diferentes tipos de suelos en el municipio de Sincelejo (Colombia). Finalmente, se propone la mejor alternativa de control que optimice el manejo del agua en sistemas de riego para cultivos de sandía, tomando como criterio de decisión la estabilidad del sistema y el consumo energético del mismo. Se concluye que el modelo de irrigación basado en el controlador PID alcanzó un mejor rendimiento en términos de estabilidad, consumo energético y en confiabilidad, pero el controlador difuso utiliza menos cantidad de líquido para mantener los requerimientos hídricos, no obstante, la permanente intermitencia en su funcionamiento que se presume hace al controlador susceptible al aumento en el consumo de energía.

Palabras clave: Sistemas de riego, lógica difusa, controladores PID, el balance hídrico, agricultura de precisión, microclima.

Application and optimization of control implemented in irrigation systems based on models of microclimate of tropical crops

Abstract

We present a simulation study aimed at control of irrigation systems, whose main objective was to assess the performance in terms of stability of drivers based on fuzzy logic and PID, which feature as the emulation of human knowledge and the traditional use in industrial applications respectively. Both control systems, interacted with the different models and submodels related to the microclimate of the plants, so that its fundamental purpose was to maintain the humidity of the soil and the requirements of water of the crop. As control strategy, was defined as the input signal the difference between the moisture level supported by the existing type of flooring and the level of actual humidity measured at each moment of time through electronic sensors. As a strategy for modeling these levels of moisture is used the equation of the water balance, i.e. the interaction between the subsystems climate, cultivation and soil. Which are parametrizaron under the climatic conditions of the area of study and adapted to the different types of soils in the municipality of Sincelejo (Colombia). Finally, it proposes the best alternative control that optimize the management of water in irrigation systems for crops of watermelon, taking as a decision criterion the stability of the system and the energy consumption of the same. It is concluded that the model of irrigation based on the PID controller reached a better performance in terms of stability, energy consumption and reliability, but the fuzzy controller uses the least amount of fluid to maintain the requirements water, however, the Permanent flashing on its functioning which is presumed to be made to the controller susceptible to increase in energy consumption.

Keywords: Irrigation systems, fuzzy logic, PID controllers, water balance, precision agriculture, microclimate.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La población mundial crece vertiginosamente y según las proyecciones globales continuará (ONU, 2010), principalmente en los países menos desarrollados, donde la población está creciendo a un ritmo cinco veces superior al de los países desarrollados (FAO, 2011). Este crecimiento implica que la agricultura siga siendo el motor esencial de crecimiento para el desarrollo económico y los servicios ambientales, y para reducir la pobreza rural. En Colombia, aproximadamente el 70% del agua dulce que es utilizada para consumo humano, es destinada para el sector agrícola (Steduto et al., 2012). Este alto porcentaje de extracción y consumo en el país se debe a la demanda de cada uno de los cultivos permanentes o transitorios que se utilizan para el sostén alimentario de personas y animales (Pacheco Rieño, 2017).

Según el IGAC (2012), en Colombia solo el 24.1% del área con vocación agrícola es empleada, y que a pesar de que el país tiene un importante potencial de producción agrícola que podría superar su demanda interna de alimentos, y si además, se utilizarán las ventajas comparativas asociadas a su localización intertropical, se podrían asegurar importantes ganancias vinculadas a la exportación de productos agrícolas, coadyuvando al desarrollo rural del país (Perfetti et al., 2013). Pero a pesar de tan importante potencial, nuestro país tiene múltiples dificultades con la tecnificación de sus campos, presentando desventajas competitivas con muchos de los países agrícolas en el mundo. Por esta razón, y pensando en proporcionar una opción tecnológica de desarrollo para el campo, sobretodo en la región de las Sabanas del departamento de Sucre - Colombia, donde las implementaciones tecnológicas rurales son muy escasas, se pensó en la implantación de un sistema de riego automático basado en lógica difusa o en un controlador PID, que garantizara la optimización del uso del agua en la agricultura teniendo en cuenta los requerimientos hídricos básicos del cultivo, utilizando técnicas de modelamiento y simulación del microclima de las plantas (Díaz, 2005).

En el presente escrito, se emplean modelos matemáticos para ser utilizados en la simulación de las variables que intervienen en el consumo de agua para un cultivo de sandía (*Citrullus Lanatus*). Para ello, se consideró el punto de balance hídrico presentado por Laio et al., (2001), donde se modela la dinámica de las pérdidas de humedad en el suelo y los efectos de la transpiración, lo que se define como el microclima de las plantas. Para ello, se utilizan algunos modelos como el de Penman Monteith (PM) para evaluar su evapotranspiración (Allen et al., 2006) utilizados por Norero (1976) para la estimación del crecimiento radicular diario de la raíz de la planta y su impacto en el consumo hídrico, Liotta (2007) para la evaluación de los volúmenes de agua para riego en cultivos de sandía, James (2012) para el proceso de balance de flujo, Mendoza Díaz (2009) para el modelo de estudio de los suelos en la Sabana Sincelejana, Kostiakov – Lewis para calcular la velocidad de infiltración del agua en el suelo (Laio et al., 2001), Lop et al. (2005) para el modelo de estimación del agua útil en plantas, Flores y Ruíz (1999) para el modelo de humedad deseada en suelos y Hernández Tórres (2010) para el modelo eco-hidrológico de balance hídrico puntual, entre otros. Evaluados todos, a través de modelamiento dinámico definido para recrear los requerimientos hídricos globales de las plantas, de la manera más aproximada posible a la realidad y demostrando que éste es un proceso totalmente controlable en el tiempo y utilizable para estudios orientados a la producción agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto empleó herramientas de modelamiento y simulación para el encapsulamiento del microclima de la planta, en una función de transferencia modelada en el tiempo, de modo que pudiera ser controlada a través de un modelo matemático (función de transferencia) que facilite el ajuste de las constantes propias de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID), respectivamente Kp, Ki y Kd. Ello, con el fin de que pueda implementarse de manera eficiente y sencilla, estudiando su estabilidad en términos de ganancia, polos y ceros utilizando algunos métodos tradicionales, tales como el lugar geométrico de las raíces, técnicas de sintonización como la de Ziegler Nichols (O´Dwyer, 2006), de modo que se pueda encontrar la sintonía ideal. De forma paralela, el controlador difuso se utilizó como una alternativa importante debido a su facilidad de aplicación relacionada con su interfaz intuitiva y de fácil aplicabilidad, de modo que la sintonización se realizó en base a reglas orientadas a la corrección del error que se produce al comparar las funciones de entrada y salida de la planta.

Para esto, se definieron las principales variables climatológicas de la zona de estudio, empleando la estación meteorológica satelital de la Universidad de Sucre, ubicada en el municipio de Sincelejo y de la cual se obtuvieron en total 17.280 datos tomados por sensores de precisión. Estos datos corresponden a la temperatura del aire, el registro de precipitaciones, la radiación global, la humedad relativa del aire, la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, siendo medidas con una periodicidad horaria. Estos registros alimentaron el modelo de

 ISBN 978-607-8242-11-5

Penman Monteith Allen et al, (2006), para recrear el consumo hídrico del cultivo a través del proceso de evapotranspiración (Ecuación 1). Los datos tomados y aplicados al estudio de simulación, se seleccionaron de las medidas correspondientes a los meses en los cuales se cultiva la sandía en la zona de estudio, esto es marzo, abril, mayo y junio.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

Donde, ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm/día), Rn es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m^2 día), R_a es la radiación extraterrestre (mm/día), G es el flujo del calor de suelo (MJ/m^2 día), T es la temperatura media del aire a dos metros de altura (°C), U_2 es la velocidad del viento a dos metros de altura (m/s), e_a es la presión real de vapor (Kpa), e_s-e_a es el déficit de presión de vapor (Kpa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (Kpa/°C) y finalmente γ es la constante psicrométrica (Kpa/°C). Además de modelar la evapotranspiración, el coeficiente de cultivo K_c y sus etapas fenológicas, se modelaron las propiedades hídricas del suelo, trabajadas a partir de algunos modelos matemáticos sujetos al principio de conservación de la masa. Para modelar la zona del suelo, se utilizó el modelo de balance hídrico siguiendo la metodología de Laio (2001) y de Rodríguez-Iturbe y Porporato (2007), considerándose el medio poroso como una estructura de pequeños conductos interconectados de diámetro *n* y teniendo en cuenta el flujo laminar expresado por la Ley de Darcy (Sánchez, 2011) de modo que:

$$nZ_r \frac{ds(t)}{dt} = \varphi[s(t);t] - \chi[s(t)] \quad (2)$$

Dónde, *n* es la porosidad del suelo, Z_r es la profundidad activa de la zona radicular de la planta, s(t) es el contenido relativo de humedad del suelo, φ[s(t);t] es la tasa de infiltración, χ[s(t)] es la tasa de pérdida de humedad desde la zona radicular. La región de estudio utilizada para la implementación del sistema de control corresponde a una zona de bosque seco tropical y su paisaje característico es la montaña. El predominio de niebla es común en los bosques de ladera durante las primeras horas de la mañana y al atardecer. La acción de los vientos alisios durante la estación seca influye en la regulación de la temperatura, la humedad relativa y las precipitaciones. Posee dos estaciones bien marcadas, durante el verano que se extiende por más de ocho meses al año, la temperatura se eleva y los suelos son muy propensos a la resequedad y la erosión. Así mismo, para la estación de invierno las precipitaciones son seguidas y copiosas. En la figura 1, se muestra el comportamiento de algunas variables en un día de verano en la zona de estudio y en tiempo de siembra.

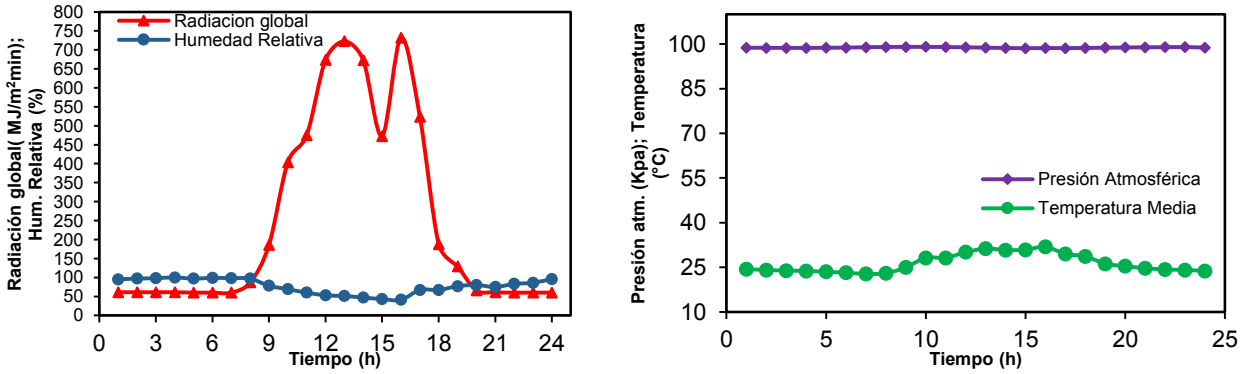


Fig. 1: Muestra de la radiación global, la humedad relativa, presión atmosférica y temperatura media en la región de estudio (Sabanas del departamento de Sucre) en un día durante la cosecha de sandía.

Se puede inferir de la figura 1 que, los valores de la radiación y la temperatura son bastante altos promediando el medio día, manteniéndose hasta bien entrada la noche. Lo que indica que los rayos del sol golpean fuertemente los cultivos durante una buena parte del día, produciendo requerimientos líquidos.

De igual modo, el modelo (2) no solo incluye los consumos por transpiración del cultivo sino que adiciona la actividad hídrica del suelo, donde algunas cantidades de agua son absorbidas por las raíces, otras tantas no logran penetrar el terreno y otras son infiltradas a través del suelo sin lograr ser útiles para las plantas (Moreno y Osorno (1999), y es mostrada en la figura 2, produciéndose la percolación profunda y que en el presente

ISBN 978-607-8242-11-5

documento no se incluye, por la dificultad de medición y el escaso aporte porcentual a la totalidad de líquido drenado por precipitación o riego (Ponce, 2008). El modelo general del microclima de la planta utilizado para el sistema de control se muestra en la figura 3, donde se exponen la tasa de precipitación R(t), además de las pérdidas por infiltración I(t), escorrentía superficial Q[s(t);t], evapotranspiración E(s(t)] y percolación profunda L[s(t)]. De la ecuación 2, se puede inferir el modelo completo que se utilizó en el sistema de control (Rodríguez-Iturbe, 1999; Laio et al., 2001; Porporato et al., 2004; Hernández Tórres, 2010).

$$nZ_r \frac{ds(t)}{dt} = R(t) - I(t) - Q[s(t);t] - E[s(t)] - L[s(t)] \quad (3)$$

Una vez definidos los modelos que simularon las diferentes variables que representan el microclima de la planta (3), se procede a definir los sistemas de control. Para ello, se utilizaron dos tipos de controladores, un controlador proporcional, integral derivativo (PID) y otro difuso. Ambos utilizando los mismos datos de entrada y el mismo modelo de simulación, para comparar su funcionamiento y establecer cual se adapta mejor a las condiciones dinámicas del microclima que se presenta en las Sabanas de Sucre.

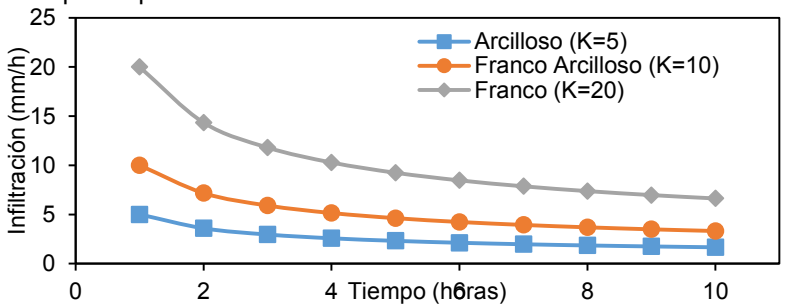


Fig. 2: Grafica de velocidad de infiltración para los tipos de suelo en la sabana del departamento de Sucre.

En primer lugar, se utilizó un sistema de Control PID sintonizado. Basado en su configuración clásica, utilizando la ganancia respectiva (K_p) y sintonizando las variables propias del diseño, relacionadas con el controlador proporcional, integral y derivativo K_p, K_i, K_d. El método heurístico utilizado para optimizar el controlador fue la *Sintonización de Ziegler – Nichols* (Ruíz, 2011). Para realizar dicha sintonización se tuvieron en cuenta algunas recomendaciones planteadas en el Handbook de Sintonización de Controladores PI y PID (O´Dwyer, 2006) para obtener los valores de las constantes de manera rápida y garantizada, de modo que se pudiese alcanzar el comportamiento deseado.

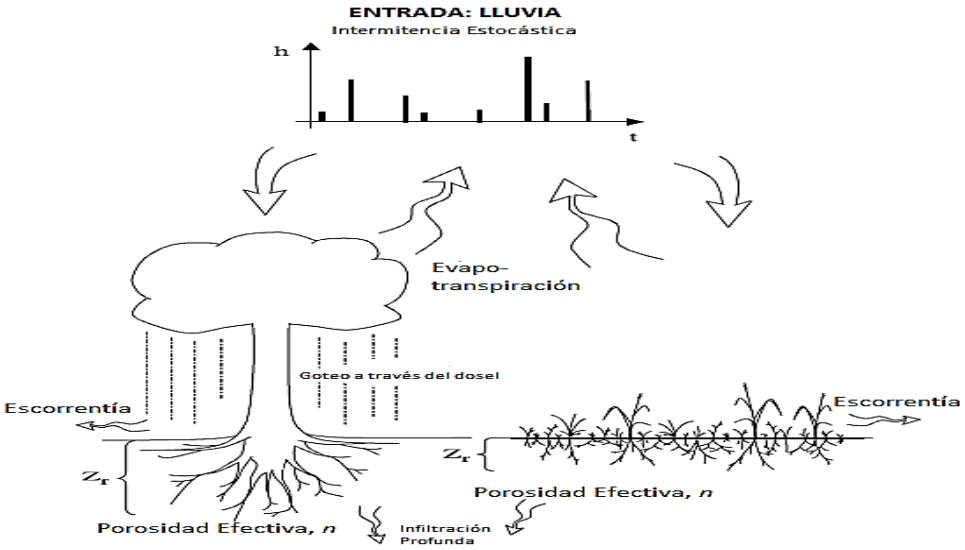


Fig. 3: Distribución de la pérdida de líquido en la planta (Laio et al., 2001).

Al sintonizar el controlador experimentalmente, como parámetros de diseño proporcional, integral y derivativo, se obtuvieron respectivamente los valores de $K_p = 2$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.3$; de modo que la respuesta entregada en términos de la humedad real o medida con la humedad deseada, produjera un error aproximado al 0%. Esto sometiendo el controlador a varias pruebas de sintonía y estabilidad, para establecer si es sistema de control

ISBN 978-607-8242-11-5

seguía a la señal deseada. Fue así como se procedió a cambiar el bloque que modela la humedad deseada (señal de entrada del sistema) por una fuente con señal escalón, luego por una fuente con señal constante y/o por último, una fuente con señal tipo rampa. Para todas ellas el sistema mostró total estabilidad y una respuesta en cuanto a la señal de error muy cercana a cero. Por lo cual se podría asegurar que el controlador PID está correctamente sintonizado. En la figura 4, se muestra el controlador PID diseñado en Matlab ® utilizando su herramienta de desarrollo Simulink ®.

Para controlar el riego, el sistema de control de irrigación utilizó una medida del nivel de humedad real del suelo, para luego compararlo con el nivel de humedad deseado o nivel de humedad soportado por el suelo. En general, la diferencia entre el nivel de humedad deseado y el nivel de humedad actual es igual al error, el cual es ajustado por el controlador mediante un lazo de control realimentado. La salida del controlador ocasiona que el actuador regule el proceso con el propósito de reducir el error, abriendo o cerrando la válvula de manera que la diferencia entre los datos de nivel de humedad es continuamente reducida. Para efectos prácticos, se utilizó como rangos de diseño el modelo de estimación para el agua útil en las plantas (AUP), es decir, el nivel de humedad óptimo en el que debe permanecer el cultivo, ya sea por los niveles de precipitación o por el accionar del sistema de control. Dicho nivel AUP se define como la diferencia entre el valor de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente del cultivo (PMP). Ambos modelos, están incluidos en el bloque llamado Balance Hídrico de la figura 3 (Lop et al., 2005; Dukes et al., 2010; Osuna y Ramírez, 2013).

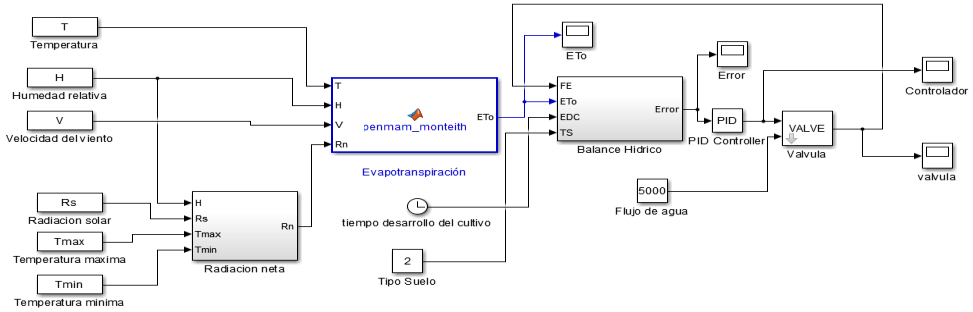


Fig. 4: Controlador PID Sintonizado aplicado al modelo de microclima.

Así mismo, para el controlador difuso se utilizó el toolbox de Matlab®, como se muestra en la figura 4 (Klee y Randal, 2011). La señal de entrada del controlador es el error, es decir, la diferencia entre la humedad deseada y la humedad real, tal como lo propone Rahangadale y Choudhary (2011). En el toolbox se cargaron las variables difusas de entrada y salida, como también el mecanismo de inferencia utilizado, para este caso Mamdani (1975). Este mecanismo de inferencia de Mamdani, tiene la ventaja de que no se utilizan las áreas de las funciones de pertenencia, sino que se opera separadamente cada contribución y se calcula un promedio ponderado de los centros de las contribuciones, lo que simplifica el análisis matemático de su comportamiento (Berengi, 1996). Además, el sistema difuso tipo mamdani es el más usado en la metodología Fuzzy (Nicolás, 2008).

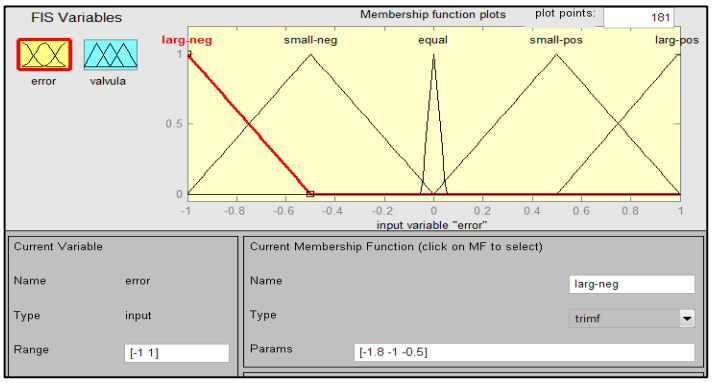


Fig. 5: Función de pertenecía para la señal del error

La figura 5 muestra las funciones de membresía utilizadas como reglas del controlador difuso en el software de Matlab ®, y que se pueden apreciar en la tabla 1. Se asumen cinco etiquetas lingüísticas: Muy Negativo (LN), poco Negativo (SN), Cero (E), Poco Positivo (SP) y Muy Positivo (LP).

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1. Reglas utilizadas en el controlador difuso para evaluar el microclima de la planta.

Reglas del controlador difuso
1. Si el Error es Muy Negativo (LN), entonces, Válvula Cierra Rápidamente
2. Si el Error es Poco Negativo (SN), entonces, Válvula Cierra Lentamente
3. Si el Error es Cero (E), entonces, Válvula No Cambia
4. Si el Error es Poco Positivo (SP), entonces, Válvula Abre Lentamente
5. Si el Error es Muy Positivo (LP), entonces, Válvula Abre Rápidamente

Este conjunto de reglas difusas decidieron con base en el error del nivel de humedad, la posición en que fue ajustada la válvula. Dichas reglas se obtuvieron haciendo un análisis heurístico de las posibles decisiones que se hubiesen tomado si el operador fuera un humano (Juárez et al., 2011).

En la figura 6, se ilustra la división difusa de los espacios de salida del controlador con sus respectivas etiquetas lingüísticas y con función de pertenecía triangular. Se observan las funciones de membresía que se ejecutan en la válvula, es decir, al ejecutarse estas reglas en el controlador difuso la válvula se abrirá o cerrará de manera gradual, según el caso. Lo que limita a la cantidad de agua disponible para cada terminal (gotero) de riego, según la necesidad hídrica de la planta.

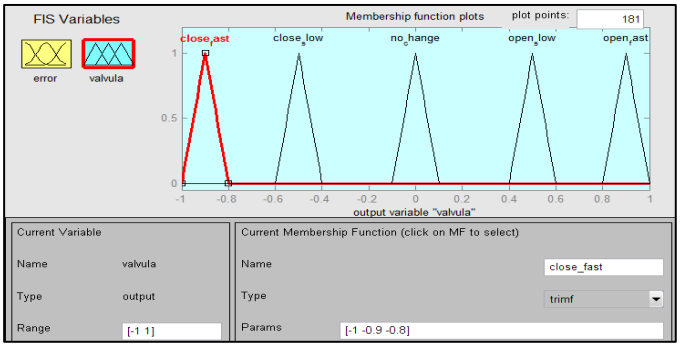


Fig. 6: Función de pertenecía para el control de la válvula.

Los productos de estas normas o reglas son entonces alineados para determinar la posición temporal de la válvula del actuador. El método de Mamdani esgrima que las entradas sean *fuzzificadas* para obtener la posición de la válvula. El siguiente proceso que ejecuta el método en el algoritmo difuso es el de la *defuzzificación* de las reglas y ejecuciones provenientes del controlador y que servirán como salida del mismo. MATLAB® utiliza como procedimiento predeterminado el método del centroide para ejecutar estos procesos, y que utiliza como ecuación básica la del centro de gravedad (COG) (Rahangadale y Choudhary, 2011). En la figura 7, se muestra el controlador difuso, donde se observa la retroalimentación de la salida en la válvula, es decir la cantidad de agua en el riego, con lo que el bloque de balance hídrico define el valor actual de la humedad diferenciado con el valor deseado.

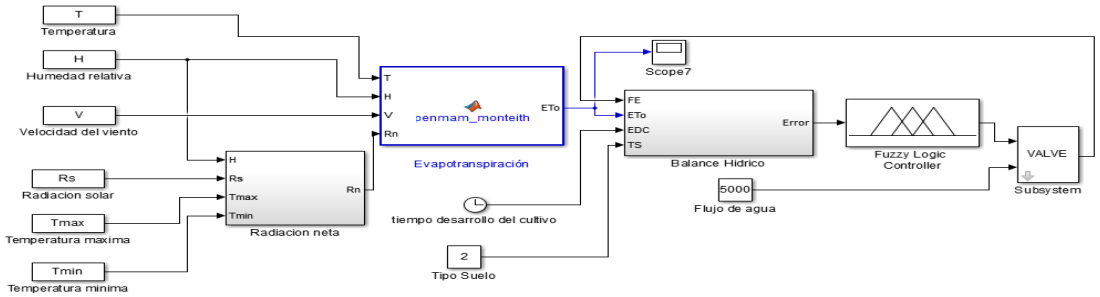


Fig. 7: Controlador Difuso aplicado al modelo de microclima

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tiempo de ejecución del modelo considerado, es el tiempo de vida del cultivo de la sandía, estimado entre 90 y 110 días correspondientes a 3 meses y 20 días, es decir 720 horas de simulación mensual (2.640 horas en

ISBN 978-607-8242-11-5

total), siendo estas últimas las unidades de tiempo en que se ejecuta el sistema. Para que la simulación del modelo y la estructura del controlador funcionaron correctamente, el formato de los datos incluidos en cada uno de los modelos fueron matriciales con periodicidad horaria, algunos de ellos proporcionados directamente por la estación meteorológica, otros indirectamente a través de submodelos (Allen et al., 2006) y otros por su evaluación temporal debidas al crecimiento del cultivo. Por practicidad, se realizaron corridas diarias del modelo para conocer su comportamiento ante señales de entrada variantes en el tiempo tales como las del modelo de Penman-Monteith, el modelo del tamaño de la raíz, el modelo que establece los requerimientos hídricos, entre otros. Todo esto para intentar comprender de primera mano el rendimiento de los controladores, el consumo de líquido, el trabajo de la válvula, etcétera. Los resultados gráficos de las mismas se muestran en las siguientes figuras.

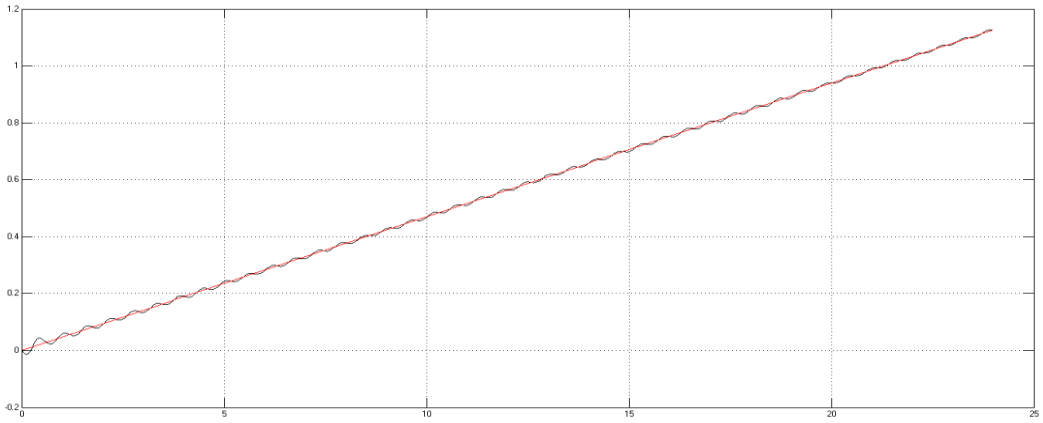


Fig. 8: Comparación de la Humedad Real y la Humedad Deseada en el suelo para el PID durante 24 horas.

En la figura 8, se muestra la comparación de la variable de entrada (Humedad Deseada – señal verde) y la variable de salida (Humedad Real – señal azul). Se puede comprobar mediante esta misma gráfica que el comportamiento del controlador es óptimo, pues a pesar que la señal de entrada es variante en el tiempo y que es compleja de definir en espacio continuo, reacciona de manera suave ante la sintonización del controlador y su repuesta ante los cambios de dicha señal de entrada, es generar valores muy próximos de la señal controlable o salida, es decir magnitudes de error cercanas al cero. En la figura 9, se observa que el error transitorio (la diferencia entre humedad deseada y la humedad real), obtiene un valor máximo observable de aproximadamente de $6x10^{-3}$, es decir, en el orden del 0,6%, esto indica que la acción de control pretende llevar rápidamente el nivel de humedad al valor deseado, por lo que se demuestra que el sistema tiene un comportamiento óptimo ante los requerimientos de la planta (Javadi et al., 2009).

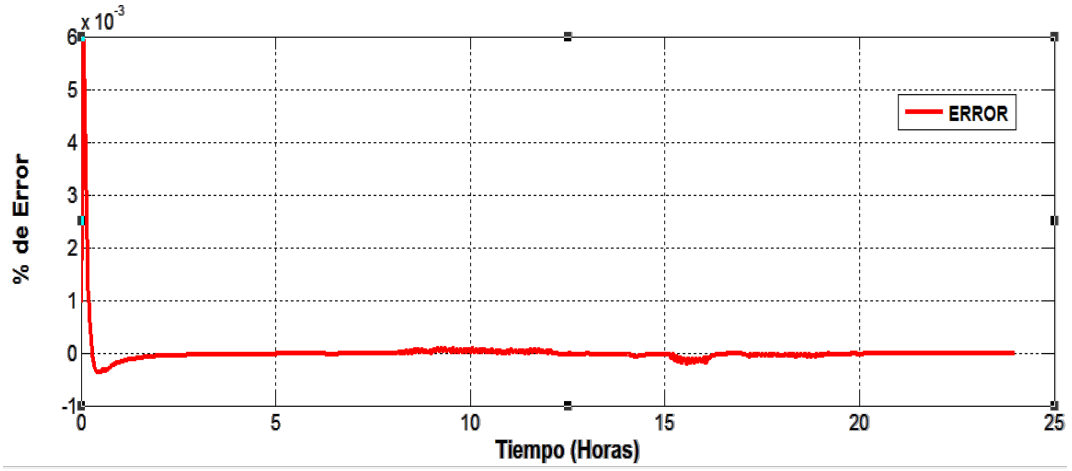


Fig. 9: Señal error para el Controlador PID.

Ahora, para el controlador difuso, en la figura 9 se muestra la relación entre la Humedad Deseada y la Humedad Real luego de la labor del controlador.

ISBN 978-607-8242-11-5

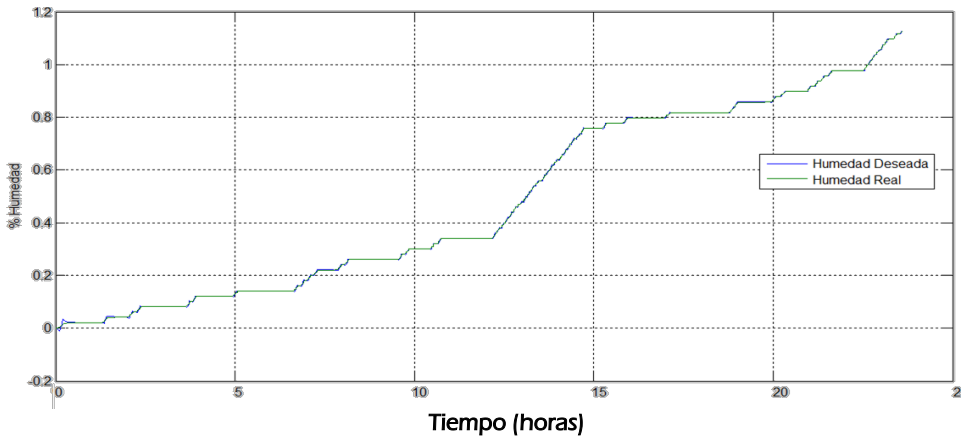


Fig. 10: Comparación entre la humedad real y la humedad deseada en el suelo para el controlador fuzzy.

Como puede observarse, el comportamiento del controlador Difuso, reviste cierto parecido con el controlador PID en lo relacionado a la estabilidad, solo que los márgenes de diferencia entre ambas variables (H. Real y H. Deseada) son más pronunciados, pero no mayores al 1,5%(figura 10). Cabe anotar que esto solo es observable luego de un zoom pronunciado sobre la figura comparativa. Si se revisa el comportamiento de las humedades luego de la acción de ambos controladores, se podría afirmar que la acción del controlador PID sintonizado es más suave que la acción del controlador Difuso. Podría esto deberse a que la base de reglas del controlador está hecha en base al error (ver tabla 1), por lo que podría ampliarse, de modo que exista un número mayor de reglas en el controlador difuso reduciendo de este mismo modo el diferencial de Error (ΔE) para cada regla. Partiendo del hecho que, el número de reglas definidas en base al error reducen el mismo, en la medida en que cada regla aplica para un diferencial menor.

En la figura 11, se muestra la señal del error (diferencia entre la humedad deseada y la real) a la salida del sumador en el controlador difuso, y se puede inferir que los valores del mismo en términos porcentuales superan ligeramente el 1.5%, lo cual según lo planteado por Rahangadale y Choudhary (2011) es un valor válido para un sistema de control, y aún más para una aplicación agrícola donde los márgenes de tolerabilidad del error pueden ser bastante altos.

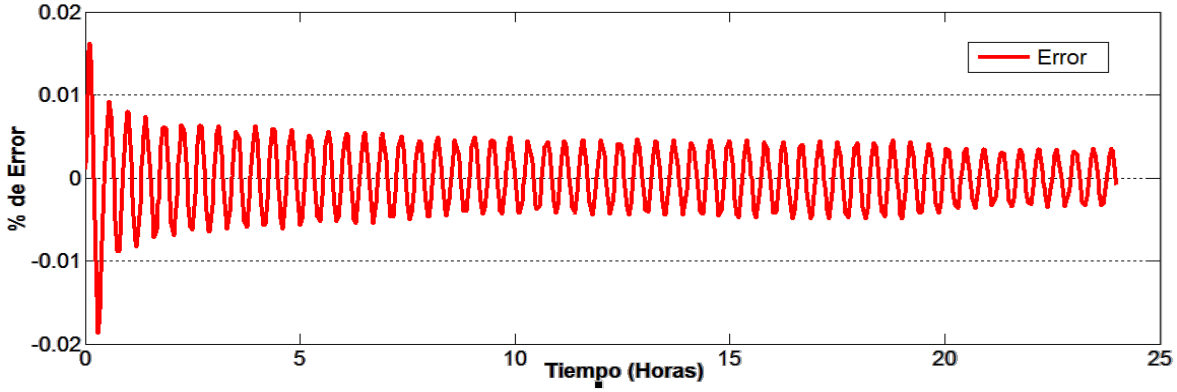


Fig. 11: Señal error para el Controlador Difuso.

Adicional a esto, puede decirse que en ciertas horas del día y durante lapsos de tiempo relativamente cortos el error se hace cero, lo que demuestra la estabilidad del sistema y la optimización del recurso hídrico; desafortunadamente es oscilante y con un período de oscilación aproximado de 2,4 ciclos/hora, pero con valores de amplitud casi constantes de ±1,5% aproximadamente.

Por otro lado y para la evaluación técnica en términos energéticos, se puede inferir de la posición de la válvula para ambos controladores (figura 12), que se obtiene su máxima expresión al promediar el medio día, es decir entre las 9.30 am y las 15 horas. Horario que coincide con los horarios de máximo requerimientos hídricos en cada planta. A continuación se muestran las gráficas comparativas en cuanto al trabajo realizado por las válvulas para cada uno de los controladores.

ISBN 978-607-8242-11-5

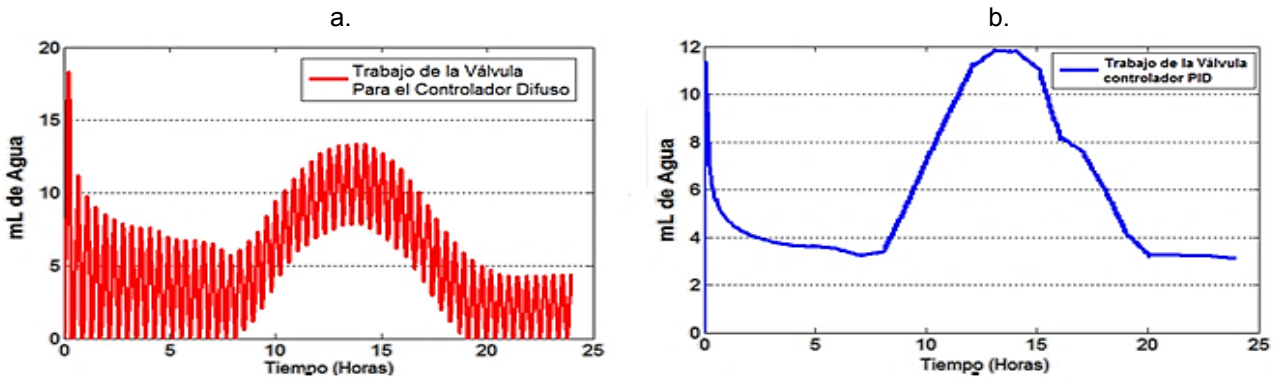


Fig. 12: Señal de trabajo de la válvula para los Controladores difuso (a) y PID (b).

El máximo trabajo realizado (cantidad de riego suministrado al cultivo) por la válvula cuando el controlador es el difuso (Figura 12a), se produce aproximadamente entre las trece y catorce horas del día, con un valor cercano a los trece mililitros (12,6755 ml), esto sin tener en cuenta el gasto de inicio (primera hora de riego). A diferencia con el controlador PID (Figura 12b), el controlador difuso muestra un riego alternado, es decir, el riego no es continuo, sino que en largos períodos de tiempo la cantidad de agua es oscilatoria, lo que incrementa ostensiblemente el trabajo en la válvula, pero así mismo el máximo consumo supera los 18,29 mililitros, durante la primera hora de trabajo, y en promedio el consumo alcanza los 1,7533 mililitros de agua. De manera análoga, en la figura 12b se muestra el consumo de agua o la cantidad de agua suministrada al riego por parte del controlador PID, se observa que el controlador PID provee permanentemente de riego al cultivo y su accionar es continuo. Al igual que en el controlador difuso se puede afirmar que en las horas del mediodía se produce el máximo requerimiento de agua y por tanto la máxima entrega de líquido, alcanzando su máximo valor de entrega de 11,89 mililitros de agua aproximadamente a la 13,07 horas del día (01:04 pm). Adicionalmente, se puede afirmar que el trabajo efectivo realizado por la válvula cuando se utiliza el controlador PID es mayor, esto se observa por la mayor área bajo la curva del controlador PID que en el controlador Difuso, y porque el valor promedio (media aritmética) del consumo en la válvula del controlador PID es del orden de 6,333 ml/hora, mientras que, en el difuso 1,7533 ml, lo cual representa solo el 27,68% del líquido suministrado por el controlador PID. Pero con el atenuante de que en el control difuso la válvula trabaja de manera discontinua y punzante, generando picos altos en cortos períodos de tiempo no recomendados en términos de estabilidad y en ahorro energético del sistema. En sentido estricto el regulador en ambos casos trabaja en mayor grado durante los primeros minutos del riego para superar la inercia del sistema en cuanto a requerimientos hídricos, para luego reducir su trabajo de manera pronunciada. Es necesario recordar que todas las figuras entre la 8 y la 12 muestran lo ocurrido durante un día promedio de simulación, en otras palabras, se muestra el comportamiento típico de los controladores a lo largo del período de vida plántula o fase inicial de la planta, o si se quiere, cualquier otra fase de desarrollo de la planta. Para ello, se incluyeron los valores horarios de cada una de las variables climatológicas que alimentan el modelo de Penman–Monteith, y que, en base a estas variables, responde gráficamente como se muestra en la figura 13. Se puede observar que el máximo requerimiento hídrico de cada planta, en relación con las variables del microclima, se presenta entre las nueve (9 am) y las veinte horas del día (8 pm). Alcanzando un valor máximo de 17,5458 mililitros de agua (aproximadamente a las 13,5 horas), y un valor mínimo de requerimiento líquido de 0,8558 mililitros de agua, durante las primeras y las últimas horas del día.

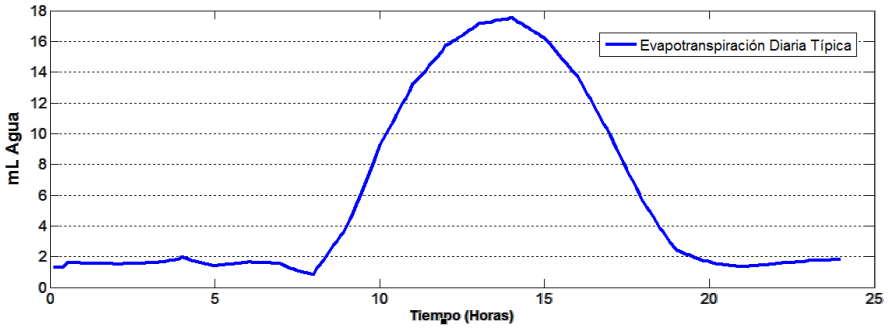


Fig. 13: Comportamiento de la Evapotranspiración.

ISBN 978-607-8242-11-5

El comportamiento grafico del modelo de Penman–Monteith (ecuación 1) y figura 13, responde al comportamiento típico de este modelo en distintas partes del mundo (Gong y Xu, 2005; Allen, 2005; Nghi, 2008; Mundo-Molina, 2008; Howell, 2010; Adeboye y Osunbitan, 2010). Lo cual demuestra la correcta aplicación del mismo, basado en los parámetros climatológicos circunscritos a la región Sabanas del departamento de Sucre. Por otro lado, si se variara el valor de Kc (Edad fenológica de la planta), o se cambiara el tipo de cultivo, de modo que dicho valor de Kc represente otra etapa del crecimiento de la planta, con otros requerimientos hídricos, el comportamiento del controlador sería el mismo.

CONCLUSIONES

Se concluye que, bajo los parámetros utilizados en la misma, el modelo de irrigación basado en el controlador PID alcanzó un mejor rendimiento en términos de estabilidad, consumo energético y en confiabilidad, pero el controlador difuso utiliza menos cantidad de líquido para mantener los requerimientos hídricos, no obstante la permanente intermitencia en su funcionamiento que se presume hace al controlador susceptible al aumento en el consumo de energía. Pero en términos generales, se ha logrado definir un modelo hídrico que independiente al tipo de controlador, demuestra ser controlable y manipulable dinámicamente. Esto cobra importancia a la hora de la implementación en campo, pues el modelamiento ahorra mucho dinero y tiempo por el hecho de que algunos modelos sustituirían la compra de sensores de precisión que por lo general resultan ser muy costosos para el agricultor. Además facilita la implementación del mismo en su posterior implementación en otros tipos de cultivos, terrenos o tipos de riego.

REFERENCIAS

Adeboye, O., y J. Osunbitan, *"Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and Temperature Based Models in Estimating Reference Evapotranspiration Using Complete and Limited Data, Application to Nigeria".* Ile-Ife, Nigeria: Department of Agricultural Engineering (2010).

Allen, R., L. Pereira, D. Raes, y M. Smith, *"Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos"*. Roma, Italia: FAO (2006).

Berengi, H., "*Fuzzy and Neural Control".* New York, USA: Intelligent and Autonomuos Control (1996).

Bitar, S., *"Las tendencias mundiales y el futuro de América Latina",* (2014).

Díaz, M. *"La economía del departamento de Sucre: ganadería y sector público. Banco de la República"*, Centro de Estudios Económicos Regionales, (2005).

Dukes, M. D., L. Zotarelli, y K. Morgan, *"Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida"*. HortTechnology, 20(1) 133-142 (2010).

FAO. *"Estado de los Recursos de Tierras y Aguas del Mundo para la Alimentación y la Agricultura".* Roma: FAO, Fiat Panis. (2011).

Flores, H., y J. Ruíz, *"Estimación de la Humedad del Suelo para Maíz de Temporal Mediante un Balance Hídrico"*. Jalisco, México: ANIFAP - CIPAC (1999).

Gong, L., y C. Xu, *"Sensitivity of the Penman–Monteith Reference Evapotranspiration to Key Climatic Variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin"*. Basin, China: Uppsala University (2005).

Hernández Torres, G., "*Modelamiento eco-hidrológico de la humedad del suelo en el valle del Río Cauca",* Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia (2010).

Howell, T. *"The Penman - Monteith Method. Bushland",* USA: USDA - Agricultural Research Service. (2010).

IGAC, U. *"Atlas de la distribución de la propiedad rural en Colombia".* Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Universidad de los Andes, Bogotá (2012).

James, R. *"Modelling LIDs using PCSWMM and EPA SWMM5",* New York: CHI., (2012).

Javadi, P., M. Omid, y L. Nomb, *"Intelligent Control Based Fuzzy Logic for Automation of Grrenhouse Irrigation System and Evaluation in Relation to Conventional Systems".* World Applied Sciences Journal, 16 – 23 (2009).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Juárez, J., J. Cañadas, y M. Roque, *"Sistemas de Control Moderno"*, Murcia, España: Universidad de Murcia, Universidad de Almería, (2011).

Klee, H., y Randal, A. *"Simulation of Dynamic Systems with Matlab and Simulink".* Boca Ratón, Florida: CRC Press. (2011).

Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L., y Rodriguez-Iturbe, I. *"Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: II. Probabilistic soil moisture dynamics"*. Advances in Water Resources, 24(7), 707-723. (2001).

Liotta, M. *"Los Sistemas de Riego por Goteo o por Microasperción*". San Juan, Puerto Rico: INTA - EEA.iturb(2007).

Lop, A., C. Peiteado, y V. Bodas, *"Curso de riego para agricultores. Proyecto de autogestión del agua en la agricultura de la WWF y Acciones Integradas de desarrollo"*, (2005).

Mamdani, E. *"An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller"*. New York, USA: International Journal of Man-Machine Studies (1975).

Mendoza Diaz, J. F. *"Determinación de ecuaciones lineales de capacidad de campo para tres tipos de suelos arcilloso, franco arcilloso y franco, presentes en la ciudadela universitaria Puerta Roja, Sincelejo, Sucre"* Tesis Doctoral, (2009).

Mundo-Molina, M. "Estandarización de las ecuaciones para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia". RIIT FI - UNAM, 125 - 135 (2008).

Nghi, V. V., "Potencial Evapotranspiration Estimation and its effect on Hydrological Model Response at the Nong Son Basin. VNU Journal of Science, 213 - 223 (2008).

Nicolás, I*., "Técnicas de compresión de tablas de datos mediante regresiones lineales, redes neuronales y sistemas fuzzy".* Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena (2008).

Norero, A., *"Evaporación y Transpiración: Serie Suelos y Climas"*. Mérida, Venezuela: CIDIAT (1976).

O'Dwyer, A., *"Handbook of PI and PID controller tuning rules"*. World Scientific. (2009).

Osuna Canizalez, F. D. y S. Ramírez Rojas, *"Manual para cultivar cebolla con fertirriego y riego por gravedad en el estado de Morelos"*, (2013).

Pacheco Riaño, A. M., y A. Garzón Bustamante, *"Formulación de estrategias de mejora de consumo de agua en la producción de Feijoa en la finca Cortijo de la Merced en la Vega–Cundinamarca",* (2017).

Perfetti, J. J., A. Hernández, J. Leibovich, y Á. Balcázar, "Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia" (2013).

Porporato, A., Daly, E., y I. Rodriguez-Iturbe, *"Soil water balance and ecosystem response to climate change"*. The American Naturalist, 164(5), 625-632 (2004).

Rahangadale, V., y D. Choudhary, *"On Fuzzy Logic Based Model for Irrigation Controller Using Penman - Monteith Equation"*. Gondia, India: MIET (2011).

Rodriguez-Iturbe, I., A. Porporato, L. Ridolfi, V. Isham, y D. Coxi. *"Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation. In Proceedings of the Royal Society of London",* Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 455(1990), 3789-3805 (1999).

Ruíz, V. A. *"Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores*". Revista Ingeniería, 12(1-2) (2011).

Sánchez San Román, J. *"Ley de Darcy. Conductividad Hidráulica"*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca (2011).

Steduto, P., T. C. Hsiao, E. Fereres, y D. Raes, *"Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua"*. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) spa no. 66 (2012).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de procesos hospitalarios utilizando la técnica Variants Miner desde la perspectiva tiempo de minería de procesos

Dr.C Arturo Orellana García[1,3], Dr.C Damián Pérez Alfonso[3], Ing. Lisandra Castañeda Dominguez[2,3] y Ing. Antonio Valladares Martínez[1,3]

(1) Centro de Soluciones de Informática Médica, Univ. de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.

(2) Centro de Informatización de Entidades, Univ. de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.

(3) Grupo de Investigación de Minería de Procesos. Univ. de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.

Resumen:

La minería de procesos incluye diferentes perspectivas, entre las que se encuentra la perspectiva temporal, que resulta ser efectiva y útil en sectores críticos como la salud. Permite determinar las diferencias temporales en los procesos de atención sanitaria, identificar cuellos de botella y eventualidades que ralentizan el funcionamiento de los procesos en los hospitales. El objetivo de esta investigación es obtener la ejecución de variantes alternativas de procesos hospitalarios y los tiempos de ejecución de los mismos. Para ello se desarrolló un componente de software para el Sistema de Información Hospitalaria XAVIA HIS, integrando el complemento Variants Miner de la herramienta ProM y la perspectiva temporal de la minería de procesos. El resultado de esta investigación muestra modelos en forma de árbol de la ejecución de los procesos del sistema XAVIA HIS. Los nodos del modelo representan las actividades y contienen un conjunto de métricas de tiempo, tales como mínimo, promedio, máximo y duración total. Los resultados de la aplicación del componente en el sistema para el cual se desarrolló permitirán a los analistas obtener criterios cualitativos y cuantitativos para tomar decisiones de gestión clínica y proporcionará un mecanismo para generar nuevos conocimientos a partir de la interpretación de datos almacenados en el sistema.

Palabras clave: Sistema de información hospitalaria, modelo de proceso, perspectiva de tiempo, Variants Miner.

Introducción

Los sistemas de información de salud en las instituciones sanitarias resultan de vital importancia para el funcionamiento de estas organizaciones. El análisis de los procesos hospitalarios no es algo trivial, pues se necesita un amplio conocimiento de los mismos para representarlos con suficiente exactitud. El modelado de los procesos en las instituciones sanitarias representa, por lo general cómo deberían llevarse a cabo y no cómo se están ejecutando en realidad [1].

Una alternativa en ascenso para representar gráficamente la ejecución real de los procesos es la Minería de procesos, disciplina de investigación relativamente joven que se ubica entre la inteligencia computacional y la minería de datos, por una parte, y la modelación y análisis de procesos, por otra. El objetivo de la minería de procesos es descubrir, monitorear y mejorar los procesos reales a través de la extracción de conocimiento de los registros de eventos, disponibles en los actuales sistemas de información [2-3].

Para el análisis de procesos se siguen diferentes perspectivas entre las que se encuentran la organizacional, la de casos y la temporal, siendo esta última una de las más importantes debido a que se relaciona con los tiempos de ejecución de las instancias de procesos. Cuando los eventos tienen asociados marcas de tiempo es posible descubrir cuellos de botella1, medir niveles de servicio, monitorear la utilización de recursos y predecir el tiempo de procesamiento restante de casos en ejecución [4-5].

El análisis de procesos desde la perspectiva temporal permite obtener elementos interesantes de los procesos con los que se están trabajando. En [1] fue desarrollado un estudio acerca del análisis temporal de un proceso quirúrgico, el cual permitió descubrir a partir de técnicas de minería de procesos que la duración media de algunas actividades era relativamente larga. Como resultados se realizaron representaciones de modelos, teniendo en cuenta las características temporales de cada una de las actividades, lo cual permite tomar decisiones sobre su ejecución.

Según [6] el análisis de procesos hospitalarios desde la perspectiva temporal resulta ser especialmente efectivo y útil. Esto se debe, por un lado, a que determina el tiempo promedio de atención a un paciente y las

[1] Cuellos de botella: es un límite en la capacidad de transferencia de información de un sistema o una conexión, que puede reducir el tráfico en condiciones de sobrecarga.

 ISBN 978-607-8242-11-5

diferencias de tiempo dentro de un proceso asistencial para un grupo de pacientes con el mismo diagnóstico. Por otro lado, identifica las actividades dentro del hospital que puedan representar cuellos de botella, ya sea por largas esperas en la atención a pacientes o por sobrecarga en los servicios médicos.

Con el objetivo de automatizar los procesos del nivel secundario de salud en Cuba, en el Centro de Informática Médica (CESIM) de la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI), se desarrolló el Sistema de Información Hospitalaria XAVIA HIS. Este sistema está orientado a satisfacer las necesidades de: almacenamiento, procesamiento, recopilación e interpretación de los datos clínico-administrativos que se generan en las instituciones hospitalarias.

El XAVIA HIS, cuenta con un componente para la extracción y transformación de los datos de eventos contenidos en las trazas de ejecución en Registros de eventos. El Registro de eventos almacena información con marcas de tiempo de las actividades, como fecha de inicio, fecha de fin y duración de las mismas. Entre las operaciones que se pueden realizar con la información contenida en el Registro de eventos desde la perspectiva temporal se mencionan:

- Calcular la duración media y el tiempo total de las actividades, así como su desviación típica.
- Obtener resultados de los tiempos de demora de ejecución de las actividades.
- Conocer qué productos o insumos tardan más o menos en ser despachados, o enviados a las labores asistenciales.
- Obtener información sobre el desempeño de la organización o las actividades de proceso.

Además de recopilar y almacenar datos, el HIS debe procesar e interpretar los mismos, sin embargo, aún está dando los primeros pasos con funcionalidades que permitan realizar análisis de la ejecución de las actividades de proceso en el sistema [7-8]. La información que posee el registro de eventos del sistema no está siendo aprovechada cabalmente, limitando a los analistas de procesos e investigadores el acceso a esta fuente de conocimientos sin explotación. Dicha situación limita el uso de nuevos elementos para enriquecer criterios que favorecerían la toma de decisiones sobre el rendimiento de las instituciones y la ejecución de sus actividades.

Por lo tanto, la presente investigación se propone desarrollar un componente para la obtención de modelos de procesos a partir de la instanciación de la técnica Variants Miner [9], incorporándole la perspectiva temporal de minería de procesos y utilizando como fuente de datos el registro de eventos del Sistema de Información Hospitalaria XAVIA HIS. De esta forma, permite a los analistas de procesos obtener criterios cualitativos y cuantitativos para la toma de decisiones clínico-administrativas desde el propio sistema.

En la presente investigación se presenta la instanciación de la técnica Variants Miner de ProM [10] en el sistema de información hospitalaria XAVIA HIS desarrollado por el CESIM y su aplicación para el análisis de procesos hospitalarios. Para ello, el documento queda estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se elaboran los fundamentos teóricos que sustentan la investigación. La sección 3 aborda la instanciación de la técnica Variants Miner en el XAVIA HIS incorporándole la perspectiva temporal de minería de procesos, para facilitar los análisis de los procesos desde el sistema. Mientras que la sección 4 aplica el componente desarrollado a un proceso seleccionado del sistema.

Análisis comparativo de técnicas de minería de procesos

Los análisis de procesos en instituciones sanitarias han sido orientados, por lo general, a la frecuencia de ejecución, detección de fraudes, análisis de tiempo, detección de desviaciones, identificación de cuellos de botella, variantes alternativas de su ejecución, entre otros. [9-13]. La Tabla 1 muestra cómo han sido abordados estos criterios desde la minería de procesos para la obtención de conocimientos en el entorno sanitario. Así mismo, se incluyen dos criterios, la comprensión y los valores por defectos de los parámetros de configuración, orientados a la usabilidad de las técnicas minería de procesos para usuarios no expertos.

Tabla 1: Técnicas de minería de procesos utilizadas en el análisis de procesos hospitalarios. Elaboración propia

Criterios	Técnicas de minería de procesos			
	Heuristics Miner	Fuzzy Miner	Inductive visual M.	Variants Miner
Análisis de frecuencia	X	X	X	X
Análisis de subprocesos	X	X	X	X

 ISBN 978-607-8242-11-5

Detección de desviaciones		X	X	X
Detección de frauds		X	X	X
Análisis de tiempo		X	X	
Cuellos de botella			X	
Vista global del proceso	X	X	X	X
Variantes alternativas				X
Comprensión	X	X	X	X
Valores por defecto	X	X	X	X

Una encuesta en línea desarrollada por el investigador Jan Claes en 2013 [14] solicitó a usuarios y expertos de la minería de procesos identificar cuáles son las técnicas que más utilizan en los análisis de procesos. Los resultados muestran que las técnicas de mayor frecuencia de uso por los investigadores son Heuristics Miner y Fuzzy Miner. Sin embargo, estas no propician realizar análisis de tiempo de ejecución.

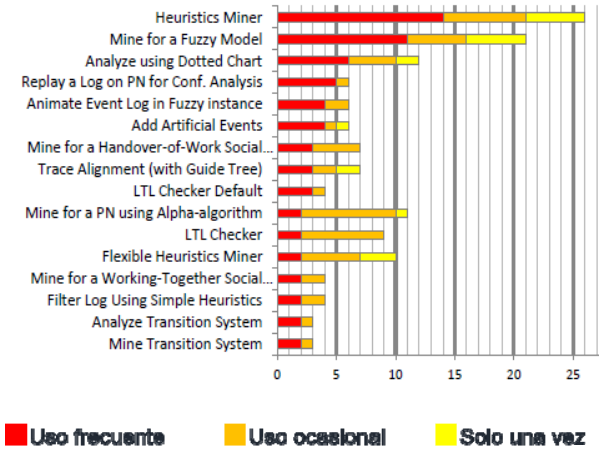


Figura. 1. Técnicas de minería de procesos más utilizadas según usuarios y expertos. Fuente: [14].

Inductive visual Miner (IvM) [15] es una técnica desarrollada en 2014 y es actualmente de las más usadas en las investigaciones de minería de procesos. Genera modelos de procesos animados en una notación inspirada en la BPMN, lo cual contribuye a mejorar el entendimiento de los mismos por parte de los usuarios ajenos a la minería de procesos. Estos modelos permiten apreciar con mayor facilidad la formación de cuellos de botella y las desviaciones de los procesos que se modelan, además de las actividades frecuentes e infrecuentes que los componen. Sin embargo, esta técnica no genera las posibles variantes de ejecución de los procesos.

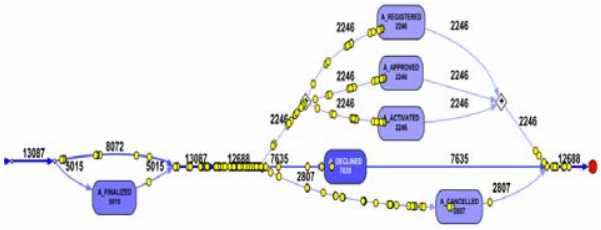


Figura. 2. Ejemplo de modelo de proceso generado con IvM. Fuente: [15]

La Minería de Variantes o Variants Miner [9] posee un enfoque diferente al de otras técnicas de minería de procesos al proponer varias descomposiciones alternativas para el mismo subproceso, utilizando diferentes operadores de control de flujo. Esto permite controlar el impacto estructural del ruido y la ausencia de información en la construcción de las alternativas. Las alternativas se construyen al descartar o considerar comportamientos poco frecuentes que están contenidos en el registro de eventos. También en dicha construcción se asumen comportamientos ausentes del registro.

ISBN 978-607-8242-11-5

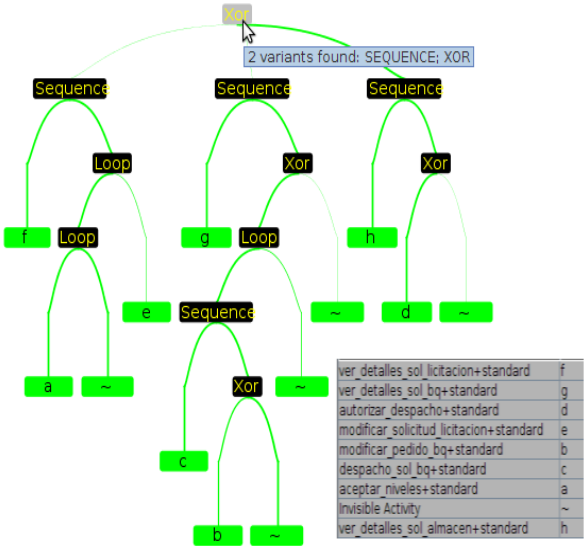


Figura. 3. Ejemplo de árbol de variantes. Fuente: [9]

Al comparar las técnicas antes mencionadas y resumidas en la Tabla 2 y a partir de un análisis documental [16-20] se concluye que Heuristics Miner es útil para obtener una vista global del proceso. Por su parte Fuzzy Miner permite obtener una vista de la frecuencia de ejecución de las actividades de procesos, así como la detección de desviaciones. Inductive visual Miner es una de las técnicas más recientes, sin embargo, es utilizada frecuentemente en análisis de tiempo y es considerada por los expertos como una de las más intuitivas.

Variants Miner, por su parte permite realizar análisis de las variantes alternativas del proceso, además es posible incorporarle análisis basados en tiempo, lo cual enriquece el modelo en análisis. Todas las técnicas son multicriterios lo que propicia realizar análisis desde diferentes perspectivas. El análisis anterior permitió seleccionar a Variants Miner para la propuesta de solución, teniendo en cuenta la incorporación de la perspectiva tiempo de minería de procesos, lo cual enriquece las variantes alternativas de ejecución.

Instanciación de la técnica Variants Miner

La propuesta de solución consiste en la integración de la técnica de minería de procesos Variants Miner al XAVIA HIS. Este componente mostrará las variantes alternativas de la ejecución de los procesos desde el sistema, con la información temporal extraída de los registros de eventos.

Para ello es necesario adaptar la técnica antes mencionada a las tecnologías de desarrollo definidas para el sistema XAVIA HIS. El lenguaje de programación propuesto es Java, el Entorno Integrado de Desarrollo Eclipse 3.4.2, el marco de trabajo JBoss Seam 2.1.1 y para el mapeo de los datos se propone Hibernate 3.3. La técnica a integrar utilizará los datos almacenados en la base de datos del sistema para generar los modelos de proceso.

A partir de las investigaciones realizadas y las características que posee el Sistema de Información Hospitalaria XAVIA HIS, se propone el diseño de solución representado en la Figura 7, el cual describe de forma gráfica el diseño conceptual del componente a desarrollar. En el mismo se tienen en cuenta todos los aspectos descritos en la presente investigación y que son necesarios para cumplir el objetivo planteado. Este diseño permitirá la integración no solo al HIS sino también a otros sistemas concebidos bajo la misma línea base de desarrollo.

La instanciación del componente para la visualización de modelos de procesos basado en la técnica Variants Miner incorporándole la perspectiva temporal de minería de procesos, utiliza como entrada un registro de eventos en formato XES (eXtensible Event Stream) y genera como salida un modelo de procesos en forma de árbol, donde cada actividad mostrada en el árbol contendrá su duración máxima, media, mínima y total. Para el desarrollo del mismo se sigue el flujo de información representado en la Figura 7.

ISBN 978-607-8242-11-5

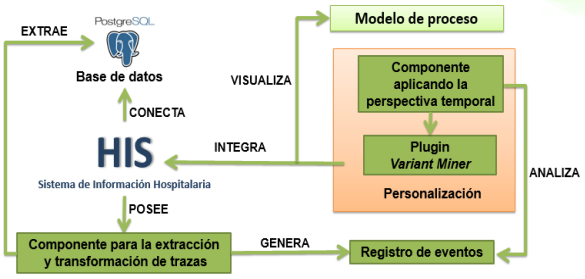


Figura. 7. Flujo de información de la propuesta de solución. Fuente: Elaboración propia.

El componente para la extracción y transformación de trazas del HIS, extrae la información de la ejecución de las actividades de una base de datos y genera un Registro de eventos, el cual es el punto de partida del componente aplicando la perspectiva temporal. Este componente es producto de una investigación previa a la actual [3]. Luego se instancia la técnica Variants Miner incorporándole el componente antes mencionado. La personalización se integra al HIS y genera un modelo de proceso, el cual se visualiza desde el sistema.

A continuación, se muestra un procedimiento descrito en tres fases, para el desarrollo de dicho componente.

- Extracción de la información de tiempo de los registros de eventos aplicando la perspectiva temporal de minería de procesos.
- Instanciación de la técnica Variants Miner, incorporándole el resultado del paso 1 y determinando las configuraciones para el XAVIA HIS.
- Integración de la instanciación de la técnica Variants Miner en el HIS, para la visualización de modelos de procesos.

Extracción de la información de tiempo

Esta fase se desarrolla con el objetivo de obtener las métricas para el análisis de procesos aplicando la perspectiva temporal. Dichas métricas son: la duración mínima, media, máxima y total de cada una de las actividades del proceso en análisis.

Duración total: se refiere a la suma de todos los tiempos de duración de las instancias de cada actividad de un proceso.

Duración media: es el tiempo promedio en que se ejecutan las actividades de un proceso, la misma se realiza basándose en la Fórmula I de media aritmética [21]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i = \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n} \qquad \text{(I)}$$

Una actividad dentro de un proceso puede ejecutarse una o varias veces, cada a_i representa el tiempo que demora la actividad en la aparición i, y n el total de apariciones de dicha actividad.

- Duración mínima: del total de apariciones, la menor duración registrada de la actividad.
- Duración máxima: del total de apariciones, la mayor duración registrada de la actividad.
- Para el desarrollo del componente, se crearon las clases Analisis, TimeDifDate, Metriccs.

La clase TimeDifDate es una estructura donde se almacena la diferencia de tiempo entre el inicio y el fin de una actividad. La clase Metriccs representa una estructura para almacenar duración media, máxima, mínima y total de ejecución de las actividades en el Registro de eventos. La clase Analisis permite calcular la duración media, la duración máxima y la duración mínima de cada una de las actividades, haciendo uso de las clases TimeDifDate y Metriccs.

Instanciación de la técnica Variants Miner

La instanciación de la técnica Variants Miner se realizó bajo las siguientes tareas:

- Establecer las configuraciones para su integración al HIS.

ISBN 978-607-8242-11-5

- Mostrar en los nodos hojas del árbol que devuelve la técnica, las métricas generadas por el componente aplicando la perspectiva temporal.

La instanciación al igual que la técnica de ProM, utiliza como entrada un Registro de eventos en formato XES y un ámbito definido como parámetros de entrada, el ámbito se especifica en términos de umbrales para ruido y completitud.

Los umbrales para ruido y completitud se definen como un número entre cero y 100 y pueden ser especificados individualmente para cada patrón de control de flujo. Los valores serán asignados por defecto, donde los valores de los umbrales para ruido serán de un 5% y para los umbrales de completitud serán de un 95%, se establecieron dichos valores con el propósito de obtener un modelo que sea comprensible por el usuario y a la vez que brinde la mayor exactitud posible.

Para cumplir con el objetivo número 2 se creó un paquete denominado org.processmining.variantstree.patterns.temporal, el cual contiene las clases desarrolladas en el componente aplicando la perspectiva temporal de minería de procesos.

Integración de la instanciación AL sistema XAVIA HIS

Una vez personalizado la técnica Variants Miner, se procede a su integración con el HIS, la cual se detalla en los pasos:

El Registro de eventos es utilizado como parámetro de entrada de la clase AnalisisVariants.

Luego se instancia la clase VariantsTreeManager que descompone el proceso almacenado en el registro de eventos, en varios subprocesos.

Posteriormente se obtiene el modelo, el cual se convierte a un archivo en formato svg, a partir del método exportarSVG de la clase AnalisisVariants.

Finalmente se visualiza en el HIS el modelo de proceso.

Para la visualización, el componente incluye dentro de sus elementos fundamentales, la interfaz de usuario, la cual se estructura de las siguientes secciones:

- Área para la entrada de datos
- Área de resultados

El área para la entrada de datos es donde los analistas e investigadores de procesos introducirán los datos que serán necesarios para que el sistema muestre el modelo. Esta área sustituye las herramientas que tradicionalmente son utilizadas para extraer el registro de eventos de forma externa al sistema y soluciona el problema de la Usabilidad para no expertos, planteado en el Manifiesto de la minería de procesos [4]. Las entradas de esta área son: selección del proceso, selección del tipo de análisis, en este caso Perspectiva temporal y el rango de tiempo en el cual se obtendrán las trazas de ejecución para el proceso seleccionado.



Figura. 8. Área para la entrada de datos. Fuente: [3] [22].

El área de resultados muestra un modelo de variantes de procesos en forma de árbol. Donde los nodos hojas representan las actividades que conforman el proceso, cada actividad aparece con su duración mínima, media, máxima y total. Los nodos patrón, muestran el nombre del patrón de control de flujo utilizado para descomponer el subproceso en la variante correspondiente, las aristas del árbol representan caminos dentro del proceso.

ISBN 978-607-8242-11-5

El grosor de estas aristas depende de la frecuencia con la cual aparece en el registro de eventos el camino que representan y dicho grosor representa además las posibles desviaciones, es decir mientras más finas sean las aristas, mayor existencia de desviaciones.

En el área también se muestra una leyenda especificando cada actividad del proceso, pues estas aparecen codificadas en el modelo, además en dicha leyenda se muestra la frecuencia de cada una de las actividades. El sistema muestra los patrones de control de flujo utilizados para la descomposición en subproceso y si se selecciona uno de dichos patrones, el sistema muestra una descripción de su significado. El sistema permite expandir, contraer y arrastrar el modelo.

La Figura 9 muestra una vista de dicha área desde el XAVIA HIS.

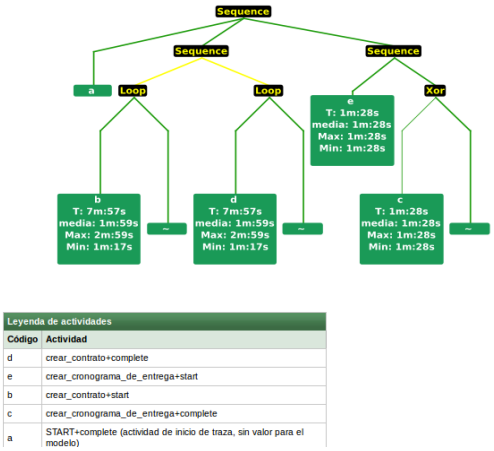


Figura. 9. Área de resultados. Interfaz del modelo ¨Procesar Solicitudes¨ generado por el componente. Fuente: Elaboración propia.

Los nodos hojas del árbol de variantes representan las actividades que se ejecutan en el proceso, además cada nodo muestra las métricas para el análisis de procesos aplicando la perspectiva temporal, las cuales son duración total, media, máxima y mínima.

Las métricas en el modelo aparecen en abreviaturas, en la siguiente tabla se muestra como se identifican cada una en el árbol de variantes.

Tabla 2. Métricas de tiempo. Elaboración propia

Métricas	Identificador
Duración total	T
Duración media	Media
Duración máxima	Max
Duración mínima	Min

Las métricas aparecen en el formato D HH: mm: ss., d representa la cantidad de días, h las horas, m los minutos y s los segundos de ejecución de cada actividad.

Análisis del proceso procesar solicitudes

Como caso de estudio se procede a analizar el proceso Procesar Solicitudes, representado por la Figura 10. Para comprender los modelos generados por el componente en el sistema se ha aplicado el mismo a un registro de eventos que corresponde al módulo Almacén del HIS. El registro de eventos recopila 150 ejecuciones (instancias) del proceso Procesar Solicitudes entre las fechas 10/05/2012 y 23/07/2012. Dicho proceso cuenta con 5 actividades. La Figura 10 muestra el modelo generado:

ISBN 978-607-8242-11-5

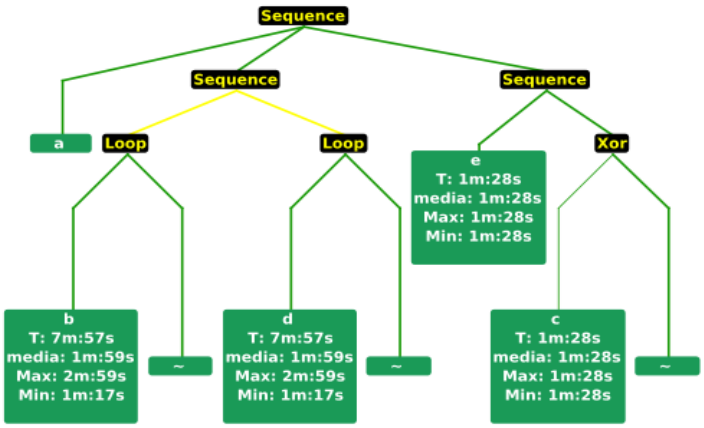


Figura. 10. Modelo del proceso ¨Procesar Solicitudes¨ generado por el componente. Fuente: Elaboración propia.

El primer nivel de abstracción del árbol lo constituye el patrón de control de flujo Secuencia, lo que significa que los subprocesos crear_contrato y crear_cronograma_de_entrega, se ejecutaron uno seguido del otro. Seguidamente se realiza el análisis de los subprocesos identificados correspondientes al segundo nivel de abstracción.

Tabla 3. Tiempos de ejecución del proceso Procesar Solicitudes. Elaboración propia

Actividad	Cod	Total	media	mín	máx
crear_ contrato+ complete	d	7:57s	1:59s	2:59s	1:17s
crear_cronograma_de _entrega+star	e	1:28s	1:28s	1:28s	1:28s
crear_ contrato+star	b	7:57s	1:59s	2:59s	1:17s
crear_cronograma_de_ entrega +complete	c	1:28s	1:28s	1:28s	1:28s

La tabla 3 se interpreta de la siguiente forma por cada una de las actividades. La actividad crear_ contrato+ complete codificada como d, tiene una duración total de 7 minutos y 57 segundos, una duración media de 1 minutos y 59 segundos, una duración máxima de 2 minutos y 59 segundos y duración mínima de 1 minutos y 17 segundos.

Subproceso Crear cronograma de entrega

La descomposición obtenida para este subproceso y la codificación de sus actividades se muestran en la Figura 12.

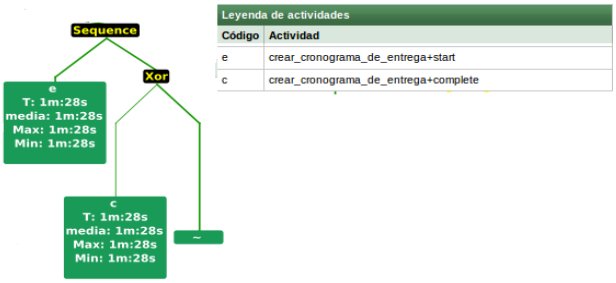


Fig. 12. Modelo del subproceso Crear cronograma de entrega. Fuente: Elaboración propia.

En esta sección del registro de eventos se identifica la existencia de la secuencia entre la actividad crear_cronograma_de_entrega+star y un subproceso descompuesto mediante el patrón de control de flujo selección exclusiva. La traza que contiene únicamente a la actividad crear_cronograma_de_entrega+complete representa una de las situaciones de ausencia de información reportadas en la literatura [23].

ISBN 978-607-8242-11-5

La ausencia de representación de uno de los subprocesos que se encuentran en secuencia en alguna traza es considerada ausencia de información para el patrón de control de flujo secuencia. El análisis de la sección del registro de eventos correspondiente evidencia la ausencia de información en la segunda traza.

La identificación de la ausencia de información en esa traza provoca la inserción de una actividad invisible inmediatamente después de la actividad crear_cronograma_de entrega+complete. Una tarea invisible se puede manifestar cuando se produce un salto de una o varias actividades en una situación de selección. La inserción de la actividad invisible en la traza posibilita la posterior identificación del patrón de selección exclusiva.

En el grosor de las aristas del árbol del subproceso cuya descomposición se realizó utilizando el patrón de selección exclusiva, se observa que la alternativa que contiene la actividad invisible insertada es menos frecuente. Esto indica que la ejecución más común del subproceso crear_cronograma_de_entrega es la secuencia conformada por crear_cronograma_de_entrega+star y crear_cronograma_de_entrega+complete.

Subproceso Crear contrato

La descomposición obtenida para este subproceso y la codificación de sus actividades se muestran en la Figura 13.

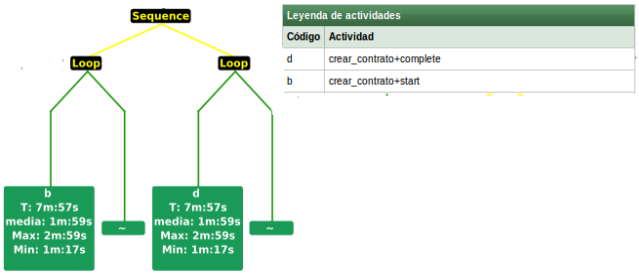


Figura 13. Modelo del subproceso Crear contrato. Fuente: Elaboración propia.

En esta sección del registro de eventos se identifica una secuencia entre dos subprocesos descompuestos mediante el patrón de control de flujo Lazo, esto significa en un primer momento se ejecutará el subproceso descompuesto por el patrón lazo de la izquierda y en un segundo momento el descompuesto por el patrón Lazo de la derecha.

El primer subproceso se descompone a su vez en una actividad llamada crear_contrato+start y una actividad invisible, la cual representa que existe ausencia de información en el proceso. La actividad crear_contrato+start en el lazo se va a ejecutar tantas veces como aparezca en el registro de eventos, dicha actividad siempre va a aparecer como actividad de inicio de la secuencia del subproceso general.

El segundo subproceso se descompone en dos actividades, crear_contrato+complete y una actividad invisible que al igual que en el subproceso anterior representa ausencia de información. La actividad crear_contrato+complete puede aparecer tantas veces como se registre en el registro de eventos y la misma es la que culmina la secuencia general iniciada por la actividad crear_contrato+start del lazo izquierdo.

Conclusiones

El desarrollo de un componente aplicando la Perspectiva temporal de Minería de procesos permitió obtener las métricas necesarias para realizar el análisis de procesos aplicando la Perspectiva temporal de dicha tecnología. La personalización de la técnica Variants Miner, posibilitó obtener un árbol de variantes donde se visualiza en los nodos hojas las métricas para realizar el análisis de procesos aplicando la perspectiva temporal. El resultado obtenido puede ser utilizado por analistas de procesos hospitalarios e investigadores, permitiéndoles realizar análisis de la ejecución de los procesos del HIS en cuestión. Propicia el uso de una fuente de información que por lo general en estos sistemas pasa desapercibida, dotando al XAVIA HIS de un componente para el análisis de sus procesos de negocio. Como futura extensión de la investigación se plantea la interpretación de los resultados en un lenguaje natural para facilitar su entendimiento por los usuarios del sistema. La validación del componente desarrollado demostró que los resultados obtenidos tras su ejecución son correctos y que puede ser utilizado por analistas de procesos hospitalarios.

ISBN 978-607-8242-11-5

Referencias

[1] Dios-Rubio, M. A., Framiñán, J. M., Domínguez, R., & León, J. M. Modelado y análisis de un proceso quirúrgico mediante técnicas de Minería de procesos. Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Organización - ADINGOR, 243-257, 2010.

[2] Yzquierdo Herrera, R. Minería de proceso como herramienta para la auditoria. Ciencias de la Información, 44(2), 25-32, 2013.

[3] Orellana, A., Pérez, D., & Larrea, O. U. Analysis of Hospital Processes with Process Mining Techniques. [ed.] Indra Neil Sharkar, Andrew Georgio y Paulo Mazzoncini de Azevedo. Sao Paulo: s.n., 2015. MEDINFO 2015: EHealth-enabled Health: Proceedings of the 15th World Congress on Health and Biomedical Informatics. Vol. 216, pp. 310-314. 978-161449-564-7, 2015.

[4] IEEE TASK FORCE ON PROCESS MINING. Manifiesto sobre Minería de proceso [online]. S.l.: s.n. Disponible desde: http://www.win.tue.nl/ieeetfpm/lib/exe/fetch.php?media=shared:pmm-spanish-v1.pdf. 2011.

[5] Orellana A., Pérez, Y. E., Larrea, O.U. "Process Mining in Healthcare: Analysis and Modeling of Processes in the Emergency Area." Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina) ISSN: 1548-0992. 13:5. 2015.

[6] van der Aalst., W.M.P. Process Mining. Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. London New York: Springer, ISBN 978-3-642-19344-6. 2011.

[7] Orellana, A., Pérez, Y.E. & Larrea, O.U., (2015). Process Mining in Healthcare: Analysis and Modeling of Processes in the Emergency Area. Latin America Transactions, IEEE, Vol. 13 no. 5, p.1612-1618.

[8] Orellana, A., Larrea, O.U, Pérez, Y.E., and Pérez-Alfonso, D. (2016). Inductive Visual Miner Plugin Customization for the Detection of Eventualities in the Processes of a Hospital Information System. Latin America Transactions, IEEE, Vol. 14 no. 4, pp.1930-1936.

[9] Pérez, D. Técnica para el diagnóstico de variantes de procesos de negocio. Tesis de Maestría, Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba, 2014.

[10] Orellana, A., Sánchez, Y. Minería de procesos en salud. Caso de Estudio: modelado de los procesos del área de Emergencia. Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014) "Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity".PRF#254, 13 978-0-9822896-7-9. 2014.

[11] Mans, R. S., van der Aalst, W. M., Vanwersch, R. J., & Moleman, A. J. Process mining in healthcare: Data challenges when answering frequently posed questions. In Process Support and Knowledge Representation in Health Care. Springer Berlin Heidelberg.C, pp. 140-153, 2013.

[12] Mans, R. S., van der Aalst, W. M., & Vanwersch, R. J. Healthcare Processes. In Process Mining in Healthcare. Springer International Publishing. pp. 11-15, 2015.

[13] Rebuge, Á. & Ferreira, D. R. Business process analysis in healthcare environments: A methodology based on process mining. Information Systems, 37(2), 99-116, 2012.

[14] Claes, J., & Poels, G. Process mining and the ProM framework: an exploratory survey. In Business Process Management Workshops. Springer Berlin Heidelberg. pp. 187-198, 2013.

[15] Leemans, Sander J.J., Fahland, Dirk y van der Aalst, Wil M.P. Process and Deviation Exploration with Inductive visual Miner. Eindhoven: Eindhoven University of Technology. 2014.

[16] Hernández-Nariño, A. et al. Inserción de la gestión por procesos en instituciones hospitalarias. Concepción metodológica y práctica. Revista de Administração-RAUSP. vol. 48(4), p. 739-756, 2013

[17] Hernández-Nariño, A., Medina-León, A., Nogueira-Rivera, D., Negrín-Sosa, E., & Marqués-León, M. Systems characterization and clasification, a needed step for processes management and improvement. The specifics of health care organizations. Dyna, 81(184), p. 193-200. 2014.

[18] Leoni, M., & van der Aalst., W.M.P. Aligning Event logs and Process Models for Multi- Perspective Conformance Checking: An Approach Based on Integer Linear Programming. Netherlands: Eindhoven University of Technology.2012.

[19] De Medeiros, A.K. Genetic Process Mining. Eindhoven University of Technology. ISBN: 90-386-0785-7, ISBN: 978-90-386-0785-6, 2006.

[20] Chamorro, M. C., & Maturana, S. Método para Aplicar Minería de procesos a la Distribución de Bebestibles No Alcohólicos. 2013.

[21] Revista de Didáctica de las Matemáticas, 1995 JUL; II (5).

[22] Orellana A., Alfonso, D., and Larrea, O.U. "Generador de Registros de Eventos para el análisis de procesos en el Sistema de Información Hospitalaria xavia HIS." Convención Salud 2015. ISBN: 978-959-212-963-4, 2015.

[23] Yzquierdo, R. Modelo para la estimación de información ausente en las trazas usadas en la minería de proceso. Tesis de Doctorado, Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba. 2012.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Model for Designing Human-Computer Interaction for Virtual Reality Applications (MODIHC-VR)

Flor Narciso[1], Joseph Álvarez[1], Peggy González[1], Alfredo Pomales[1] and Addison Ríos-Bolívar[2]
(1) Fac. of Arts and Sciences, Dept. of Mathematical Sciences, Univ. of Puerto Rico, Mayagüez Campus, CALL BOX 9000, Mayagüez-Puerto Rico 00681-9018
(2) Fac. of Engineering, Dept. of Control Systems, Univ. of Los Andes, La Hechicera, Mérida-Venezuela
e-mail: flor.narciso@upr.edu

Abstract

The Model for Designing Human-Computer Interaction (MODIHC) allows to design those aspects involved in the interaction between humans and computers when software is being developed. This model has four components: Users, Work Environment, Technology and System Functionality. Since MODIHC does not consider the design of the Human-Computer Interaction for Virtual Reality applications, in this work the model is evaluated and modified to consider these types of applications.

There are two models that are meant to guide the design of a Virtual Reality application: Virtual Reality Interface Design (VRID) and ThREe dimensional uSer interface Development (TRES-D). In the VRID model, it is discussed how Virtual Reality applications are not easily integrated into everyday life because of the difficulty of designing them. This model provides guidelines to designing Virtual Reality applications as well as to facilitate their use and integration into society. The TRES-D model is introduced with the purpose to put together the best of iterative and incremental software process models that can be adapted to the variable complexity of different application developments. The modifications of the components of MODIHC are based on some basic concepts of these two models.

As a result, the Users component of MODIHC is modified following the Understanding Requirements of the TRES-D, because it describes the Users component more specific. The Technology component of MODIHC is modified following some aspects that are considered in VRID (Behavior, Iteration and Communication Components) and in TRES-D (Concept Design, Iterative Design, Building and Implementation, and Deploy and Maintenance), and by adding Virtual Reality hardware that help in the development and use of Virtual Reality applications. During the evaluation of MODIHC it has been determined that the System Functionality component is not clearly defined. Thus, this component is redefined by establishing a new objective, which is to create a Graphical User Interface prototype for a Virtual Reality application. Finally, the Work Environment component of MODIHC is not updated because it can already be used to develop the Human-Computer Interaction for Virtual Reality applications. The new version of MODIHC with these modifications is called MODIHC-VR.

Keywords: Software Engineering, User Centered Design, Human-Computer Interaction, Virtual Reality

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

The Model for Designing the Human Computer Interaction (MODIHC) (Narciso et al., 2015, Narciso and Valero, 2015; Valero, 2008; Narciso and Rodríguez, 2004) is a model that is used as a guide for the design of the Human-Computer Interaction (HCI) (ACM SIGCHI, 2009; Preece et al., 2007) when a software is being developed. On the other hand, Virtual Reality (VR) (Jason, 2015) is a computer simulation of a three-dimensional (3D) environment that can be interacted similarly as a real or physical world by a person using special electronic equipment, such as a helmet with a screen inside or gloves with sensors, among others. Since MODIHC does not consider the design of the HCI for VR applications, the model is evaluated and updated to allow this in (Álvarez et al. 2016). The result of this work, which is presented here, is a new version of MODICH called MODICH-VR. At present, this model has been used for the HCI design of several VR applications (Giboyeaux et al., 2017; Nagovitch et al., 2017; Paredes et al., 2017; Pérez González et al., 2017; Quiñones et al. 2017, Rosado and Mendez, 2017).

Background

In 2000, MODIHC was proposed by (Rodríguez, 2000) to be used as a guide for designing HCI for the software products needed by organizations and businesses. The four components of this model are (Narciso and Rodríguez, 2004):

- Users component: An analysis of users is performed to determine the physical, intellectual, cognitive and personality aspects of potential users of the software as well as their abilities. This allows to generate user profiles for the design of a HCI of the software.
- Work Environment component: A study of the environment where the users are going to use the software is performed, considering organizational, physical and social aspects.
- Technology component: The choice of input/output devices (hardware) and interaction styles (software) appropriate for interacting with the software is made depending on the users, the working environment and the software functionality.
- System Functionality component: It defines what the software will do based on the domain of the tasks or activities carried out by the users and the restrictions under which the software must operate to guarantee its implementation.

MODIHC was formalized in (Valero, 2008) to provide a formal way for designing the HCI of software products. Since then, several modifications have been made to the model to adapt it to the current requirements related to the evolution of the computer and mobile technologies. Thus, MODIHC was revised and modified in (Molano and Echavarría, 2015) to include mobile apps, focusing on the update of the Technology component. This model was completed in (Gonzalez et al., 2015) by performing modifications to the Users, Work Environment and Technology components, which allows to design the HCI for mobile applications. Finally, in (Gerena and Román, 2016) modifications were performed to MODIHC to include aspects that allow the design of the HCI of software products for users with total visual and auditory impairments. Fig. 1 shows the relationship among the four components of MODIHC and the organization for which the software is being developed.

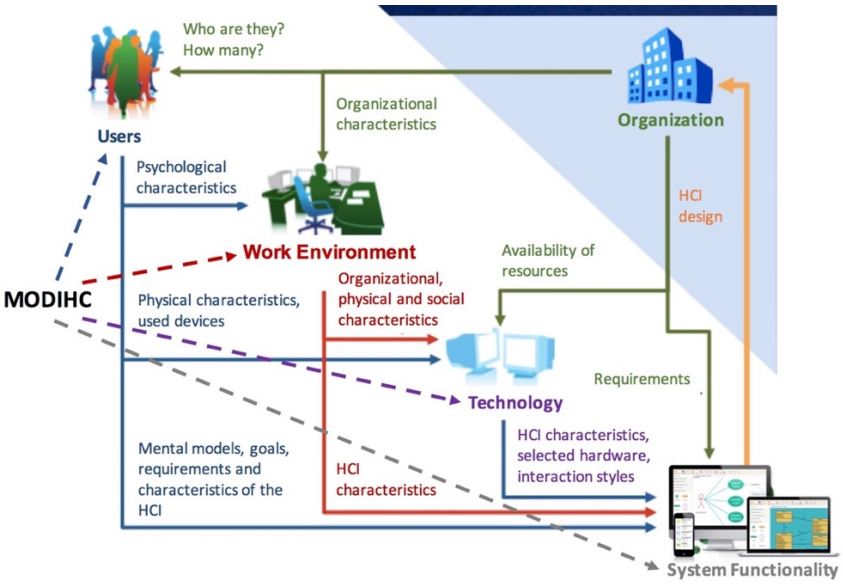


Fig. 1: Relationship among the components of MODIHC and the organization

ISBN 978-607-8242-11-5

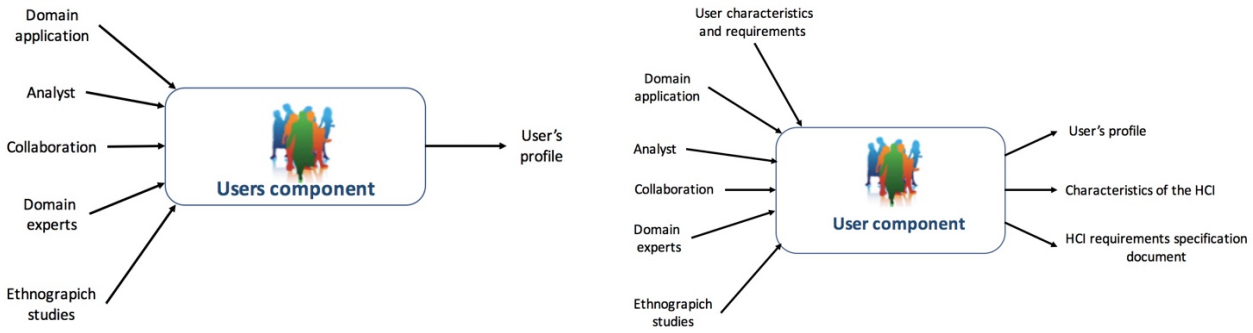
For the development of MODIHC-VR, the Virtual Reality Interface Design (VRID) (Tanriverdi, 2001) and ThREe dimensional uSer interface Development (TRES-D) (Molina et al., 2006) models were reviewed. The first model provides guidelines for designing VR applications to facilitate their use and integration into society and the second model considers the best characteristics of iterative and incremental software process models that can be adapted to the variable complexity of different application developments.

MODIHC COMPONENTS FOR VIRTUAL REALITY APPLICATIONS

The modifications that allow that MODIHC can be used to design the HCI of VR applications are explained below. As it has been said before, these modifications are based on some aspects covered by VRID and TRES-D models.

Users Component

The Users component of MODIHC defined in (Valero, 2008) is modified following some aspects that are considered in the TRES-D model, such as the Understanding Requirements because they allow to describe the Users component more specifically. The Understanding Requirements uses steps to make corrections for a better application to the user, creating the user's profile, which is a document that identifies and classifies every user of the VR application. This is managed directly with the domain application verified with experts such as development team categorize as analyst, collaboration team, and the ethnographic studies that helps to improve a better functionality of the application. Fig. 2a shows how TRES-D is used on the Users component of MODIHC to create a user's profile and Fig. 2b shows the component obtained after performing the modifications.



(a) User component using TRES-D (b) User component obtained

Fig. 2: MODIHC-VR Users component

Objectives of the Users component

The objectives that software designers must achieve with this component are:

- Identify the potential users of the VR application.
- Classify the potential users according to their characteristics.
- Define the data collection techniques and the type of data analysis to be used.
- Create the user's profile.
- Determine characteristics of the HCI for the VR application based on the potential user characteristics and requirements.
- Create the HCI requirements specification document.

Products of the Users component

The products to be obtained from this component are the user's profile, the characteristics of the HCI based on the potential users and the HCI requirements specification document. The user's profile can be represented as a table containing the information of the potential users, such as basic data (gender, age, experience, education, abilities, limitations), physical and psychological characteristics, input/output devices commonly used, mental model of how a system works in the real world, goals, and requirements. Also, the characteristics of the HCI can be represented as a table with the description, observed value, and recommendations for the design of the HCI of each characteristic. For the elaboration of the requirements specification document can be used any of the formats established by the different software development processes (Somerville, 2011).

ISBN 978-607-8242-11-5

The information contained in these products support the other three components of MODIHC. For example, the psychological characteristics of the users are considered for a study of the social environment; the physical characteristics of the users are considered for the selection of the styles of interactions and the input/output devices; and the mental models, user's goals, VR applications requirements and the characteristics of the HCI are used to design the software functionality.

Methodologies, methods, techniques and tools of the Users component

To obtain the data needed to create the user's profile, the characteristics of the HCI based on the potential users and the HCI requirements specification document, one or several data collection techniques can be used. Different techniques and methods based on the paradigm of User Centered Design (UCD) (Baek et al., 2009; Zhang and Dong, 2009) might help designers to obtain the required data of the potential users. The most commonly used data collection techniques are interviews, group sessions, questionnaires, surveys, documents and records, and direct and indirect user's observation. The objectives of these techniques are to obtain enough data that allow to specify the characteristics of the potential users, their mental models of VR applications, the input/output devices, the styles of interaction and the work environment. In (Preece et al., 2007), the following four elements that must be considered to perform a successful data collection are defined:

- **Goals:** It is important to define the goals of the activities to be carried out, the techniques that will be used and the type of analysis will be performed. Once the goals are established, the data to look for and what to do with them are to be defined.
- **Relationship with participants:** The relationship between the software designer and the users should be clear and professional. In addition, users should know the reason of the study and what is done with the information they provide.
- **Triangulation:** This is a strategy that implies using more than one data collection technique address a goal, or using more than one analysis approach of the same data. This strategy provides different perspectives and corroborates the results of different techniques used.
- **Pilot study:** This is a test of how the main study works. Its purpose is to ensure that the proposed techniques for collecting data are feasible before the actual study is performed.

Workflow of the Users component

In Fig. 3 the steps that should be followed by the software designer to accomplish the objectives of the Users component are showed as a UML (Unified Model Language) activity diagram (OMG, 2015).

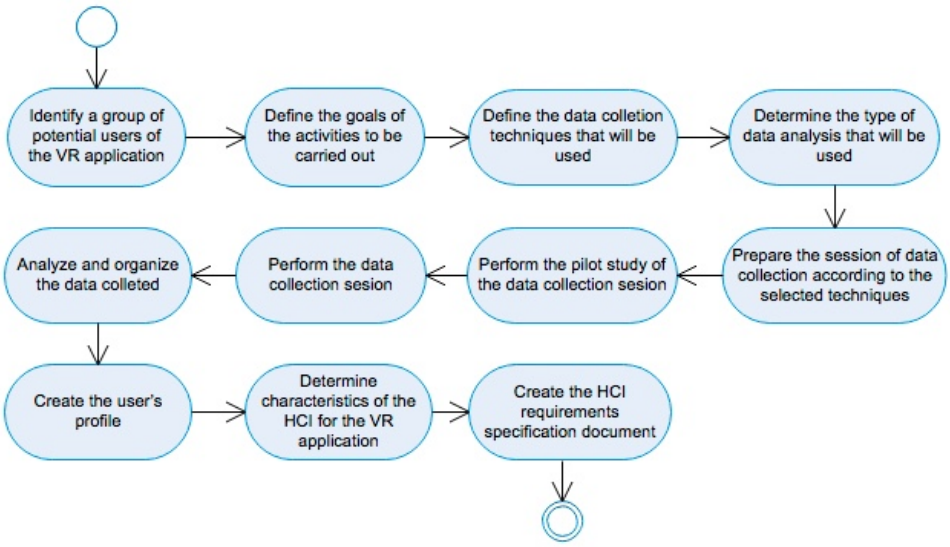


Fig. 3: UML activity diagram for the MODIHC-VR Users component

Work Environment component

When designing the HCI of a software it is necessary to perform a study of the environment in which it will operate, considering three aspects: organizational, physical, and social (Valero, 2008). The Work Environment component of MODIHC is responsible for studying these aspects to produce the characteristics of the HCI based on the work environment and the work environment specification document (see Fig. 4 and Table 1).

ISBN 978-607-8242-11-5



Fig. 4: MODIHC-VR Work Environment component

Table 1: Aspects of the MODICH-VR Work Environment component

Aspect	Factors
Organizational	Structure, mission and strategies, work positions, work organization, users, customers and suppliers, politics and culture
Physical	Ambient temperature, natural and artificial lighting, external and internal noises, physical space organization, furniture, specific objects, buildings, geographic spaces, vegetation
Social	Communication between people and interaction with the environment that constitutes their working environment

As it is defined, the Work Environment component can be used for the design of the HCI of VR applications, since the aspects considered by this component allow the study and analysis of the real world, which is modeled in VR applications. Only some factors that could be modeled by VR applications have been added to the physical aspect, such as furniture, specific objects, buildings, geographic spaces, and vegetation, among others. In addition, the objectives have been adapted to VR applications.

Objectives of the Work Environment component

The objectives that software designers must achieve with this component are:

- Study the organizational, physical and social aspects of the work environment in which the VR application will be implemented.
- Study the distribution and characteristics of the physical space.
- Determine characteristics of the HCI based on the work environment.
- Create the work environment specification document.

Products of the Work Environment component

The products that are obtained in this component are the table of characteristics of the HCI based on the work environment and the work environment specification document. The table of characteristics of the HCI contains information related to persons and/or objects in the work environment, sounds, light, colors, temperature, among others, with the description, observed value, and recommendations of each characteristic. The work environment specification document describes in detail the physical, social and organizational environment where the VR application will be used. It should be taken into consideration that the physical space in which the VR application would be used is not necessarily a specific or fixed location, that is, in some cases it could be used anywhere with a computer or mobile device. These two products provide information to the Technology and System Functionality components of the MODIHC-VR.

Methodologies, methods, tools and techniques of the Work Environment Component

The data required for the creation of the table of characteristics of the HCI based on the work environment and the work environment specification document are obtained using one or more of the data collection techniques previously discussed (Valero, 2008). For example, to study the organizational environment it is recommended the use of interviews and the review of documents and records of the organization and the physical space; to study the physical environment direct observation could be used; and to study of the social aspects both interviews and direct and indirect user's observation are recommended.

Workflow of the Work Environment component

To accomplish the objectives of this component, the software designer must carry out the activities presented in the UML activity diagram of Fig. 5.

ISBN 978-607-8242-11-5

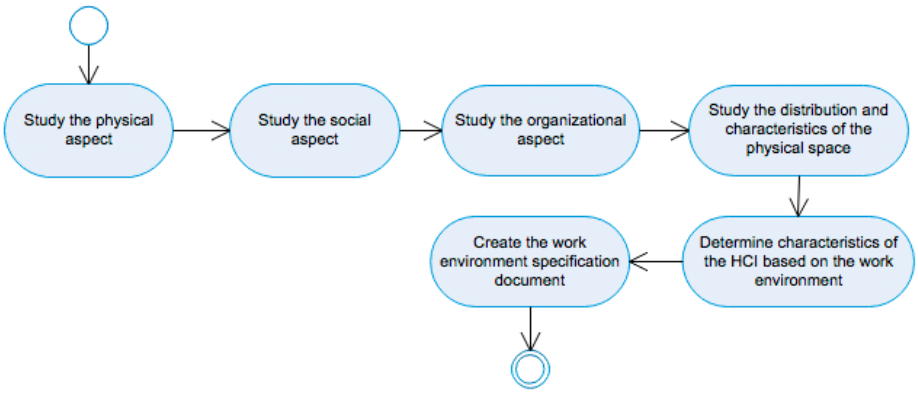


Fig.5: UML activity diagram for the MODIHC-VR Work Environment component

Technology Component

The Technology component of MODIHC is modified considering some aspects of VRID and TRES-D models (see Fig. 6). The aspects of VRID model are the Behavior, Iteration and Communication components because each of them interacts with the technology of the software. The Behavior Component is needed for computer-generated appearance and animations of the objects which connects to the Iteration Component that specify where inputs of the VR system are made and how is affected. In addition, the Communication Component specify sources of communication. The aspects of TRES-D model are Concept Design, Iterative Design, Building and Implementation, and Deploy and Maintenance. Concept Design allows to work directly solving the problem of the application through analyst experiences while the Iterative Design has two sub-designs (Abstract Design and Presentation Design) which are a cycle. Interaction designers perform the specification of each of the components of the application using tools of increasing detail. For the Building and Implementation, the successive refinement result in a set of specifications and prototypes that are the documentation. Finally, the stages and activities of Deploy and Maintenance can be adapted to the specific requirements of each application (Molina et al., 2006).

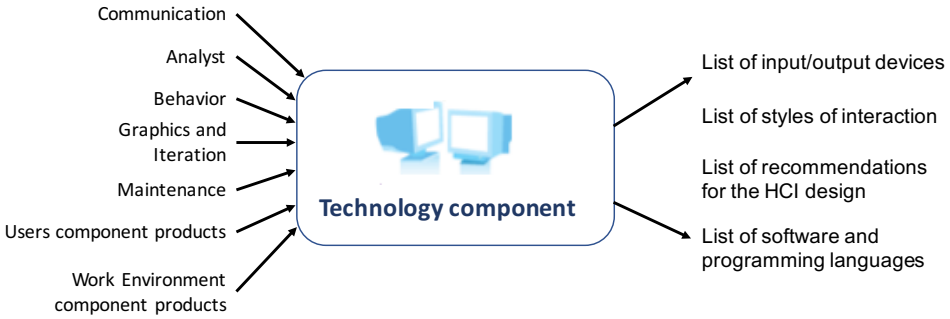


Fig. 6: MODIHC-VR Technology component

Objectives of the technology component

The objectives that software designers must achieve with this component are:

- Select the input/output devices that adapts the best to the user, the work environment and to the organization's available resources.
- Select the appropriate interaction styles for the VR application in development.
- Determine the characteristics of the UI based on the technology available.
- Select the most appropriate software and programming language for the development of a VR application.

Products of the technology component

The products of the Technology component are:

- A list that contains various input and output devices (mouse, keyboard, printer, microphone, monitor, speakers, data gloves, tracker, etc.) with their description.
- A list of appropriate interaction styles (menu, command line, question and answer, form filing, direct manipulation, natural language, graphical user interface, gesture-based interaction, etc.).

ISBN 978-607-8242-11-5

- A list of recommendations for the HCI design of a software application.
- A list of software and programming languages for implementing the VR application.

The products of this component provide an important information for the development of the System Functionality component of the MODIHC-VR

Methodologies, methods, tools and techniques of the Technology component

The software designer must select the most appropriate input/output devices and interaction styles for a better use of the VR application according to the user's requirements, work environment and availability of these resources. Also, the designer must determinate the characteristics of the HCI based on the selected technology.

Workflow of the Technology component

Fig. 7 illustrates the activities that must be performed by the software designer for the development of the Technology component as a UML activity diagram.

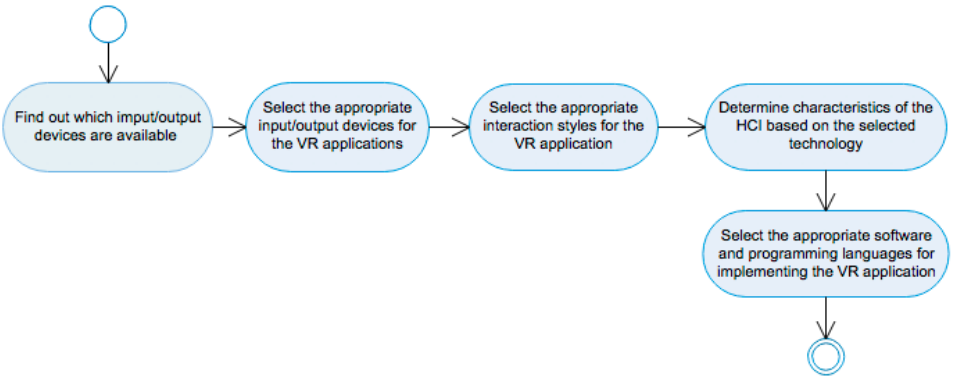


Fig.7: UML activity diagram for the MODIHC-VR Technology component

System Functionality component

This component allows the design of the HCI of a VR application that satisfies the user and organizational requirements, fulfills the UCD design philosophy, it is suitable for the work environment where it will be used and uses the input/output devices and interaction styles selected allowing the interaction of the user with the VR application according to its functionality. As a product of this component a HCI prototype of the virtual reality application that is being designed is obtained (see Fig. 8).

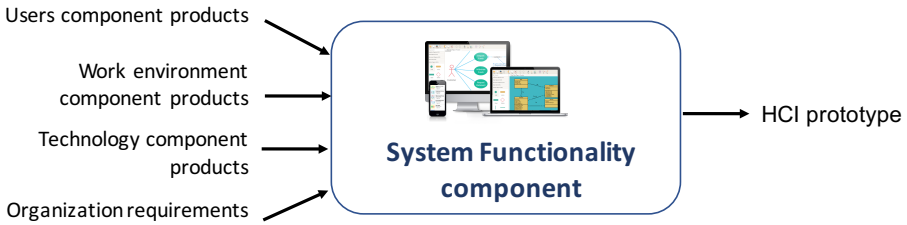


Fig. 8: MODIHC-VR System Functionality component

Objectives of the System Functionality component

The objectives that the software designer must achieve for this component are the following:

- Identify the needs of the organization that must meet the software VR application.
- Identify the goals and requirements of the users that must be fulfilled with the VR application.
- Review the mental model of the users of the VR application.
- Review the characteristics of the HCI defined in the Users, Work Environment and Technology components.
- Review the information obtained from the analysis phase of a software development processes.
- Design an HCI that appropriately represents the functionality of the system and satisfies the users requirements.

ISBN 978-607-8242-11-5

Products of the System Functionality Component

The product of this component is a HCI prototype of the VR application which allows that the users can verify if the HCI designed satisfies the requirements obtained from the Users, Work Environment and Technology components and get an idea of what the VR application will look like before it is implemented.

Finally, the HCI design of the VR application is presented as a final report detailing the products generated by the four components of MODIHC-VR.

Methodologies, methods, tools and techniques of the System Functionality Component

The design of the HCI of a VR application evolves iteratively through cycles of design-evaluation-redesign in which users are always present. There are two types of design: conceptual and physical. The first one refers to the elaboration of a conceptual model that represents what a software is going to do and how it will behave, while the second refers to design details such as screens, menu structures, icons, and graphics (Preece et al., 2007).

For users and members of the organization to be able to effectively evaluate the HCI that are being designed, the software designer must create a prototype, which can be improved based on the feedback of the users. The use of low-fidelity prototype (Preece et al., 2007) using UML notations (OMG, 2015) is recommended. The use of this kind of prototype allows to take advantage of the UML diagrams for the design of the VR applications when integrating MODIHC-VR with any software process models (Valero 2008).

Workflow of the System Functionality Component

The UML activity diagram with the activities that the software designer must accomplish to develop the System Functionality component is shown in Fig. 9.

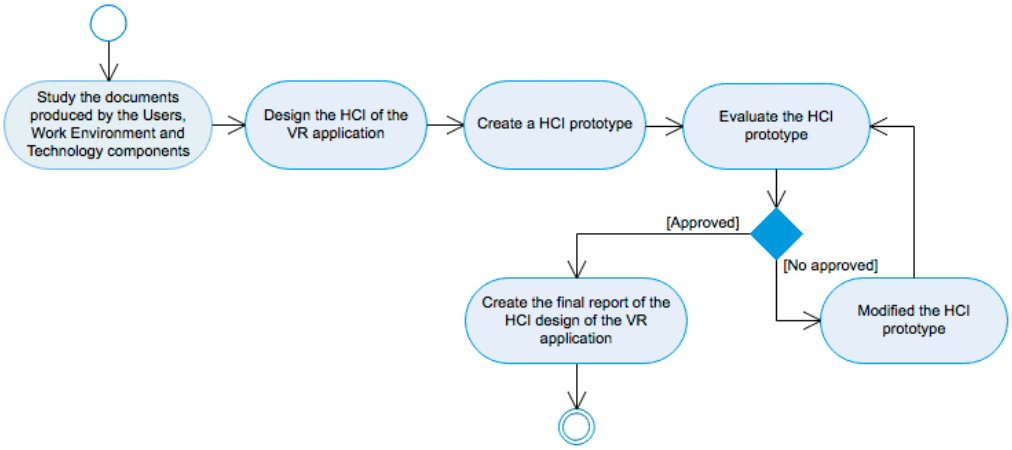


Fig.9: UML activity diagram for the MODIHC-VR System Functionality component

CONCLUSIONS

In this work, the four components of MODIHC have been evaluated and modified to include aspects that allow the design of the HCI of VR applications. After the evaluation, it was determined that a new component was not needed because the modifications of the components satisfy the requirements of the HCI design for VR applications.

The Users component has been modified and adapted for VR applications based on VRID and TRES-D models. In the Work Environment component, some factors that can be modeled by VR applications have been included. The Technology component has been modified based on VRID and TRES-D models. Also, VR input/output devices and a list of software and programming languages for implementing the VR application have been added to this component. It was determined that the System Functionality component was not clearly defined. Therefore, this component has been redefined, establishing as its objective the creation and evaluation of a HCI prototype, which guarantees the acceptance of a VR application by the users. Also, the objectives of the four components of MODIHC-VR have been modified to consider aspects related to VR applications.

ISBN 978-607-8242-11-5

However, it was not necessary to make significant modifications to MODIHC to generate MODIHC-VR, which demonstrates that the model was well defined. By making a few changes to its components, the model has been adapted for designing the HCI of VR applications. Thus, the four components of MODIHC-VR have a formal definition, providing the Software Engineering community with a useful and well defined model for the HCI design of this type of applications.

REFERENCES

ACM SIGCHI; *Curricula for Human-Computer Interaction*. Retrieved from http://sigchi.org/cdg/cdg2.html (2009)

Álvarez J., P. González and A. Pomales; *Model for Designing Human-Computer Interaction for Virtual Reality Applications (MODIHC-VR)*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2016)

Baek E., K. Cagiltay, E. Boling and T. Frick; *User-Centered Design and Development*. Retrieved from http://www.aect.org/edtech/edition3/ER5849x_C049.fm.pdf (2009)

Gerena S. and J. Román; *MODIHC - Model for Designing Human-Computer Interaction for Users with Visual and Auditory Impairments*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2016)

Giboyeaux J., S. Echevarría and A. García; *Department of Mathematics Virtual Reality (DOMVR)*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2017)

González E., D. Olivo and L. Rodríguez; *Users, Work Environment and Technology components of the Model for Designing Human-Computer Interaction (MODIHC) for the development of applications of mobile devices*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2015)

Jason J.; *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*, Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool New York, NY, USA (2015)

Molano L. and S. Echevarria; *Evaluation of the Technology and Work Environment Components of the Model for Designing Human-Computer Interaction (MODIHC)*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2015)

Molina J. P., A.S. García, L. López-Jaquero and P. González; *Developing VR applications: theTRES-D methodology*. Retrieved from https://wise.vub.ac.be/MeToVR/downloads/Paper3_Molina_garcia.pdf (2006)

Nagovitch C. A., J. Rosario and R. O. Negrón, *CelisVR*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2017)

Narciso F., A. Ríos-Bolívar, I. Besembel, M. González; *Aplicación del modelo para Diseñar la Interacción Humano-Computadora: Componente Usuario*, 12° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos (CAIP 2015). Cartagena de Indias, Colombia, 14-17 (2015)

Narciso F. and G. Valero; *Formalización del Modelo para Diseñar la Interacción Humano-Computadora (MODIHC)*, XXX Seminario de Investigación en Ciencias Matemáticas (SIDIM XXX). Mayagüez, Puerto Rico (2015)

Narciso F. and T. Rodríguez; *Un Modelo para Diseñar la Interacción Humano-Computadora*, Sistemas de Información e Ingeniería de Software: Temas Selectos: 365–375. J. Montilva, et al. (eds.). Mérida, Venezuela (2004)

OMG; Documents Associated With Unified Modeling Language™ (OMG UML) Version 2.5. Retrieved from http://www.omg.org/spec/UML/2.5 (2015)

Paredes W., G. Ramos and J. Toro; *Modelo de Interacción Humano-Computadora para Aplicación Realidad Virtual de Edificio Oficina Profesores*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2017)

Pérez González E., K. Ayala Bernard and K. Maldonado Zapata, *Aplicación en Realidad Virtual Natatorio (NataVR): Informe Final*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2017)

Preece J., H. Sharp and Y. Rogers; *Interaction Design: beyond human-computer interaction*, Second Edition, John Wiley & Sons (2007)

Quiñones K., C. Malavé and W. Ruiz, *Virtual Environment of Jesus T. Piñero building from the University of Puerto Rico Mayagüez Campus (PiñeroVR)*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2017)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Rodríguez T.; *Modelo de la Interacción Humano-Computadora para Ambientes Bibliotecarios (IHM-AMBIB)*, Master Thesis, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela (2000)

Rosado J. and I. Mendez; *PHK - VR Plaza Henry Klumb - Virtual Reality*, Technical Report, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Mayagüez, Puerto Rico (2017)

Somerville I.; *Software Engineering*. 9th Edition. Pearson (2011)

Tanriverdi V. and R.J.K. Jacob; *VRID: A Design Model and Methodology for Developing Virtual Reality Interfaces*. Retrieved from http://www.cs.tufts.edu/~jacob/papers/vrst01.tanriverdi.pdf (2001)

Valero G.A.; *Formalización del modelo para el diseño de la interacción humano-computadora (MODIHC)*. Undergraduate Thesis, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela (2008)

Zhang T. and H. Dong, "*Human-centred design: An emergent conceptual model*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/49402084_Human-centred_design_An_emergent_conceptual_model (2008)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Diseño de inversor para luminaria con aplicación en ambiente rural sin acceso a energía eléctrica

Guillermo A. Arzate[1], Marco C. Retana[1], Leobardo H. González[1], José V. Gómez[1], Roxana R. Valencia[1].

(1) Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, ESIME Unidad Culhuacán del I.P.N, Ciudad de México
E-mail: gavalos580@hotmail.com, carbajalrmarco@gmail.com; lhernandezg@ipn.mx

RESUMEN

La necesidad de energía eléctrica va en aumento con el rápido crecimiento de la población. Esto genera el requerimiento de un sistema eléctrico en todas las comunidades y si dicho sistema es sustentable tendrá un gran impacto ecológico. Teniendo en cuenta estas condiciones, se diseño un inversor energizado por batería, que es cargada adecuadamente por medio un panel solar, la energía almacenada en la batería durante el día permite la energización de una luminaria de bajo consumo. Con la adquisición de energía solar se aprovecha el alto índice de radiación solar en el país y se obtiene energía sin dañar al medio ambiente, lográndose un proyecto sustentable ya que se independiza del suministro eléctrico convencional para realizar la recarga. El sistema puede aportar la energía suficiente para cubrir las necesidades básicas de luminaria en periodos de escasa luz o noche, en una vivienda que se encuentre localizada en alguna zona rural sin acceso a la energía eléctrica.

Design of inverter for lamp with application in rural environment without access to electric energy

Abstrac

The need for electric power is increasing with the rapid growth of the population. This generates the requirement of an electrical system in the rural communities, if this system is sustainable will have a great ecological impact. Taking into account these conditions a battery-powered inverter is designed, which is charged by means of a solar panel, the energy stored during the day allows the energization of a low-energy luminary. The acquisition of solar energy takes advantage of the high solar radiation index in the country and obtains energy without damaging the environment, achieving a sustainable project as it becomes independent of the conventional electricity supply to perform the recharge. The system can provide sufficient energy to cover the basic needs of luminaries in periods of low light or night, in a house that is located in a rural area without access to electricity.

keyword: Flyback, SEPIC, Inverter.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía eléctrica en México crece constantemente con el incremento de la población por lo que la necesidad de electricidad crece con gran velocidad, sobretodo en áreas urbanas donde la tecnología está presente en la vida cotidiana. En 2007, el consumo per cápita de electricidad fue de 2036 KW/h, sin embargo, la generación de energía eléctrica en el país no alcanza a abastecer a todas las comunidades y aún hay un gran índice de viviendas sin energía eléctrica. Los estados del norte y sur como lo son Chihuahua, Durango, Guerrero, Oaxaca entre otros presentan el mayor porcentaje de ocupantes en viviendas sin energía eléctrica con cifras cercanas al 5% en 2010 de acuerdo al INEGI. El porcentaje nacional es de 1.77%. Estas comunidades marginadas, no cuentan con electricidad y por tanto carecen de un sistema de iluminación básica, por tanto los sistemas inversores CD/CA aportan una solución adecuada para aprovechar los recursos renovables en la generación de energía eléctrica, como lo es el caso de la energía solar. Como solución a la problemática planteada, se propone el diseño de un sistema inversor para luminaria de bajo consumo, el cual se divide en siete etapas básicas: fuente de energía, acondicionador, cargador, almacenamiento de energía, inversor, control y carga. Cada una de estas etapas se diseño para satisfacer la carga que se conectará al inversor, para la aplicación se propuso utilizar un foco ahorrador con luz cálida.

OPERACION GENERAL DEL SISTEMA

En la Figura 1 muestra el diagrama a bloques del sistema propuesto. El proyecto se divide en dos partes: el sistema de carga de la batería y la inversión de voltaje para la energización de la luminaria de bajo consumo. El sistema de control se programo en un microcontrolador ATMega48 y sus funciones son las siguientes: se monitorea el nivel de carga de la batería, si la batería se encuentra en un voltaje igual o menor a 10 V, valor indicado por el fabricante, es necesario cargarla. Para poder hacerlo, el panel solar debe entregar un voltaje mayor o igual a 16 V, el potencial anterior se asegura la activación del cargador que entregará el voltaje de carga a la batería de 14.5 V. En caso de que el panel no entregue el voltaje mínimo, significa que aún no hay energía solar suficiente y el sistema se quedará en espera para poder realizar la recarga. Se monitorea sensado de corriente a la salida del cargador que permite saber si la batería aún se está cargando, condicionado a que el panel solar entregue suficiente voltaje. Cuando la batería deje de demandar corriente, significa que la carga está completa y el cargador debe desactivarse para no dañar a la batería. Si se detecta la acción del interruptor de energización de la lámpara, se monitorea el nivel de carga de la batería para asegurar que existe voltaje suficiente para energizar la carga, de lo contrario la batería continuara cargándose hasta llegar a mínimo de 11V a partir del cual se permite energizar la lámpara a través del convertidor inversor. En estas condiciones la lámpara está en condiciones de ser energizada. En la Figura 2, se muestra el esquema del inversor utilizado, el cual se procederá a explicar su diseño.



Figura 1. Diagrama a bloques del esquema inversor

DISEÑO DEL INVERSOR

La conversión de energía CD a CA se lleva a cabo en el inversor de puente completo a una frecuencia de 60 Hz. Los cálculos del transformador para elevar 12 VCD a 180 Vpico en principio arrojan valores de inductancias altos así como corrientes elevadas, debido a la alta relación de ganancia. Para solucionar esto, se propuso dividir el inversor en dos etapas: un convertidor de CD-CD para generar un bus de CD con un nivel de voltaje más elevado que energice al inversor y así reducir el tamaño del transformador de baja frecuencia y la corriente demandada. El bus de CD se genera a partir de un convertidor Flyback con un transformador de alta frecuencia. Se calcularon diferentes valores para el bus de CD y así elegir el más apropiado para la construcción del transformador de baja frecuencia. La Tabla 1 es una comparativa de los

 ISBN 978-607-8242-11-5

valores para los convertidores Flyback e inversor propuestos. Se puede observar las variaciones de inductancia de ambos transformadores, así como la corriente que demanda cada uno cuando el convertidor elevador se diseña a 35 V, 50 V y 75 V (Colonel, 2004, Rashid, 2004, Mohan 2003).

Tabla 1. Comparativo de bus de CD

Bus de CD		35V			50V			75V		
Ciclo de trabajo del Flyback		D=0.4929			D=0.51			D=0.51		
Flyback 50KHz		L [H]	V[Volts]	I [A]	L [H]	V[Volts]	I [A]	L [H]	V[Volts]	I [A]
	Primario	0.2396m	12		0.2656m	12		212.5u	12	>3A
	Secundario	2.15m	35	800m	4.25m	50	600m	7.65m	75	500m
Inversor a baja frecuencia 60Hz		L [H]	V[Volts]	I [A]	L [H]	V[Volts]	I [A]	L [H]	V[Volts]	I [A]
	Primario	378.32m	33	726m	799.68m	48	500m	1.715	73	329m
	Secundario	11.25	180Vp	133m	11.24	180Vp	133m	10.64	180Vp	133m

De acuerdo a la Tabla 1, se observa que las corrientes disminuyen a medida que el voltaje del bus de CD se incrementa, al igual que la relación de ganancia. Por esto se eligió utilizar el bus de CD a 75 V.

a) Cálculos de las inductancias para el transformador de baja frecuencia

El transformador de baja frecuencia es el que elevará la señal alterna que entrega el puente inversor, para obtener un voltaje de línea de 127 Vrms ($180V_P$). Los cálculos de las inductancias se muestran en la Tabla 2 (Colonel, 2004).

Tabla 2. Diseño del transformador de baja frecuencia

Vin=75 V	Vo=180 Vp
Po=24 $Watts$	f=60 Hz
$G_V = \frac{180V}{73V} = 2.46$	Se restan 2V para considerar la caída del voltaje en el inversor
Corriente en inductor del secundario	Corriente en el inductor del primario
$I_{LS} = \frac{24Watss}{180Vp} = 133mA$	$I_{Lp} = G_V \bullet I_{Ls} = 2.46 \bullet 133mA = 329mA$
Inductancia del primario LP	Inductancia del secundario LS
$L_P = V_{in}\frac{T/2}{I_{Lp}} = 73V\frac{8.33mS}{329mA} = 1.715H$	$L_S = \frac{L_P}{\left(\frac{Vin}{Vo}\right)^2} = \frac{1.715H}{\left(\frac{73V}{180V}\right)^2} = 10.64H$

b) Cálculos del convertidor CD-CD Flyback

El convertidor Flyback debe elevar los 12 V de la batería hasta 75 V de CD para energizar el inversor, en la Tabla 3, se presenta la metodología de cálculo del convertidor Flyback (Mohan 2003).

Al secundario del Flyback se le adiciono un segundo secundario para obtener un bus extra de 12 V para la alimentación de los drivers de conmutación. En la Figura 2 se muestra el circuito eléctrico con valores finales.

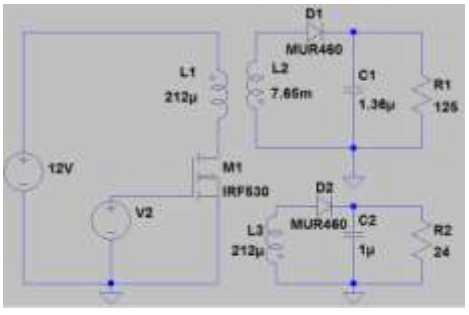


Figura 2. Convertidor Flyback con valores finales

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 3. Diseño del convertidor Flyback

Vin=12 V	Vo=75 V
F=50KHz	I_O=500mA
$Con\ D = 0.5\ inicial$ $\frac{ns}{np} = \frac{Vo}{Vin}\left(\frac{D}{1-D}\right) = \frac{75V}{12V}\left(\frac{0.5}{1-0.5}\right) = 6.25\ se\ toma\ 6$	$D = \frac{Vo}{\frac{ns}{np}\bullet Vin + Vo} = \frac{75V}{6\bullet 12V + 75V} = 0.510$
Calculo del inductor secundario	Calculo del inductor primario
$L_S = \frac{V_{LS}\bullet D}{\Delta I_{Ls}\bullet f} = \frac{75V\bullet 0.510}{0.2\bullet 500mA\bullet 50kHz} = 7.65mH$	$Lp = \frac{Ls}{\left(\frac{ns}{np}\right)^2} = \frac{7.65mH}{(6)^2} = 212.5uH$
Calculo del capacitor	
$Co = \frac{Io\bullet D}{\Delta Vo\bullet f} = \frac{500mA\bullet 0.510}{0.05\bullet 75V\bullet 50kHz} = 1.36uF$	

c) Cargador y acondicionador

La energía para recargar la batería se toma de un panel solar de 40 W. Para ello, es necesario el diseño de un acondicionador y cargador que adecue el voltaje del panel, dado que este varía con la intensidad solar que recibe durante el día. Para acondicionar la señal se eligió un convertidor SEPIC (*single-ended primary-inductor converter*), que permite reducir o elevar el voltaje de suministro con la ventaja de que no invierte la polaridad del voltaje a la salida. La ganancia se controla por medio del ciclo de trabajo. Para mantener el voltaje y corriente constante a la salida se utilizo un sensor de voltaje, además de monitorear el nivel de carga con un sensor de corriente (ACS712). El cargador de la batería se diseñó para cargarse únicamente cuando el voltaje del panel sea mayor o igual a 16.4 V, que es voltaje que entrega el panel solar a partir de las 8 am y con un cielo nublado y a un voltaje máximo de 22 V. Con estos datos se diseñó el convertidor SEPIC. En la Tablas 4, se muestran los cálculos de los capacitores y para el diseño de los inductores (Rashid, 2004, Mohan 2003).

Tabla 4. Diseño del convertidor SEPIC

Vin_min=16.4V	Vin_max=22V
Vo=14.5V	f=50 kHz
$D_{\max} = \frac{Vo}{Vo + Vin\_\min} = \frac{14.5V}{14.5V + 16.4V} = 0.469$	$D_{\min} = \frac{Vo}{Vo + Vin\_\max} = \frac{14.5V}{14.5V + 22V} = 0.397$
Calculo de inductancias mínimas	
$L_{1\min} = \frac{2\bullet 20uS(1-0.469)22V}{1.75A} = 267uH$	$L_{2\min} = \frac{2\bullet 20uS\bullet 0.469\bullet 22V}{1.75A} = 236uH$
Calculo de capacitores	
$\Delta\min = \frac{D\min}{1-D\min} = \frac{0.469}{1-0.469} = 0.659$	$C_3 = \frac{\Delta\min\cdot Io\cdot D\min\cdot T}{\Delta Vo} = 31.6uF$
$C_2 = \frac{Io\cdot D\min\cdot T}{Vin\_\min\cdot 0.05} = 16.9uF$	$C_1 = \frac{C3}{10} = 3.16uF$

Resultados

a) Convertidor CD-CD tipo Flyback

En la Figura 3a, se observan los voltajes de entrada y salida del convertidor Flyback y en 3b, se presentan los resultados experimentales obtenidos con la realización del prototipo de prueba.

ISBN 978-607-8242-11-5

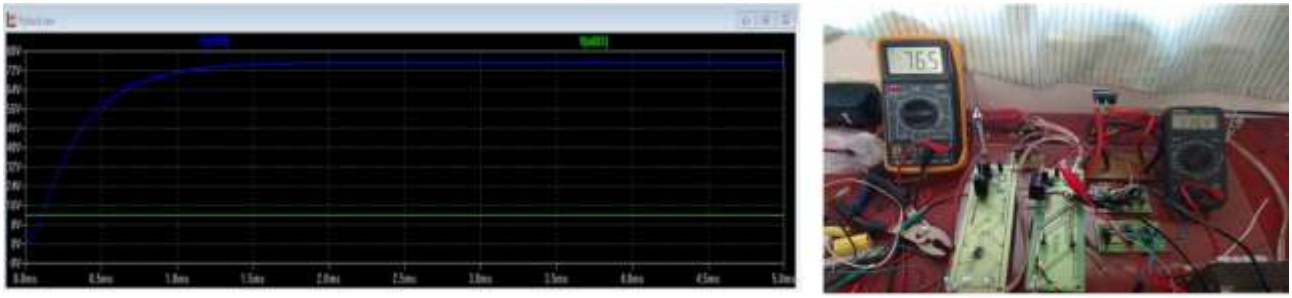


Figura 3a.Resultados del convertidor Flyback: Izquierda Simulación, Derecha Experimentales

b) Inversor de puente completo

En la Figura 4a, se presentan los voltajes a la salida del puente completo, es una señal cuadrada con una amplitud de ±75 V y la forma de onda a la salida del transformador de baja frecuencia, teniendo una señal sinusoidal de 115 VRMS con una frecuencia de 60Hz. En 4b se presentan los resultados experimentales.

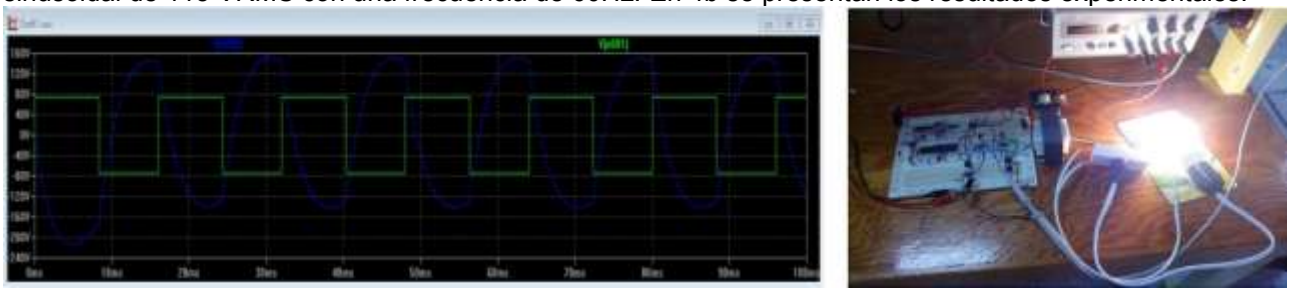


Figura 4. Resultados de puente completo: Izquierda Simulación y derecha Experimental

c) Convertidor SEPIC

Con este convertidor se logró obtener el acondicionamiento para la carga de la batería, en la Figura 5a, se presentan los voltajes de entrada y salida además de la corriente de salida de simulación. En las figuras 5b y 5c, se presentan los resultados experimentales.



Figura 5. Resultados de convertidor SEPIC: a) Simulación, b) Experimental con voltaje de suministro de 15.8 y salida de 14.6V, c) Experimental con voltaje de suministro de 18 y salida de 14.6V.

PROTOTIPO FINAL

Finalmente el sistema completo se ensamblo en bases de acrílico traslucido para que se pudiera observar cada una de las etapas y agregando una serie de indicadores visuales para el monitoreo de carga de la batería, nivel de voltaje en el panel solar y si se está cargando la batería, tal como se observa en la Figura 6, resaltado en un recuadro verde se muestra el convertidor SEPIC que es el circuito que acondiciona la carga de la batería, en el recuadro rojo se visualiza el convertidor Flyback encargado de elevar los 12V suministrados por la batería a 75 VCD, en color amarillo se tiene el circuito inversor conformado por el puente completo y el transformador de baja frecuencia, en el recuadro azul la etapa de optoacopladores, en color violeta el control y finalmente en color negro se muestran los indicadores. Para los indicadores se hizo uso de LED´s donde los colores rojo, naranja, amarillo y verde indican el nivel de carga de la batería, el color verde indica carga completa y el color rojo indica sin energía suficiente para energizar la lámpara. En color violeta se indica que se está cargando la batería y el color azul es el indicador para conocer que el panel está generando el voltaje mínimo para realizar la carga de la batería.

ISBN 978-607-8242-11-5

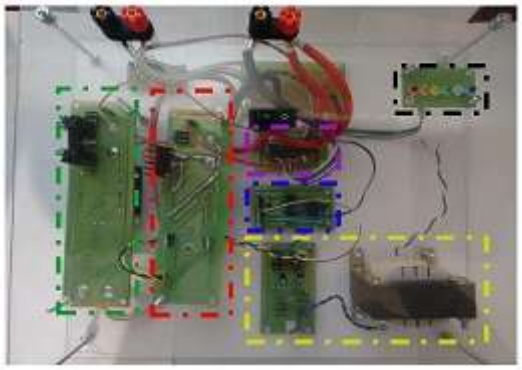


Figura 6. Prototipo final ensamblado

CONCLUSIONES

Finalmente, el sistema diseñado es robusto y de poco mantenimiento, solo se requiere la limpieza del panel solar debido a su exposición al medio ambiente, el polvo acumulado en la superficie de la celda provoca que baje su eficiencia y en consecuencia se tiene una menor generación de voltaje y un mayor estrés a los dispositivos de conmutación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y a la COFAA del IPN por el apoyo brindado a través del proyecto SIP20160024.

REFERENCIAS

Colonel W_M. T. M., "*Transformer and Inductor Design Handbook"*, Third Edition, Marcel Dekker, 2004.

Muhammad H. Rashid "*Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*" Tercera Edición. México: Pearson Educación, 2004.

Ned Mohan, Power Electronics and Drives, Department of Electric and Computer Engineering, University of Minnesota, 2003.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Programación de enlace bluetooth para el monitoreo de energía transmitida

Marco C. Retana[1], Leobardo H. González[1], Guillermo A. Arzate[1]
(1) Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, ESIME Unidad Culhuacán del I.P.N, Ciudad de México
E-mail: carbajalrmarco@gmail.com; lhernandezg@ipn.mx, gavalos580@hotmail.com

Resumen

Una propuesta que está teniendo gran impacto en la comunidad científica de electrónica de potencia, son los sistemas de recarga inalámbricos, los cuales dan libertad a los usuarios de continuar con sus actividades diarias sin necesidad de tener sus dispositivos conectados directamente a un tomacorriente y perder movilidad. A partir de la propuesta de un sistema de transmisión inalámbrica del tipo inductivo, se desarrollo un sistema de monitoreo del voltaje receptor (bus de cd) a través de una comunicación bluetooth, la propuesta desarrollada permite conocer si la energía transmitida al receptor esta en un nivel adecuado (mínimo y máximo permitido), el monitoreo de voltaje inducido permite ajustar los parámetros de control del sistema inalámbrico para una transmisión constante de energía a cambios de carga en la parte receptora.

Programming bluetooth link for monitoring energy transmitted

Abstract

One proposal that is having a great impact on the scientific community of power electronics, are the wireless recharge systems, which give users the freedom to continue their daily activities without needing to have their devices connected directly to a power outlet and lose mobility. From the proposal of a wireless transmission system, a monitoring system was developed voltage receiver via Bluetooth communication, the proposal developed allows to know if the energy transmitted to the receiver is at an appropriate level. Voltage monitoring allows you to adjust the control parameters of the wireless system for constant power transmission at load changes on the receiving part.

Keywords: Qi protocol, bluetooth, inductive charging

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética por el uso cada vez mayor de dispositivos tecnológicos portátiles (celulares, tabletas, laptops, etc.) y la necesidad de continuar trabajando este tipo de dispositivos a falta de un suministro eléctrico adecuado, ha ocasionado que se busquen alternativas de captación de energía alternas para solucionar esta problemática.
Una propuesta que está teniendo gran impacto en la comunidad científica de electrónica de potencia, son los sistemas de recarga inalámbricos, los cuales dan libertad a los usuarios de continuar con sus actividades diarias sin necesidad de tener sus dispositivos conectados directamente a un tomacorriente y perder movilidad.
A partir de la propuesta de un sistema de transmisión inalámbrica del tipo inductivo, se desarrollo un sistema de monitoreo del voltaje receptor (bus de cd) a través de una comunicación bluetooth, la propuesta desarrollada permite conocer si la energía transmitida al receptor esta en un nivel adecuado (mínimo y máximo permitido), el monitoreo de voltaje inducido permite ajustar los parámetros de control del sistema inalámbrico para una transmisión constante de energía a cambios de carga en la parte receptora.

Desarrollo

Actualmente existen múltiples estándares en la transmisión de energía inalámbrica, siendo el protocolo *Qi* el que mayor aceptación e incorporación en productos comerciales se tiene [Miao y Li, 2014], [Deepack y Swades, 2015], [Wezheng y Weifa, 2016]. Partiendo de esta situación se decidió realizar el estándar mediante una comunicación con módulos Bluetooth, en la Figura 1 se presenta el diagrama a bloques del sistema de monitoreo propuesto. Los bloques en color azul representan al transmisor del sistema de recarga inalámbrica tipo inductivo y los bloques de color rojo representan al receptor.
El sistema de transmisión inalámbrica se muestra en la Figura 2, donde el diseño y los resultados de validación se encuentran en [Leobardo y Edgardo, 2016]. Para un adecuado funcionamiento se utilizaron dispositivos de carburo de silicio, lo que aseguro perdidas de conmutación mínimas y manejo en alta frecuencia.

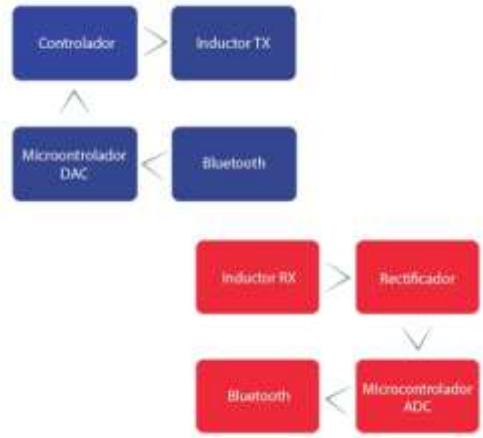


Figura 1.-Diagrama a bloques del sistema de monitoreo.

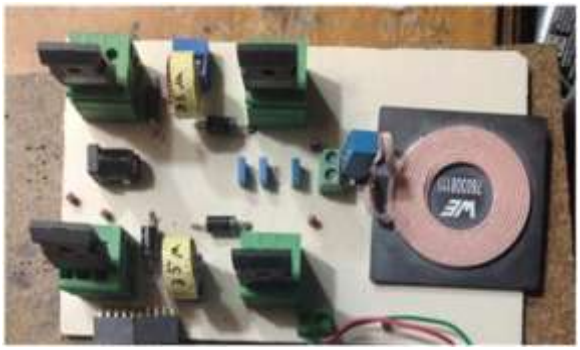


Figura 2. Modulo de transmisión inalámbrica tipo inductivo

En la Figura 3, se muestra el modulo de recepción inalámbrica, se puede observar la bobina plana, lo que permite una adecuada captación de energía transmitida.

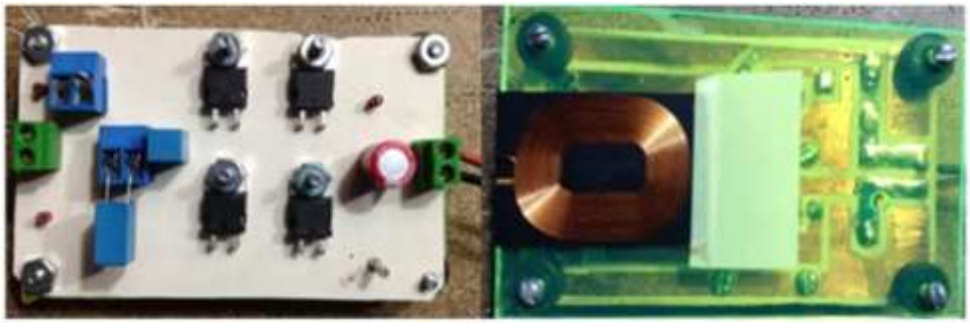


Figura 3. Modulo de recepción inalámbrica.

ISBN 978-607-8242-11-5

La energía captada en la bobina receptora es rectificada a través de diodos de alta conmutación y suavizada con un filtro capacitivo, el procedimiento anterior permite obtener un bus de CD que se utilizara para la carga y recarga de dispositivos tecnológicos portátiles. Para el monitoreo del bus de CD, se utilizo en principio el ADC de un microcontrolador para la conversión a una palabra digital de 8 bits, el cual es aplicado al modulo Bluetooth para su procesamiento y transmisión al sistema de control del circuito transmisor, en el lado del transmisor y empleando un microcontrolador y su DAC la palabra digital recibida por el modulo bluetooth receptor, se convierte en la señal analógica que interpretara el controlador del sistema de recarga para ajustar el ciclo de trabajo del convertidor CD/CD y garantizar una transmisión de energía constante y con mínimas variaciones.

En las figuras 4 y 5 se muestran los diagramas de los circuitos que conforman al sistema de monitoreo propuesto. En la Figura 4 se observa el circuito que se incorpora al receptor de energía inalámbrica y se emplea el ADC del microcontrolador para poder enviar una palabra de 8 bits mediante la tecnología Bluetooth. En la Figura 5 se puede observar el circuito que se incorpora al transmisor de energía, donde se hace uso de un DAC para convertir en un valor analógico la palabra recibida.

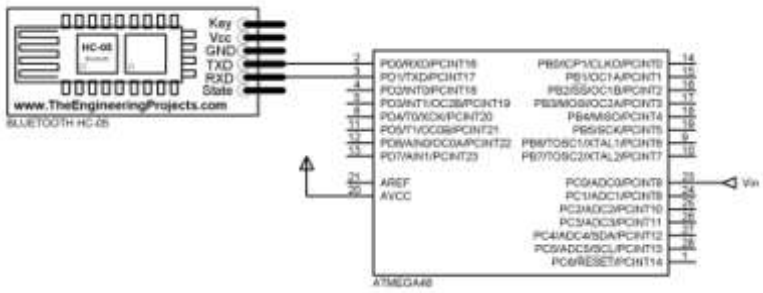


Figura 4.- Circuito lector del nivel de voltaje inducido.

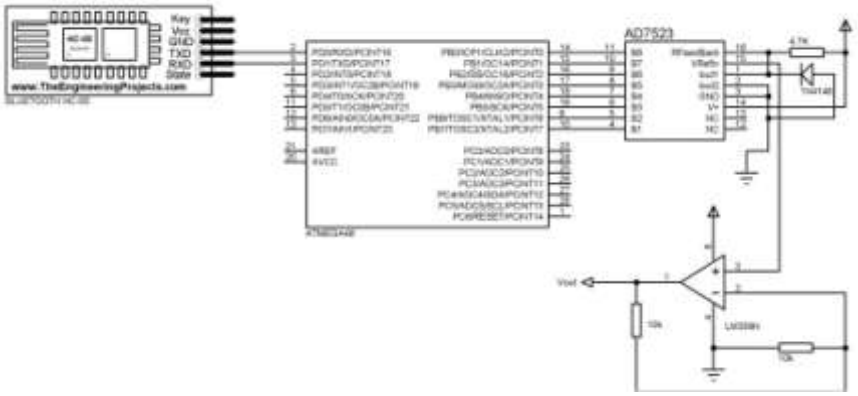


Figura 5.- Circuito convertidor de la palabra digital a una señal analógica.

En las figuras 6 y 7 se observa el circuito bluetooth transmisor y receptor que fue armado y programado para la conformación del sistema de monitoreo de voltaje inducido.

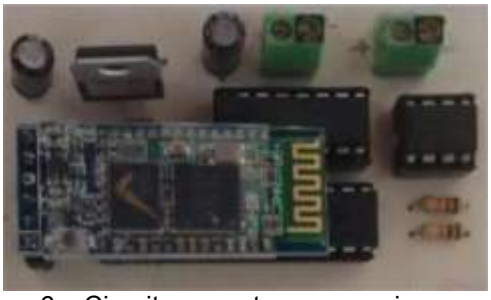


Figura 6.- Circuito receptor que se incorpora al transmisor del sistema.



Figura 7.- Circuito que se incorpora al receptor del sistema.

En las figuras 8 a 19 se presentan muestras representativas de las tramas de datos que se envian a los bloques bluetooth, y que representan el nivel de voltaje inducido (bloque receptor).

ISBN 978-607-8242-11-5



Figura 9.Trama de bits con un voltaje de 0.5V en el ADC.

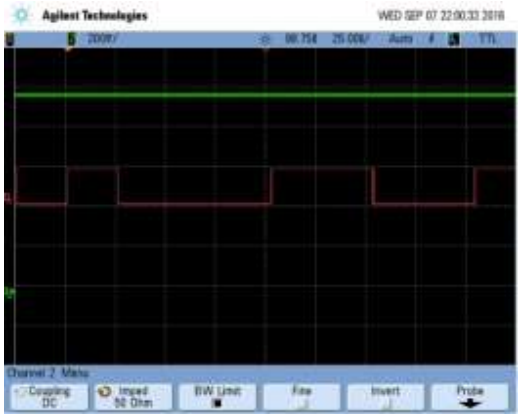


Figura 10.Trama de bits con un voltaje de 1.0V en el ADC.

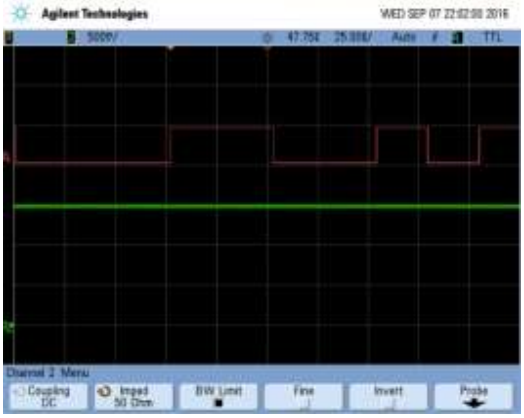


Figura 11. Trama de bits con un voltaje de 1.5V en el ADC.



Figura12. Trama de bits con un voltaje de 2.0V en el ADC.



Figura 13. Trama de bits con un voltaje de 2.5V en el ADC.



Figura 14. Trama de bits con un voltaje de 3.0V en el ADC.



Figura 15. Trama de bits con un voltaje de 3.5V en el ADC.

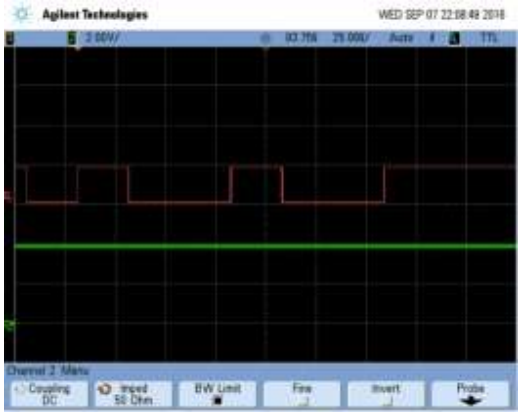


Figura 16. Trama de bits con un voltaje de 4.0V en el ADC.

ISBN 978-607-8242-11-5

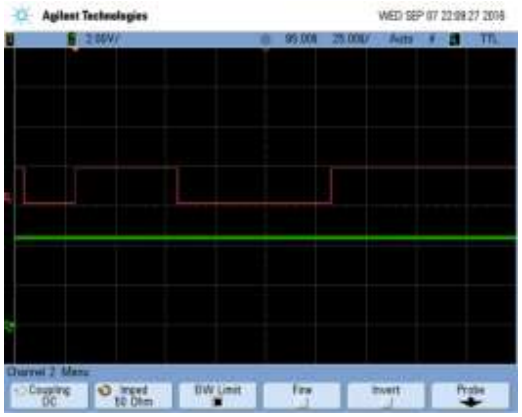


Figura 17. Trama de bits con un voltaje de 4.5V en el ADC.



Figura 18. Trama de bits con un voltaje de 5.0V en el ADC.

En la Tabla 1, se presentan la repesentación digital del voltaje monitoreado a partir de las tramas mostradas, los cuales son las tramas que se obtuvieron en laboratorio y en comparación con lo esperado teoricamente se presenta un error del 1% debido a la fuente de suministro que energiza al microcontrolodar y se toma como referencia para el ADC.

Tabla 1. Representación digital del voltaje monitoreado con el ADC.

Voltaje en el ADC (V)	Trama de bits Más significativo-Menos significativo
0	00000000
0.5	00011000
1.0	00110001
1.5	01001100
2.0	01100011
2.5	01111110
3.0	10011000
3.5	10110000
4.0	11001001
4.5	11100011
5.0	11111100
5.05	11111111

Los datos experimentales obtenidos se presentan en Tabla 2, donde se puede observar que es practicamente lineal la respuesta, siendo una gran ventaja para el diseño del lazo de control en un futuro.

Tabla 2.- Nivel a la salida del DAC de acuerdo al nivel del voltaje inducido en el receptor del sistema de recarga.

Voltaje inducido (V)	Nivel a la salida del DAC (VCD)
0	0
0.5	0.24
1.0	0.516
1.5	0.78
2.0	1.1
2.5	1.39
3.0	1.73
3.5	2.05
4.0	2.41
4.5	2.81
5.0	3.12

La Figura 20 es la representación gráfica a la respuesta del sistema de monitoreo desarrollado, donde se observa la casi linealidad del sistema.

ISBN 978-607-8242-11-5

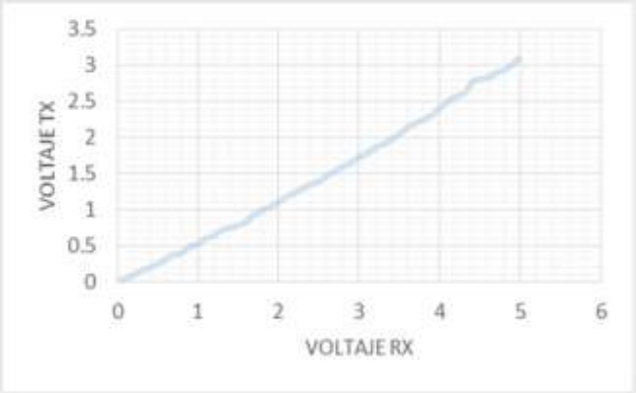


Figura 20. Gráfica de la respuesta del sistema.

CONCLUSIONES

Se lograron obtener datos de gran relevancia para el diseño del lazo de control a partir del sistema de monitoreo propuesto, en principio se logro validar un adecuado monitoreo de voltaje inducido a partir de la emulación del estándar Qi. Para la correcta operación del sistema en su totalidad se digitalizo la señal analógica de monitoreo a una palabra digital de 8 bits, lo que seguro una resolución de 19mV para una voltaje máximo de 5V.

Una limitante en el uso de la comunicación Bluetooth es la velocidad de comunicación, debido a que a altas frecuencias presenta saturación en su bus de datos, y aunque el sistema estará monitoreando niveles de CD, se limitará la velocidad de su respuesta a variaciones en distancia o carga del sistema de recarga inalámbrica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y a la COFAA del IPN por el apoyo brindado a través del proyecto SIP20160024.

REFERENCIAS

Deepack Mishra, Swades De, Kuashik R. Chowdhury, *Charging Time Characterization for Wireless RF Energy Transfer,* IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefse, 2015.

leobardo H., Edgardo N., Guillermo A., " Proposal of Buck- Symmetric for Energization of Wireless Power System , International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering ICMEAE 2016, Mexico.

Miao Zhao, Ji Li,Yuayuan Yang, *A framework of Joint Moblie Energy Replenishment and Data Gathering in Wireless Rechargeable Senor Network*, IEEE Transaction on Mobile Computing, 2014.

Wezheng Xu, Weifa Liang, Jiang Peng, Yiguang Liu Yang, *Maximizing Charging Satisfaction of Smartphone Users via Wireless Energy Transfer,* IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Compresión de Imágenes JPEG con un FPGA para un Centro de Datos

José I. Vega[1], Mario A. Lagos[1], Gerardo Salgado[1], Víctor N. Tapia[1] y Francisco J. Sánchez[1]
(1) Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, Azcapotzalco, Cd. de México, MEXICO
E-mail: vlji@correo.azc.uam.mx

Resumen

Se presenta el diseño e implantación de un sistema cuyo objetivo fue comprimir a formato JPEG, usando un FPGA, la imagen del rostro de personas que intentan acceder a un área de un centro de datos y transmitirla a un servidor. La investigación y desarrollo de técnicas de compresión de imágenes se ha incrementado los últimos años por la necesidad de usar eficientemente el espacio de almacenamiento y ancho de banda de las redes de datos. En los centros de datos se usan diferentes procedimientos para registro y control de acceso a las instalaciones. Algunos de estos procedimientos capturan, usando una cámara de video, el rostro de personas que intentan acceder al centro de datos en un archivo con formato TIF y lo transmiten a una aplicación de reconocimiento de imágenes y control de acceso. Comúnmente, estas aplicaciones aceptan también archivos en formato JPEG los cuales procesan y analizan más rápido y eficientemente que los archivos TIF. El sistema desarrollado en este trabajo se basa en una tarjeta Altera DE2 y realiza las siguientes funciones; lee el identificador de la tarjeta RFiD, captura la imagen del rostro de la persona, implanta en un FPGA el algoritmo estándar JPEG para comprimir el archivo de la imagen y transmite el archivo JPEG al servidor. Se realizó una interfaz de usuario, la cual se ejecuta en el servidor, que muestra y almacena en un archivo el nombre de la persona y su imagen. Este archivo es usado por una aplicación, no realizada en este trabajo y con la cual ya dispone el centro de datos, de reconocimiento de imágenes que acepta tasas de compresión de 10% a 20%. La tasa de compresión obtenida fue 15%. Se pudo haber realizado una compresión aritmética para lograr una tasa de compresión menor pero el tiempo de ejecución y recursos necesarios serían mayores a los usados en este trabajo. También, se pudo haber realizado la compresión con un programa ejecutándose en una computadora pero el costo de la solución es mayor al del sistema aquí presentado.

Palabras clave: Altera DE2; centro de datos; compresión; FPEG; TIF

JPEG Image Compression with an FPGA for a Data Center

Abstract

This paper presents the design and implementation of a system whose objective was to compress to JPEG format, using an FPGA, the face image of people trying to access an area of a data center and transmit it to a server. Research and development of image compression techniques has increased in recent years by the need to efficiently use the storage space and bandwidth of data networks. Different data logging and access control procedures are used in data centers. Some of these procedures capture, using a video camera, the faces of people trying to access the data center in a TIF file and transmit it to an image recognition and access control application. Commonly, these applications also accept files in JPEG format which process and analyze faster and more efficiently than TIF files. The system developed in this work is based on an Altera DE2 card and performs the following functions; Reads the ID of the RFiD card, captures the face image of the person, implements the standard JPEG algorithm in an FPGA to compress the image file and transmits the JPEG file to the server. A user interface was executed, which is executed on the server, which displays and stores in a file the name of the person and their image. This file is used by an application, not performed in this work and with which the data center already exists, of image recognition that accepts compression rates of 10% to 20%. The compression rate was 15%. Arithmetic compression could have been performed to achieve a lower compression ratio but the execution time and resources needed would be greater than those used in this work. Also, compression has been performed with a program running on a computer but the cost of the solution is greater than the system presented here.

Keywords: Altera DE2; compression, data center; FPEG; TIF

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Los centros de datos o data center por su equivalente en inglés, ofrecen servicios para concentrar y operar recursos y equipos necesarios para el procesamiento y almacenamiento de información de empresas e instituciones, así como equipos de telecomunicaciones. La confiabilidad, seguridad y disponibilidad de estos servicios garantiza la continuidad del negocio y procesos de clientes, empleados, ciudadanos, proveedores y empresas colaboradoras. Los centros de datos cuentan con mecanismos seguros y eficientes para la protección del equipo y acceso a instalaciones, ya que contienen información crítica y necesaria para las operaciones de empresas. Para acceder a instalaciones de un centro de datos, se usa una variedad de dispositivos y procedimientos de seguridad que incluyen: cerraduras electromagnéticas, torniquetes, videocámaras, detectores de movimiento, tarjetas de identificación, sistemas biométricos, teclados claves de acceso y sistemas de registro y reconocimiento facial. Se usa uno o varios de estos dispositivos dependiendo de los siguientes factores: tipo de área a proteger, cantidad de usuarios que pueden acceder al área, equipo alojado y confiabilidad del mecanismo de seguridad (El Mir et al., 2015). Comúnmente, sólo algunas personas bien identificadas, responsables de la operación y mantenimiento de equipos, acceden a las áreas críticas, privilegiadas e importantes del centro de datos. Los procedimientos de seguridad están incluidos en las auditorías que periódicamente realizan organismos y empresas externas para certificar la confiabilidad de un centro de datos (Lontsikh et al., 2016). Recientemente se han empezado a usar sistemas de procesamiento de imágenes de rostros en los procesos de acceso a instalaciones y en otros sectores como: el militar, la salud y registro de población. La industria e instituciones de investigación han invertido mucho tiempo y recursos en este campo para el desarrollo de software y hardware para obtener soluciones eficientes y seguras. Generalmente, un sistema de registro y reconocimiento facial procesa la imagen del rostro humano para generar órdenes que actúan sobre un mecanismo de control (Hackenberg, 2014). La imagen del rostro contiene gran cantidad de información que consume: espacio significativo en un dispositivo de almacenamiento, ancho de banda al transmitirla por la red de datos y tiempo de procesamiento.

La realización del trabajo aquí presentado surgió a solicitud de los administradores de un centro de datos. Actualmente, algunas áreas del centro de datos cuentan con una cámara de video que puede capturar, en un archivo con formato TIF, el rostro de personas que se identifican con una tarjeta RFiD para poder acceder al área donde está instalada la cámara. El archivo es transmitido por la cámara a un servidor donde se ejecuta una aplicación que registra y procesa la imagen para permitir el acceso a las personas. Los archivos de imágenes TIF consumen mucho espacio en disco y la aplicación acepta que estén en formato JPEG. Se realizaron pruebas de la aplicación usando archivos con formato JPEG y mostraron que su procesamiento es más rápido que las de formato TIF. La solicitud fue realizar un sistema cuyos objetivos son los siguientes: comprimir el archivo del rostro capturado por la cámara a formato JPEG usando un FPGA, transmitir el archivo comprimido e información de la tarjeta RFiD al servidor y realizar una interfaz de usuario que registre y muestre la imagen y nombre de las personas que han solicitado acceder. El propósito y aplicación de este trabajo es de seguridad en el centro de datos.

Un FPGA (Field Programmable Gate Array) es un dispositivo lógico programable que incorpora gran cantidad de compuertas lógicas y circuitos digitales cuya interconexión y funcionalidad puede configurarse al momento de usarse mediante un lenguaje de descripción de hardware o una herramienta gráfica. Esto los hace flexibles al flujo de diseño y presentan costos de adquisición bajos para pequeñas cantidades de dispositivos, además que el tiempo de desarrollo es menor en comparación con otros dispositivos digitales. Se usan cada vez más en aplicaciones de procesamiento digital de señales y sistemas electrónicos de control. Permiten implantar sistemas complejos en un circuito integrado remplazando tarjetas con varios circuitos, interfaces y buses. Uno de los fabricantes de FPGA es Altera. Los FPGA de Altera incluyen procesadores con características y funcionalidades a la medida, memoria y transceptores de alta velocidad. Un procesador que puede implantarse con la lógica programable y bloques de memoria de las familias de FPGA de Altera, es el procesador Nios II. Es uno de los procesadores embebidos más utilizados en la industria de los FPGA. Es equilibrado en rendimiento y tamaño para aplicaciones de procesamiento de información. Tiene arquitectura RISC de 32 bits y la naturaleza de su núcleo por software permite que el Nios II sea creado con características específicas para cada aplicación. Puede extenderse la funcionalidad básica del Nios II, adicionándole unidades de manejo y protección de memoria e instrucciones y periféricos personalizados para ejecutar un sistema operativo. El uso de un FPGA presenta tres ventajas: son dispositivos reprogramables, disminuyen el costo y tiempo de desarrollo y proporcionan mayor rendimiento a las aplicaciones. Debido a estas ventajas, así como a la frecuencia alta de trabajo y capacidad de procesamiento en paralelo, los FPGA exceden la potencia de cómputo de los procesadores digitales de señales (DSP). La variedad de aplicaciones de un FPGA es muy amplia, entre las cuales se encuentran: sistemas de visión, tratamiento de imágenes médicas, radio por software, reconocimiento de voz e imágenes, codificación y encriptación, radioastronomía y aeronáutica. Existen proveedores de tarjetas de desarrollo que conjuntan un FPGA con circuitos de memoria, interfaces serie y de red, interruptores y

 ISBN 978-607-8242-11-5

dispositivos de salida como leds y displays LCD. Uno de estos proveedores el Terasic, quién tiene disponible la tarjeta Altera DE2 como la utilizada en este trabajo. Altera ofrece el software Quartus II para el diseño y simulación de circuitos en la tarjeta Altera DE2 y soporta el uso de los lenguajes de descripción de hardware VHDL y Verilog. La programación realizada en Quartus II se transfiere desde una computadora a la DE2 para probar inmediatamente el diseño. El procesador Nios II implantado en el FPGA y los diferentes componentes de la tarjeta Altera DE2 permiten crear un sistema digital completo. Para implantar el sistema embebido con el procesador Nios II, Quartus II incorpora las herramientas SOPC Builder y Qsys mediante las cuales se usa una interfaz gráfica para establecer las características del procesador y seleccionar sus componentes como: periféricos, bloques de entrada/salida, temporizadores, interfaces y controladores, en lugar de escribir código para realizar el sistema embebido. Las funcionalidades de un FPGA, conjuntamente con los recursos de la tarjeta Altera DE2 los convierten en una opción práctica, confiable y eficiente para el desarrollo de aplicaciones de compresión de imágenes.

En aplicaciones de procesamiento de imágenes digitales, los archivos pueden tener diferentes formatos. Cada formato tiene una extensión diferente, de los cuales los más utilizados son: BMP, GIF, JPG, TIF y PNG. Cada uno utiliza un algoritmo de compresión diferente para reducir el espacio ocupado en disco y facilitar su transmisión a través de la red. La compresión reduce la información redundante e irrelevante con la menor pérdida posible. Los algoritmos de compresión pueden ser sin pérdida o con pérdida. Los primeros tienen como objetivo representar la información ocupando un espacio menor al original, garantizando la reconstrucción del archivo de forma exacta, uno de estos algoritmos es el usado por el formato TIF. Los algoritmos de compresión con pérdida usan procedimientos de codificación para representar una cantidad de información usando la menor cantidad de ésta. No pueden reconstruir exactamente el archivo original y almacenan una aproximación del mismo. Generalmente utilizan limitaciones del ser humano para dar la percepción que la imagen resultante es igual a la original. Este tipo de compresión presenta perdida de datos en beneficio de aumentar el factor de compresión. Un ejemplo de este tipo de algoritmos es el JPEG, con el cual se obtienen los mejores resultados en la compresión. El algoritmo JPEG fue creado como software libre por el Joint Photographic Experts Group (JPEG) ante la necesidad de transmitir por la Internet archivos de imágenes de manera rápida y confiable (Hudson y Niss, 2017). Este algoritmo es fácil de entender y no fácil de implantar. Se diseñó para comprimir archivos de imágenes en escala de grises o imágenes de color con 24 bits. Con el algoritmo JPEG se puede ajustar el grado de compresión, de tal forma que al usar un grado de compresión alto se obtiene un archivo pequeño pero se pierde calidad. Con una tasa de compresión baja se obtiene un archivo de calidad similar al original pero de tamaño grande. El algoritmo JPEG está basado en dos características del ojo humano. La primera es que el ojo es más sensible al cambio en la luminancia que en la crominancia, debido que capta más claramente los cambios de brillo que los de color. La segunda es que percibe más fácilmente cambios de brillo en áreas homogéneas que en zonas donde la variación es grande. El algoritmo considera que las imágenes digitales se pueden representar como matrices para poder comprimirse a través de las cuatro etapas siguientes (Luoy y Wan, 2016):

Conversión de la imagen de formato de color RGB a formato de color YIQ. El canal Y representa la luminancia y los canales I y Q representan la crominancia.

Transformación de la imagen. Se divide la imagen en matrices de 8x8 pixeles, se aplica la transformada de coseno discreta (DCT) a cada matriz y se redondea cada elemento de éstas al entero más cercano.

Cuantificación digital. Se aprovecha que el ojo humano detecta bien cambios de brillo en áreas grandes y no cambios rápidos de brillo en áreas pequeñas, esto es, variación de alta frecuencia. Por tanto se eliminan altas frecuencias sin perder calidad visual, dividiendo cada componente de las matrices del paso anterior, en el dominio de la frecuencia, entre una constante y el resultado se redondea al entero más próximo.

Codificación entrópica. Se realiza una compresión especial donde no existe pérdida de información. Usa el código Huffman en cada sub-imagen o matriz de 8x8. El algoritmo Huffman toma los elementos de la matriz en forma de zig-zag para obtener una lista de elementos con ceros acumulados al final.

En los últimos años, se han realizado aplicaciones que registran la imagen del rostro de una persona en un archivo sin comprimir usando una computadora, pero tienen la desventaja de usar una cantidad grande de hardware y generan archivos que ocupan mucho espacio en disco (Wibisono y Setiawan, 2014). Aun cuando el algoritmo estándar JPEG no es nuevo, continúan desarrollándose trabajos que modifican los procedimientos usados en las fases del mismo, por ejemplo se han desarrollado trabajos que mejoran la etapa de cuantificación al reemplazar multiplicaciones y divisiones por corrimientos (Oliveira et al., 2017). También se han realizado investigaciones donde se comprime el archivo más de una vez sin tener pérdida significativa de calidad (Zhan y Zhang, 2017; Doan et al., 2016) y textura de la imagen (Lyu y Yang, 2016). En otras investigaciones se varia el factor de calidad en cada compresión (Chouhany y Nigam, 2016) para determinar el grado de pérdida en la calidad de la imagen. También se ha implantado el algoritmo JPEG en

 ISBN 978-607-8242-11-5

tarjetas Virtex V ML507 (Ayadi et al., 2016), las cuales tienen un FPGA, para aplicaciones diferentes a la aquí presentada. Recientemente, el algoritmo JPEG se ha usado en aplicaciones de: big data y minería de datos (Kaur y Bawa, 2016), para detectar imágenes modificadas que puedan contener software mal intencionado o virus (Serrano et al., 2016), en aplicaciones de compresión de imágenes para dispositivos de monitoreo de salud (Li et al., 2015; Santos et al., 2016) y en sistemas biométricos para detectar el centro del ojo humano (Khryashchev et al., 2015). El algoritmo JPEG ha sido modificado, apareciendo las versiones JPEG XT (Richter, 2017), JPEG 2000 (Iida y Kiya, 2016; Perra y Giusto, 2017) y JPEG XR (Chen et al., 2106). Estas versiones del algoritmo logran altas tasas de compresión, mejoran la claridad de la imagen pero su tiempo de ejecución es grande y consumen mucho más recursos que el JPEG estándar. Algunas aplicaciones y navegadores no reconocen archivos comprimidos con estas versiones JPEG.

En este trabajo se solicitó que la compresión se realice usando el algoritmo JPEG estándar, para lo cual se usó el FPGA de una tarjeta Altera D2. Las ventajas y aportaciones del sistema desarrollado son las siguientes: reducción de tamaño en los archivos que almacenan las imágenes de rostros, y por tanto el espacio en disco necesario, y reducción de tiempo de reconocimiento de rostros y apertura de la puerta de acceso en la aplicación usada en el centro de datos. No se ha realizado una solución como la aquí presentada, implantando el algoritmo JPEG con un FPGA e integrando un lector de tarjetas RFiD para un centro de datos.

METODOLOGÍA

La metodología seguida para el diseño del sistema fue dividirlo en dos partes: la programación del FPGA y la interfaz de usuario. La operación del sistema es la siguiente: cuando una persona se identifica con una tarjeta RFiD, a través de un lector instalado en la puerta de acceso del centro de datos, el sistema lee el identificador de la tarjeta (TID) y lo transmite, a través de la interfaz Ethernet de la tarjeta Altera DE2, a un servidor. A continuación, el sistema solicita a la cámara de video la captura de imagen del rostro de la persona y espera recibir de la cámara el archivo de la imagen en formato TIF. Posteriormente, la programación del FPGA comprime el archivo de la imagen usando el algoritmo JPEG y lo transmite al servidor. La interfaz de usuario, ejecutándose en el servidor, registra y muestra el nombre asociado con el TID leído así como la imagen de la persona. Las imágenes registradas son utilizadas por una aplicación, no realizada en este trabajo y adquirida por el centro de datos, para reconocimiento y validación de rostros de usuarios autorizados y apertura de la puerta. La Fig. 1 muestra el diagrama de bloques del sistema cuya funcionalidad es la explicada anteriormente.

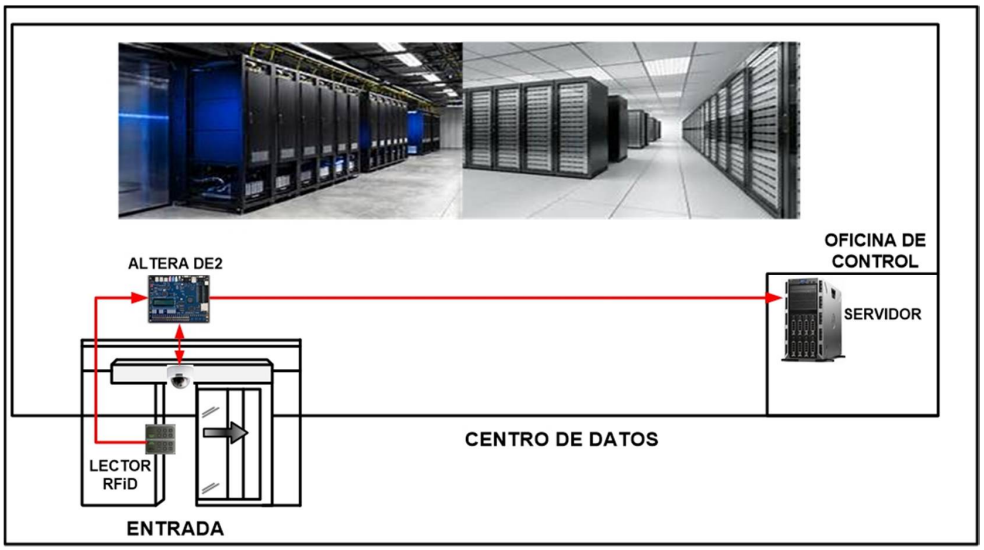


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema desarrollado

La programación del FPGA

Se utilizó una tarjeta Altera DE2, la cual tiene los siguientes componentes: FPGA Cyclone II EP2C35, 8 MB memoria SDRAM, 512 KB SRAM, 4 MB memoria Flash, 4 push-button, 18 interruptores DPDT, 27 leds, display LCD de 16x2, módulo de memoria SD e interfaz Ethernet 10/100 BT. Esta parte del sistema realiza la mayoría de funciones del sistema y está compuesta por los siguientes cuatro módulos: el módulo lector RFiD, el

ISBN 978-607-8242-11-5

módulo captura de imagen, el módulo de compresión y el módulo Ethernet, como se indica en el diagrama de bloques de la Fig. 2.

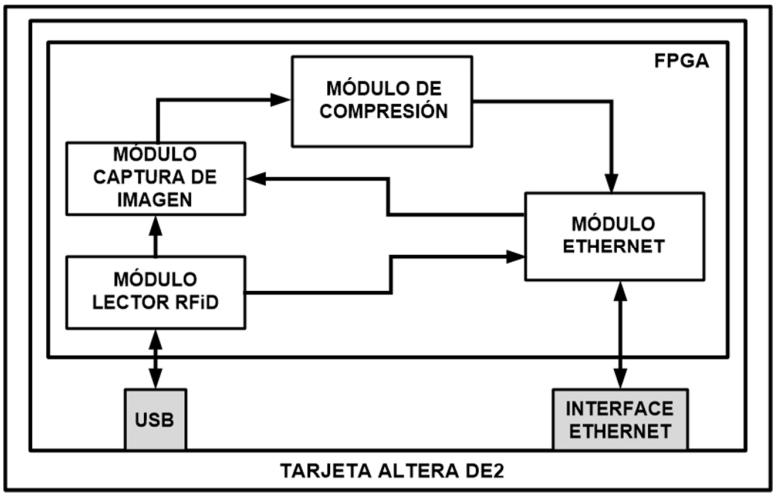


Fig. 2. Diagrama de bloques de la programación de la tarjeta Altera DE2

La función del módulo lector RFiD es obtener la información de la tarjeta RFiD usada por las personas que intentan acceder al área del centro de datos donde se encuentra instalado el sistema aquí presentado. Para lograr está función, se conectó un circuito SkyeModule Gemini al puerto USB de la tarjeta Altera DE2. El SkyeModule Gemini es un dispositivo que permite leer y escribir etiquetas RFiD del tipo MIFARE y tarjetas basadas en el estándar ISO14443A/B. Contiene un microcontrolador Cortex M-0 que implanta algoritmos complejos de criptografía en su firmware para proporcionar seguridad en la transmisión de información. Su voltaje de alimentación es 2.0 V a 5.5 V; se puede configurar en modo sleep consumiendo 10 µA; cuenta con un puerto USB 2.0, un puerto SPI y un puerto I^2C y puede configurarse para usar una antena externa o la antena integrada al módulo. Trabaja en la banda ISM de 13.56 MHz, la cual no necesita licencia, disponible para su uso en todo el mundo y su alcance es 1 metro. La tarjeta Altera DE2 suministra la alimentación de 5 V al lector, a través del puerto USB, y la transmisión de información se lleva a cabo por las terminales USB_DP y USB_DN del puerto USB del SkyeModule Gemini. La programación del FPGA de este módulo realiza las siguientes tareas: establece la velocidad del puerto USB a 38.4 Kbps, envía el comando *Loop_F* al lector, indicando que continuamente explore el campo de detección RFiD en busca de un TID, entra a un ciclo del que sale cuando el lector ha detectado un TID, solicita al módulo Ethernet que trasmita el TID al servidor y finalmente transfiere el control al módulo de captura de imagen. La comunicación entre el módulo lector RFiD y el SkyeModule Gemini lleva a cabo usando el protocolo propietario SkyeTek Protocol (STPv3), el cual trabaja con el formato de comando-respuesta.

La función del módulo de captura de imagen, es obtener el archivo TIF de la imagen del rostro de la persona. Para llevar a cabo esta función, la programación de FPGA realiza las siguientes tareas: solicita al módulo Ethernet la transmisión del comando de captura a la cámara de video, entra a un ciclo donde espera del módulo Ethernet el archivo TIF enviado por la cámara, almacena en memoria RAM el archivo TIF recibido y transfiere el control al módulo de compresión.

La función del módulo de compresión es convertir el archivo de la imagen a formato JPEG. La programación del FPGA lee el archivo TIF de la memoria RAM y para comprimirlo implanta las cuatro etapas del algoritmo JPEG indicadas en el diagrama de bloques de la Fig. 3. Las tareas que realiza la programación del FPGA en cada etapa se explica a continuación.

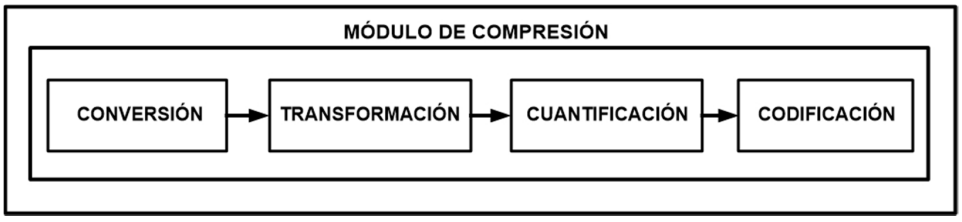


Fig. 3. Diagrama de bloques del módulo de compresión

ISBN 978-607-8242-11-5

Conversión de la imagen de formato de color RGB a formato de color YIQ. El formato de color YIQ indica la luminosidad e información del color. Las imágenes en formato de color RGB se almacenan en 3 canales independientes: rojo, verde y azul, usando 8 bits para indicar la intensidad. El formato de color YIQ representa una división entre la luminosidad (Y) y el color (I, Q). La programación del FPGA usa las siguientes ecuaciones para convertir el archivo de imagen de RGB a YIQ:

$$Y = (0.257 * R) + (0.504 * G) + (0.098 * B) + 16 \quad (1)$$
$$I = (-0.148 * R) - (0.291 * G) + (0.439 * B) + 128 \quad (2)$$
$$Q = (0.439 * R) - (0368 * G) + (0.071 * B) + 128 \quad (3)$$

Debido a que el ojo humano es más sensible a la luminosidad que al color, en esta etapa se realiza una reducción de información de los canales I y Q de la imagen

Transformación de la imagen. En esta etapa, la programación del FPGA implanta un procesador Nios II cuyas funciones son las siguientes: dividir la imagen en matrices de 8x8 pixeles, aplicar la DCT y redondear al entero más cercano cada elemento de las matrices. Se divide la imagen para procesar cada matriz de 8x8 independientemente y disminuir el tiempo de procesamiento. Cada matriz de 8x8 se convierte al dominio de la frecuencia usando la DCT, comprimiendo la imagen en base a patrones de frecuencia. La transformada de una imagen genera una serie de datos que contiene la misma información que la imagen original, la cual puede usarse para obtener la imagen original aplicando la transformada inversa. La DCT expresa una secuencia finita de números como una sumatoria de términos de coseno con distintas frecuencias y amplitudes. La DCT está basada en la transformada discreta de Fourier (DFT) pero para números reales. La DFT representa funciones periódicas como una sumatoria de senos de diferente frecuencia. La DCT, y específicamente la DCT-II, es usada para compresión de imágenes por su propiedad de alta compactación de energía o información original. Gran parte de la información original la compacta usando una cantidad pequeña de bits. La DCT concentra la mayor parte de la información con pocos coeficientes transformados. Una vez convertida la imagen a formato de color YIQ *NxN*, se puede expresar como una función de dos variables *f(x,y)*. Donde *(x,y)* son las coordenadas de cada píxel, *x=0,1,...,N-1* e *y=0,1,...,N-1* y la función *f(x,y)* es la intensidad de color del píxel *(x,y)*. La DCT sirve para obtener una matriz *F* a partir de la anterior. El dominio de *F* es el mismo que el de *f* para cada valor *(u,v)* con *u=0,1,2,...,N-1* y *v=0,1,2,...,N-1*, por lo que se obtiene la siguiente ecuación, la cual se implantó con la programación del FPGA de este módulo del sistema:

$$C(u,v) = \alpha(u)\alpha(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) cos\left(\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right) cos\left(\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right) \quad (3)$$

Por ejemplo, en la etapa anterior se obtuvo la matriz de color A en formato YIQ indicada en la Fig. 4.

31	23	60	93	49	57	57	35
31	21	74	73	55	52	45	44
25	16	82	65	61	38	50	51
26	38	91	61	62	28	49	50
17	85	70	76	50	34	37	43
29	90	68	53	43	25	30	49
116	184	108	25	52	26	38	36
151	144	182	129	44	23	41	39

Fig. 4. Matriz A, imagen de color YIQ

Al aplicar la DCT a la matriz A, se obtuvo la matriz B indicada en la Fig. 5, ambas de iguales dimensiones.

466.2500	100.9063	-40.3393	-91.13.15	-25.2500	2.6791	-3.3152	16.6482
-88.4065	-146.0661	-67.5059	26.1243	33.4120	44.3008	24.6658	-0.4861
69.5604	73.4218	17.6909	8.1087	-1.2285	31.3229	12.3824	-7.9303
-44.0839	-28.5187	4.3866	18.4638	-11.9507	-32.1620	-31.1853	-32.1898
27.5000	12.2552	-25.4491	-19.8833	9.5000	35.2306	3.2352	-10.1438
-2.2299	6.3770	26.7637	18.3775	-13.4471	-20.9802	-10.1116	19.2261
-10.4122	-22.5187	-20.8676	-15.9436	17.2859	25.7420	9.5591	-14.7470
8.0193	11.5534	7.5823	9.4544	-9.8801	-12.0629	-13.2570	-7.4175

Fig. 5. Matriz B, resultado de aplicar la DCT

ISBN 978-607-8242-11-5

Los valores más grandes de la matriz B se encuentran en la parte superior-izquierda. Esto indica que se concentra gran parte de la información en los primeros valores. Para almacenar la matriz B se realizó un proceso de normalización, usando la función *N(u,v)* tal que: *C(u,v)=Redondeo(F(u,v)/N(u,v))*, donde *C* es una matriz con una cantidad grande de ceros. El algoritmo JPEG recomienda el uso de una matriz de normalización estandarizada, como la indicada en la Fig. 6, para imágenes con una cantidad grande de niveles de intensidad, por lo que la programación del FPGA normaliza la matriz B usando la matriz de la Fig. 6, obteniendo como resultado la matriz D mostrada en la Fig. 7.

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

Fig. 6. Matriz de normalización estandarizada

29	9	-4	-6	-1	0	0	0
-7	-12	-5	1	1	1	0	0
5	6	1	0	0	1	0	0
-3	-2	0	1	0	0	0	-1
2	1	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 7. Matriz D, resultado de la normalización

Cuantificación digital. En esta etapa se aprovecha que el ojo humano detecta cambios de brillo en áreas grandes y no cambios rápidos de brillo en áreas pequeñas, esto es, variación de alta frecuencia. Por tanto se pueden eliminar altas frecuencias sin perder calidad visual. Para lograr esto, la programación del FPGA divide cada componente en el dominio de la frecuencia entre una constante y el resultado se redondea al entero más próximo. Es en este paso donde se generó la mayor pérdida de información. Los componentes de frecuencias altas tienden igualarse a cero y los restantes se convierten a números positivos o números negativos pequeños. Para realizar la división, el algoritmo JPEG recomienda usar matrices estándar para imágenes con 256 niveles de intensidad, una de ellas es la matriz de cuantificación típica de Losheller, la cual se indica en la Fig. 8 y es la utilizada en esta etapa. Los coeficientes de la matriz D transformada se dividieron entre los coeficientes de la matriz de Losheller obteniendo la matriz E redondeada, indicada en la Fig. 9. Esta matriz tiene una cantidad grande ceros en la parte inferior-derecha.

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

Fig. 8. Matriz de Losheller

29	9	-4	-6	-1	0	0	0
-7	-12	-5	1	1	1	0	0
5	6	1	0	0	1	0	0
-3	-2	0	1	0	0	0	-1
2	1	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 9. Matriz E, cuantificación digital

Codificación entrópica. En esta última etapa se realizó una compresión especial donde no hay pérdida de información. Se utilizó el algoritmo Huffman en cada sub-imagen o matriz de 8x8. La programación del FPGA implanta el algoritmo Huffman leyendo los elementos de la matriz en forma de zig-zag, como se indica en la Fig. 10, para obtener una lista de elementos con ceros acumulados al final. A continuación, conjunta los elementos de frecuencias similares e inserta ceros de codificación. Con esta codificación se utiliza menor cantidad de espacio eliminando los números más repetidos, la redundancia. Se puede usar algún método de codificación aritmética, más óptimo que el algoritmo Huffman, pero generalmente están patentados. En esta etapa se almacena la información de la imagen usando distintos grados de compresión. Si se almacenan los 64 elementos de la matriz, el grado de compresión es pequeño. Cómo los datos significativos están al inicio de la matriz, se pueden considerar sólo los primeros elementos de la misma y el grado de compresión es mayor.

Al implantar con el FPGA el algoritmo Huffman a la matriz E obtenida en el paso anterior, se obtuvo la siguiente secuencia: 29, 9, -7,5, -12, -4, -6, -5, 6, -3, 2, -2, 1, 1, -1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, F. La letra F, indica que a partir de ese elemento son todos ceros hasta completar los 64 elementos de la lista. El algoritmo JPEG trunca la secuencia en la cadena anterior cuando el resto de los coeficientes son ceros para ahorrar espacio, de manera que la secuencia anterior se redujo de la siguiente forma: −26, −3, 0, −3, −2, −6, 2, −4, 1 −4, 1, 1, 5, 1, 2, −1, 1, −1, 2, 0, 0, 0, 0, 0, −1, −1, F. Finalmente, la programación del FPGA obtiene, para cada matriz E una secuencia

ISBN 978-607-8242-11-5

como la anterior, para crear el archivo comprimido en formato JPEG en la memoria RAM de la tarjeta Altera DE2 y solicita al módulo Ethernet la transmisión de este archivo.

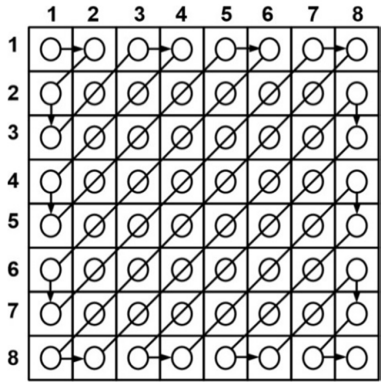


Fig. 10. Algoritmo Huffman

El último módulo de la programación del FPGA es el módulo Ethernet. La función de este módulo es transmitir el TID obtenido por el módulo lector RFiD y el archivo JPEG al servidor. Para llevar a cabo esta función, la programación del FPGA realiza las siguientes tareas: configura e inicializa la interfaz Ethernet DM9000A de la tarjeta Altera DE2 a 100 Mbps, entra en un ciclo donde espera solicitud de servicio del módulo lector RFiD o del módulo de compresión. Si el servicio lo solicita el primero de los módulos anteriores, establece la conexión vía ftp con la cámara de video para descargar en memoria RAM el archivo de la imagen TIF. Si el servicio lo solicita el módulo de compresión, establece la conexión vía ftp con el servidor para transferirle al archivo JPEG. Las direcciones MAC e IP usadas por la cámara, el servidor y la interfaz Ethernet de la tarjeta Altera DE2 son fijas.

La interfaz de usuario

La interfaz de usuario se realizó en Visual Basic y Python 3.6.0. Se ejecuta en el servidor ubicado en una oficina de control y monitoreo del centro de datos. La interfaz recibe de la tarjeta Altera DE2, vía un segmento Ethernet, el TID leído de la tarjeta RFiD y el archivo JPEG del rostro de la persona que intenta acceder al área del centro de dato. Posteriormente, almacena esta información en disco para estar disponible a la aplicación de reconocimiento de imágenes. La interfaz muestra el nombre de cada persona y la imagen de su rostro como se indica en la Fig. 11.

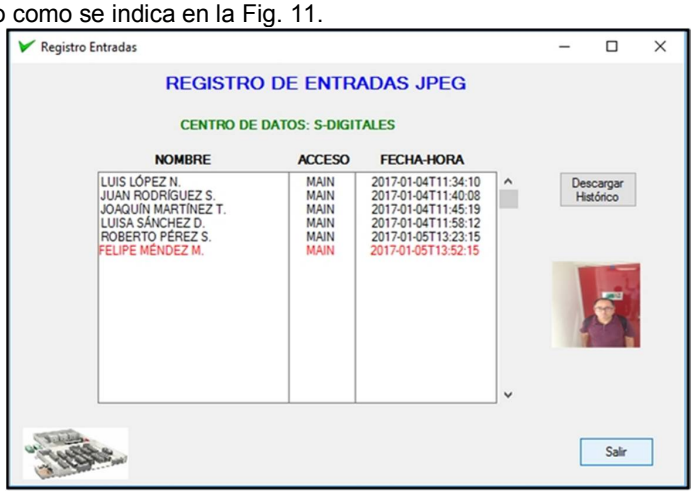


Fig. 11. Interfaz de usuario

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron tres grupos de pruebas. El objetivo del primer grupo fue determinar el alcance del lector RFiD. Los resultados de las pruebas mostraron que el alcance es 1.2 metros, suficiente para leer el TID de la tarjeta al momento de ubicarse la persona frente la puerta de acceso y bajo la cámara de video, por lo que no hubo necesidad de conectar al lector una antena externa. En el segundo de pruebas se capturó la imagen del rostro de varias personas, dando como resultado un archivo TIF, para cada una, cuyo tamaño es

ISBN 978-607-8242-11-5

en promedio 600 KB, por lo que la memoria SDRAM de 8 MB la tarjeta Altera DE2 es suficiente para almacenar este archivo. Difícilmente se tendrán archivos TIF mayores a 1 MB en esta aplicación. La tasa de compresión obtenida en este sistema fue 15%. El tercer grupo de pruebas consistió en modificar las etapas de cuantificación y codificación del algoritmo JPEG para lograr una mejor tasa de compresión. En la etapa de cuantificación, donde se tiene mayor pérdida de información, los puntos de la imagen de frecuencia alta se eliminan. Las pruebas en esta etapa consistieron en realizar la división de matrices usando como divisor tres matrices estándar, recomendadas por el algoritmo, en lugar de usar la matriz de Losheller. Las tasas de compresión obtenidas fueron 12%, 13% y 14%. En la etapa de codificación se eliminan los elementos de la matriz cuyo valor es cero. Las pruebas llevadas a cabo en esta etapa consistieron en incrementar el grado de compresión eliminando los elementos cuyo valor se encuentre entre 1 y 10. Los resultados obtenidos fueron tasas de compresión entre 10% y 12%. Como puede observarse, las tasas de compresión obtenidas modificando estas dos etapas del algoritmo mejoran un poco la tasa lograda originalmente (15%), encontrándose todas en el rango aceptable de 10% a 20% de la aplicación de reconocimiento de imágenes del centro de datos. Se pudo haber realizado la etapa de transformación de forma más sencilla sin implantar el procesador Nios II en el FPGA, sin embargo, se optó por utilizar al Nios II para aprovechar sus características de paralelismo y arquitectura RISC de 32 bits y obtener la DCT más rápidamente. Aunque el algoritmo estándar JPEG no es nuevo, se ha trabajado mucho y se continúan realizando estudios sobre su eficiencia, no es fácil implantarlo en un FPGA y los beneficios que se obtienen son eficiencia en costo y velocidad de compresión.

CONCLUSIONES

Ya que el manejo de imágenes depende en gran medida de la velocidad del procesamiento de datos, debido a que requiere una gran cantidad de procesamiento de señales, la implantación del mismo en un FPGA fue una buena elección. En este trabajo se alcanzó el objetivo planteado, el cual fue crear un sistema de compresión de imágenes de bajo costo cuyo resultado es un archivo de mucho menor tamaño que el generado por la cámara de video usando un FPGA Cyclone II 2C35. El diseño del sistema surgió para resolver una necesidad específica y real, mostrando una aplicación completa terminada. No incluye reconocimiento de imágenes, lo cual está planeado implantarse en el FPGA a corto plazo. Con esta adición al sistema se determinará más rápidamente si debe o no abrirse la puerta de acceso. Se tiene planeado también incorporar al sistema, específicamente en el módulo Ethernet, la programación que determine las direcciones MAC e IP asociadas con la interface de red de la cámara y el servidor para hacer más flexible su uso y pueda usarse en otras aplicaciones como por ejemplo sistemas de seguridad biométricos y sistemas de tratamiento médico. La realización de este trabajo sirvió para establecer generar la relación de confianza con el centro de datos y continuar trabajando en esta y otras aplicaciones.

REFERENCIAS

Ayadi, W., W. Elhamzi y M. Atri, "A FPGA-based implementation of JPEG encoder", International Image Processing, Applications and Systems (IPAS), 1-4, Hammamet-Tunisia (2016).

Chen, H., X. Guo e Y. Zhang, "Implentation of onboard JPEG XR compression on a low clock frequency FPGA", IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2811-2814, Beijing-China (2016).

Chouhan, A. y M. J. Nigam, "Double compression of JPEG image using DCT with estimated quality factor", IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 1-3, Delhi-India (2016).

Doan, T., F. Retraint, T. Thai y C. Zitzmann, "Quality factor estimation of JPEG compressed images", IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), 104-108, Washington, DC-USA (2016).

El Mir, I., D. S. Kim y A. Haqiq, "Security modeling and analysis of an intrusion tolerant cloud data center", Third World Conference on Complex Systems (WCCS), 1-6, Marrakech-Morocco (2015).

Hackenberg, D., "The Plenum concept: Improving scalability, security, and efficiency for data centers", Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 1137-1144, Orlando, FL-USA (2014).

Hudson, G., A. Léger y B. Niss, "JPEG at 25: Still Going Strong", IEEE MultiMedia, 24(2), 96-103 (2017).

Iida, K. y H. Kiya, "Codestream level secure identification for JPEG 2000 images under various compression ratios", Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 1-6, Jeju-South Korea (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Kaur, N. y N. Bawa, "Algorithm for fuzzy based compression of gray JPEG images for big data storage", 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 518-523, Greater Noida-India (2016).

Khryashchev, V., A. Priorov y O. Stepanova, "Improving the eyes localization algorithm for face recognition systems", 1-4, Batumi-Georgia (2015).

Li, Y., W. Jia, B. Luan y Z. Mao, "A FPGA implementation of JPEG baseline encoder for wearable devices", 41st Annual Northeast Biomedical Engineering Conference (NEBEC), 1-2, Troy, NY-USA (2015).

Lontsikh, P. A., V. A. Karaseva y E. P. Kunakov, "Implementation of information security and data processing center protection standards", IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS), 138-143, Nalchik-Russia (2016).

Luo, Z. e Y. Wan, "An efficient framework for lossless color image compression", International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 380-384, Shanghai-China (2016).

Lyu, Y. y Y. Yang, "No-reference JPEG image quality assessment based on block detection and texture analysis", 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 737-741, Chengdu-China (2016).

Oliveira, P., R. S. Oliveira y R. J. Cintra, "JPEG quantisation requires bit-shifts only", Electronics Letters, 53(9), 588-590 (2017).

Perra, C. y D. Giusto, "JPEG 2000 compression of unfocused light field images based on lenslet array slicing", IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 27-28, Las Vegas, NV-USA (2017).

Richter, T., "Error Bounds for HDR Image Coding with JPEG XT", Data Compression Conference (DCC), 122-130, Snowbird, UT-USA (2017).

Santos, J. S., A. F. R. Guarda y L. A. da Silva Cruz, "Compression of medical images using MRP with bi-directional prediction and histogram packing", Picture Coding Symposium (PCS), 1-5, Nuremberg-Germany (2016).

Serrano Pérez, J. J., M. Salinas Rosales y N. Cruz-Cortés, "Universal Steganography Detector Based on an Artificial Immune System for JPEG Images", IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, 1896-1903, Tianjin-China (2016).

Wibisono, S. S. y F. B. Setiawan, "Automatic doorstop safety system based on image processing using webcam and scanner", The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, 150-154, Semarang-Indonesia (2014).

Zhan, Y. y R. Zhang, "No-Reference JPEG Image Quality Assessment Based on Blockiness and Luminance Change", IEEE Signal Processing Letters, 24(6), 760-764 (2017).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Agrupación de técnicas inteligentes para predecir Reacción Adversa a Medicamentos

Annia A. Morales[1], Darien C. Perez[1], Juan P. Febles[1] y Yoiler F. Moreno[1]
(1) Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba
e-mail: aarencibia@uci.cu

Resumen
En Cuba el Programa de Farmacovigilancia, ha permitido detectar una elevada tasa de reacciones adversas a medicamentos (de siete mil a diez mil casos anuales), con más de seiscientas asociaciones fármaco-reacción por millón de habitantes. Con el uso de este programa, se ha perfeccionado la detección y el análisis de los efectos adversos, aumentando el registro de efectos moderados y graves, que generalmente requieren atención de urgencia y/o ingreso hospitalario. Son muchas las soluciones que se han intentado para establecer la existencia o no de una relación causal entre la exposición al fármaco y la aparición del acontecimiento adverso. Con el objetivo de poder predecir una reacción adversa desde la consulta médica, fue necesario identificar qué herramientas necesitaban los especialistas. Para lograr este propósito, se le aplicó una encuesta a un conjunto de médicos, obteniendo como resultado los valores necesarios para la creación de sistemas inteligentes que en combinación pudieran predecir una reacción adversa.

Para dar solución a este problema de salud, se creó una suite de herramientas informáticas basada en la inteligencia artificial distribuidas de la siguiente forma: un sistema basado en caso, un sistema basado en regla y un sistema que hace uso de reconocimiento de patrones. Cada herramienta le proporciona al médico un conjunto de valores que le ayudan a su prescripción diaria. El sistema basado en caso utiliza los casos como forma de representación del conocimiento, y para su creación se utilizó una base de datos plana que contaba con más de un millón de casos ocurridos en Cuba. Informáticamente se usó en su creación testores típicos, se calculó los pesos de los rasgos predictores con el triángulo de Fullër y se determinó la incertidumbre y la función de semejanza para devolver el caso más semejante. El sistema baso en regla permite identificar cuando dos medicamentos no se pueden consumir al mismo tiempo; su base de datos es plana y se utilizó como estrategia de inferencia el Modus Ponens, donde la estructura de la regla implementada seguía el siguiente esquema: SI antecedente ENTONES consecuente, ejemplo de la misma es la siguiente: Si una persona consume METRONIDAZOL con AMOXICILINA entonces puede sufrir ERUPCIÓN CUTÁNEA y PRURITO. La tercera aplicación se basa en reconocimiento de patrones, y tiene como objetivo proporcionarles a los médicos una herramienta que les permita comparar medicamentos, teniendo en cuenta las reacciones adversas que causan y los grupos farmacológicos en los que estos se encuentran. Para desarrollar esta aplicación se agruparon los medicamentos según RAM que causan, se calculó el peso informacional asociado a cada rasgo y se calculó la semejanza entre medicamentos.

Para probar que la integración de estas técnicas inteligentes, que predicen una reacción adversa en un paciente, fue necesario hacer experimentos a cada una de las aplicaciones de forma independiente. Dichos experimentos se desarrollaron en ambiente de laboratorio haciendo uso de la información histórica acumulada de las reacciones adversas ocurridas en Cuba en el periodo del 2012 hasta el 2015. Los objetivos del experimento fueron: primer demostrar que existían casos de reacciones adversas que podían ser prevenibles y segundo enfocar el resultado en disminuir las muertes por reacciones adversas en Cuba. Los resultado obtenidos fueron satisfactorios, los médicos que participaron en dicho experimento quedaron satisfecho con la suite de herramientas, ya que estas le proporcionan una fuente de datos importantes en la predicción de las reacciones adversas por medicamentos. Con el experimento se logró demostrar que existen muertes innecesarias en pacientes por reacciones adversas.

Referencias

Debesa García, Francisco, y otros. *Principales resultados del sistema cubano de Farmacovigilancia en el año 2004.* 2005. 3, Ciudad de la Habana: Revista Cubana de Farmacia, 2005, Vol. 39. ISSN 1561-2988.

Lorenzo, Guillermo Suarez, Pérez, Darien Castellano y Morales, Annia Arencibia. *Sistema para la recolección y control de las reacciones adversas a medicamentos ocurridas en cuba*. Informática 2013. La Habana, Cuba: Informática 2013, 27 de febrero de 2013. ISBN: 978-959-7213-02-4.

Machín, Maykel Pérez y Triana, Rayza Méndez. *Evento adverso vs reacción adversa. necesidad de emplear algoritmos de causalidad para su definición*. 1, Villa Clara: s.n., 11 de abril de 2011, Rev Electron Biomed. ISSN: 1697-090X.

Aramendi, Inés, y otros. *Problemas relacionados con medicamentos en pacientes hospitalizados en el Hospital Vilardebó*. 2, Uruguay: s.n., diciembre de 2011, Revista de Psiquiatría

Organización Mundial de la Salud. OMS. [En línea] 2013. [Citado el: 08 de 01 de 2013.] http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs293/es/index.html.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Portero Digital con Raspberry PI y tecnología DNLA

José I. Vega, Gerardo Salgado, Mario A. Lagos, Víctor N. Tapia y Francisco J. Sánchez
(1) Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, Azcapotzalco, Cd. de México, MEXICO
E-mail: vlji@correo.azc.uam.mx

Resumen

El objetivo de este trabajo fue la implementación de un sistema de grabación y reproducción de mensajes de voz en un edificio de apartamentos. Los mensajes son almacenados en una memoria SD, con opción de reproducir en vivo, en una red local, usando el estándar DLNA (Digital Living Network Alliance). La captura del audio se realiza por medio de un micrófono y la reproducción se hace en el auricular de un sistema Raspberry PI. El micrófono se encarga de capturar mensajes para cada uno de los cinco apartamentos del edificio. El altavoz se utiliza para reproducir mensajes que se escucharan en el portero electrónico que se ubica en el acceso al edificio. Cuando se selecciona un apartamento en el teclado del portero, se reproduce un mensaje personalizado y posteriormente se da la opción de realizar una grabación. Las grabaciones son registradas en la memoria SD, para que posteriormente se puedan escuchar. También se controla un actuador para abrir una contrachapa solenoide. Los usuarios del dispositivo tienen la opción de escuchar en vivo lo que se tenga como entrada en el micrófono en cualquier momento, utilizando dispositivos clientes con estándar DLNA dentro de la red local. DLNA, más que una conexión, se trata de un estándar de compatibilidad entre dispositivos, por medio del cual se pueden compartir datos mediante una conexión Wi-Fi o Ethernet. Ya instalado y configurado el servidor DLNA, los clientes que se intenten conectar solo necesitan una aplicación compatible con DLNA y seleccionar el servidor de audio para poder reproducir el mismo, ofertado por el servidor. Los elementos multimedia contenidos en el servidor vienen codificados en diferentes formatos. El término "formato" designa las herramientas de compresión y codificación utilizadas para generar la instancia binaria de un elemento de contenido, que se intercambia finalmente a través de la red local utilizando protocolos de transferencia de archivos o de transmisión. Algunos de los formatos que acepta DLNA incluyen MPEG-2, MPEG-4, WMV y otros para video; o MP3, AAC, WMA y otros para audio.

Palabras clave: Digital gatekeeper; DLNA; Raspberry Pi 3; Raspbian

Digital gatekeeper with Raspberry PI and DLNA technology

Abstract

The objective of this work was the implementation of a system of recording and reproduction of voice messages in an apartment building. The messages are stored in an SD memory, with option to reproduce live, in a local network, using DLNA (Digital Living Network Alliance) standard. The audio is captured by a microphone and playback is done on the headset of a Raspberry PI system. The microphone is responsible for capturing messages for each of the five apartments in the building. The loudspeaker is used to reproduce messages that will be heard in the electronic doorman that is located in the access to the building. When an apartment is selected on the doorman's keyboard, a custom message is played and then the option to make a recording is given. The recordings are recorded in the SD memory, so that they can be heard later. An actuator is also controlled to open a solenoid plate. Users of the device have the option to listen live what you have as input to the microphone at any time, using client devices with standard DLNA within the local network. DLNA, rather than a connection, is a standard of compatibility between devices, through which data can be shared over a Wi-Fi or Ethernet connection. Once the DLNA server is installed and configured, clients that try to connect only need a DLNA compatible application and select the audio server to be able to play the same, offered by the server. The multimedia elements contained in the server are encoded in different formats. The term "format" refers to the compression and encoding tools used to generate the binary instance of a content element, which is finally exchanged over the local network using file transfer or transmission protocols. Some of the formats that DLNA supports include MPEG-2, MPEG-4, WMV and others for video; Or MP3, AAC, WMA and others for audio.

Keywords: Digital gatekeeper; DLNA; Raspberry Pi 3; Raspbian

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Debido a la reciente aparición de la tecnología DLNA(Digital Living Network Alliance) y las ventajas que representa el poder compartir dispositivos multimedia entre computadoras, tabletas, teléfonos inteligentes y algunos electrodomésticos en un hogar, se han hecho investigaciones en los últimos años, cuyo objetivo es incorporar nuevas funcionalidades. Una cantidad importante de trabajos se ha concentrado en la capa de aplicación de la arquitectura usada en DLNA, desarrollando aplicaciones para búsqueda rápida y eficiente de contenidos (Peng y Zhuang, 2016), así como aplicaciones para compartir en redes sociales de la internet, dispositivos DLNA conectados a una red doméstica (Guo et al., 2013) y protocolos para distribuir video en vivo en una red DLNA (Nam y Kim, 2013). Ya que las interfaces de usuario no son iguales en los dispositivos DLNA de diferentes fabricantes, se han desarrollo interfaces comunes, que se ejecutan en diferentes plataformas de sistemas operativos (Rapic et al., 2014), así como la implantación de servidores de medios digitales en esta arquitectura compartida (Loncarevic et al., 2012). De manera similar, en una cantidad importante de investigaciones se ha trabajado en extender la operación de dispositivos DLNA más allá de una red doméstica, basándose en la configuración de gateways, routers y nubes de dispositivos (Mai y Kim, 2017; Shimizu et al., 2012) e implantando mecanismos de seguridad para evitar el acceso no autorizado a contenidos y dispositivos (Wu y Zhi, 2015; Islam et al., 2014; Gu et al., 2015). En otras investigaciones se han creado herramienta de análisis de protocolos usados en ambientes DLNA, para diagnóstico y desarrollo de funcionalidades usando dispositivos móviles inteligentes (Park et al., 2015). En lo que respecta a la tarjeta Raspberry Pi, en los últimos años se ha implantado una gran cantidad de aplicaciones en distintos campos de la ciencia y vida humana, por ejemplo, se ha usado para detección de movimiento y reconocimiento de imágenes en sistemas de vigilancia (Arva y Fryza, 2017), en el área de la salud, para monitoreo del sueño y captura de información en enfermos de Parkinson (Haney et al., 2017), en reconocimiento de voz y traducción de inglés a otros lenguajes (Rithika y Santhoshi, 2016), en registro electrónico de mantenimiento a maquinas industriales (Onkar y Karule, 2016) y principalmente en sistemas de control y monitoreo remoto de electrodomésticos y luces en casas habitación (Jayanth et al., 2016; Kumar y Pati, 2016). No se ha implantado hasta ahora una aplicación como la presentada en este trabajo utilizada en un edificio de apartamentos empleando la arquitectura DLNA y una tarjeta Raspberry Pi. La aportación del trabajo es automatizar el mecanismo de registro de mensajes de residentes y visitantes en el acceso al edificio usando tecnología de punta incorporada en los modelos recientes de electrodomésticos, dispositivos móviles y computadoras. Las aplicaciones pueden estar desarrolladas para diversos sistemas operativos en dispositivos físicos y móviles como muestra la Fig. 1.

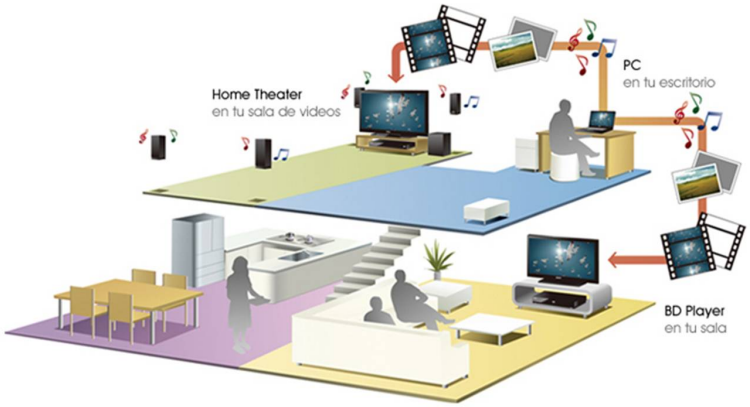


Fig. 1. Tecnología DLNA

La tarjeta Raspberry Pi es una computadora, también llamada SBC (Single Board Computer), desarrollada en el Reino Unido por la Raspberry Pi Foundation para incentivar la enseñanza de la computación en las escuelas. La Raspberry Pi Foundation no indica explícitamente si la tarjeta es hardware libre o con derechos de marca pero tiene contratos de distribución y venta con diferentes empresas y se interpreta como producto de propiedad registrada y de uso libre. De esa forma, la Raspberry Pi Foundation mantiene el control de la plataforma permitiendo su uso libre tanto a nivel educativo como particular. Tampoco indica explícitamente si es posible utilizarlo a nivel empresarial u obtener beneficios con su uso, lo cual debe consultarse con la fundación. Se han distribuido diferentes modelos de tarjetas Raspberry Pi con diferente cantidad de recursos. Los modelos más recientes son las tarjetas: 1). Raspberry Pi 2 Model B versión 2, basada en procesador ARM V7 Quad-Core de 900 MHz, la cual cuenta con 1 GB RAM, 4 puertos USB, puerto HDMI y puerto Ethernet RJ-45 y 2). La versión 3, que cuenta con procesador ARM Quad-Core de 1.2 GHz, 1 GB RAM, 4 puertos USB, puerto HDMI, puerto Ethernet RJ-45, conectividad inalámbrica integrada

ISBN 978-607-8242-11-5

de 802.11 b/g/n LAN, ranura para tarjeta Micro SD y puerto Bluetooth. Su costo es de $20 a $25 USD aproximadamente. En la Fig. 2 se muestra una tarjeta Raspberry PI 2.

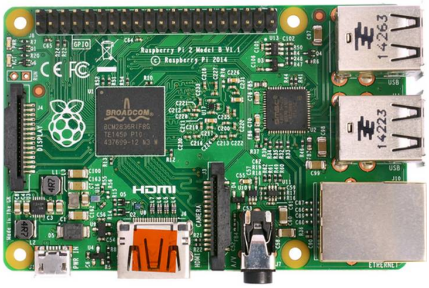


Fig. 2. Raspberry PI 2

METODOLOGÍA

La metodología utilizada es la siguiente: el sistema se divide en cinco módulos funcionales. El módulo principal es el sistema Raspberry PI, el segundo módulo es la programación y puesta en marcha del proceso DLNA, el tercer módulo es la adquisición y almacenamiento de datos del teclado y micrófono, el cuarto modulo es la salida al altavoz y contrachapa y por último el módulo de servicio remoto al sistema. El sistema completo se muestra en la Fig. 3.

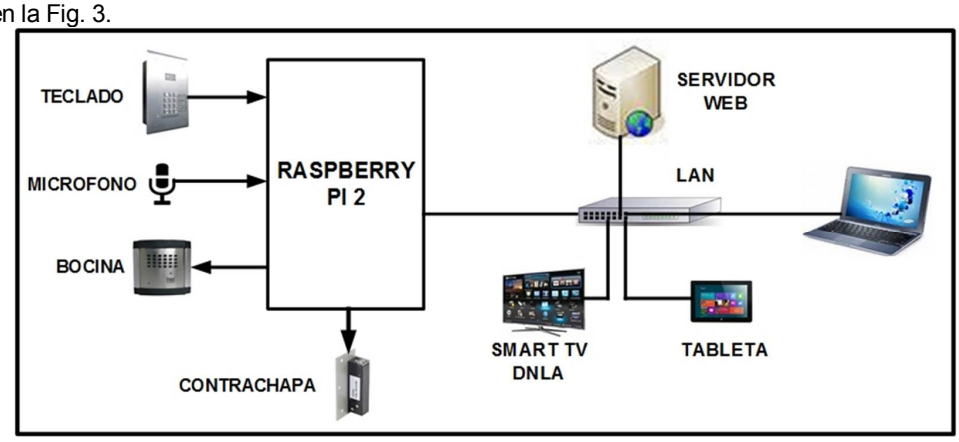


Fig. 3. Instalación de Raspbian

Módulo de Raspberry PI

Este es el módulo principal del sistema; es donde se implantó la lógica de operación y control. Para la programación del sistema se utilizó Python 2.7.9, ya que es una versión estable y por ahora con mayor compatibilidad que las más recientes. Para la instalación de Raspbian se usó el instalador de sistemas operativos para Raspberry PI, NOOBS. Con este instalador se puede seleccionar una de varias opciones de sistemas operativos dentro de los que se encuentra Raspbian. El proceso se realizó cargando en una memoria SD, recomendada de 32 GB, la descarga de NOOBS. Al tener la información de NOOBS en la memoria se procede a insertar la microSD en la ranura asignada de la tarjeta Raspberry. El arranque de la tarjeta Raspberry se realiza desde la memoria y proporciona las opciones de instalación de Raspbian como se indica la Fig. 4.

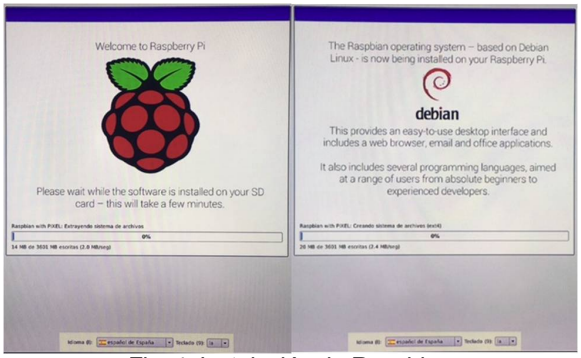


Fig. 4. Instalación de Raspbian

ISBN 978-607-8242-11-5

La tarjeta Raspberry Pi tiene un conector disponible para utilizar los puertos de entrada/salida con las características necesarias. Al Raspberry se conectaron las salidas como son la contra chapa y usando el puerto de audio la bocina, las entradas del teclado matricial y el micrófono igualmente al puerto de audio.

Módulo de la programación

En este módulo se programó el núcleo de la aplicación DLNA utilizando el lenguaje de programación Python y algunas aplicaciones diseñadas en Linux para crear el servidor DLNA. Con Python se realiza la aplicación de captura y reproducción de audio. Este programa es capaz de reproducir el audio dependiendo del almacenamiento de mensajes seleccionado, ya que si fue un llamado al apartamento 1, se reproduce el mensaje especificado por el usuario del apartamento 1. Dependiendo de la programación de los mensajes por cada usuario, se puede dar la opción de grabación de un mensaje que se grabara al buzón como se muestra en el diagrama de la Fig. 5.

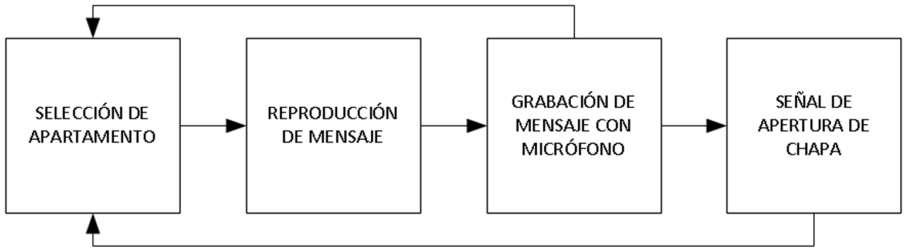


Fig. 5. Flujo de la aplicación principal

Para compartir los archivos multimedia se utilizó la aplicación multimedia minidlna como servidor DLNA. La configuración de dicha aplicación se basa en agregar el identificador DLNA de nuestro dispositivo, especificación de las rutas de los archivos a reproducir y el refrescar la información que se ofrecerá ya que serán dinámicos los cambios del almacenamiento.

Módulo de control de salida

En este módulo se utiliza una contrachapa controlada, que incluye un relevador para adecuar los niveles eléctricos utilizados, como se muestra en la Fig. 6.

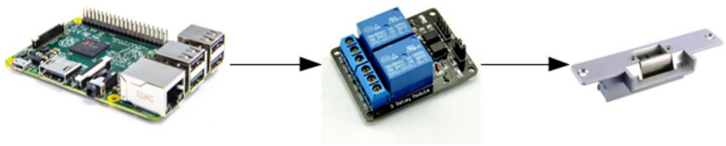


Fig. 6. Contrachapa y acoplamiento

La otra salida controlada es la salida de audio, utilizando una bocina. La señal que se utiliza para esta bocina se encuentra utilizando la salida de audio inter-construida por el Raspberry como se muestra en la Fig. 6.

Módulo de control de entrada

En este módulo se incluye la captura del teclado matricial, que se accede utilizando la programación en Python. Otra entrada es el audio del micrófono piezoeléctrico conectado al puerto de audio incluido en la tarjeta del Raspberry, como se muestra en la Fig. 7.

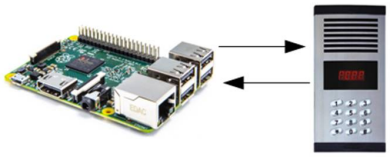


Fig. 7. Entrada/Salida, micrófono, teclado y bocina

ISBN 978-607-8242-11-5

Módulo de servicio

En este módulo se administra la configuración de cada uno de los buzones de mensajes que serán reproducidos por la bocina del portero. Los mensajes de audio que se reproducirán de forma personalizada por cada apartamento, son cargados al servidor DLNA en un formato estándar .wav o .mp3, para realizar esta tarea se configuro el servidor vsftp y se configuraron los cinco perfiles de usuarios. También se configurara el estado de cada uno de los apartamentos mediante un servidor web que se configuro con la aplicación apache y una simple interfaz realizada con PHP, como. Usando este sitio se autentica el usuario para personalizar las opciones de funcionamiento del buzón de mensajes a escuchar. En la Fig. 8 se muestra el flujo de la configuración y acceso de dispositivos DLNA.

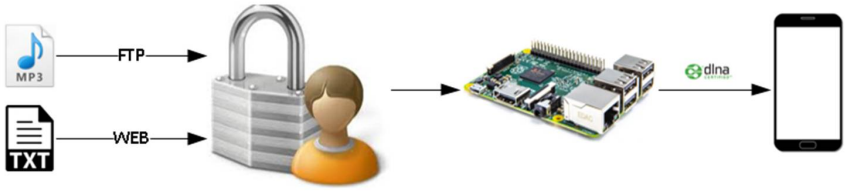


Fig. 8. Configuración y acceso por DLNA

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar las pruebas del sistema se codificaron dos dígitos para que fácilmente se pueda acceder al mensaje de cada uno de los apartamentos, por ejemplo teclear 03 sería acceder al banco de mensajes del apartamento tres y se utilizaron algunos mensajes seleccionables para reproducir en el portero como: “por el momento no puedo atenderle”, “deje su mensaje”, “favor de entrar”, etc. La grabación que se puede dejar el cliente en el portero no debe exceder 10 segundos, ya que en promedio es lo que duraría un mensaje en un buzón, pero es una opción configurable la cual depende de la capacidad de almacenamiento del sistema. El usuario doméstico es capaz de seleccionar el mensaje personalizado por departamento en cualquier momento utilizando la página web que se encuentra en el sistema Raspberry PI. También se realizaron pruebas con la conexión a la red cableada Ethernet, conectando a los clientes a través de la red, teniendo buena conectividad desde todos los puntos de la red local.

CONCLUSIONES

Este tipo de sistemas no son comunes en la actualidad y los que se le asemejan son muy caros. Aquí mostramos una solución de bajo costo y que puede escalarse para tener funciones específicas para cada usuario. Los problemas a los que nos enfrentamos fueron la compatibilidad con algunos exploradores WEB y la compatibilidad con aplicaciones DLNA en los diferentes clientes a conectar. Las adecuaciones que se pueden hacer son: utilizar una conexión inalámbrica, con la dificultad de tener la mejor cobertura a los puntos de acceso. Una mejora podría ser que clientes que puedan interactuar directamente con audio bidireccional para evitar tener mensajes preestablecidos.

REFERENCIAS

Peng, L. y B. Zhuang, "A media resources sharing system based on DLNA", First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI), 211-215, Wuhan-China (2016).

Guo, X. y J. Li, "Extending SNS Media to DLNA Content Sharing Systems", Fourth Global Congress on Intelligent Systems, 219-223, Hong Kong-China (2013).

Nam, H. y Y. Kim, "Contents sharing using PPSP in DLNA-based networks", The International Conference on Information Networking 2013 (ICOIN), 320-323, Bangkok-Thailand (2013).

Rapic, D., S. Medic, N. Šoškic y M. Subotic, "Integration of RVU remote user interface and DLNA remote media player in Qt framework", IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), 215-217, Berlin-Germany (2014).

Loncarevic, M., B. Bogicevic y J. Hlavac, "One software solution for sharing multimedia content via DLNA protocol on Android operating system", 20th Telecommunications Forum (TELFOR), 1346-1348, Belgrade-Serbia (2012).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Mai, V. D. K. y Y. Kim, "Using DLNA cloud for sharing multimedia contents beyond home networks", International Conference on Advanced Communication Technology, 54-57, Pyeongchang-South Korea (2014).

Shimizu, K., H. Suzuki, A. Watanabe y K. Naito, "Remote DLNA communication system based on NTMobile", The 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2012, 130-134, Tokyo-Japan (2012).

Wu, Y. y X. Zhi, "ARP Spoofing Based Access Control for DLNA Devices", IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015

Islam, M. Z., M. M. Hossain y S. Haque, "User-agent based access control for DLNA devices", 6th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), 7-11, Chonburi-Thailand (2014).

Gu, F., J. Niu y Z. He, "CLMRS: Designing Cross-LAN Media Resources Sharing Based on DLNA", IEEE 2nd International Conference on Cyber Security and Cloud Computing, 133-140, New York-USA (2015).

Arva, G. y T. Fryza, "Embedded video processing on Raspberry Pi", 27th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 1-4, Brno-Czech Republic (2017).

Rithika, H. y B. N. Santhoshi, "Image text to speech conversion in the desired language by translating with Raspberry Pi", IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 1-4, Chennai-India (2016).

Onkar, T. A. y P. T. Karule, "Web based maintenance for industrial application using RASPBERRY-PI", Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), 1-4, Coimbatore-India (2016).

Jayanth S., M. P. Poorvi y M. P. Sunil, "Raspberry Pi based energy management system", Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), 1-5, Coimbatore-India (2016).

Kumar, P. y U. C. Pati, "Arduino and Raspberry Pi based smart communication and control of home appliance system", Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), 1-6, Coimbatore-India (2016).

Haney, J., S. Lim y R. Chong, "Automated sleep data extraction and streaming using Zeo sleep personal manager and Raspberry Pi", SoutheastCon 2017, 1-2, Charlotte, NC-USA (2017).

Park, Y. S., S. H. Park y K. T. Lee, "DLNA protocol analysis tool for smart device interoperability test", International Conference on Information Networking (ICOIN), Pages: 464-465, Cambodia-Cambodia (2015).

IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom), 1371-1376, Beijing-China (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Algoritmos para el ajuste de parámetros cinéticos y sus desviaciones para diferentes sistemas reactivos usando MatLab®

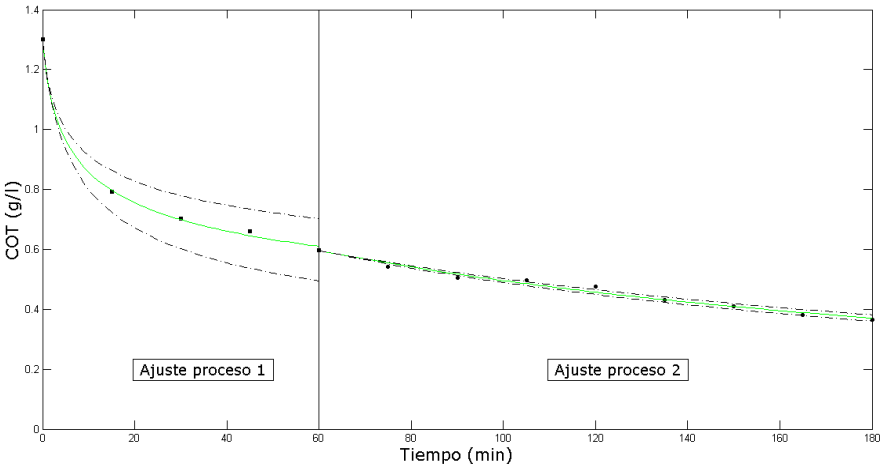
Santiago Zuluaga[1,a], Harold Norbey Ibarra[1,a], Edison GilPavas[1a,2], Izabela Dobrosz-Gómez[1b,2], Miguel-Ángel Gómez*[1a,2]

(1) PRISMA: Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados. [a]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [b]Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(2) GIPAB: Grupo de Investigación en Procesos Ambientales, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
(e-mail: sazuluagabo@unal.edu.co; hnibarrat@unal.edu.co; egil@eafit.edu.co; idobrosz-gomez@unal.edu.co; *magomez@unal.edu.co)

Resumen

Desde los inicios, una de las preguntas centrales en el ejercicio de la ingeniería química ha sido la determinación de la velocidad a la que ocurre un proceso reactivo. Esto dio origen a la formulación de estudios cinéticos que conducen a la formulación de modelos de velocidades de reacción. Tales modelos cinéticos han evolucionado enormemente alcanzando cada vez mayor grado de complejidad debido a la incorporación de herramientas numéricas computacionales (*v.g.* MatLab®). La determinación de los parámetros de los modelos cinéticos, con sus respectivas desviaciones, constituyen una herramienta fundamental para el diseño de reactores (Denisov *et al.*, 2003). En estos casos, el análisis estadístico de los errores asociados al ajuste de los datos permite verificar el adecuado comportamiento del modelo obtenido. Dado que los datos cinéticos pueden provenir de diferentes fuentes experimentales, su ajuste a un modelo matemático deberá involucrar las particularidades del proceso físico, incluyendo, además, las diferentes fuentes de error. Dicho esto, se podría generalizar que cada proceso de ajuste es particular.

En consideración de lo anterior, en este trabajo se presenta una metodología para realizar ajustes de datos cinéticos junto con la forma de determinar la incertidumbre de los modelos ajustados. Para ello se presentan tres casos de estudio que permiten analizar igual número de situaciones de diferente grado de complejidad: i) una única ecuación de velocidad en términos explícitos, ii) un sistema de ecuaciones de velocidad en términos explícitos y iii) un sistema de ecuaciones en términos implícitos. Para los ajustes se usan varias funciones predefinidas en MatLab® garantizando que los modelos matemáticos ajustados representan con una confiabilidad del 95% los datos experimentales.



Ejemplo de los resultados obtenidos tras el ajuste de los parámetros cinéticos de dos procesos reactivos secuenciales

Referencias

Denisov, E. T., Sarkisov, O. M. y Likhtenshtein, G. I. (2003). Chemical Kinetics: Fundamentals and New Developments. Elsevier Science, Amsterdam, the Netherlands.

ISBN 978-607-8242-11-5

Prácticas Ancestrales, Uso y Manejo Sostenible del Agua: Caso de Estudio Comunidades Indígenas Wayuu de La Guajira Colombiana

Alcides R. Daza[1], Nelson Rodríguez[2] y Alexis Carabalí[3]

(1) Fac. De Ingeniería, Grupo Territorios Semiáridos del Caribe, Univ. de La Guajira, km 5 vía Maicao, Riohacha La Guajira-Colombia, e-mail: adaza@uniguajira.edu.co
(2) Centro Nacional De Investigación De Café, Investigador Científico III, Cenicafé, Km 4 vía Antigua Manizales, Chinchiná-Caldas-Colombia, e-mail: Rodriguez@cafedecolombia.com
(3) Fac. De Ciencias Sociales y Humanas, Grupo Territorios Semiáridos del Caribe, Univ. de La Guajira, km 5 vía Maicao, Riohacha La Guajira-Colombia, e-mail: acarabali@uniguajira.edu.co

Resumen

Las prácticas ancestrales de manejo y uso del agua, se convierten en un claro ejemplo de gestión sostenible; es donde el recurso se cuida y se conserva. Bajo este precepto, el presente estudio se centró en estudiar los saberes, creencias y prácticas ancestrales de las comunidades indígenas wayuu de La Guajira Colombiana como una posible herramienta en la gestión sostenible del agua. Metodológicamente, el estudio se realizó aplicando los métodos de investigación histórica, documental y explicativa. Para esto, se realizó una revisión bibliográfica de la etnografía indígena wayuu existente, con el objeto de entender las costumbres, categorías y tradiciones referentes al agua. Los resultados evidencian que las prácticas ancestrales de manejo del agua están supeditadas a la presencia o ausencia del líquido; es decir, las zonas con mejores condiciones de disponibilidad de agua optan por tener comportamientos y costumbres diferentes en términos de administración, conservación y buen uso del recurso.

Palabras clave: recursos naturales, gestión sostenible, pueblos indígenas, saberes ancestrales

Ancestral Practices, Use and Sustainable Water Management: Case Study Wayuu Indigenous Communities of La Guajira Colombiana

Abstract

The ancestral practices of water management and use become a clear example of sustainable management; Is where the resource is cared for and preserved. Under this precept, the present study focused on studying the ancestral knowledge, beliefs and practices of the Wayuu indigenous communities of La Guajira Colombiana as a possible tool for sustainable water management. Methodologically, the study was carried out applying the methods of historical, documentary and explanatory research. For this, a bibliographical review of the existent Wayuu indigenous ethnography was carried out, in order to understand the customs, categories and traditions related to water. The results show that ancestral water management practices are contingent on the presence or absence of the liquid; That is, areas with better water availability choose to have different behaviors and customs in terms of administration, conservation and good use of the resource.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Para las comunidades indígenas la naturaleza está ligada a sus saberes y prácticas tradicionales. En este aspecto, los recursos naturales representan el sentido de la vida y de la existencia del ser humano. Los ríos, animales, las piedras, el aire, la fauna y la flora constituyen sus dioses, miedos y creencias. Cada suceso natural para los indígenas se convierte en un mensaje y llamado de los seres mitológicos. De este vínculo humano – naturaleza radica el sentir de los pueblos por preservar sus recursos (Escobar, 2007).

Desde este punto de vista, los saberes y las prácticas tradicionales se integran a partir de tres aspectos: la praxis que alberga las prácticas productivas, el corpus que involucra el conjunto de conocimientos y el kosmos conformado por el sistema de creencias; que en conjunto permiten entender las dinámicas de conservación de los recursos naturales por parte de las culturas indígenas (Toledo y Alarcón, 2012).

En este sentido, el agua para el wayuu es ser vivo que se enmarca muchas veces dentro del simbolismo de los sueños, para revelar hechos relacionales con el entorno natural con el cual interactúan (Instituto Colombiano de Cultura Hispánica, Geografía Humana de Colombia [ICCH], 2014). El ser wayuu está fundamentado en la relación armónica con el mundo natural y el valor sagrado de la vida. El agua desde la visión cultural establece los principios de la vida social y espiritual, con la cual garantizan su existencia (Ministerio de Ambiente y desarrollo Territorial [MADS], 2013).

Bajo este precepto, el presente artículo se centró en estudiar los saberes, creencias y prácticas ancestrales de las comunidades indígenas wayuu de La Guajira Colombiana como una posible herramienta en la gestión sostenible del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área objeto de estudio se encuentra localizada en el extremo norte de Colombia, en la zona más septentrional de América del Sur. Presenta una superficie de 20.848 km^2 representando una cobertura del 1.8% con relación al área total del país. Al norte limita con el mar Caribe, al sur con el departamento del Cesar, al este con el mar Caribe y el hermano país de Venezuela y al oeste con el departamento del Magdalena y el mar Caribe (Corporación autónoma Regional de La Guajira [CORPOGUAJIRA], 2009). Figura 1.

En lo que respecta a la distribución del territorio, La Guajira cuenta con 15 municipios y 44 corregimientos. Como características hidrográficas se resaltan los depósitos de agua como pozos, jagüeyes, represas y ríos: Ranchería, Cesar, Jerez, Ancho y Palomino (Gobernación de La Guajira, 2011).

Por otra parte, con relación a la ocupación poblacional se estima una población para La Guajira de 930.143 personas, de las cuales 525.042 estarían localizadas en la cabecera municipal y 432.755 ubicadas en la zona rural. El índice de necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) total de La Guajira corresponde al 65 %; distribuidos para la cabecera municipal en el 40 % y para la zona rural el 91,92 % (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2012).

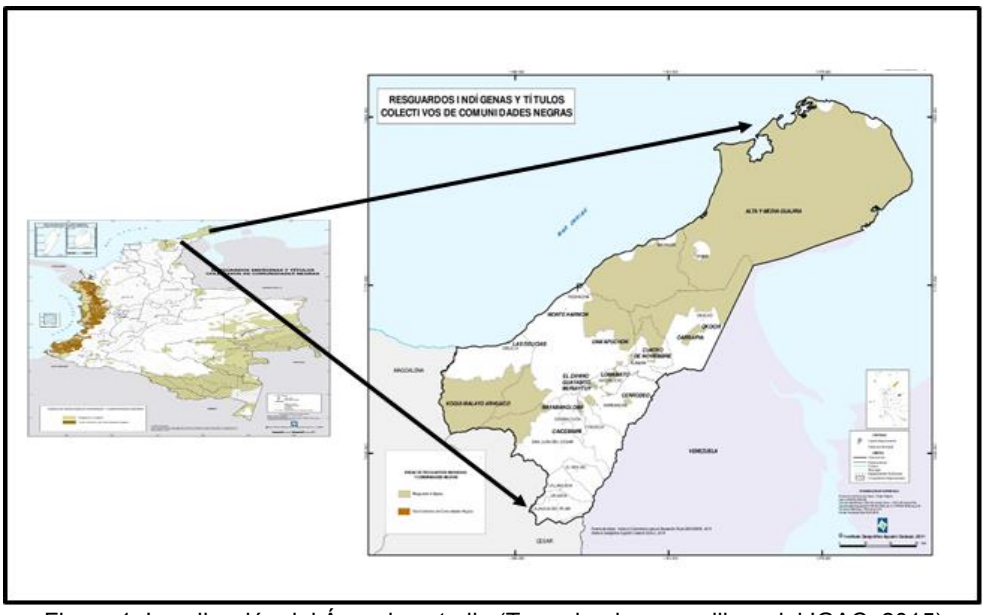


Figura 1. Localización del Área de estudio (Tomado, descarga libre, del IGAC, 2015)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Procedimiento de la investigación

Para el estudio se aplicó la investigación histórica, documental y explicativa; la cual consistió en el análisis de la etnografía indígena wayuu existente, con el objeto de entender las costumbres, categorías y tradiciones existentes con respecto al agua (Braña, 2015). Así mismo, se efectuó la búsqueda documental relacionada con la temática del agua, sus normas, estructura, funciones, conocimiento y percepciones desde el modo de vida de la comunidad indígena wayuu con relación a este recurso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Generalidades de la etnografía wayuu

El wayuu pertenece a la familia Arawak, proveniente de las zonas selváticas del Amazonas habitando en las fronteras del Orinoco y los ríos de Brasil (Paz, 2016). Constituyen una de las extensas etnias indias de las zonas bajas de América del Sur. Son un pueblo que durante siglos de luchas con los Caribes fueron desplazados y permanecieron en continuo desplazamiento en territorio Venezolano y Colombiano, hasta llegar a tierras baldías de la Alta Guajira; región desértica con vegetación xerofítica (Perrin, 1980). Dentro de las actividades a que se dedicaban están la pesca, pastoreo, caza, recolección y la horticultura heredada de los pueblos prehispánicos. Para el caso de las actividades de siembra generalmente estuvieron condicionadas por los periodos de lluvias. Dentro de la cosmovisión wayuu sus clanes surgieron de la zona norte de La Guajira, de una tierra denominada *Wotkasainru,* donde *Maleiwa* (Dios creador de todas las cosas) los fabricó

Por otra parte, la población wayuu está compuesta en clanes matrilineales no exogámicos, presentándose alrededor de treinta clanes cuyos nombres están asociados a animales totémicos. Existen las autoridades tradicionales los cuales son los portadores de la palabra entre clanes. El tío materno es la persona encargada de atender todos los problemas de la familia. Los hijos son dirigidos por el hermano de la madre y no por su padre biológico. La mujer es la encargada de mantener la cultura tradicional y la interacción entre los clanes por medio del matrimonio. De esto, las rancherías se construyen cerca de los cementerios de la familia de la mujer. De igual modo, la mujer juega un papel preponderante dentro del mundo de la espiritualidad de la etnia wayuu, es la encargada del cuidado de la familia dentro del hogar, mantiene la armonía, fabrica cerámicas, teje vestido y mochilas, interpreta los sueños, oficializa rituales y es conocedora del poder curativo de las plantas tradicionales (Perrin, 1980; Vílchez, 2003).

Creencias, saberes y prácticas ancestrales de las comunidades indígenas wayuu entorno al agua

Entorno al agua las comunidades indígenas wayuu de La Guajira Colombiana establecen un sinnúmero de creencias, saberes y practicas ancestrales que demarcan la importancia de este recurso dentro de la cultura wayuu. Parte de esta connotación mitológica milenaria se justifica en la población indígena producto de su escasez, que genera todo tipo de sentimientos de gratitud y respecto ante los incesantes meses de sequía que deben afrontar a lo largo de un año. En este sentido, el agua adquiere un simbolismo y un uso desde la visión wayuu que a lo largo de esta sección se explicara.

Percepción sobre la lluvia (Juya)

Para la mujer (*jiet*) y el hombre (*tooro*) wayuu el agua de lluvia adquiere diferentes significados dependiendo de la época en que se presenta, su frecuencia, la intensidad y los fenómenos meteorológicos que esta pueda traer. En este sentido, la palabra *Juya* es utilizada para definir el agua líquida que traen las nubes, las estaciones lluviosas, personajes mitológicos de sexo masculino interpretados como fecundadores de la tierra, los sitios fértiles de cosecha; también es empleada para denotar los lugares donde se desarrollan los festejos de su llegada y los espacios para resguardarse de la lluvia. Ahora bien, si en verano se presentan lluvias al momento de dar sepultura aún wayuu, se considera que la persona muerta fue agradecida con los designios de *juya* en vida (Perrin, 1980; Paz, 2016).

Por otra parte, desde el pensamiento wayuu el agua de lluvia (*saiña juya*) es vista desde dos dimensiones, lo mítigo y lo natural; es decir, el wayuu desde su connotación del saber empírico y al no tener una respuesta científica de cómo se presenta el fenómeno, lo explica desde su interacción con el entorno natural a través de muchos años de convivencia con este (Paz, 2016). Con relación a esto, el ser wayuu interpreta que *Juya* (lluvia) menos precia las condiciones orográficas de muchos sectores del departamento de La Guajira (montañas de poca elevación, vegetación escasa, dispersa y de poco tamaño y cobertura, vientos fuertes y suelos áridos) donde los vientos no dejan que el vapor de agua se condense y estas se desplazan a las zonas donde las montañas son más altas, donde Juya deja caer sus aguas con mayor frecuencia para fecundar las tierras y hacer renacer los cultivos.

Creencias y simbolismo del wayuu entorno al agua

Es necesario, sin embargo, aclarar en este punto que a pesar de que la lluvia es tomada por el wayuu con un ser de vida, también existen momentos de la cotidianidad donde *Juya* es concebida como un ser que emana

 ISBN 978-607-8242-11-5

temor. Esto significa, que existen ciertos acontecimientos producto de los fenómenos climáticos entorno a la lluvia que generan este tipo de comportamientos en la cultura wayuu. Ejemplo de esto, se tiene cuando se presentan tormentas; en este aspecto, el wayuu frente a su vivienda entierra en forma de cruz dos machetes con el fin de calmar el mal tiempo. De igual forma, los ancianos lanzan al aire injurias contra la tempestad en sentido de regaño por su mal comportamiento. Otro aspecto de resaltar, dentro de la creencia wayuu es la de agitar una manta larga para intimidar a las nubes grises que ocasionan tempestades y exclaman gritos pidiéndole que se alejen hacia el mar profundo y las altas montañas. De acuerdo con lo anterior, los periodos de mucha pluviosidad son asimilados por la etnia wayuu como el principio de enfermedades y muerte. Se tiene el concepto que mucha agua genera la proliferación de insectos, problemas respiratorios y erupciones en la piel (Paz, 2016).

Hay que mencionar además que para el wayuu al partir el verano es para el wayuu un acontecimiento de alegría, que genera tributo por parte de estos porque es el inicio de la llegada de las primeras lluvias, lo que hace que estos ofrezcan sus primeras cosechas a *Juya*; realizando bailes (*Yonnas*) y comidas en su nombre. Es de resaltar también, que en los meses en el que el wayuu acostumbra a esperar las lluvias y estas se retrasan, proceden a realizar de igual forma bailes implorando a *Juya* su pronta llegada. De igual forma, ciertas comunidades indígenas wayuu de la Alta Guajira implementan ritos para evocar la lluvia. Este rito consiste en cubrir los orificios hechos por los iguánidos (cierto tipo de reptiles caracterizados por presentar escamas, de cabeza grande y cola larga) en los arboles con barro para impedir su salida y evitar que perturben a *juya*. Previo a esto, la comunidad se reúne y ejecuta una gran fiesta para conmemorar la realización del ritual (Perrin, 1980).

Usos y manejo ancestral sostenible del agua por parte de la etnia wayuu

En términos de uso y manejo del agua por parte de las comunidades indígenas se tiene que parte de sus actividades giran en torno al trabajo comunitario donde cada uno de los integrantes del núcleo familiar presenta un papel específico. De igual forma, las comunidades indígenas wayuu a lo largo de la historia han establecido una estrecha relación con el recurso agua, siendo esta esencial en muchas de las actividades cotidianas que estos realizan a lo largo de su vida. En términos de usos del agua y manejo el análisis que a continuación se presenta se orienta en plasmar una revisión de los antecedentes históricos orientados a determinar cuáles son sus hábitos (higiene, tratamiento, consumo) entorno al manejo de este recurso desde su saber y sus prácticas ancestrales. Partiendo de esto, se plasma de igual forma una interpretación a partir la relación naturaleza, sociedad, cultura y escasez.

En este orden de ideas, el agua es utilizada en muchos rituales y adquiere un manejo especial dependiendo de su uso. Así mismo, se emplean una serie de utensilios y técnicas artesanales que permiten darle un mejor aprovechamiento y cuidado a este recurso. En cuanto a esto, se tienen las siguientes connotaciones por parte de etnia wayuu que es necesario aclarar.

El agua, sus rituales y los roles de la comunidad indígena wayuu

Una de las actividades culturales más importantes de la etnia wayuu está relacionada con el ritual para enterrar a sus muertos y todo el proceso de su preparación. En relación con esto, son las mujeres dentro de la cultura wayuu las encargadas de asumir este papel y deben tener algún vínculo familiar para realizar esta labor. Las wayuu que se someten a esta actividad deben ser mujeres mayores sin hijos pequeños y no pueden después de realizado el acto efectuar actividades en la cocina y no pueden tocar a los niños producto que los pueden contaminar y dejarlos expuestos a enfermedades. Dentro de la cultura esta actividad es una de las más difíciles por la concepción que tiene el wayuu que al ejecutar estas prácticas de baño con el muerto quedan expuestas a los espíritus. En este aspecto, el difunto se baña completamente dejándolo limpio para que su espíritu no quede penando, sino que pase a una mejor vida (Paz, 2016). El agua empleada se mezcla con sal para luego realizar su baño. De igual forma, al momento de su colocación en la bóveda como creencia se le pone un recipiente con agua para que el difunto no pase sed en la otra vida Las mujeres después del baño del difunto se bañan en ron o chirrinchi (bebida alcohólica elaborada de forma artesanal por el wayuu a base de la fermentación de la panela) para liberarse de toda enfermedad y atadura (Chacín, 2016).

De igual forma, antiguamente el muerto era metido en una gran batea construida solo para esta actividad y el agua producto del baño era arrojada en las afueras de la vivienda en dirección donde el muerto seria enterrado (A. Epinayú, comunicación personal, 20 de febrero de 2017). Lo dicho hasta este momento, deja entre ver en cierta parte, la forma indirecta de los cuidados higiénicos que enmarca el wayuu en la realización de este tipo de prácticas. El lavado de su cuerpo con ron o chirrinchi y el evitar que las mujeres manipulen alimentos permiten evidenciar hábitos higiénicos de manejo. De igual forma, es de resaltar que después de las actividades del entierro y al momento de concentrarse todos para consumir los alimentos en honor del muerto los hombres proceden al lavado de sus manos como habito de limpieza. Adicional a esto, lo dicho anteriormente deja ver el valor del agua no solo como un elemento que crea al ser humano (ser wayuu), si no

 ISBN 978-607-8242-11-5

también que le renueva la vida con el nuevo florecimiento del alma a un nuevo mundo libre de padecimientos y regenerador de la divinidad hídrica donde la propia muerte vuelve a resurgir (Gonzales, 2006).

Igualmente, en la preparación de los alimentos, las labores agrícolas y la etnomedicina también el agua juega un rol importante dentro de la cultura wayuu. En este sentido, la gastronomía wayuu se caracteriza por la preparación de sopas (frijol, maíz, millo entre otros), hervidos (lentejas, yuca, pastas de maíz, pasta de millo, guineos entre otros) y bebidas (chicha de maíz y de millo entre otros) que garantizan el sostenimiento de la etnia. De igual modo, algunas comunidades utilizan en periodos de abundancia el agua para el riego de sus cultivos el agua procedente de los jagüeyes, cauces y pozos. (Paz, 2016). Es de anotar sin embargo, que en épocas de verano estas condiciones cambian las cuales se detallaran en el punto siguiente. Otro de los usos, está relacionado con la medicina ancestral; en este aspecto, el agua se emplea para la preparación de las medicinas naturales (Malambo [*Croton malambo karsten*], Brasil [*Haematoxylon brasiletto karst)*, jobito [*Cordia dentada poir)*, entre otros) mediante su cocción, baño, gargarismo, vaporización, maceración, zumo (algunas veces mezclado con agua), cataplasma e infusión; con el fin de limpiar el cuerpo, expulsar los malos espíritus y curar enfermedades de tipo benignas, es decir, no graves (diarrea, vómitos dolor de garganta, oídos, tos, catarros, resfriados entre otras) y las de tipo malignas que son susceptibles de causar la muerte producto que provienen de seres sobrenaturales como *pulowi (ser sobrenatural femenino asociado a la muerte y sequia), yolujaa (espíritu de una persona recién facellida) y wanülüü* (espíritu maligno que mata en la noche utilizando un arco y flecha). Es de anotar, que esta actividad es desarrollada generalmente por las mujeres mayores denominadas piache (*Ouutsü*) o yerbateras (*Alüjülii*) (Rosado, 2009).

Prácticas de abastecimiento, conservación, manejo y gestión de manipulación del agua en las comunidades indígenas wayuu

Para abordar este punto, es necesario primero conocer cuáles han sido los medios y los sistemas de abastecimiento y obtención del recurso agua dentro de las comunidades indígenas. Desde este punto de vista, las dinámicas de ocupación del territorio Guajiro por parte de los wayuu tuvieron una fuerte influencia del recurso hídrico para su abastecimiento. En este sentido el río Ranchería y los causes que lo alimentan son a lo largo de la historia la despensa de subsistencia para la población wayuu. Adicional a esto, el agua de lluvia, las casimbas, lagunas naturales y la utilización del agua almacenada en depresiones naturales de rocas y del suelo fueron otro medio de abastecimiento empleado por los aborígenes para su subsistencia. Con el pasar del tiempo y la inclusión de la cultura de occidente aparecieron otras prácticas de abastecimiento de agua como fueron los pozos subterráneos, jagüeyes artificiales, albercas y el empleo de grandes tanques de plástico y carros cisternas que los abastece de agua (Gobernación de La Guajira, 2011).

Por otro lado, en lo que respecta al control, uso y manejo físico del agua se tiene que son las mujeres y los niños y niñas las encargadas de buscar y acarrear los recipientes como múcuras (utilizado ancestralmente) y tanques plásticos (pimpinas de 20 a 25 litros) con agua. Muchas veces, si no se cuenta con animales (burros) la mujer wayuu le corresponde realizar largas caminatas de hasta 30 minutos o más hasta llegar a los pozos, casimbas o jagüeyes y emprender su regreso nuevamente hasta la vivienda. Conviene decir, que existe actualmente una alta influencia de la cultura de occidente para el acarreo de los recipientes en algunas zonas del territorio wayuu. Utilizando motos, carretillas y ciclas (E. Muñoz, comunicación personal, 25 de febrero de 2017). Lo dicho hasta aquí, supone que son las mujeres quienes conocen realmente la demanda real de agua, debido a que ellas son las responsables directas de su manejo en el hogar; específicamente en las actividades de lavado de ropa, preparación de alimentos, aseo de las viviendas y otras actividades propias de su rol que demanden el uso de este recurso (Soares, 2007). De igual forma, Anderson *et al.*, (2013) afirma que en muchas etnias las mujeres establecen relaciones espirituales con el agua, son catalogadas como las veedoras del manejo y uso del agua en las actividades domésticas y limpieza de los seres que parten al mundo eterno.

Dicho lo anterior, es necesario entender que la escasez física del agua en el territorio Guajiro ha sido el punto de disputa y dominio desde los primeros siglos de ocupación del territorio. El agua es para el wayuu una pertenencia de máximo valor; en este sentido, los grupos familiares wayuu siempre reclamaran prioridad en el aprovechamiento de las fuentes de abastecimiento de agua presentes en su territorio. Historiadores del siglo XVI revelan la existencia de jagüeyes y reservorios diseñados en depresiones naturales con el fin de recolectar el agua que decantaba al suelo en las épocas de invierno. También, construían casimbas y pozos excavados en concavidades naturales con sistemas de acceso (escalinatas) cuando el agua disminuía su nivel durante las estaciones secas. De lo anterior, se resalta que antiguamente, las comunidades wayuu que carecían de este recurso accedían a su disponibilidad por medio de los vínculos de parentesco. Dentro de esto, un aspecto preponderante en las relaciones culturales del ser wayuu está marcado en la actualidad por la intrusión de la cultura de occidente y sus aportes económicos para la construcción de reservorios de agua manchando las comunidades de la politiquería; Es decir, la construcción de fuentes de abastecimiento de agua a cambio del aporte de votos por parte de las comunidades en las épocas de campañas electorales (Harker *et al.,* 1998).

 ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

Las particularidades y diferencias que puedan existir en el territorio entorno a las practicas ancestrales de manejo del agua están supeditadas a la presencia o ausencia del líquido; es decir, las zonas con mejores condiciones de disponibilidad de agua (algunas áreas de la media y baja Guajira) optan por comportamientos y costumbres diferentes en términos de administración, conservación y buen uso del recurso producto de su disponibilidad. De forma contraria, cuando el recurso escasea (Alta Guajira) las mismas dinámicas del entorno obligan a la comunidad wayuu a hacer un mejor uso de las fuentes de abastecimiento estableciendo dinámicas de gestión y conservación acordes a las necesidades de escasez.

El agua como componente integrador de la comunidad wayuu permite establecer lazos de hermandad por medio de ciertas prácticas que facilitan el trabajo conjunto mientras se implementan soluciones para contrarrestar la escasez física de agua. Ejemplo de esto, es la realización del denominado *Yanama* que consiste en el trabajo comunitario no remunerado entorno a la excavación de jagüeyes, pozos, casimbas, limpieza de las fuentes de abastecimiento de agua entre otros aspectos de la cultura wayuu. En este sentido, la población se reúne de forma voluntaria para trabajar y compartir de manera solidaria comida y bebidas reforzando los lazos convivencia y colaboración.

REFERENCIAS

Anderson, K., Clow, B., & *Haworth-Brockman, M. Carriers of water: Aboriginal women's experiences, relationships, and reflections.* Journal of Cleaner Production, 60, 11-17 (2013).

Braña F. *Magia, religión y vida. Apuntes de la literatura etnográfica sobre el agua termal en Galicia.* Congreso Internacional del agua, 1-7, Ourense, España (2015).

Chacín, H. *Asombros del Pueblo Wayuu*, 1ª edición, 1-150. Fondo editorial Unermb, Maracaibo, Venezuela (2016).

CORPOGUAJIRA, Corporación Autónoma Regional de La Guajira. *Plan de Gestión Ambiental Regional 2009-2019*. (*en la web*: http://www.corpoguajira.gov.co/web/attachments_Joom/article/216/PGAR_CORPOGUAJIRA_2009-2019_Consejo_DirectivoII.pdf,acceso 23 de enero de 2017), CORPOGUAJIRA, (2009).

DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. *Informe Estadístico de La Guajira*. (*en la web:* https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/Bol_nbi_censo_2005.pdf, acceso: 6 de febrero de 2017), DANE, (2005).

Escobar, E.M. *Introducción: La vida es la posibilidad de estar en el mundo como parte de la naturaleza, Mujeres indígenas, territorialidad y biodiversidad en el contexto latinoamericano,* Universidad Nacional de Colombia - Universidad Nacional de Colombia-Fundación Natura de Colombia-Unión Mundial para la Naturaleza-UNODC-Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, pp 137-139, Bogotá, Colombia, (2007).

Gobernación de La Guajira. (2011*). Evaluación social y plan de pueblos indígenas, para el proyecto "construcción y sostenibilidad de once (11) reservorios y un (1) micro acueducto, en comunidades indígenas de la alta guajira" (en la web:* http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2011/06/27/000333038_20110627004809/Rendered/INDEX/IPP2000v20SPAN0RVORIOS00260ABRIL010.txt, acceso 6 de febrero 2017), Gobernación de La Guajira, (2011).

Gonzales, A. *Leyendas del Agua en México*, 1ª edición, 1-124. Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Ciudad de México, México (2006).

IGAC, Instituto geográfico Agustín Codazzi. *Sistema de Información Geográfico para la Planeación y el Ordenamiento Territorial (en la web:* http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/frames_pagina.aspx, acceso 7 de febrero de 2017), IGAC, (2015).

Harker, S., & Wilder, G. *Wayuu People of the Colombian Desert*, Villegas Asociados, 1ª edición, pp 1-192, Colombian, (1998).

ICCH, Instituto Colombiano de Cultura Hispánica, *Geografía Humana de Colombia. Nordeste Indígena,* 1ªedición, pp 215-292, Bogotá, Colombia, (2014).

MADS, Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible, *Nuestra Tierra,* 1ªedición, pp 24, Bogotá, Colombia, (2013).

Perrin, M. *El Camino de los Indios Muertos Mitos, símbolos guajiros,* pp 1-272., Monte Ávila editores, Caracas, Venezuela (1980).

Paz, R. *Concepción y Descripción de la Cultura Wayuu*. Fondo Editorial Wayuu Araurayu, pp 1-362, Bogotá, Colombia (2016).

Rosado, J. *farmacopea Guajira: cosmovisión y usos de las plantas medicinales por los wayuu,* 2ª edición, 1-460, universidad de La guajira, Riohacha, Colombia (2009).

Soares, D. *Acceso Abasto, Control del Agua en una comunidad indígena Chamula en Chiapas. Un Análisis a través de las Perspectivas de Género, ambiente y Desarrollo.* Región y sociedad, Chiapas, México, 9(38), 25-50 (2007).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Toledo, V.M. y P. Alarcón. *La Etnoecología hoy: Panorama, Avances, Desafíos.* Etnoecológica: 9(1), 1-16 (2012).
Vílchez, J. *Taliraa1: Música, género y parentesco en la Cultura Wayuu.* Opción: 19(42), 9-25 (2003).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de la Multiplicidad de Estados Estacionarios en Sistemas Químicos Reactivos Usando la Metodología Cell-Mapping

Juan Carlos Ojeda[1a], Edison GilPavas[1a,2], Gerard Olivar-Tost[3], Izabela Dobrosz-Gómez[1,b], Miguel-Ángel Gómez*[1,a]

(1) PRISMA: Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados. [a]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [b]Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(2) GIPAB: Grupo de Investigación en Procesos Ambientales, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
(3) ABC Dynamics, Departamento de Matemáticas y Estadística. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(e-mail: jcojedat@unal.edu.co; egil@eafit.edu.co; golivart@unal.edu.co; idobrosz-gomez@unal.edu.co; *magomez@unal.edu.co)

Resumen

El comportamiento de los sistemas químicos reactivos se ve afectado por los valores de diferentes parámetros fisicoquímicos. Tal dependencia se traduce en la posibilidad de manipular el reactor químico a diferentes condiciones, no todas ellas convenientes desde el punto de vista operativo y/o de seguridad. Para la identificación de las condiciones de operación, que algunas veces corresponden con múltiples estados estacionarios, se han desarrollado diferentes metodologías: Plano de fases, Sensibilidad Paramétrica, Análisis de Bifurcación, Caos, etc… (Varma, Morbidelli, y Wu, 1999). La aplicación e implementación de estos métodos se ha venido consolidando gracias al desarrollo y disponibilidad de los computadores (cada día más asequibles y potentes).

En este trabajo se ha implementado la metodología del mapeo de celdas (o *cell-mapping* de su nombre en inglés) (Seydel, 2010) para el análisis de varios sistemas químicos reactivos. El algoritmo generalizado, que se implementó en el software de MatLab®, se puede extrapolar a cualquier sistema dinámico con presencia inherente del fenómeno de multiplicidad de estados estacionarios. Para esto, los dominios de atracción del sistema dinámico se definen en un espacio de estado finito (con límites específicos para un sistema bidimensional). El sistema dinámico se resuelve para una gran cantidad de condiciones iniciales, optimizando su tiempo de evaluación (minimizando el recurso computacional) y mostrando las trayectorias celda-a-celda de las soluciones, o patrones de flujo, que conducen a la identificación del estado estacionario estable o atractor estable.

Se presentan los resultados obtenidos tras el análisis, a condiciones industriales, de la hidrólisis de anhídrido acético y la hidrólisis ácida de glicidol. Los diagramas mapeados permitieron identificar la presencia de los estados estables e inestables así como su dependencia con las variables del proceso.

Referencias

Seydel, R., Practical Bifurcation and Stability Analysis, Springer Science+Business Media, LLC, 2010.
Varma, A., Morbidelli, M., & Wu, H. (1999). Parametric sensitivity in chemical systems. Cambridge: Cambridge University Press.

 ISBN 978-607-8242-11-5

SALONES DIGITALES EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Anderson Monroy[1], Ingrid A. Hernández[1] y Martha Jiménez[2]
(1) Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA).
(2) Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA), Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.
E-mail: anderson_monroy.r74@outlook.com; marthajimenezga@gmail.com

RESUMEN

Debido al avance tecnológico, el sector educativo ha sido beneficiado y se han implementado las aulas virtuales como: complemento a las clases presenciales y para estudios en modalidad no escolarizada, con el fin de tener un aprendizaje permanente y mejorar la calidad del proceso de enseñanza, por lo que algunas universidades hacen uso de este recurso. El objetivo de esta investigación es conocer el impacto del uso de las aulas virtuales en la educación superior. La investigación es de tipo exploratoria, y fue realizada en la Ciudad de México, en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA) perteneciente al Instituto Politécnico Nacional (IPN). El instrumento utilizado para recopilar la información fue una encuesta estructurada por secciones referentes a diversos tipos de herramientas informáticas para apoyo a los estudiantes universitarios. Este instrumento se aplicó a una muestra aleatoria de 428 alumnos de una población aproximada de 13,000 durante el ciclo escolar 2015-2016. Los principales resultados muestran que los alumnos de UPIICSA no hacen uso de las aulas virtuales y que su desempeño académico necesita mejorar ya que el promedio académico es de 7.98 y 36% de los estudiantes tienen materias reprobadas. Como conclusión se tiene que las escuelas de nivel superior necesitan implementar cursos de capacitación sobre herramientas de software relacionadas con las “aulas virtuales” como complemento a la modalidad presencial, ya que esto permitiría un incremento en el rendimiento académico de los alumnos y formar capital humano de calidad para impulsar el desarrollo productivo del país.

Palabras clave: Aulas virtuales, TIC, educación, rendimiento académico.

DIGITAL CLASSROOMS IN HIGHER EDUCATION

ABSTRACT

Due to the technological progress, the educational sector has been benefited and the virtual classrooms have been implemented as: complement to the classroom and non-school studies, in order to have lifelong learning and improve the quality of the teaching process, some universities make use of this resource. The objective of this research is to know the impact of the use of virtual classrooms in higher education. The research is of an exploratory type, and was carried out in Mexico City, in the Interdisciplinary Professional Unit of Engineering and Social and Administrative Sciences (UPIICSA) belonging to the National Polytechnic Institute (IPN). The instrument used to compile the information was a section-structured survey of various types of computer tools to support university students. This instrument was applied to a random sample of 428 students from a population of approximately 13,000 during the 2015-2016 school year. The main results show that UPIICSA students do not use virtual classrooms and that their academic performance needs to improve since the academic average is 7.98 and 36% of students have failed subjects. In conclusion, higher level schools need to implement training courses on software tools related to "virtual classrooms" as a complement to face-to-face modality, as this would allow an increase in students' academic performance and form human capital of quality to boost the productive development of the country.

Keywords: Virtual classrooms, ICT, education, academic performance.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en su libro titulado “Hacia las sociedades del conocimiento”, indica que desde 1990, ha aumentado considerablemente el interés de los países por el mejoramiento de la calidad de la educación (UNESCO, 2005), asimismo la UNESCO señaló que los libros de texto son fundamentales para mejorar la calidad de la educación, sin embargo es necesario de otros materiales y servicios pedagógicos(UNESCO, 2015). Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) son un instrumento esencial en el mundo actual; en las escuelas de nivel superior también se han incorporado el uso de las TIC, para asociar el desarrollo de un aprendizaje permanente y mejorar la calidad de los métodos pedagógicos, pues el uso de las TIC propicia una diversificación de contenidos educativos a través de entornos digitales de colaboración y también apoya en los problemas de espacios físicos (Castro Romero, 2015). Por lo que es importante la aplicación de las TIC en escuelas de educación superior, para exigir la creación de nuevos modelos de aprendizaje, procedimientos, estrategias de búsqueda, organización para el buen procesamiento y uso de la información (Ruiz, Martínez, & Sánchez, 2016); los cuales deben ser capaces de aumentar el desempeño académico en los estudiantes de todos los niveles.

Como consecuencia de la creación de modelos de aprendizaje y herramientas con implementación del uso de las TIC, se ha creado un concepto denominado “Aulas virtuales”, desde sus primeros estudios se consideran como un ambiente de aprendizaje y enseñanza, localizado con un sistema de comunicación mediante una computador, que tienen la ventaja de ya no estar construida de ladrillos y tablas, sino con espacios de trabajo y plataformas que están implementados mediante software (Hiltz, 1994). Con motivo de esta revolución tecnológica en la educación, esta investigación está dirigida a conocer si se están implementando las aulas virtuales en la educación superior en México, ya que la mayoría de las escuelas de educación superior actualmente en México laboran en una modalidad escolarizada. Por esta razón el objetivo de este trabajo es: analizar la importancia y uso que tienen las aulas virtuales en la educación superior, para que este análisis sirva como argumento para promover a las aulas virtuales como motor de desarrollo educativo en México en cualquiera de sus niveles educativos.

Educación en México

El Plan Nacional de Desarollo 2013-2018 indica que el Sistema Educativo Nacional atiende actualmente a 35.2 millones de niños y jóvenes, en la modalidad escolarizada y colaboran alrededor de 1.2 millones de profesores en casi 228 mil escuelas. La educación básica representa el 73.4% de la matrícula del sistema educativo. En los planteles de educación media superior se está atendiendo a 4.4 millones de jóvenes, correspondiendo el 91.3% a los bachilleratos y 8.7% a la educación profesional técnica y por cada 100 egresados del bachillerato, 85.9 se inscriben en alguna institución de educación superior. La matrícula de la educación superior es de 3.3 millones de alumnos. Hoy en día existe un desequilibrio entre la demanda de los jóvenes por ciertas carreras y las necesidades del sector productivo. De las carreras con mayor número de profesionistas ocupados (Ciencias Administrativas, Contaduría y Derecho,) un 49.6, 67.7 y 68% de los egresados no desempeña labores afines a sus estudios. En particular el rezago educativo en la población adulta mayor de 15 años es de 32.3 millones, que no han completado la educación básica, 15 millones de personas mayores de 18 años no han completado el bachillerato, requisito para acceder a mejores oportunidades de trabajo. Esta situación conlleva un alto costo económico, social, y humano, ya que se desaprovecha el recurso más importante del cual goza México hoy en día: una juventud que tiene el potencial de convertirse en el gran motor del desarrollo económico y social del país (Federal, 2013).

Uso de las TIC en México

Con respecto al uso del internet, los datos estadísticos que proporciona la Asociación Mexicana de Internet (AMIPCI) describe el perfil que tienen las personas quienes acceden al internet y se destaca: 1) la edad de los internautas, el cual tiene un rango de 13 a 55 años y representa el 85% de la muestra, 2) el tiempo diario promedio de conexión es de 7 horas y 14 minutos, 3) el lugar donde más frecuencia se hace uso del internet es el hogar seguido de “en cualquier lugar mediante un dispositivo móvil”, 4) el dispositivo más utilizado por los internautas es el Smartphone seguido de la laptop y computadora de sobremesa (AMIPCI, 2016). Con los datos proporcionados por la AMIPCI podemos asegurar que las aulas virtuales tienen una gran oportunidad para ser utilizadas por los estudiantes de cualquier nivel educativo ya que cuentan y hacen uso de la infrastructura necesaria para accesar al internet. Cabe mencionar que en México se tienen diferentes líneas de acción para garantizar el acceso y uso de las TIC, las cuales son propuestas por el Plan Nacional de Desarollo 2013-2018. Con relacion a las propuestas antes mencionadas se tienen las siguientes: crear una

 ISBN 978-607-8242-11-5

red nacional de centros comunitarios de capacitación y educación digital; promover mayor oferta de los servicios de telecomunicaciones, así como la inversión privada en el sector, con el que se puedan ofrecer servicios electrónicos avanzados que mejoren el valor agregado de las actividades productivas; continuar y ampliar la Campaña Nacional de Inclusión Digital; aumentar el uso del Internet mediante el desarrollo de nuevas redes de fibra óptica que permitan extender la cobertura a lo largo del territorio nacional; desarrollar e implementar la infraestructura espacial de banda ancha, incorporando nuevas tecnologías satelitales y propiciando la construcción de capacidades nacionales para las siguientes generaciones satelitales (Federal, 2013).

Problemáticas para el uso de las TIC en la población mexicana

Ahora bien, algunas personas no cuentan con los medios necesarios para el acceso a internet ni computadora, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) el 53% de los hogares no cuenta con internet, y solo el 45.6% de los hogares cuentan con computadora; la razón de su ausencia en los hogares se relaciona con su costo principalmente. Respecto de la conectividad por entidad federativa, Baja California Sur y Sonora son estados que tienen una mayor disponibilidad de conexión a internet mientas que en Tlaxcala, Oaxaca y Chiapas se presenta la menor disponibilidad de conexión (INEGI, 2017).

Aulas Virtuales

En lo concerniente a las aulas virtuales podemos afirmar que son sitios web especializados cuyas herramientas ayudan a la gestión de enseñanza-aprendizaje, se clasifican en semi-presencial o remota, sincrónica y asíncrona, funcionan bien como complemento de una clase presencial o para la educación a distancia debido a que ayuda a compartir con los alumnos el material de la clase, así como también recursos publicados en Internet como horarios e información extra al curso, además, promueve la comunicación entre los alumnos y el docente para compartir sus diversos puntos de vista. Otro de los beneficios que tienen el uso de las aulas virtuales es que los alumnos logran comunicarse aun fuera del horario de clase sin tener que concurrir a clases de forma presencial y llevan a cabo trabajos en grupo y de forma individual (Scagnoli, 2001; Wilfredo, 2014). En cuanto a las características esenciales de un aula virtual podemos mencionar: facilidad al profesor de presentar información y al estudiante de recibir los contenidos para la clase en un formato claro, fácil de distribuir y de acceder en cualquier momento y lugar, también permite el intercambio de ideas y experiencias, los estudiantes pueden experimentar de lo aprendido y transferir los conocimientos para la integración con otras disciplinas, también se puede evaluar los conocimientos adquiridos. En conclusión las aulas virtuales son plataformas seguras y confiables, permite el monitoreo de la presencia del alumno en la clase (Scagnoli, 2001).

Cabe mencionar que las aulas virtuales también cuentan con servicios los cuales pueden ser síncronos y asíncronos. Con los Servicios sincrónicos se puede recibir o enviar un mensaje, sin embargo, es necesario que las dos personas estén presentes en el mismo, como ejemplo podemos nombrar a la videoconferencia y el chat. Los servicios asincrónicos son aquellos que permiten la transmisión de un mensaje entre el emisor y el receptor sin que tengan que coincidir para interactuar en el mismo instante, algunos ejemplos de este servicio son: página web; e-mail y foros de discusión (Lara, 2002). En la actualidad existen diversas aulas virtuales en internet que implementan los servicios sincrónicos y asincrónicos por ejemplo Moodle, Schoology y Edmodo, cada una con características particulares, a continuación, se da un panorama general sobre estas plataformas web.

Moodle “es una plataforma de aprendizaje diseñado para proporcionar a los educadores, administradores y estudiantes con un único sistema robusto, seguro e integrado para crear ambientes de aprendizaje personalizados” (Moodle, 2017). *Schoology “e*s una propuesta para gestionar mejor el aprendizaje a través de la integración de herramientas digitales en la nube. Una plataforma que promete convertirse en la red social de la educación” (Schoology, 2017). *Edmodo “e*s una plataforma tecnológica, social, educativa y gratuita, que permite la comunicación entre los alumnos y los profesores en un entorno cerrado y privado a modo de microblogging, creado para su uso específico en educación. Proporciona al docente un espacio virtual privado en el que se pueden compartir mensajes, archivos, enlaces, calendario de aula, así como proponer tareas y actividades y gestionarlas” (Edmodo, 2017).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Estado del arte

En Venezuela, la Universidad Nacional Abierta es una de las pioneras en usar la herramienta tecnológica "Moddle" y confirman que poseen los conocimientos del aula virtual, sin embargo, la herramienta no es utilizada ni aprovechada de modo efectivo (García, 2016). Asimismo, en Argentina en la Universidad Nacional de Catamarca, también han utilizado por 9 años dicha plataforma en la modalidad B-Learning, lo cual les ha funcionado de forma exitosa (Rodríguez de Zar, Gallardo, & Quinteros, 2016). A diferencia de las universidades anteriores, la Universidad Católica Argentina Santa María de los Buenos Aires propuso la implementación de un sistema de evaluación de las prácticas de enseñanza desarrolladas en las aulas, lo cual permite implementar medios digitales a la enseñanza que pueden ser usadas como evaluadores de docentes, alumnos y programas académicos (Salinas, 2016). En ecuador la Universidad Católica de Cuenca utilizan la plataforma "Moodle" solamente para responder a consultas de los estudiantes y opinar sobre alguna actividad enviada; asimismo no es muy utilizada por falta de capacitación (Quintanilla, 2016). El uso de la plataforma "Moodle" permite una buena interacción con el estudiante además se adapta a modelos educativos cambiantes (Blanco, 2016). La plataforma Moodle ayuda también a mejorar cualitativamente el proceso de enseñanza y aprendizaje, además de permitir realizar consultas asincrónicas mediante foros (Minnaard, Pascal, Torres, & Frende, 2017).

Asimismo, el uso de portafolios electrónicos con soporte para contenidos grupales como blogs y cuadernos de bitácoras facilita el conocimiento al alumno y permite dar seguimiento al progreso del aprendizaje del grupo (Cabero Almenara, López Meneses, & Jaén Martínez, 2016); por otro lado se tiene que las aulas virtuales no solamente pueden ser usadas en la interacción con alumnos o para evaluar indicadores, sino que también puede ser una herramienta para la iteración de profesores (Alfaro & Zermeño, 2017); por lo que el contenido de las aulas virtuales debe ser a fin a la temática del curso(Aedo, R. F. Ramos, E. C. oledo, 2017).; con respecto al uso de los Learning Management Systems, para complementar las clases presenciales, son un modelo flexible que se puede adaptar a contextos diferentes (Silva, 2017).

METODOLOGÍA

La investigación es de tipo exploratoria y fue realizada en el mes de marzo en la Ciudad de México, dentro de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA) perteneciente al Instituto Politécnico Nacional que imparte los siguientes programas académicos: Licenciatura en Administración Industrial; Licenciatura en Ingeniería en Transporte; Licenciatura en Ingeniería en Informática; Licenciatura en Ciencias de la Informática y Licenciatura en Ingeniería Industrial. El instrumento utilizado para la recopilación de información fue una encuesta estructurada por 52 preguntas divididas en 12 secciones. Dichas preguntas tienen contenido acerca de diversos tipos de herramientas informáticas para apoyo a los estudiantes de licenciatura que actualmente cursan las carreras ofrecidas por la unidad.

La encuesta contempló variables cuantitativas como el tiempo (días). Este instrumento se aplicó a una muestra aleatoria de 428 alumnos de una población aproximada de 13,000 durante el ciclo escolar 2015-2016. La sección utilizada para el desarrollo de este trabajo fue "Aulas virtuales" la cual contenía las siguientes preguntas: ¿Qué tan seguido usas Moodle?; ¿Qué tan seguido usas Schoology?; ¿Qué tan seguido usas Edmondo? Posteriormente se pidió a los encuestados que eligieran el nivel de usabilidad que tienen dichas herramientas. Los datos fueron medidos y analizados por la escala del 0 al 7, donde 0 es nunca, 2 es 2 veces por semana, 3 es 3 veces por semana, 5 es 5 veces por semana y 7 es diario.

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de las preguntas aplicadas en la sección “aulas virtuales” de la encuesta.

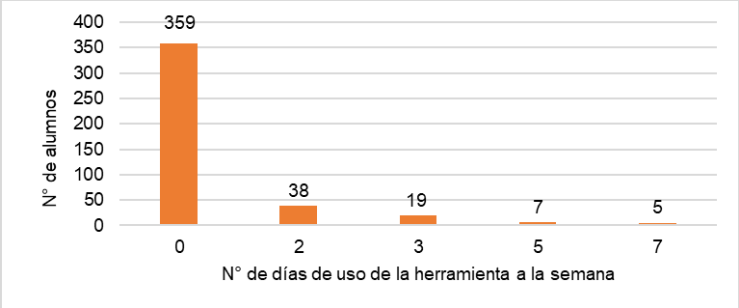


Fig. 1: Número de alumnos que usan el aula virtual Moodle.



Fig. 2: Número de alumnos que usan el aula virtual Schoology.

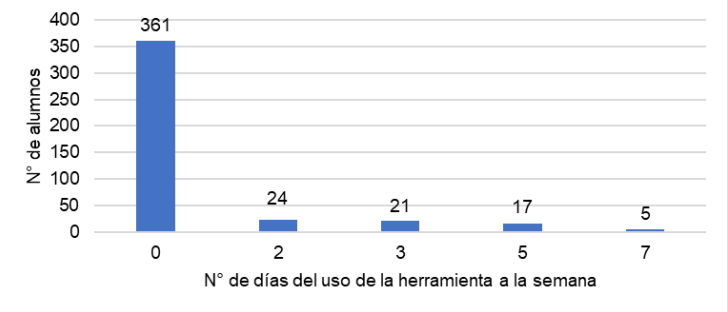


Fig. 3: Número de alumnos que usan el aula virtual Edmodo.

A continuación, se muestran diversos resultados de interés como la demanda académica, número de alumnos que cuentan con beca, el promedio de los estudiantes de nivel superior en UPIICSA y los alumnos que tienen materias reprobadas. Asimismo, en los resultados se encontró que el promedio académico de los encuestados es de 7.98.

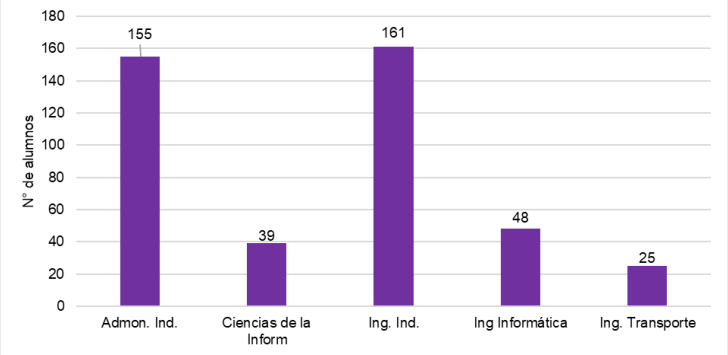


Fig. 4: Demanda académica en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA).

ISBN 978-607-8242-11-5



Fig. 5: Número de alumnos que cuentan con beca en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA).

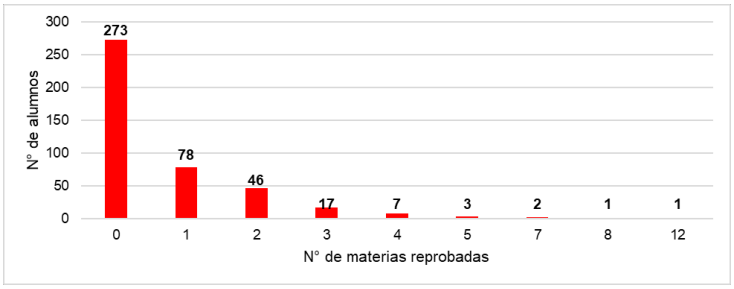


Fig. 6: Numero de materias reprobadas que tienen los alumnos en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA).

DISCUSIONES

En los resultados de las figuras 1,2 y 3 se aprecia que más del 90% de los alumnos no conocen las herramientas informáticas sobre aulas virtuales, lo cual afecta al rendimiento académico de los estudiantes y se coincide con los autores Padilla, Moreno & Hernández, 2015, quienes indican que la falta de experiencia en educación a distancia, así como el hábito de estar en un ambiente presencial de estudio y la falta de conocimiento en implementación de aulas virtuales son causas del poco uso de dicha tecnología, esto confirma que en México es difícil implementar el uso de aulas virtuales aunque no es imposible.

Los alumnos de UPIICSA en su mayoría no hacen uso de Moodle, Schoology y Edmodo que contienen servicios sincrónicos (Videoconferencia, Chat) y servicios asíncronos (Página web, E-mail: el correo electrónico, Foros de discusión). Si el estudiante de UPIICSA utilizara estos medios para aumentar su rendimiento académico se tendría un mejor desempeño en la casa de estudios debido a que el promedio actual de los estudiantes encuestados es de 7.98. El uso de sitios web especializados que cuenten con herramientas para la gestión de enseñanza aprendizaje podría generar buenos resultados para elevar el rendimiento académico de los estudiantes (Minnaard et al., 2017; Scagnoli, 2001).

Otro punto que es importante considerar, es el rezago educativo en la población adulta ya que se estima que alrededor de 15 millones de personas mayores de 18 años no han completado el bachillerato, esto nos da un punto de vista que el rezago educativo esta en todos los niveles académicos ya que como se observa en la figura 6, gran parte de los encuestados tienen materias reprobadas lo que podría en un futuro truncar sus estudios superiores.

De acuerdo con el INEGI casi dos de cada tres personas carecen de computadora, mientras que casi el 70 por ciento se declaró sin conexión a Internet, la principal razón para este fenómeno se relaciona con su costo. Este problema origina que el estudiante no pueda acceder a complementos de clase que ofrecen estas aulas virtuales. El estudio concuerda con el INEGI ya que como se observa en la gráfica 8 que la mayoría de estudiantes no cuentan con becas por lo que desafortunadamente no tienen ninguna ayuda para poder costear el acceso a las aulas virtuales

Los datos que nos ofrece AMIPCI (2016) menciona que las personas con acceso a internet tienen un tiempo promedio de conexión de 7 horas 14 minutos. Sin duda los jóvenes con estas oportunidades tienen el tiempo y el medio adecuado para hacer uso de las aulas virtuales sin embargo no lo hacen.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

Las aulas virtuales no son usadas por los estudiantes de UPIICSA y el promedio de los alumnos de esa unidad académica podría incrementarse si se hiciera uso de las aulas virtuales. Una de las causas que impiden al estudiante usar del internet, podría ser el costo que representa este servicio ya que pocos alumnos tienen el apoyo económico (becas) por parte de la escuela, como consecuencia los alumnos no pueden aprovechar el recurso para su propia educación y la utilización de diversas tecnologías.

Asimismo, los salones digitales en la educación superior apoyan a evitar el rezago educativo, pues los alumnos de UPIICSA presentan un porcentaje considerable de materias reprobadas y corren el riesgo de truncar sus estudios. Por lo que las universidades deberían implementar capacitación sobre el uso de aulas virtuales, para que puedan ser usadas por los alumnos, pues existen las aulas virtuales, pero no se usan. Para finalizar cabe mencionar que las aulas virtuales tienen elementos y recursos que pueden impulsar el desarrollo productivo del país al generar gente capacitada en diferentes áreas del conocimiento gracias a las metodologías que aplica para la enseñanza aprendizaje y su fácil acceso con el uso de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las facilidades que fueron otorgadas para la realización del presente trabajo al Instituto Politécnico Nacional – Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Proyecto SIP 20161046 LAS HABILIDADES INFORMÁTICAS DEL CAPITAL HUMANO COMO FUENTE DE CRECIMIENTO ECONÓMICO.

REFERENCIAS

Aedo, R. F. Ramos, E. C. oledo, R. Y. (2017). Gestión de Conocimiento Mediante el Uso de las Aulas Virtuales. *Universidad&Ciencia*, *3*(3), 1–12.

Alfaro, R. C. J., & Zermeño, M. G. G. (2017). Talleres Virtuales : una estrategia para el desarrollo profesional docente. *Revista de Investigación Educativa de La Escuela de Graduados En Educación*, *7*(4), 12–18.

AMIPCI. (2016). 12° Estudio sobre los hábitos de los usuarios de intenet en México 2016, 20.

Blanco, H. F. Q. (2016). Sistematización de Experiencias en la Integración de Aulas Virtuales para la Educación Universitaria a Distancia en el Estado Táchira. *Investigación Y Formación Pedagógica Revista Del CIEGC*, *3*, 86–102.

Cabero Almenara, J., López Meneses, E., & Jaén Martínez, A. (2016). Enseñanza., *5374*, 43–70.Recuperado de https://gredos.usal.es/jspui/handle/10366/129841

Castro Romero, O. (2015). Uso de los medios sociales como herramienta de aprendizaje en educación superior: análisis comparativo entre México y Corea del Sur. *Scielo- Sinéctica*, (44), 1–16.Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-109X2015000100012&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Edmodo. (2017). Acerca de Edmodo.Recuperado de https://www.edmodo.com/about

Federal, P. E. (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.Recuperado de http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Resource/205/1/images/Cap17.pdf

García, A. M. V. (2016). La plataforma Moodle y la facilitación de los aprendizajes, universidad nacional abierta, táchira, 141–170.

Hiltz, S. R. (1994). *The Virtual Classroom: Learning Without Limits Via Computer Networks*. Ablex Publishing Corporation.Recuperado de https://books.google.com.mx/books?id=A9J-svunvD0C

INEGI. (2017). Estadísticas a proposito del dia mundial del internet (17 de Mayo), 1–13.

Lara, L. R. (2002). Análisis de los recursos interactivos en las aulas virtuales. *Segundo Congreso Virtual "Integración Sin Barreras En El Siglo XXI."*

Minnaard, C., Pascal, G., Torres, Z., & Frende, F. (2017). Entorno Virtual de Aprendizaje en la Formación Estadística del Ingeniero : Nuevas experiencias pedagógicas en la Cátedra Probabilidad y Estadística de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora. *Revista Electrónica Sobre Tecnología, Educación Y Sociedad*, *4*(17).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Moodle. (2017). Acerca de Moodle.Recuperado de https://docs.moodle.org/all/es/Acerca_de_Moodle

Quintanilla, P. C. (2016). Herramientas tecnológicas de apoyo al aula virtual para el proceso formativo en asignaturas teórico - prácticas. *Virtualidad, Educación Y Ciencia*, *7*(12), 154–158.

Ruiz, J. A., Martínez, M., & Sánchez, M. de la L. (2016). El impacto de las TICs en la calidad de la educación superior . *Revista de Investigación En Ciencias Contables Y Administrativas*, *1*, 28–44.

Salinas, M. I. (2016). Gestión de la evaluación del desempeño docente en aulas virtuales de un proyecto de blended-learning. *Ciencia, Docencia Y Tecnología*, *28*(54).

Scagnoli, N. (2001). El aula virtual: usos y elementos que la componen, 1–8.Recuperado de http://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/2326

Schoology. (2017). About.Recuperado de https://www.schoology.com/about

Silva, J. (2017). Un modelo pedagógico virtual centrado en las E-actividades A virtual pedagogical model centered on E-activities. *RED. Revista de Educación a Distancia. Núm. Artic*, *53*(10), 31–3. https://doi.org/10.6018/red/53/10

UNESCO. (2005). *Hacia las sociedades del conocimiento*. *Editorial UNESCO*. https://doi.org/ISBN 92-3-304000-3

UNESCO. (2015). *La Educación para Todos, 2000-2015: logros y desafíos* (Primera Ed). United Nations Educational,Scientific and Cultural Organization.Recuperado de https://www.dropbox.com/s/jizaze602h5zjnv/GMR2015_FullReport_En.pdf?dl=0

Wilfredo, D. A. (2014). *Intervenciones pedagógicas con b-lerning (presencial - aulas virtuales):* . Editorial Dunken.Recuperado de https://books.google.com.mx/books?id=R3wZBAAAQBAJ

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo computacional experto para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud aplicando técnicas de análisis de redes sociales y minería de procesos

José Felipe Ramírez Pérez [1], Maylevis Morejón Valdés [1] y Vivian Estrada Sentí [3]
(1) Centro de Informática Médica, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba
(2) Dirección de Formación Postgraduada, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba
E-mail: jframirez@uci.cu; mmvaldes@uci.cu; vivian@uci.cu

Resumen

En la actualidad, el trabajo en equipo constituye un factor de vital importancia en el desarrollo de disímiles actividades. En el sector de la salud y en los servicios quirúrgicos existen estudios que avalan la importancia del trabajo en equipo como mecanismo determinante para aumentar el rendimiento y mejorar la seguridad del paciente. Con el progreso de la industria informática existen enfoques y herramientas que combinan la gestión de flujos de procesos de negocio con el análisis de redes sociales, lo cual permite inferir redes de interacción profesional y mejorar el proceso de toma de decisiones. Para el desarrollo de la investigación se utilizaron diversos métodos científicos, tales como el análisis documental, la entrevista, la encuesta, el criterio de expertos, la técnica Iadov para medir satisfacción y la experimentación. El objetivo de la presente investigación es desarrollar un modelo computacional experto para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud, aplicando técnicas de análisis de redes sociales y minería de procesos, que contribuya a mejorar la gestión de información como soporte para la toma de decisiones administrativas, en función de proveerle un servicio de calidad al paciente. Como resultado se obtiene una estrategia de gestión del conocimiento tácito y explícito, un procedimiento para la recomendación de los equipos de trabajo quirúrgico, una herramienta informática como instanciación del modelo e indicaciones metodológicas para la aplicación del modelo en sistemas de información en salud. El proceso de validación permitió constatar la pertinencia y aplicabilidad de la propuesta de solución, en función de disminuir las intervenciones quirúrgicas no satisfactorias, validado a partir de realización de experimentos en importantes hospitales cubanos.

Palabras claves: análisis de redes sociales, minería de procesos, toma de decisiones, trabajo en equipo, salud

Expert computational model for recommending of surgical work teams in health information systems applying techniques of social network analysis and process mining

Abstract

Currently the teamwork constitutes a vital importance factor in the development of dissimilar activities. Some studies in health sector and surgical services support the importance of teamwork as a determinant mechanism to enhance performance and to improve patient's safety. The progress of the Informatics industry has influenced in different approaches and tools that combine the business process flow management with the Social Network Analysis. These approaches allow us to infer professional interaction networks and improve the decision-making process. Several scientific methods are used for research development, such as document analysis, interviews, survey, expert's criteria, Iadov technique to measure satisfaction and experimentation. The aim of the research is to develop an expert computational model for recommending surgical work teams in health information systems, applying techniques of social network analysis and process mining, that it contributes to improve the information management like support for decision-making by administrative personnel, in order to provide a quality service to the patient. As a result, a tacit and explicit knowledge management strategy is obtained, a procedure for the recommendation of the surgical work teams, a computer tool as an instantiation of the model and methodological indications for the application of the model in health information systems. The validation process allows confirming the pertinence and applicability of the proposed solution, in order to reduce unsuccessful surgical interventions, validated by conducting experiments in important Cuban hospitals.

Keywords: *decision making, health, process mining, social network analysis, teamwork*

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Hoy es común afirmar que la capacidad de resolver problemas y de proponer soluciones en un equipo es siempre superior a la de una persona. Es por ello que los problemas complejos se pueden abordar y resolver más eficazmente cuando se hace de manera conjunta. Por tanto, el trabajo en equipo en la actualidad es una necesidad cada vez más inminente en todos los sectores de la sociedad, de ahí la creciente adopción del término trabajo interdisciplinario (Ander-Egg y Aguilar, 2001).

En el sector de la salud y propiamente en los servicios quirúrgicos existen investigaciones que avalan la importancia del trabajo en equipo (Hull y Sevdalis, 2015; Valentine et al., 2015). Ello se debe a que constituye un mecanismo determinante para aumentar el desempeño quirúrgico y mejorar la efectividad de las intervenciones quirúrgicas, de forma tal que conlleve a una mayor calidad de vida para el paciente (Mitchell y Flin, 2012; Forrellat, 2014). No obstante, las fallas en los equipos de trabajo continúan siendo uno de los elementos que más contribuyen a la proliferación de efectos adversos en los salones de cirugía. Además, subyacen en la raíz de los principales errores quirúrgicos a nivel mundial (Garrouste-Orgeas et al., 2012; Starmer et al., 2014). En estudios realizados se afirma que el error humano es la principal causa de efectos adversos en el proceso de atención médica y uno de los temas de mayor actualidad en las discusiones sobre calidad en los servicios sanitarios (García, 2013; Murray et al., 2013).

Según investigaciones realizadas en los EEUU, los errores quirúrgicos prevenibles, asociados al mal funcionamiento de los equipos de trabajo quirúrgico, causan anualmente entre 210 000 y 440 000 decesos (Hospital Safety Score, 2013), constituyendo la tercera causa de muerte en dicho país, con gastos superiores a los 225 billones de dólares (Yoon et al., 2014; Makary y Daniel, 2016). Además, según datos publicados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se calcula que, de los efectos adversos producidos en los hospitales, alrededor del 40% están relacionados con procedimientos quirúrgicos (García, 2013). Anualmente, una de cada diez personas sufre lesiones discapacitantes o muere por prácticas clínicas inseguras y en muchos países los gastos superan los 29 000 millones de dólares (Barón et al., 2015).

La adopción de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) en las instituciones médicas ha hecho posible el mejoramiento gradual de los procesos asistenciales en sentido general. Ofrecen mecanismos para aumentar la efectividad y eficiencia de la atención médica (Gonzales et al., 2014), las cuales permiten soportar sus procesos de negocio, posibilitando analizarlos y optimizarlos. Asimismo, el crecimiento exponencial de los datos y el desarrollo de técnicas para su análisis, a través de la denominada Big Data, ha conllevado a proveer un servicio de calidad cada vez mayor al paciente, así como a la reducción de costos y aumento de la productividad. (Mans et al., 2008). En este sentido, el Enfoque Basado en Procesos el mecanismo que hoy aporta mayores ventajas para el análisis del considerable volumen de datos derivado de los procesos asistenciales (van der Aalst, 2011; van Doremalen, 2012).

El Enfoque Basado en Procesos (ISO 9001, 2008) es un principio de gestión básico y fundamental para la obtención de resultados. Supone que “un resultado se alcanza más eficientemente cuando las actividades y los recursos se gestionan como un proceso”. Sin embargo, estos sistemas de información orientados a procesos que van implantándose y haciéndose fundamentales en todas las organizaciones (Dios et al., 2010), requieren un modelado explícito de los procesos de negocio, lo cual no es algo trivial ya que se necesita un amplio conocimiento de los mismos para modelarlos con la suficiente exactitud; es por ello que estos modelos de procesos suelen acabar representando más bien cómo debería llevarse a cabo el proceso que cómo se está llevando a cabo en realidad, constituyendo esta una de las principales fortalezas de la gestión por procesos.

La Gestión de Procesos de Negocio (BPM, por sus siglas en inglés) es la tecnología pionera y líder en esta área (Magliano et al., 2013). Constituye un conjunto de métodos, herramientas y tecnologías utilizadas para diseñar, representar, analizar y controlar procesos de negocio, combinando las tecnologías de la información con metodologías de proceso y gobierno. Es una colaboración entre personas de negocio y tecnólogos para fomentar procesos de negocio efectivos, ágiles y transparentes (Garimella et al., 2008). Para asistir la optimización del ciclo de vida de BPM es necesario contar con una tecnología específica que se encuentre centrada en el proceso y no en los datos como la mayoría de los enfoques tradicionales (Bose y van der Aalst, 2011), es por ello que los sistemas de información han retomado con fuerza la implementación de mecanismos para registrar la ejecución real de los procesos, tales como los registros de eventos, registros de trazas o bitácoras (Medeiros, 2006).

La Minería de Procesos es una disciplina de investigación relativamente joven. Su análisis se centra en descubrir, monitorear y mejorar los procesos reales de una organización a través de la extracción de conocimiento de los registros de eventos, registros de trazas o bitácoras (van der Aalst et al., 2011), posibilitando además entender cómo son ejecutados en realidad los procesos en el sistema (van Doremalen,

 ISBN 978-607-8242-11-5

2012; Mans et al., 2015). La Minería de procesos ayuda a identificar cuellos de botella, anticipar problemas, registrar violaciones de políticas, recomendar contramedidas y simplificar procesos de negocio (Rozinat, et al., 2008; Bratosin, 2011). Su aplicación en el sector de la salud constituye un enfoque moderno y recomendable, aportando excelentes e interesantes resultados, siendo aplicado en diversas áreas como emergencias (Orellana y Sánchez, 2014), cirugía (Dios et al., 2010), cuidados intensivos (Lybeshari, 2012), oncología y ginecología (Mans et al., 2008; van Doremalen, 2012) y urología (van Doremalen, 2012), entre otros.

En este sentido y aplicado particularmente a la selección de los equipos de trabajo, juega un papel primordial el Análisis de redes Sociales (ARS). El ARS es un área del conocimiento de la sociología que brinda una colección de métodos y técnicas de propósitos sociométricos para analizar redes sociales (Aguirre, 2011; Borgatti et al., 2011; De Nooy et al., 2011). Su fácil entendimiento y uso ha hecho posible su rápida expansión y adopción a nivel internacional (Kadushin, 2012). Como parte de la Minería de Procesos existe la Minería de Redes Sociales, la cual ofrece enfoques y herramientas que combinan los conceptos de gestión de flujos de trabajo con ARS, permitiendo la inferencia de redes de interacción social (van der Aalst y Song, 2004). Estudios demuestran que el ARS en el sector de la salud es un enfoque ampliamente utilizado y ha tenido resultados positivos en su aplicación para la conformación de equipos de trabajo más efectivos que mejoren la calidad de la atención (Meltzer et al., 2010), para mejorar la efectividad de los procesos de toma de decisiones (Chambers et al., 2012), para el entendimiento de las relaciones sociales entre individuos, constituyendo un enfoque innovador y relativamente reciente (Desikan et al., 2013) y para explorar el contexto y las situaciones que conducen a una asistencia sanitaria eficiente y eficaz (Wang et al., 2014).

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo computacional experto para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud, aplicando técnicas de análisis de redes sociales y minería de procesos, que contribuya a mejorar la gestión de información como soporte para la toma de decisiones administrativas. Con ello se impacta en una disminución de las intervenciones quirúrgicas no satisfactorias practicadas a los pacientes, en función de proveerle un servicio de calidad.

La estructura de la presente investigación es como sigue: a continuación, se abordan los materiales y métodos utilizados durante el desarrollo del modelo computacional experto, luego se procede a la presentación y discusión de los resultados y posteriormente se realiza el análisis de los resultados obtenidos. Por último, se presentan las conclusiones a las que se arribó en la investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio fue realizado en el periodo comprendido entre septiembre de 2014 a marzo de 2016, en ocho hospitales representativos de la atención secundaria y terciaria de Cuba, entre los que se destacan Hermanos Ameijeiras, Centro de Investigaciones Médico Quirúrgicas (CIMEQ), Instituto de Oncología y Radiobiología (INOR) y Centro Nacional de Cirugía de Mínimo Acceso (CNCMA) de La Habana, Gustavo Aldereguía Lima de Cienfuegos y el Cardiocentro de Villa Clara. Para la realización de la investigación, consistente en el desarrollo de un modelo computacional experto para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico, se aplicaron diversos métodos científicos como la entrevista, la encuesta, el grupo focal y la experimentación.

El desarrollo de la investigación estuvo compuesto por 4 fases, el estudio de los principales referentes teóricos, la realización de entrevistas y encuestas al personal asistencial de los servicios de cirugía y psicología de los citados hospitales, el desarrollo del modelo computacional experto y la validación del mismo a través de la experimentación y el criterio de expertos. La vinculación con el Hospital Provincial Dr. Gustavo Aldereguía Lima de Cienfuegos resultó de vital importancia, así como el intercambio con los especialistas de la salud y el escenario quirúrgico para ajustar el modelo desarrollado. En todo momento cooperaron, tanto en las entrevistas llevadas a cabo como en los grupos focales realizados para ajustar los aspectos teóricos medulares de la investigación.

Métodos científicos aplicados (Hernández et al., 2014):

- La entrevista: Se aplicó al personal psicológico y quirúrgico con vistas a obtener la información necesaria respecto a cómo son realizados hoy los procesos de selección de personal según las tendencias mundiales y cómo se realiza en los centros de salud cubanos.
- La encuesta: Mediante su aplicación al personal asistencial, se obtuvo mediciones cuantitativas de los elementos cualitativos y cuantitativos abordados que constituyen los datos que fundamentan el modelo.
- El análisis documental: Se empleó para el estudio de los referentes teóricos de la investigación. Se realizó consulta de libros y de artículos científicos digitales, con predominio de bibliografía en idioma inglés y de los últimos 5 años.

 ISBN 978-607-8242-11-5

- Grupo focal: Es empleado para el proceso de debate e interacción de participantes en torno a temáticas focalizadas, en función de obtener detalles que beneficien el proceso de desarrollo del modelo computacional.
- Experimentación: Mediante un experimento se pudo validar el impacto del modelo en la disminución de las intervenciones quirúrgicas no satisfactorias practicadas a los pacientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un servicio quirúrgico tiene un conjunto P de m pacientes: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}, m > 0, m \in \mathbb{N}$. Además, tiene un conjunto E de n especialistas (cirujanos, anestesiólogos y enfermeros): $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}, n > 0, n \in \mathbb{N}$.

Cada paciente tiene información registrada (IP) como sus datos personales e historia clínica, siendo q la cantidad de atributos que puede tener. La información se representa como se muestra a continuación:

$$IP_i = \{p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,q}\}, q > 0, q \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq m \quad (1)$$

Cada uno de los especialistas tiene información registrada (IE), la cual es heterogénea y de distintos dominios, se agrupan en información general (IG), información quirúrgica (IQ) e información de rasgos personológicos (IRP): $IE = \{IG, IQ, IRP\}$

La IG está relacionada esencialmente con su especialidad y servicio quirúrgico, siendo r la cantidad de atributos que puede tener: $IG = \{g_1, g_2, \dots, g_r\}, r > 0, r \in \mathbb{N}$

La IQ contiene las intervenciones en que ha participado, los procedimientos quirúrgicos realizados, las evaluaciones obtenidas en su actividad quirúrgica, las regiones anatómicas operadas y las complejidades quirúrgicas realizadas, siendo s la cantidad de atributos que puede tener: $IQ = \{k_1, k_2, \dots, k_s\}, s > 0, s \in \mathbb{N}$

La información de rasgos personológicos recoge el resultado de un conjunto de pruebas aplicadas, que lo caracterizan en función de la actividad que realiza, en términos de habilidades técnicas, no técnicas y psicológicas. Cada rasgo se compone del resultado de las pruebas que más se ajustan al mismo, siendo u la cantidad de atributos que puede tener. Su dominio se expresa en las variables lingüísticas Muy alto, Alto y Medio: $IRP = \{t_1, t_2, \dots, t_u\}, u > 0, u \in \mathbb{N}$

Por tanto, en función de la información anterior, el especialista e_j tendría un conjunto de atributos que lo caracterizan en el entorno hospitalario. La información se representa como se muestra a continuación:

$$IE_j = \{g_1, g_2, \dots, g_r, k_1, k_2, \dots, k_s, t_1, t_2, \dots, t_u\} \quad (2)$$

Con los datos primarios recogidos, para la selección de los equipos de trabajo quirúrgico (Z) se tiene en cuenta como condiciones la complejidad y la región anatómica de la intervención quirúrgica a realizar, así como la cantidad de especialistas por rol exigido por el jefe de servicio. Los requerimientos o premisas de la recomendación son conformar un equipo con especialistas que tengan habilidades técnicas y no técnicas, desempeño profesional y características psicológicas acordes con la intervención quirúrgica a realizar, así como una carga de trabajo normal y sinergia en sus relaciones como equipo, de acuerdo a las condiciones dadas. La información se representa como se muestra a continuación:

$$Z_v^l = \left\{{e_1}_v^l, {e_2}_v^l, \dots, {e_f}_v^l\right\}; l, v, f > 0;\ l, v, f \in \mathbb{N} \quad (3)$$

En la anterior representación l constituye las condiciones necesarias dadas a cumplir por un especialista, v son los requerimientos exigidos a un especialista para conformar el equipo de trabajo, de acuerdo a las condiciones, y f es la cantidad de especialistas por rol exigido por el jefe de servicio.

Por último, el equipo de trabajo quirúrgico recomendado constituye la salida del modelo, la información se representa como se muestra a continuación:

$$ETQ = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}, n > 0, n \in \mathbb{N} \quad (4)$$

El modelo computacional experto desarrollado (MOSES) para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud, aplicando técnicas de Análisis de Redes Sociales y Minería de procesos, se muestra en la figura 1.

ISBN 978-607-8242-11-5

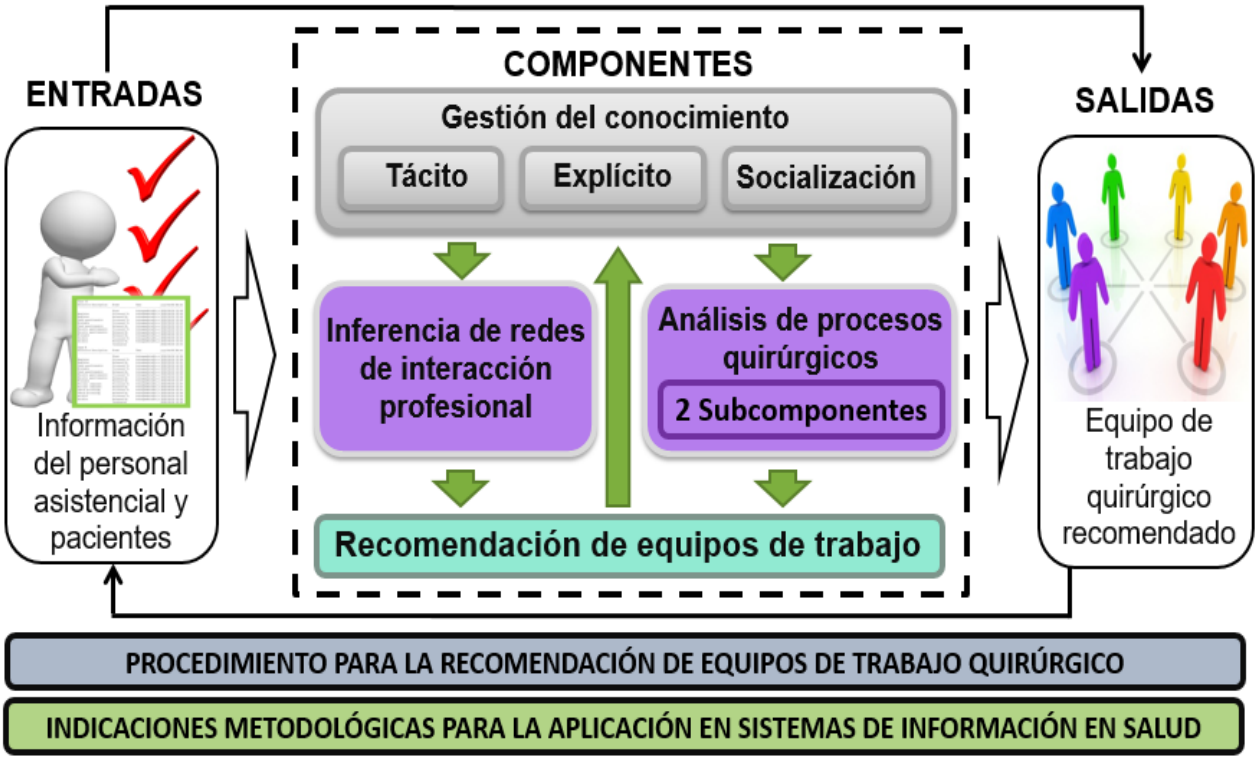


Figura 1. Modelo computacional experto para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud (MOSES). Fuente: Elaboración propia.

Los principios que sustentan la construcción del modelo son:

a) Modelación de la información a partir de una red de interacción profesional, permitiendo la representación de habilidades técnicas y no técnicas, desempeño profesional, características psicológicas y carga de trabajo del personal asistencial, así como características del trabajo en equipo como la sinergia.
b) Utilización de medidas de ponderación y variables lingüísticas para garantizar la flexibilidad y entendimiento del modelo en la recomendación realizada.
c) Utilización de métodos con estrategia voraz para la determinación de soluciones óptimas en la selección de los equipos de trabajo.
d) La recomendación se expresa de forma gráfica, mediante la señalización de los nodos y aristas, de manera intuitiva para un mayor entendimiento por parte de los decisores, no expertos en las nuevas tecnologías.

Los componentes del modelo son:

1. **Gestión del conocimiento:** Es un proceso fundamental en el modelo. En él se almacenan los datos primarios del sistema de información en salud y se gestiona todo el conocimiento relacionado con la gestión de procedimientos quirúrgicos y psicológicos, los cuales posibilitan la posterior recomendación de los equipos de trabajo quirúrgico.
2. **Inferencia de redes de interacción profesional:** En él se aplican un conjunto de complementos del ARS, así como métricas de la Minería de Procesos para la inferencia de redes de interacción profesional. Para ello se combinan enfoques orientados a datos y a procesos, dentro del sistema de información, que contribuya a una obtención integral de la información necesaria.
3. **Análisis de procesos quirúrgicos:** Mediante técnicas de minería de redes sociales y de procesos se analizan los procesos de atención al paciente quirúrgico, para mejorar la gestión de información y toma de decisiones El componente está formado por dos subcomponentes, el primero encargado de extraer la información en registros de eventos y el segundo analiza la información de los registros de eventos y produce modelos de procesos.
4. **Recomendación de equipos de trabajo:** A partir de la aplicación de algoritmos de optimización, como son los algoritmos voraces, se recomiendan los equipos de trabajo, teniendo en cuenta la inferencia antes realizada. A partir de la aplicación de un conjunto de condicionales, asociadas a las necesidades asistenciales, se brinda apoyo a la toma de decisiones, recomendando el equipo más eficiente e integrado.

Las entradas del modelo lo constituyen la información de los especialistas de la salud y pacientes, según representaciones (1) y (2). Como salida se obtiene el equipo de trabajo quirúrgico recomendado según representación (4). En cada componente la información sufre transformaciones sustanciales. La entrada de cada componente constituye la salida del componente que le precede.

ISBN 978-607-8242-11-5

Como parte del modelo se implementa un procedimiento para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico, el cual consta de cuatro fases, las que se corresponden con los componentes del modelo y tiene como objetivo guiar su aplicación y empleo. En el esquema de la Figura 2 se muestran las fases, con una breve descripción.

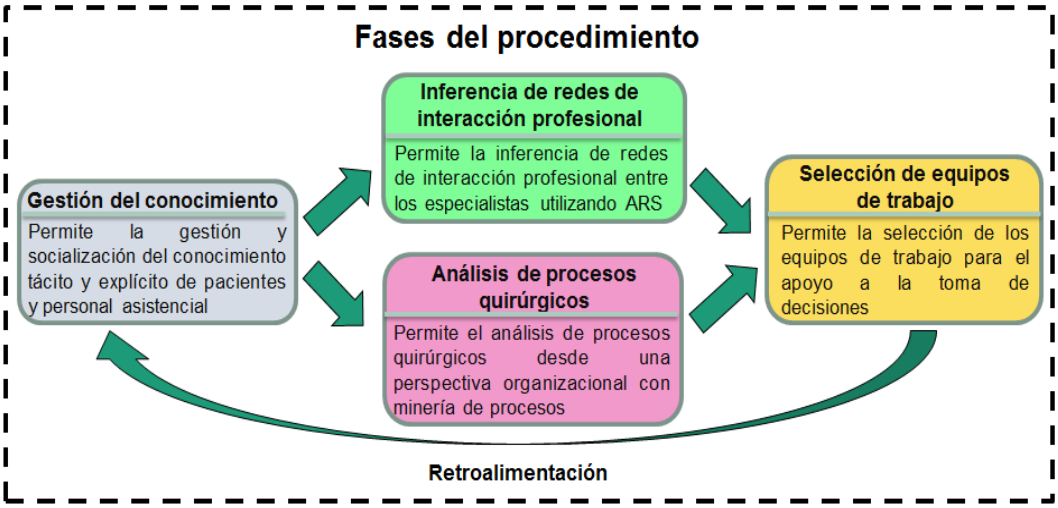


Figura 2. Fases del procedimiento para la selección de equipos de trabajo quirúrgico con MOSES. Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis de los modelos de implementación propuestos en la literatura, se plantean las indicaciones metodológicas para la aplicación del modelo MOSES en sistemas de información en salud. Unido al procedimiento, ofrecen una guía para la implantación del modelo, a partir de su instanciación en una herramienta informática. En la Figura 3 se muestran las etapas propuestas en las Indicaciones metodológicas.

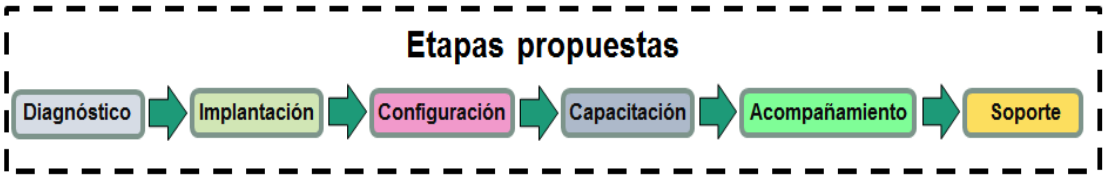


Figura 3. Etapas de la implementación del modelo. Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para validar el modelo computacional experto desarrollado fue empleada una muestra aleatoria compuesta por 60 personas distribuidas en un 50% de especialistas y residentes de cirugía, un 26% de especialistas y residentes de anestesiología y un 24% de enfermeros anestesiólogos. Ello representó una muestra representativa de cada uno de los servicios de cirugía general de los hospitales participantes. Hubo en todo momento disposición por parte del personal en colaborar con la investigación realizada. En la Tabla 1 se presenta el resumen estadístico de los resultados arrojados luego de la aplicación del experimento.

Tabla 1. Resumen estadístico de la aplicación del cuasi experimento. Fuente: elaboración propia.

Meses	Intervenciones quirúrgicas efectuadas (Servicio de Cirugía General) Año 2015					
	Grupo de Control			Grupo Experimental		
	Total	Satisfactorias	No Satisfactorias	Total	Satisfactorias	No Satisfactorias
Enero	195	187	8	202	199	3
Febrero	194	184	10	187	185	2
Marzo	191	185	6	194	194	0
Abril	171	166	5	181	177	4
Mayo	190	181	9	185	183	2
Junio	189	180	9	197	194	3
Julio	191	185	6	144	142	2
Agosto	136	129	7	158	155	3
Septiembre	206	203	3	201	200	1

ISBN 978-607-8242-11-5

Octubre	222	217	5	183	183	0
Noviembre	202	194	8	196	193	3
Diciembre	173	160	13	186	184	2
Total	**2260**	**2171**	**89**	**2214**	**2189**	**25**

Para evaluar la posibilidad de comparar los datos entre el grupo de control y el experimental, se aplicó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para comprobar que los datos se ajustan a una distribución Normal, donde el valor $p = 0.170054$. El valor $p > 0.05$ de la prueba indica que no existe problema con la normalidad de los datos. La garantía de normalidad se puede observar en el histograma que se muestra en la Figura 4:

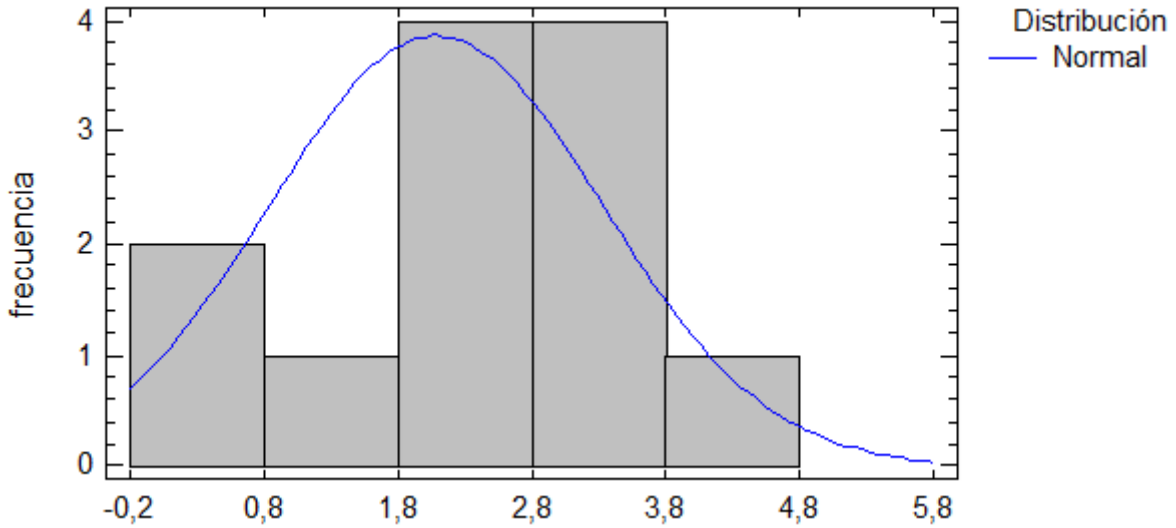


Figura 4. Histograma que representa la normalidad de las muestras analizadas. Fuente: elaboración propia.

En consecuencia, se aplicó la prueba estadística paramétrica t-student, con el objetivo de comparar dos muestras, a partir de sus medias, para comprobar si los resultados son estadísticamente diferentes. Se aplicó a la cantidad de intervenciones no satisfactorias, donde el valor $p = 0.00002275$. Como el valor $p < 0.5$ se rechaza la H_0 con un 95% de confianza, lo que indica que hay diferencia significativa entre las medias de las muestras analizadas.

Por tanto, el análisis estadístico anterior permite concluir que el modelo MOSES mejora la efectividad en la selección de equipos de trabajo quirúrgico, si bien se evidencia una disminución en la ocurrencia de intervenciones quirúrgicas no satisfactorias. Además, la afirmación anterior se soporta en que, con la aplicación del modelo, se disminuyó hasta tres horas el tiempo empleado para la realización de tales procedimientos. Ello se debe a la complejidad que presupone la gestión de tantas variables para una correcta, confiable y rápida toma de decisiones. Además, se realizó por medio de una herramienta informática, ahorrando recursos humanos y materiales.

Análisis del impacto social y factibilidad económica de la propuesta

El modelo es de utilidad para el proceso de gestión hospitalaria, posibilitando mayor efectividad en la toma de decisiones. La utilización del modelo y su instanciación en la herramienta informática permitirán el ahorro de tiempo y de cuantiosos recursos humanos y materiales empleados diariamente. Según González et al. (2015), la salud en Cuba es gratuita; sin embargo, la atención médica genera un costo que a partir de las características de cada enfermedad y la individualidad de cada paciente varía significativamente. Es por ello que el modelo influye económicamente en varios indicadores hospitalarios, como se muestra a continuación:

- Disminución de la estadía hospitalaria
- Disminución de la estadía de ingreso en el hogar
- Disminución de los tiempos de atención médica
- Minimización de los costos quirúrgicos
- Aprovechamiento eficiente de recursos hospitalarios
- Devolución a la sociedad de un paciente sano para su reincorporarse al trabajo

Premisas para el análisis de factibilidad económica:

- Se analiza el costo por enfermedad, particularizando los análisis a partir de las características propias de cada dolencia.

ISBN 978-607-8242-11-5

- La estancia hospitalaria prolongada, como principal indicador a seguir, genera efectos negativos en el sistema de salud como: aumento en los costos, deficiente accesibilidad a los servicios de hospitalización, saturación de las urgencias y riesgos de eventos adversos.

En la Tabla 2 se realiza un análisis económico del ahorro que implicaría la aplicación del modelo MOSES en sistemas de información en salud. Para ello se analizan los indicadores definidos de acuerdo a una operación con procedimiento quirúrgico: ictus isquémico agudo. Los valores en color rojo constituyen las deviaciones promedio que se registran al existir problemas que afecten la calidad de la atención prestada al paciente, en las cuales el modelo desarrollado tiene una implicación positiva.

Tabla 2. Análisis de la implicación económica del modelo MOSES. Fuente: elaboración propia.

Indicadores	**Procedimiento quirúrgico: ictus isquémico agudo**		
	Costo por persona	**Cantidad de días afectados**	**Implicación del modelo**
Estadía hospitalaria	Estadía ≤ 9 días ($268) **Estadía > 9 días ($648)** **Terapia intensiva: $704** **Terapia intermedia: $473**	7 días **10 días**	Selección de equipos de trabajo que contribuyan a disminuir la ocurrencia de intervenciones quirúrgicas no satisfactorias, disminuyendo la estadía hospitalaria
Estadía (ingreso en el hogar)	(Egreso precoz) Costo diario **$43**	3 días **7 días**	A partir de un resultado satisfactorio de la intervención quirúrgica, el proceso de recuperación en el hogar será menor
Tiempo en el proceso de atención	-	10 días	Seguimiento al proceso de atención, controlando y mejorando los tiempos de ejecución de las actividades asistenciales
Costos quirúrgicos (materiales, medicamentos y medios diagnósticos)	$5340 **$8021**	-	La ocurrencia cada vez menor de intervenciones quirúrgicas no satisfactorias (accidentes quirúrgicos, complicaciones transoperatorias y postoperatorias) posibilitaría la no utilización de material adicionales
Aprovechamiento de recursos	-	-	A partir de una correcta planificación de los materiales quirúrgicos de acuerdo al tipo de operación y complejidad
Inserción a la sociedad	-	10-14 días **un mes**	Si el proceso de recuperación en el hogar es menor, la inserción del trabajador a la sociedad será en un periodo de tiempo más corto
Costo total	**$5608 / $9674**	-	-

CONCLUSIONES

El Análisis de Redes Sociales en el sector de la salud constituye una tecnología novedosa, relativamente reciente y ampliamente utilizada por los resultados que arroja y su fácil comprensión por personal no experto. Contiene un gran número de herramientas con propósitos sociométricos, posibilitando inferir redes de interacción social, así como analizar tendencias y comportamientos. Mediante su utilización se pueden conformar equipos de trabajo más efectivos que mejoren la calidad de la atención médica. Su enfoque innovador posibilita explorar el contexto y las situaciones que conducen a una asistencia sanitaria eficiente y eficaz.

Asimismo, la minería de procesos ofrece diversas técnicas y herramientas capaces de extraer conocimiento de los registros de eventos hospitalarios, ampliamente disponibles en los sistemas de información, con el propósito de descubrir, monitorear y mejorar los procesos asistenciales. En Salud constituye un enfoque moderno y recomendable. Su utilización en áreas como emergencias, cirugía, oncología, cuidados intensivos, ginecología y urología, así como los excelentes resultados para la toma de decisiones, dan prueba de ello.

ISBN 978-607-8242-11-5

El modelo computacional experto desarrollado para la recomendación de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud, aplicando técnicas de Análisis de Redes Sociales y Minería de Procesos, contribuye a mejorar la gestión de información como soporte para la toma de decisiones administrativas. Se validó su impacto en la disminución de las intervenciones quirúrgicas no satisfactorias practicadas a los pacientes, en función de proveerle un servicio de calidad

REFERENCIAS

(Aguirre, 2011) Aguirre, J. L. Introducción al análisis de redes sociales. Documentos de Trabajo del Centro Interdisciplinario para el Estudio de Políticas Públicas, vol. 82. (2011).

(Ander-Egg y Aguilar, 2001) Ander-Egg, E. y Aguilar, M. El trabajo en equipo. Ed. Progreso. México (2001).

(Barón et al., 2015) Barón, C. M., Blandón, A. C. y Lucumí, A. C. Impacto de la política de seguridad del paciente en personal de urgencias del Hospital Tomas Uribe ESE del año 2014 y primer trimestre 2015. Trabajo de grado de especialización en administración de la salud. Colombia (2015).

(Borgatti y Halgin, 2011) Borgatti, S. P. y Halgin, D. S. (2011). On network theory. Organization Science, 22(5), 1168-1181.

(Bose y van der Aalst, 2011) Bose, R.P. y van der Aalst, W.M.P. Process Diagnostics Using Trace Alignment: Opportunities, Issues, and Challenges. Eindhoven University of Technology, the Netherlands (2011).

(Bratosin, 2011) Bratosin, C. Grid Architecture for Distributed Process Mining. Doctor Thesis. Eindhoven University of Technology, the Netherlands. 2011.

(Chambers et al., 2012) Chambers, D., Wilson, P., Thompson, C. y Harden, M. Social network analysis in healthcare settings: a systematic scoping review. PloS one, 7(8), e41911 (2012).

(De Nooy et al., 2011) De Nooy, W., Mrvar, A. y Batagelj, V. Exploratory social network analysis with Pajek (Vol. 27). Cambridge University Press. ISBN: 9780521174800 (2011).

(Desikan, et al., 2013) DESIKAN, PRASANNA, et al. Using social network analysis to identify key players within clinical teams for improving pain management. En Healthcare Informatics (ICHI) IEEE (2013).

(Dios et al., 2010) Dios, M. A., Framiñán, J. M., Domínguez, R. y León, J. M. Modelado y análisis de un proceso quirúrgico mediante técnicas de minería de procesos. Cuarta Conferencia Internacional de Ingeniería Industrial y Gestión Industrial. XIV Congreso de Ingeniería de Organización, Donostia- San Sebastián (2010).

(Forrellat, 2014) Forrellat Barrios, M. Calidad en los servicios de salud: un reto ineludible. Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Hemoterapia, 30(2), 179-183 (2014).

(García, 2013) García, G. L. Seguridad clínica en el paciente quirúrgico. Grado de enfermería. Universidad de Cantabria, España (2013).

(Garimella et al., 2008) Garimella, K., Lees, M. y Williams, B. Introducción a BPM para Dummies. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc. ISBN: 978-0-470-37359-0 (2008).

(Garrouste-Orgeas et al., 2012) Garrouste-Orgeas, M., Philippart, F., Bruel, C., Max, A., Lau, N. y Misset, B. Overview of medical errors and adverse events. Annals of intensive care, 2(1), 2 (2012).

(Gonzales et al., 2014) Gonzales, D., Solís, W., & Zurita, B. Mesa Redonda: Enfoques y Concepciones de la Calidad en Salud. In Anales de la Facultad de Medicina (Vol. 58, No. 1, pp. 20-28) (2014).

(Hernández et al., 2014) Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. McGraw-Hill Education. México. ISBN: 1456223968.

(Hospital Safety Score, 2013) Hospital Safety Score. Hospital Errors are the Third Leading Cause of Death in U.S. [En línea]. (2013). Disponible en: http://www.hospitalsafetyscore.org/newsroom/display/hospitalerrors-thirdleading-causeofdeathinus-improvementstooslow.

(Hull y Sevdalis, 2015) Hull, L. y Sevdalis, N. Teamwork and safety in surgery. Revista Colombiana de Anestesiología, 43(1), 3-6 (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

(Kadushin, 2012) Kadushin, C. Understanding social networks: Theories, concepts, and findings. Oxford University Press. New Kork. ISBN: 978-0-19-537947-1 (2012).

(Lybeshari, 2012) Lybeshari, E. Process mining in Intensive Care Unit Data. Master Thesis. Eindhoven University of Technology, the Netherlands (2012).

(Magliano et al., 2013) Magliano, V. M.; Bazán, P., Martínez, J. Análisis metodológico para la utilización de Process Mining como tecnología de optimización y respaldo de la implementación de procesos de negocio bajo el marco de BPM. XV Taller de Investigadores en Ciencias de la Computación. Argentina (2013).

(Makary y Daniel, 2016) Makary, M. A. y Daniel, M. Medical error—the third leading cause of death in the US. BMJ, 353, i2139 (2016).

(Mans et al., 2008) Mans, R.S., Schonenberg, M.H., Song, M., van der Aalst, W.M.P. Process Mining in Healthcare a Case Study. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands (2008).

(Mans et al., 2015) Mans, R., van der Aalst, W., y Vanwersch, R. J. Process Mining in Healthcare: Evaluating and Exploiting Operational Healthcare Processes. Heidelberg: Springer. Eindhoven. The Netherlands (2015).

(McKee y Healy, 2002) McKee, M. y Healy, J. Hospitals in a Changing Europe. In J. Figueras, M. et al. Saltman, editors, European Observatory on Health Care Systems. Open University Press. Buckingham (2002).

(Medeiros, 2006) Medeiros, A. K. A. d. Genetic Process Mining. Eindhoven University of Technology, the Netherlands. ISBN 978-90-386-0785-6 (2006).

(Meltzer, et al., 2010) MELTZER, DAVID, et al. Exploring the use of social network methods in designing healthcare quality improvement teams. Social science & medicine (2010).

(Mitchell y Flin, 2012) Mitchell, M. L. y Flin, R. (Eds.). Safer Surgery: Analysing Behaviour in the Operating Theatre. Ashgate Publishing, Ltd. Burlington. ISBN: 978-1-4094-8604-6 (2012).

(Murray et al., 2013) Murray, C. J., Abraham, J., Ali, M. K., Alvarado, M. et al. The state of US health, 1990-2010: burden of diseases, injuries, and risk factors. Jama, 310(6), 591-606 (2013).

(Orellana y Sánchez, 2014) Orellana, A. y Sánchez, Y. Minería de Procesos en salud. Caso de Estudio: modelado de los procesos del área de Emergencias. Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014). July 22 - 24, 2014 Guayaquil, Ecuador (2014).

(Rozinat et al., 2009) Rozinat, A., Mans, R. S., Song, M. y van der Aalst, W. M. Discovering simulation models. Information Systems, 34(3), 305-327 (2009).

(Starmer et al., 2014) Starmer, A. J., Spector, N. D. y Srivastava, R. Changes in medical errors after implementation of a handoff program. New England Journal of Medicine, 371(19), 1803-1812 (2014).

(Valentine et al., 2015) Valentine, M. A., Nembhard, I. M. y Edmondson, A. C. Measuring teamwork in health care settings: A review of survey instruments. Medical care, 53(4), e16-e30 (2015).

(van der Aalst y Song, 2004) van der Aalst, W.M.P. y Song, M. Mining Social Networks: Uncovering Interaction Patterns in Business Processes. Eindhoven University of Technology, the Netherlands (2004).

(van der Aalst et al., 2011) van der Aalst, W.M.P., Adriansyah, A. et al. Process Mining Manifesto. BPM 2011 Workshops proceedings, Lecture Notes in Business Information Processing, Springer-Verlag (2011).

(van Doremalen, 2012) van Doremalen, B. Process Mining in Healthcare Systems: An Evaluation and Refinement of a Methodology. Netherlands: Eindhoven University of Technology (2012).

(Wang et al., 2014) WANG, FEI, et al. Application of network analysis on healthcare. En Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM), IEEE/ACM International Conference on. IEEE (2014).

(Yoon et al., 2014) Yoon, P. W., Bastian, B., Anderson, R. N., Collins, J. L., Jaffe, H. W. y Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Potentially preventable deaths from the five leading causes of death--United States, 2008-2010. MMWR Morb Mortal Wkly Rep, 63(17), 369-74 (2014).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Impacto y Aprovechamiento de las TIC dentro de la Educación Superior

María F. Alcibar[1], Anderson Monroy[1], Martha Jiménez [2]
(1) Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA).
(2) Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA), Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.
E-mail: fernandaalhe@gmail.com

RESUMEN

El uso de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) se ha incrementado paulatinamente dentro de los distintos ámbitos de nuestra vida cotidiana, la educación no es la excepción, es por ello que el objetivo de la investigación es medir el aprovechamiento y uso de las distintas tecnologías para fines académicos en los estudiantes de educación superior. Se aplicó una encuesta semiestructurada sobre el uso de las TIC para el desarrollo de actividades académicas en la Ciudad de México en el Instituto Politécnico Nacional dentro de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, donde se pudo observar que los estudiantes de dicha institución usan diversas herramientas informáticas por lo menos una vez a la semana como medio de consulta para la realización de tareas escolares, lo cual se puede ver reflejado en la obtención de nuevos conocimientos y habilidades. Se concluye que los aspectos que influyen de forma positiva para realizar tareas a través del uso del internet son: la computadora, la forma amigable y divertida de hacer las tareas, el uso de las redes sociales para chatear, el uso del IPad, el uso de la computadora en la escuela y la interacción de las redes sociales para interactuar con profesores. Sin embargo, los videos como pasatiempo influyen de forma negativa en la realización de tareas con el uso del internet.

PALABRA CLAVE

TIC, educación superior, redes sociales

ABSTRACT

The use of Information and Communication Technologies (ICT) has gradually increased within the different areas of our daily lives, education is not the exception, that is why the objective of the research is to measure the use of different technologies for academic purposes in higher education students. A semi-structured survey was conducted on the use of ICT for the development of academic activities in Mexico City at the Instituto Politécnico Nacional within the Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, where it was observed that the students of said institution use various computer tools at least once a week as a means of consulting for school tasks, which can be reflected in the acquisition of new knowledge and skills. It is concluded that the aspects that positively influence to perform tasks through the use of the internet are: the computer, the friendly and fun way to do the tasks, the use of social networks to chat, the use of IPad, the use Of the computer in the school and the interaction of social networks to interact with teachers. However, videos as a hobby negatively influence the performance of tasks with the use of internet.

KEY WORDS

ICT, higer education, social networks

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Es evidente que el impacto de las Tecnologías de información y Comunicación (TIC) han generado un gran impacto en todos los ámbitos de la sociedad, es por ello que la presente investigación aborda el tema dentro de la educación superior y el efecto que tiene en México, se muestra la importancia del uso del internet y la computadora, así como el papel elemental que tiene dentro del desarrollo de tareas escolares, lo cual se refleja en el rendimiento escolar. El estudio de las TIC es de gran importancia puesto que dichas tecnologías permiten la potencialización del desarrollo de capacidades de auto-aprendizaje (Lozano, Moreno, Solórzano y González, 2016), nuevas competencias y habilidades que permiten a los alumnos aumentar sus conocimientos adquiridos dentro de las aulas.

La investigación se llevó a cabo con el objetivo de observar el aprovechamiento de las TIC y su impacto que tiene dentro de la educación superior, para conocer la opinión sobre la utilidad de distintas herramientas tecnológicas, así como la frecuencia de su uso para fines escolares y su vínculo entre su uso y el desarrollo escolar de los estudiantes para realizar tareas con el uso del internet. Se realizó una investigación exploratoria dentro de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA) perteneciente al Instituto Politécnico Nacional, debido a que esta escuela es de carácter interdisciplinario, pues tiene programas de estudio de ingeniería y del área social; lo cual permite conocer el uso de las herramientas informáticas en distintas áreas de conocimiento, y el impacto que puede tener sobre estas áreas, se aplicó una encuesta semiestructurada con variables de tipo cualitativo, los datos se analizaron de forma descriptiva, con dicho estudio se pretende conocer el uso que los alumnos hacen de las diferentes TIC a las que tienen acceso, así como su influencia dentro del desempeño escolar en cuanto a realizar las tareas académicas con el uso del internet.

México y las TIC en la educación

Hoy en día, gracias a la tecnología que se ha desarrollado paulatinamente y su utilización en distintos ámbitos de nuestras vidas, ha permitido la posibilidad de favorecer y facilitar distintos procesos; dentro de la educación el uso de TIC de igual manera a través de los años se han utilizado e incorporado de formas variadas con el objetivo de mejorar los procesos de aprendizaje y enseñanza de los estudiantes que en un futuro a mediano plazo se incorporarán al mercado laboral y serán personas activas económicamente, por lo que es preciso la mejora continua de los conocimientos obtenidos para ser capital humano más capacitado.

En general, la enseñanza universitaria se desarrolla a través de cátedras presenciales desarrollando la bibliografía de las distintas asignaturas que se tienen y al finalizar, suele aplicarse evaluaciones que permiten observar el grado del aprendizaje adquirido por los alumnos (Ausín, Abella, Delgado y Hortigüela, 2016); sin embargo hoy en día gracias a la incorporación de las TIC existen diversos programas educativos que permiten a los alumnos tomar clases en línea que generan nuevas oportunidades para las personas que no tienen la posibilidad de asistir a un aula, volviéndose así estudiantes más autónomos en el proceso de aprendizaje.

En los últimos años, de acuerdo a la UNESCO (2014), América Latina es uno de los lugares más proactivos del mundo con relación a la integración de las TIC en la educación que permite la inclusión social, la democratización, así como la reducción de la brecha digital existente.

La UNESCO menciona distintas políticas de integración de las TIC en la educación entre los que se encuentran los laboratorios donde los equipos son escasos, las aulas móviles y el modelo 1 a 1 donde se proveen dispositivos a cada persona para su uso en las aulas con el fin de reducir la brecha digital y la deserción escolar. De igual manera la UNICEF (2013) menciona que la incorporación de las TIC permite que los jóvenes adquieran habilidades y competencias reduciendo así la brecha digital entre grupos sociales, mejorando la educación y maximizando los logros académicos.

Para el caso particular de México, la UNICEF (2013) menciona los programas realizados en el gobierno mexicano resaltando la creación de portales educativos y contenidos digitales no solamente enfocados a los alumnos, sino también a docentes, y otros agentes educativos. Cabe añadir, que el gobierno mexicano señala en el Plan Nacional de Desarrollo algunas estrategias para lograr una educación de calidad y se menciona que hoy en día al tener a la mano a una gran cantidad de información debe de incrementarse la inversión en tecnología, así como la vinculación entre universidades, centros de investigación y el sector privado (Federal, 2013)

A través del programa “México conectado” de acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) (2015) se menciona que se ofrece conexión a internet de forma gratuita en distintos lugares públicos como lo son universidades, centros de investigación y bibliotecas permitiendo así el intercambio de información de forma rápida, creando una herramienta para transportar aprendizaje a lugares apartados. Actualmente la SCT se encuentra trabajando en distintos programas que permite a la población en general tener acceso a internet

 ISBN 978-607-8242-11-5

como lo garantiza el artículo sexto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos sobre el acceso a las TIC y telecomunicaciones (de Diputados, 2012). En el caso de la educación superior, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2017) recientemente informó sobre la creación de un programa llamado "Red Nacional para la Investigación Científica, Tecnológica y la Educación (Nicté)" que permitirá la conexión de instituciones de educación superior y de investigación con la comunidad del conocimiento de forma mundial.

Como resultado de lo mencionado anteriormente, se puede observar que el uso de las TIC no solamente es aplicado en distintos países sino también en México se han seguido dichas pautas para la creación de programas sociales que permitan el uso de herramientas tecnológicas dentro de las universidades permitiendo así, generar cambios importantes en la modernización de procesos educativos (Vásquez y Torres, 2016).

Las TIC y la educación superior

De acuerdo con lo mencionado con anterioridad a saber de la importancia que tienen las TIC dentro de la educación y el creciente uso dentro de esta esfera social, demanda a los profesores, alumnos e instituciones en general a reajustar los procesos con el fin de transformarlos e innovarlos. Dentro de la educación es de suma importancia el uso de las TIC puesto que ayuda a los estudiantes a desarrollar distintas competencias que pueden ser utilizadas dentro y fuera del aula. De acuerdo con Pérez y Pino (2017) la tecnología es parte importante del proceso formativo básico de la educación superior; los profesores y estudiantes universitarios deben investigar y así hacerse partícipes en los procesos de innovación, permitiendo así la formación de alumnos más autónomos, capaces de consultar distintas fuentes de información, formando criterios y nuevos conocimientos que le permitirán incrementar su desempeño académico.

El uso progresivo de las TIC dentro de las universidades de acuerdo con Colmenares (2015) ofrecen la mejora de los procesos involucrados dentro de la enseñanza-aprendizaje dando la oportunidad de convertir cualquier lugar como un entorno potencial para aprender, rompiendo así las barreras de tiempo-espacio que permiten organizar y administrar tiempos entre los interesados, ha creado un nuevo tipo de relación entre los profesores y alumnos con el fin de comunicarse correctamente sin sobrepasar los límites de espacio o tiempo. Las TIC dentro de la educación son una potencia que permite el desarrollo del aprendizaje de los estudiantes; El uso de dispositivos móviles para el aprendizaje motiva a los alumnos a desarrollar la exploración, el trabajo en equipo, el pensamiento crítico y reflexivo (Basantes, Naranjo, Gallegos y Benítez, 2017), es por ello que la afinidad creada entre las TIC y los estudiantes universitarios los ha llevado a adquirir distintos dispositivos tecnológicos, a capacitarse y a implementarlos en sus distintas actividades dentro de la escuela y su vida profesional (Casillas, Ramírez y Ortega, 2016).

Tal como lo menciona García, Guerrero y Granados (2015), las TIC dentro de la educación aportan y funcionan como fuentes de información, así como canales de distribución, procesamiento de datos con el fin de contribuir a la facilitación de los procesos educativos. La utilización de las TIC permite que la educación se transforme de manera positiva puesto que propician la adquisición de aprendizaje gracias a los entornos de investigación y contacto directo (Del Vasto, 2015) es por ello que de acuerdo a Salazar y Flores (2016) La implementación de las TIC en los salones de clase modifica el proceso educativo, influyendo de alguna manera en la forma en la que los profesores se comunican con sus alumnos creando así un medio de información y apoyo para la enseñanza, para los docentes es una herramienta importante de consulta mientras que para los alumnos es una fuente de información y apoyo para el aprendizaje.

Asimismo, las TIC en el entorno académico es un proceso que requiere una evaluación constante de su impacto con el fin de optimizar su uso (Ávila-Fajardo y Erazo, 2011) que permite a las instituciones universitarias asociarlo con el mejoramiento de la calidad educativa, la productividad y la vida profesional posterior de los egresados (Vásquez y Ramírez, 2016), además que la virtualización y avances tecnológicos constantes permiten que las TIC se mantengan como un campo en constante actualización y aprovechamiento por parte de las instituciones educativas de nivel superior (Núñez, 2016).

Con respecto a los alumnos, el uso de las TIC tanto dentro como fuera de las universidades permite a los estudiantes mantener un constante aprendizaje puesto que desarrollan habilidades de búsqueda de información, análisis, estructuración; son capaces de resolver problemas y tomar decisiones (Vásquez y Torres, 2016), dicho de otra manera, los alumnos son capaces de adquirir distintas habilidades que le permitirán lograr un aprendizaje significativo al tener a la mano distinto tipo de materiales tanto informativos como visuales que hará personas más autodidactas, capaces de aplicar el pensamiento crítico y trabajar en equipo.

ISBN 978-607-8242-11-5

El uso del internet y la educación superior

En lo que concierne al uso del internet dentro de la educación, es una herramienta que se ha ido incorporando paulatinamente dentro de las aulas escolares de todos los niveles educativos, sin duda alguna, el uso del internet dentro de la era de la información en la educación superior, permite que la virtualización del sistema educativo ofrezca a los estudiantes la capacidad de crear aprendizajes competitivos a través de recursos electrónicos, creando una comunicación continua a través del ordenador. Al ampliar su uso dentro de las universidades, la cobertura educativa se ve beneficiada y la brecha digital se reduce entre los institutos de educación superior (Tapia, Ávila y Paz, 2016)

La importancia del uso del internet entre los estudiantes en la educación superior, se ha vuelto una herramienta indispensable para la comunicación y acceso ilimitada de información, teniendo así distintas herramientas y fuentes de estudios, así mismo el poseer una computadora, es un requisito indispensable para la educación superior (Linne, 2015). Al hacer uso de la red internet dentro de las universidades, crea espacios competitivos donde se potencializa el aprendizaje continuo, lo que se verá reflejado en el incremento de la calidad de la educación y habilidades profesionales que los estudiantes obtendrán dado a la gran gama de información a la cual se tiene acceso, creando así nuevos espacios de estudios y utilización del pensamiento crítico para la recopilación de información oportuna.

Así mismo gracias a la implementación de redes comunicacionales en la educación superior, ha sido posible la creación de espacios digitales que permite abarcar a nuevos alumnos gracias a la educación en línea, que conlleva a mejorar e incrementar la calidad y cobertura de la educación, desarrollando nuevos profesionistas capacitados para su introducción al mercado laboral. Al navegar por internet, los alumnos tienen la posibilidad de encontrar infinidad de información a cerca de un mismo tema, por lo que los estudiantes se vuelven usuarios críticos para el desarrollo de estrategias que permitan la organización y selección de información a partir de un juicio. Los estudiantes entran a la red con el fin de nutrir y contestar dudas surgidas en el aula que les permite interactuar con el mundo en general y no tener solamente a los docentes como fuente de consulta y conocimientos.

Cabe añadir que el internet permite a los alumnos desarrollar la capacidad de decidir que tanto y cuando quiere aprender de forma abierta y flexible adecuándolo así a las necesidades e intereses que tengan los estudiantes, en adición, la comunicación entre alumnos y docentes es más amplia, creando así un espacio mayor para realizar consultas, dudas, organizar y planificar trabajos que permitan el desarrollo de habilidades sociales, escolares y profesionales.

Rendimiento académico en la educación superior

Como consecuencia de la incorporación de distintas herramientas tecnológicas dentro de la educación, los alumnos tienen la capacidad de aprender de diferentes maneras y a ritmos desiguales, sin embargo el papel del rendimiento académico dentro de los estudios es aun así, una forma de medir los procesos de aprendizaje de los alumnos de acuerdo a los estándares que se establecen, por lo cual es importante saber el significado del rendimiento académico y la importancia que este tiene dentro de la educación, de acuerdo a Borgobello y Roselli (2016) el rendimiento académico se refiere a la capacidad que tienen los alumnos para aprobar las asignaturas a través de múltiples sistemas de evaluación, que permite a los profesores medir el conocimiento adquirido por los estudiantes, así como su aplicación del mismo.

La relación del rendimiento académico y el uso de las TIC son numerosas, algunas subjetivas creadas por los estudiantes y otras con medidas objetivas que son proporcionadas por los entornos virtuales en los cuales se desarrollan (Borgobello y Roselli, 2016). El buen uso de las TIC dentro de los centros universitarios, por parte de docentes y alumnos permite alcanzar una constante Innovación de las clases, así como la mejora de la docencia ofertada, que ayuda a los estudiantes al incremento del rendimiento académico y su nivel profesional. (Olea, Villacís y Muñoz, 2016; García, 2016)

Las TIC juegan un papel indispensable en el proceso de aprendizaje por la facilidad de manejo existente puesto que superan las dificultades espacio-temporales, promueven ambientes cooperativos dentro de entornos digitales; Al utilizarse las tecnologías dentro de la educación, los alumnos optimizan su nivel de conocimientos y el rendimiento académico progresa, viéndose reflejado en mayores y mejores calificaciones (Lozano, 2016; González, Tovilla, Juárez y López, 2016) que tienen impacto con la calidad del conocimiento adquirido y su aplicación misma en la vida profesional.

ISBN 978-607-8242-11-5

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación, es de tipo exploratoria, cuantitativa y cualitativa; Dicha investigación fue realizada en el 2016 en la Ciudad de México dentro del Instituto Politécnico Nacional en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA) donde se imparten distintos programas educativos entre los que se encuentran: Administración Industrial; Ingeniería Industrial; Ingeniería Informática; Ciencias de la Informática; Ingeniería en Transporte. La población estudiantil de la unidad es de 13,000 alumnos aproximadamente, de la cual fue tomada una muestra representativa de 235 estudiantes de los distintos programas educativos de nivel licenciatura.

Para el desarrollo de la investigación fue utilizada una encuesta semiestructurada que consta de 28 preguntas divididas en 4 distintas secciones acerca del uso de las TIC entre las que se encuentran: actitud hacia las computadoras; uso de las TIC como entretenimiento; disponibilidad de TIC; uso de las TIC para la labor académica, utilizando variables cuantitativas como el tiempo medidas a través de una escala del 0 al 7, donde 0 es nunca, 2 es 2 veces por semana, 3 es 3 veces por semana, 5 es 5 veces por semana y 7 es diario y cualitativas como la percepción de los estudiantes sobre la utilidad de distintas tecnologías aplicadas en la educación. Los datos obtenidos fueron analizados primero de forma descriptiva para observar el uso de las diversas TIC en la educación y el rendimiento académico de los estudiantes.

Después de la aplicación del cuestionario, con los datos obtenidos se realizó un modelo de regresión lineal múltiple a través del método de mínimos cuadrados ordinarios, mismo que incluye las variables descritas en la figura 1. Asimismo, se presenta en la ecuación 1, las variables del modelo teniendo como variable dependiente la utilidad del internet para elaborar tareas y el resto son variables independientes.

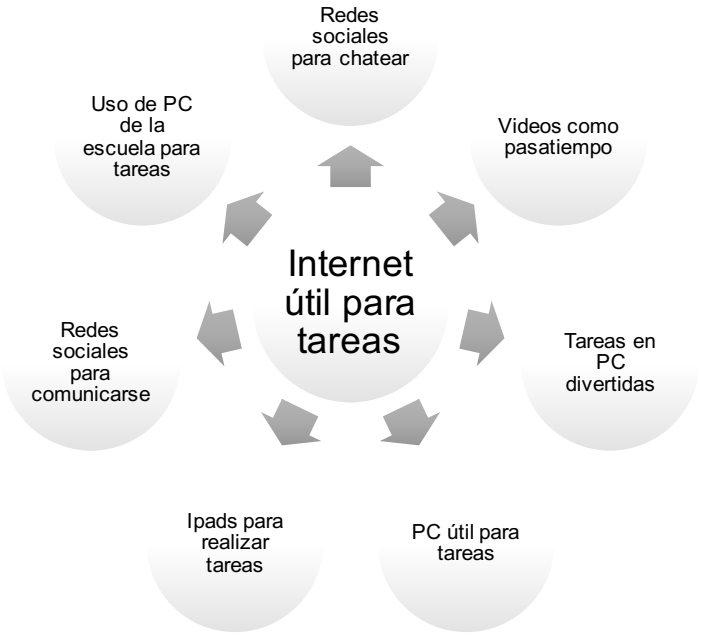


Fig. 1: variables que influyen en la utilidad del internet para realizar tareas escolares en los estudiantes universitarios.

$$InterTar = \beta_0 + \beta_1 Pu + \beta_2 Pt + \beta_3 Vp + \beta_4 Rs + \beta_5 It + \beta_6 Pe + \beta_7 Rc \quad (1)$$

Dónde: *InterTar*= Internet como recurso de gran utilidad para la búsqueda de información para las tareas; *Pu*=Computadora útil para tareas escolares; *Pt*=Tareas en computadoras divertidas; *Vp*= Videos de internet como pasatiempo; *Rs*= Redes sociales para chatear; *It*= Ipad ocupada para realizar tareas; *Pe*= Uso del equipo de cómputo de la escuela para tareas escolares; *Rc*= Redes sociales como forma de comunicación dentro del ámbito escolar con profesores y compañeros. A continuación, se presentan los resultados encontrados con dichas variables representados en la Tabla 1.

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS

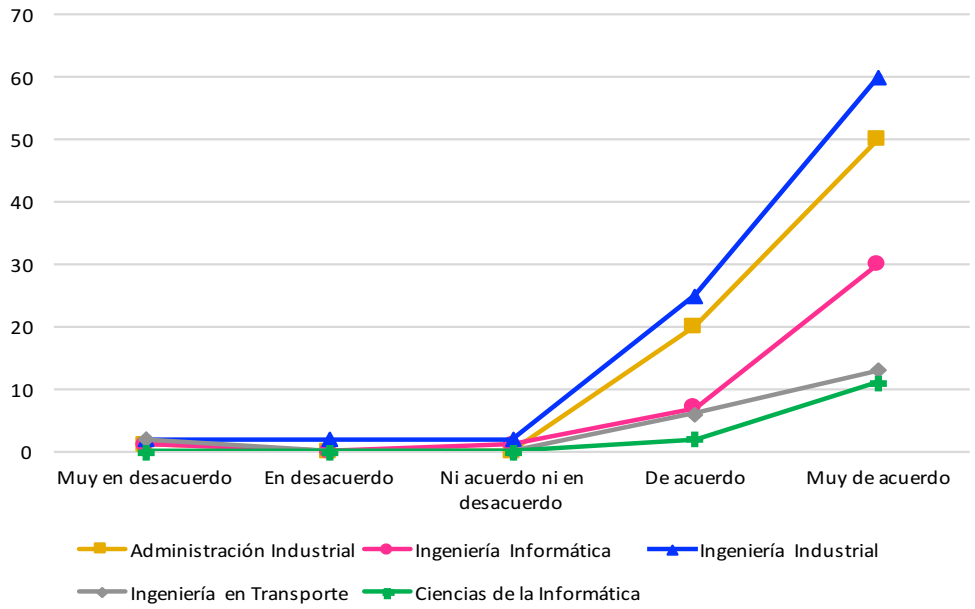


Fig. 2: Utilidad de la computadora para tareas escolares de acuerdo a los distintos programas educativos

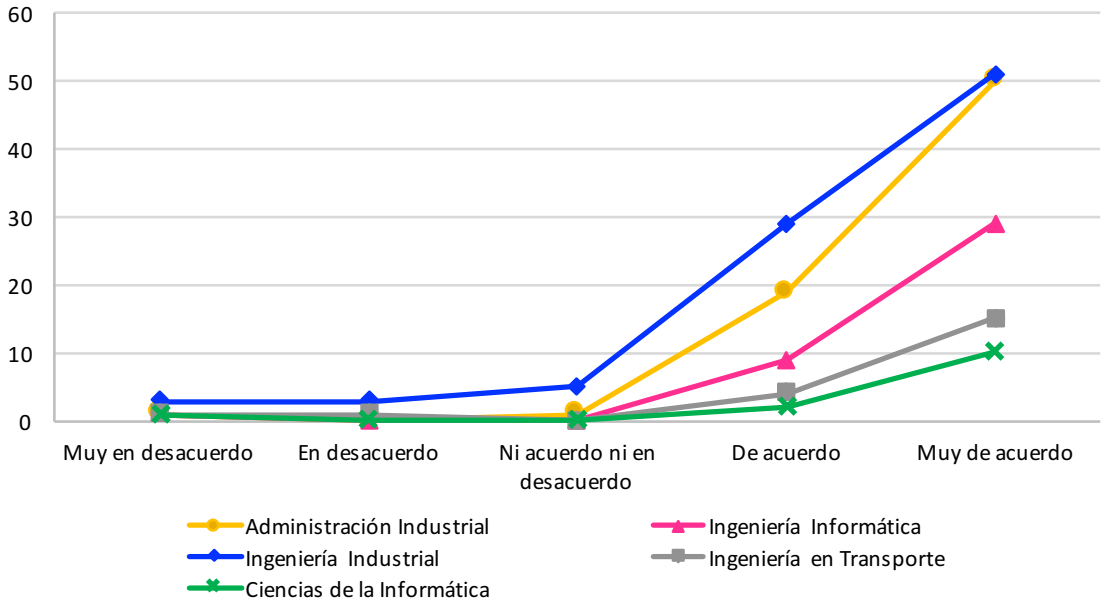


Fig. 3: Utilidad del internet para tareas escolares de acuerdo a los distintos programas educativos

ISBN 978-607-8242-11-5

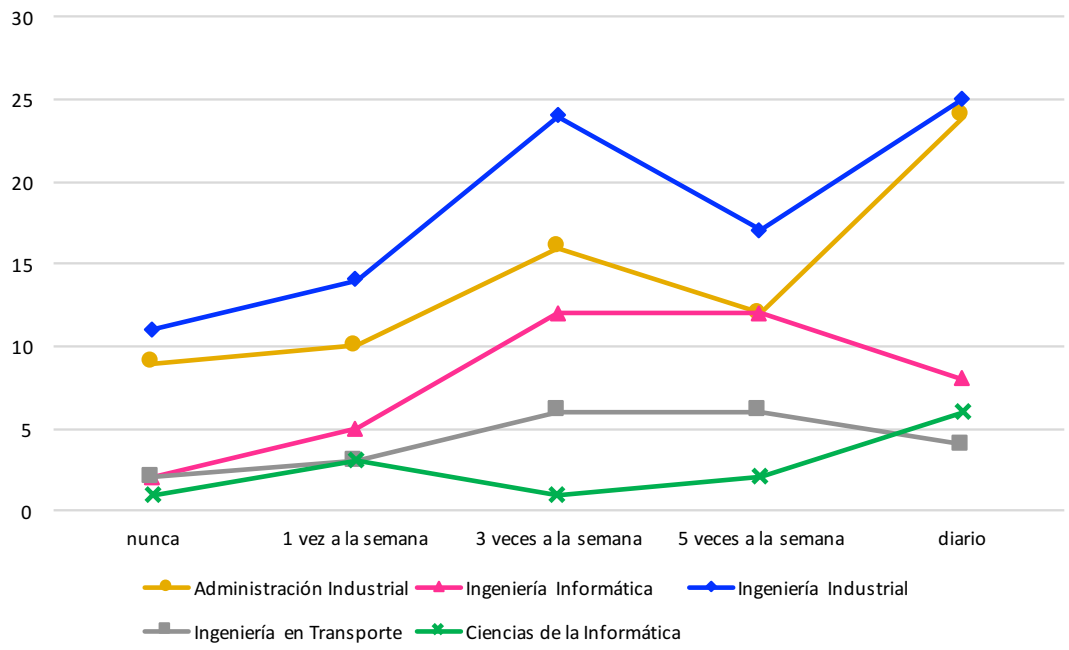


Fig. 4: Días que usan el internet para tareas escolares a la semana de acuerdo a los distintos programas educativos

Se estimó el modelo el cual se representa en una ecuación 1, y se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros estimados por el método de mínimos cuadrados ordinarios, coeficientes de determinación y el error estándar.

	Coeficiente	*Desv. Típica*	*Estadístico t*	*Valor p*	
const	0.9070	0.2564	3.5	0.0005	***
PcUtilTareas (Pu)	0.6508	0.0582	11.1	<0.0001	***
TareasPcDivertido (Pt)	0.2118	0.0483	43.8	<0.0001	***
VideoInternPasatiempo (Vp)	-0.0306	0.0185	-16.5	0.0989	*
RedesSoPaChatear (Rs)	0.0321	0.0190	16.8	0.0936	*
IpadTareas (It)	0.0331	0.0170	19.4	0.0534	*
PcEscuelaTareas (Pe)	0.0341	0.0168	20.2	0.0438	**
RedesSocComunicaCompaAeProfe(Rc)	0.0311	0.0195	15.9	0.0912	*
R^2	0.7635				
R_a^2	0.7495				
Valor p (de F)	5.34E-36				

$$InterTar = 0.9070 + 0.6508Pu + 0.2118Pt - 0.0306Vp + 0.0321Rs + 0.0331It + 0.0341Pe + 0.0311Rc \quad (2)$$

En la tabla 1 se percibe la validez del modelo con una R_a^2 y un valor *p* aceptables, además de que los valores estadísticos *t* son mayores o cercanos al valor 2 y los valores *p* menores a 0.010, por lo cual se puede asegurar que los valores estimados de la regresión previamente obtenidos en el modelo influyen en la realización de tareas a través de la búsqueda de información en internet. En la ecuación 2 se puede el internet es una herramienta de gran utilidad para la búsqueda de información para tareas escolares, así mismo las redes sociales, los equipos de cómputo de las escuelas y la comunicación entre alumnos y profesores por medio de redes sociales influyen positivamente, sin embargo, se observa también que ver videos como pasatiempo influye negativamente en la realización de tareas escolares.

ISBN 978-607-8242-11-5

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de la encuesta realizada, se puede observar que sin duda alguna que el uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación se incrementan paulatinamente dentro de la educación superior, de acuerdo con la la figura 2 se muestra la utilidad que las Computadoras Personales (PC) tienen para la realización de tareas escolares, la mayoría de los estudiantes encuestados sostienen que los ordenadores tienen un gran impacto en la realización de proyectos, por lo que de acuerdo con Linne (2015) puede afirmarse el requisito indispensable de poseer una PC para fines académicos dentro de la educación superior, con el fin de desarrollar las actividades escolares y tener acceso a un sinfín de información que permitirá el desarrollo de habilidades y competencias en los alumnos universitarios.

En la figura 3 se puede atisbar que de igual forma los estudiantes de los distintos programas académicos que ofrece la universidad de estudio, están de acuerdo que el internet es una herramienta de gran utilidad para realizar actividades académicas, y se tiene acceso de acuerdo con la SCT (2015) en distintos puntos públicos a lo largo del país así mismo Tapia, Ávila y Paz (2016) y Linne (2016) reiteran la importancia de su uso que conlleva a la creación de aprendizajes competitivos a través de los recursos a los que se tiene acceso, incrementa la comunicación entre profesores y alumnos y da paso a la consulta de diversas fuentes que permiten la autonomía en el proceso de aprendizaje así como su fortalecimiento.

En la figura 4 se pueden observar que los resultados obtenidos complementan a los descritos anteriormente, puesto que puede apreciarse que la mayoría de los estudiantes utilizan el internet por lo menos una vez a la semana con fines académicos, creando así espacios digitales dentro de la educación superior e incrementando el uso de las TIC que es confirmado por Pérez y Pino (2017), Colmenares (2015), Basantes, Naranjo, Gallegos y Benítez (2017) y Casillas, Ramírez y Ortega (2016) quienes opinan que la implementación de las TIC en los procesos de enseñanza y aprendizaje crea nuevos entornos para desarrollar habilidades a través de distintos dispositivos, que despierta la inquietud por explorar e implementar su uso en las actividades escolares.

Así mismo y tomando en consideración el modelo presentado de forma numérica en la ecuación 2, se puede apreciar que efectivamente las TIC han ido incursionando en el ámbito educativo, siendo hoy en día, herramientas de gran utilidad para los estudiantes, tal es el caso del internet, dada a la gran cantidad de información a la que se tiene acceso, los alumnos universitarios ocupan dicha herramienta para la búsqueda de datos específicos para la realización de tareas y proyectos escolares, influyendo así en la creación de nuevos conocimientos; la autonomía del proceso de aprendizaje; la calidad de la educación; el desarrollo de nuevas habilidades específicas, lo cual se ve reflejado en el aumento considerable del rendimiento académico de los estudiantes.

CONCLUSIONES

La computadora y el internet son útiles para realizar las tareas escolares, en todas las áreas incluyendo las de administración, ingeniería e informática; pues es usado hoy por varias áreas del conocimiento. Los aspectos que influyen de forma positiva para realizar tareas a través del uso del internet son: la computadora, la forma amigable y divertida de hacer las tareas, el uso de las redes sociales para chatear, el uso del Ipad, el uso de la computadora en la escuela y la interacción de las redes sociales para interactuar con profesores. Sin embargo, hay que hacer un buen uso de la tecnología, pues los videos como pasatiempo influyen de forma negativa en la realización de tareas con el uso del internet. Esto es punto importante, pues hay que buscar las formas para que existan video educativos que puedan ser un pasatiempo para los alumnos.

Se puede concluir que, al conocer los resultados generales de la encuesta aplicada, se reitera que el uso de tecnologías dentro de la educación superior permite a las universidades incrementar la calidad y disminuir la brecha digital existente, es por ello que con base en los resultados es posible la creación de diversas estrategias puesto que se han expuesto diversas áreas de oportunidad dentro de la universidad, por lo que es posible crear programas y asignaturas que implementen las TIC con el fin de desarrollar nuevas habilidades en los estudiantes y alumnos que tendrá un efecto positivo dentro del rendimiento académico de los estudiantes, así mismo, dicho conocimiento será de gran utilidad no solamente dentro del aula sino también para su aplicación en el ámbito laboral.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo al Instituto Politécnico Nacional-Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Proyecto SIP 20161046 LAS HABILIDADES INFORMÁTICAS DEL CAPITAL HUMANO COMO FUENTE DE CRECIMIENTO ECONÓMICO.

 ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

Ausín, V., Abella, V., Delgado, V., & Hortigüela, D. (2016). Aprendizaje Basado en Proyectos a través de las TIC: Una Experiencia de Innovación Docente desde las Aulas Universitarias. *Formación universitaria*, *9*(3), 31-38.

Argentina, U. N. I. C. E. F., & Arceo, F. D. B. (2013). *Las políticas TIC en los sistemas educativos de América Latina: Caso México* (Vol. 5). UNICEF Argentina.

Ávila-Fajardo, G. P., & Erazo, S. C. R. (2011). Propuesta para la medición del impacto de las TIC en la enseñanza universitaria. *Educación y educadores*, *14*(1), 9.

Basantes, A. V., Naranjo, M. E., Gallegos, M. C., & Benítez, N. M. (2017). Los Dispositivos Móviles en el Proceso de Aprendizaje de la Facultad de Educación Ciencia y Tecnología de la Universidad Técnica del Norte de Ecuador. *Formación universitaria*, 10(2), 79-88.

Borgobello, A., & Roselli, N. D. (2016). Rendimiento académico e interacción sociocognitiva de estudiantes en un entorno virtual. *Educação e Pesquisa*, 42(2), 359-374.

Casillas Alvarado, M. A., Ramírez Martinell, A., & Ortega Guerrero, J. C. (2016). Afinidad tecnológica de los estudiantes universitarios. *Innovación educativa (México, DF),* 16(70), 151-175.

de Diputados, C. (2012). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. *México: Cámara de diputados*.

Del Vasto, P. M. H. (2015). Influencia de las tecnologías de información y comunicación (TIC) en el proceso enseñanza-aprendizaje: una mejora de las competencias digitales. *Revista Científica General José María Córdova*, 13(16), 121-132.

Federal, P. E. (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. *Ciudad de México, México*.

García Martínez, A., Guerrero Proenza, R. S., & Granados Romero, J. M. (2015). Buenas prácticas en los entornos virtuales de enseñanza-aprendizaje. *Revista Cubana de Educación Superior*, (3), 76-88.

García-Ramírez, J. M. (2016). La motivación de logro mejora el rendimiento académico. *ReiDoCrea*,5, 1-8.

González-Gutiérrez, K. P., Tovilla-Zárate, C. A., Juárez–Rojop, I. E., & López-Narváez, M. L. (2016). Uso de tecnologías de la información en el rendimiento académico basados en una población mexicana de estudiantes de Medicina. *Educación Médica Superior*, 31(2).

Linne, J. (2015). Estudiar en Internet 2.0.: Prácticas de jóvenes universitarios de la Ciudad de Buenos Aires. *Comunicación y sociedad*, (23), 195-213.

Lozano, J. M. R. (2016). LAS TICS APLICADAS EN LA EDUCACIÓN Y SU CORRELACIÓN EN EL RENDIMIENTO ACADÉMICO. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 49-52.

Lozano, M. M. M., Moreno, L. A. H., Solórzano, J. G. L., & González, A. E. M. (2016). Incursión de tecnologías emergentes en una escuela pública de negocios de México. *EDMETIC*, 6(1), 124-144.

Núñez, M. E. C. (2016). La virtualización de la educación superior en América Latina: entre tendencias y paradigmas. *Revista de Educación a Distancia*, (48).

Olea, F. P., Villacís, C., & Muñoz, P. Á. (2016). LAS TIC COMO HERRAMIENTAS EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE PARA OPTIMIZAR EL RENDIMIENTO ACADÉMICO. ICT'S AS A TOOL INTHE TEACHING-LEARNING PROCESS TO IMPROVE ACADEMIC ACHIEVEMENT. *Revista Ciencias Pedagógicas e Innovación*, 3(1).

Pérez, O. G. B., & Pino, J. W. F. (2017). Rol de la gestión educativa estratégica en la gestión del conocimiento, la ciencia, la tecnología y la innovación en la educación superior. *Educación Médica*.

Salazar, R. L. C., & Flores, S. G. T. (2016). Diagnóstico del uso de las tecnologías en el proceso de enseñanza y aprendizaje en la educación superior. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo: RIDE*, 7(13), 18.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2015). *Programa México Conectado*. [online] Available at: http://www.gob.mx/sct/acciones-y-programas/programa-mexico-conectado.

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2017). *Presenta SCT Programa de Conectividad Digital para consolidad los avances de la Reforma de Telecomunicaciones* [online] Available at: http://www.gob.mx/sct/prensa/presenta-sct-programa-de-conectividad-digital-para-consolidar-los-avances-de-la-reforma-de-telecomunicaciones

Tapia, J. A. R., Ávila, M. M., & Paz, M. D. L. L. S. (2016). El Impacto de las TICs en la Calidad de la Educación Superior. *Revista de investigación en ciencias contables y administrativas*, *1*(1).

UNESCO (2014). *Políticas TIC en los sistemas educativos de América Latina. Informe sobre tendencias sociales y educativas en América Latina 2014*. Buenos Aires: UNESCO, International Institute for Educational Planning.

Vázquez, P. N., & Ramírez, M. M. O. (2016). La evaluación de la integración de las TIC en la educación superior: fundamento para una metodología. *Revista de Educación a Distancia*, (48).

Vásquez, M. O. A., & Torres, C. E. G. (2016). Lectura y escritura con recursos tics en Educación Superior. Evaluación de la competencia digital. *Innoeduca. International Journal of Technology and Educational Innovation, 2*(1), 64-73.

Zamora, L. C. (2015). Investigación y Educación en TIC dentro de escenarios de reordenamiento educativo, social y económico. *IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation*, (3).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Gamification en la Educación Superior como Estrategia para Incrementar la Productividad y Competitividad en el Alumnado

Ingrid A. Hernández-Horta[1], Anderson Monroy-Reza[1] y Martha Jiménez-García [1]
(1) Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Av. Té 950, Iztacalco, Granjas México, 08400 Ciudad de México.
Email: ingrid.hdz.horta@gmail.com; amonroyr1301@alumno.ipn.mx; majimenez@ipn.mx.

Resumen

En el presente trabajo se desarrolló una investigación teórica correspondiente a la Gamification y sus aportaciones a los procesos de la educación, con el propósito de tomar puntos clave de esta temática para la formulación de una propuesta de Gamification para mejorar los procesos de enseñanza en Instituciones de Educación Superior (IES) La metodología utilizada para la formulación de la propuesta de Gamification fue la metodología Werbach & Hunter de seis pasos para la creación de un juego exitoso. Como resultado se tiene una propuesta de juego complementaria al proceso tradicional del aprendizaje, basado en competencias, favoreciendo el estado de "*Flow*" del alumnado. Dentro de los componentes del juego destacan, los puntos, insignias, tablas de calificación, sorpresas, libre elección, misiones, logros, retroalimentación y cuentas regresivas, con las dinámicas principales de reto, asociación y sensación. Esta propuesta tiene cinco objetivos 1) Desarrollar, mantener y mejorar las competencias en el alumnado, 2) Fomentar la competitividad entre los alumnos, poniendo a prueba las competencias desarrolladas en entornos virtuales especializados en el área que les compete, 3) Determinar su perfil de liderazgo, 4) Integrar las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) como un aliado para el desarrollo de competencias dentro del aula y 5) Informar a los alumnos acerca de la Gamification y sus sectores de aplicación.

Dicho modelo de juego solo se puede aplicar IES dentro de la CDMX en asignaturas del área socio-administrativa. La propuesta generada cumple con los requerimientos de la convocatoria de investigación para la evaluación de la educación 2017 publicada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para mejorar la evaluación de las instituciones de educación superior a través de entornos virtuales. Se recomienda ampliar la investigación para someter la propuesta a prueba ante el CONACYT. Para posible prueba piloto en escuelas incorporadas al Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Gamification in Higher Education as a Strategy to Increase Productivity and Competitiveness in Students

Abstract

In this paper is made an theoretical research corresponding to Gamification and its contributions to education, the aim of this research was take key points of this topic for the formulation of a Gamification proposal to improve learning process for Higher Education Institutions (IES) The methodology used to formulate the Gamification´s proposal was Werbach & Hunter's six-step methodology for the creation of a successful game. As a result, it´s had a play proposal as a complement to the traditional mechanics of learning, based on competencies, favoring the flow state of students. Among the components of the game are the points, badges, qualification tables, surprises, free choice, missions, achievements, feedback and countdowns, with the main dynamics of challenge, association and sensation. This proposal has five objectives: 1) Develop, keep and improve competences in the students; 2) Encourage the competitiveness among the students by testing the competences developed in specialized virtual environments in the corresponding area; 3) Define Students' profile of leadership, 4) Integrate Information and Communication Technologies (ICT) as an ally to developing competences within the classroom, and 5) Give knowledge about Gamification and its application to the students.

This game model can only be applied at IES within the CDMX in subjects of the socio-administrative areas. The generated proposal satisfies the requirements of the call for research for the evaluation of education 2017 published by the National Council of Science and Technology (CONACyT) to improve the evaluation of institutions of higher education through virtual environments. Is recommended to extend the research to submit the proposal to the CONACyT. For possible pilot test in schools incorporated to the National Polytechnic Institute (IPN).

Keywords: gamification, proposal, classroom, higher education

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La Gamification es una herramienta que permite el uso de componentes, mecánicas, y dinámicas de los videojuegos en entornos no lúdicos, esto es posible debido a que la mayoría de los individuos tiende a crear juegos dentro de entornos poco atractivos, como lo son: el transporte, el trabajo, la escuela entre otros. Muchas organizaciones de diferentes tipos utilizan la Gamification para mantener a la motivación de sus integrantes en los niveles más altos (Robson, Plangger, Kietzmann, McCarthy, & Pitt, 2015). Abordando directamente el ámbito educativo, la Gamification cuenta con una rama dedicada al estudio del uso de los componentes de juego dentro del aula, dicha rama es llamada "*Game Based Learning*" es decir el aprendizaje basado en juegos, esta estrategia permite al estudiante incrementar su retención, a través de actividades más dinámicas y desafiantes que las que actualmente son utilizadas en la educación tradicional ofertada. Es cierto que existe el mito de que aprender y jugar no son términos que vayan de la mano, sin embargo, existen estudios donde se han aplicado los principios de la Gamification en los niveles K-12 de Estados Unidos de América, teniendo un incremento en la capacidad retención de los alumnos y en el compromiso por parte de los mismos (Brull, DNP, RN, NE-BC, & Finlayson, 2016).

Acorde con Brull (2016), la Gamification permite que los alumnos participen y creen una comunidad de aprendizaje, disfrutando de la libertad de experimentar y fallar en un entorno agradable, al mismo tiempo los alumnos tienen la oportunidad de interactuar con sensaciones diferentes que los mantienen motivados, es decir en el estado de "*Flow*" adecuado. Uno de los principales motivadores para el alumnado, es el uso de las TIC durante los procesos del aprendizaje, el uso adecuado de estas herramientas aunado a la correcta implementación de los elementos de la Gamification, es esencial para mantener la motivación en cada curso que se desee impartir. Para llevar a cabo la Gamification en el aula es importante analizar previamente al alumnado al que se desee dirigir el juego, y probar los efectos del juego en el mismo antes de diseñar el sistema de Gamification, con el objetivo de evitar que los alumnos caigan en un estado de aburrimiento o ansiedad (Landers, Armstrong B., & Collmus B., 2016), al evitar estas sensaciones de crea un juego apto y atractivo para los alumnos meta.

Nuevos Modelos Educativos en el Nivel Superior en México

En el año 2003 con la inclusión del Plan Bolonia, en México se hicieron diversos cambios sobre algunos planes de estudios, enfocándolos al proceso de desarrollo de competencias en el alumnado. Para el año 2009, los modelos de aprendizaje por competencias dentro de los planes de estudio tuvieron su primer lanzamiento dentro del IPN, dicho lanzamiento tuvo su justificación en las necesidades enmarcadas por el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), generando un cambio en la metodología de evaluación de las Universidades. El EEES enmarcó la necesidad de preparar a los alumnos para hacer frente a los cambios en la sociedad y al crecimiento de las TIC mediante competencias Las competencias son una serie de aptitudes y valores que el alumno debe desarrollar a lo largo de su trayectoria universitaria, las cuales le faciliten la adquisición del conocimiento y la solución de problemáticas cotidianas de manera eficiente y eficaz (Cano, 2008).

Para lograr desarrollar estas aptitudes los alumnos deben participar obligatoriamente en actividades extra curriculares que fomenten su aprendizaje en diferentes ambientes que propicien el aprender a aprender, aprender a ser, a pensar, a hacer, a emprender, a respetar y a convivir con los demás y el entorno de manera positiva (Cano O, 2010).

El IPN dentro de sus planes de estudios cuenta con competencias tomadas del Modelo Educativo Deusto, estas competencias acorde a Villa & Poblete (2007) son vitales para la formación de nuevos profesionales. Dentro de las competencias genéricas que cada alumno debe desarrollar, se pueden mencionar 1) Uso de las TIC, 2) Resolución de problemas, 3) Creatividad, 4) Trabajo en Equipo, 5) Innovación, 6) Orientación al logro 7) Correcta comunicación oral y escrita 8) Inteligencia emocional, entre otras.

Los Juegos, la Adquisición y Evaluación de Competencias

Se ha demostrado tanto en investigaciones teóricas como en casos reales los beneficios de la Gamification. Esta herramienta es capaz de generar un cambio de actitud o comportamiento en el individuo a través del manejo de refuerzos intrínsecos y extrínsecos, otorgados usualmente mediante plataformas que incluyen las TIC. Forsquare fue la primera aplicación móvil que hizo uso exitoso de las técnicas de Gamification,(Deterding, Sicart, Nacke, O'Hara, & Dixon, 2011), después de que Forsquare implemento la Gamification, fue que diversas organizaciones hicieron uso de esta estrategia tanto para crear e incentivar como para modificar y mantener comportamientos, en sus trabajadores y en sus consumidores (Gabe Zichermann & Cunningham, 2011), algunas aplicaciones móviles que han hecho uso exitoso de esta técnica son AppleWatch, Nike+, Waze, Booking, Uber, TripAdvisor entre otras, creando en el usuario un hábito que antes no existía,

 ISBN 978-607-8242-11-5

haciéndolo crítico y partícipe activo de la marca a través de elementos de juego. La asignación de los refuerzos tanto intrínsecos como intrínsecos, la Gamification, se apoya en diversos componentes entre los más comunes se encuentran, las insignias, las barras de nivel, y los tableros de calificación (Zichermann & Linder, 2010).

En esta breve reseña han quedado manifiesto los propósitos tanto de la Gamification como de los Modelos educativos por competencias, resumiendo tenemos por un lado, a la Gamification la cual busca crear y modificar actitudes y aptitudes dentro de los individuos involucrados en el juego; mientras que, por otro lado, los modelos educativos basados en competencias buscan que los alumnos desarrollen ciertas actitudes y aptitudes en específico.

Derivado de la afirmación anterior se puede inferir que la Gamification es un excelente auxiliar para modificar las actitudes de los estudiantes pertenecientes modelo de aprendizaje por competencias, brindándoles una herramienta divertida, e innovadora para el desarrollo y evaluación de sus competencias a través de retos, misiones, y más elementos de juego.

METODOLOGÍA

Para poder incluir la Gamification en el aula de manera exitosa siguió la metodología de seis pasos de Werbach & Hunter. Se considera que para que un juego sea exitoso es necesario realizar una investigación detallada de seis tópicos en específico, dichos tópicos se han adecuado al contexto estudiantil para poder ser implementados, a continuación se enlistan los tópicos: 1) Definir los objetivos del modelo, 2) Determinar los comportamientos deseados de los alumnos que se integraran en el juego, 3) Determinar el tipo de jugadores hacia los cuales se orientara el juego, 4) Definir circuito de actividades, 5) Incluir la diversión, 6) Desarrolla herramientas apropiadas (Werbach & Hunter, 2012).En la Fig. 1 se presenta el desglose de la metodología.

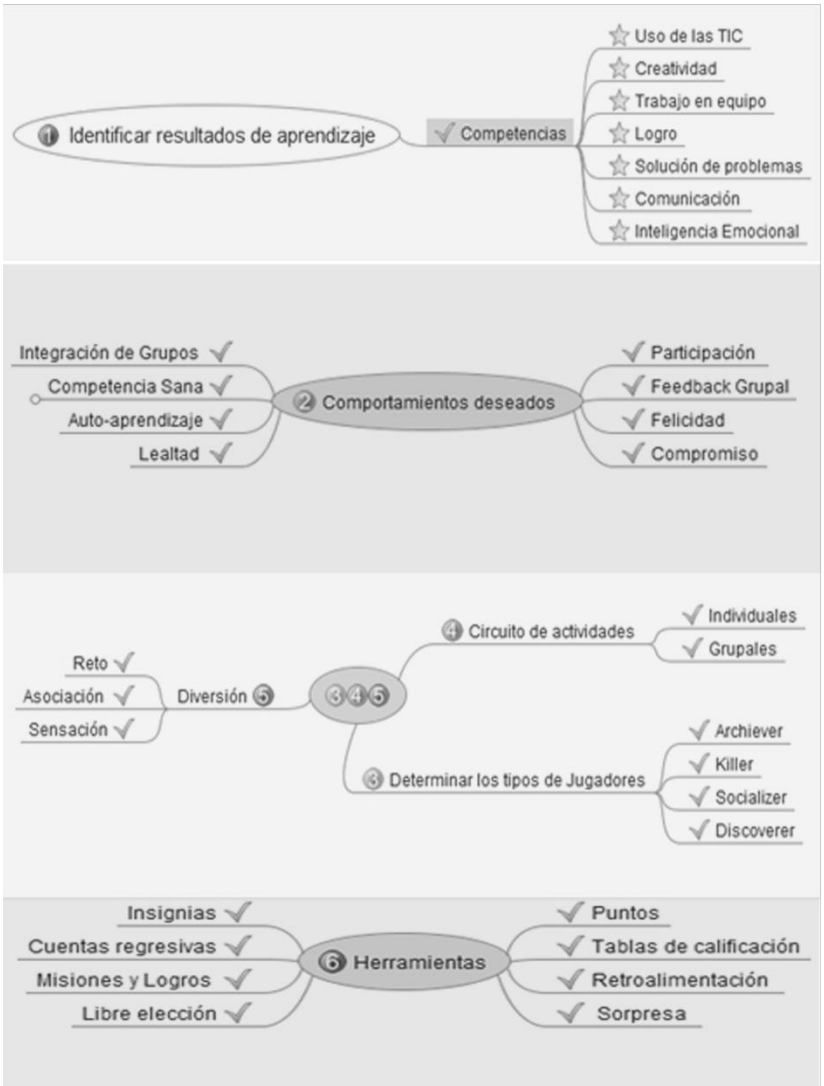


Fig. 1 Metodología de Werbach & Hunter aplicada a la investigación para el diseño del juego

ISBN 978-607-8242-11-5

Como se muestra en la Fig. 1, los comportamientos buscados con el juego son las competencias del alumnado, en específico inteligencia emocional, trabajo en equipo, uso de TIC, logro, creatividad e innovación, las cuales son fundamentales acorde al Modelo Deusto, el juego es enfocado a los cuatro tipos de jugadores puesto que todo individuo posee un poco de cada jugador (Espinar, 2017). Las actividades van enfocadas hacia el reto, la asociación y la mezcla de sensaciones o emociones de trabajo bajo presión, poder, logro y asociación.

La metodología de la Gamification para ser incluida en el proceso de aprendizaje y evaluación dentro del aula se vale del diseño y programación de aplicaciones para dispositivos móviles inteligentes, en lenguaje Java, tanto para sistemas Android, como para IOS, los cuales acorde a encuestas previas son los sistemas más utilizados dentro de la comunidad estudiantil.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la metodología se obtuvo la propuesta de un juego programada en java apto para IOS y Android, con una duración de 6 meses, con misiones quincenales, que incluyen nueve componentes de juego y tres tipos de dinámicas. La estética de juego cambiará acorde a los resultados observados en los alumnos incluidos en la versión 1.0 del juego, la estética también será vulnerable al cambio cada seis meses, para no perder el interés del alumnado en cuestión. A continuación se presentan los componentes del juego diseñado, dinámicos y mecánicas para la creación de la estética del juego.

Componentes de Juego

A continuación se describen los componentes del sistema de Gamification propuesto. Cada componente incluido tiene la finalidad de mantener la estética del juego durante la duración del mismo, todos los componentes del juego están interrelacionados entre sí. Los componentes deben seguir las condiciones descritas para cada uno en específico.

Misiones y Logros: Son actividades que se le otorgarán al alumno de manera remota e inesperada para su cumplimiento efectivo en un tiempo límite, las misiones serán enfocadas al desarrollo de competencias directivas, las misiones pueden ser individuales en equipo o en cooperación de dos o más-equipos. La misión especificará que es lo que el alumno o el equipo debe desarrollar, el tiempo con el que contará para realizarla, y los puntos que podrá obtener a cambio de completar la misión o los puntos con los que se penalizará por aceptar la misión y no completarla. El mínimo de lecciones que a incluir durante un juego son 12 (una lección por quincena), sin embargo, el profesorado a cargo puede tomar decisiones de incluir misiones especiales, acorde al comportamiento observado, teniendo la posibilidad de incrementar las misiones a un total de 60 misiones (cinco por quincena) con diferente nivel de dificultad. Es importante destacar que los profesores son libres de enviar mediante la aplicación las misiones que deseen a los equipos o alumnos que deseen sin exceder el límite mencionado. Es libre elección del involucrado aceptar o declinar la misión. Las misiones que el profesor asigne para ejecución individual serán por segmentación de mercado. Es decir el profesor enviará misiones a un grupo específico de alumnos segmentándolos, por edad, sexo, promedio en puntos, entre otros.

Puntos: Son la forma para medir el desempeño a los alumnos en las misiones otorgadas, los puntos son valuados acorde al desempeño de la misión, es decir; es decisión del profesor a cargo de la aplicación y de las misiones, la asignación justa de puntos. La dificultad de la misión será proporcional a los puntos que se recibirán por la ejecución de la misma. Para poder ganar el juego y obtener la nota mínima aprobatoria el alumno tendrá que acumular un total de 12,000 puntos, equivalente a desbloquear en el nivel 3 de la aplicación, el alumno podrá acumular un máximo de 60 000 puntos a lo largo del semestre. Cabe destacar que al inicio del juego por decidir participar, se le otorgara al alumno 1000 puntos bonus por iniciativa y se le otorgará una insignia significativa de valentía. El puntaje mínimo asignado para una misión son 1000 puntos.

Insignias: El comportamiento del alumno dentro del sistema será retribuido por medio de insignias virtuales, en la Tabla 1 se muestran algunas de insignias diseñadas, las insignias podrán incrementar por temporalidad o eventos especiales.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1 Modelo de Insignias Versión 1.0

Insignias para Jugadores	*Actividad a Realizar*
Achiever	Realizar 3 o más misiones en un mes
Valentía	Aceptar formar parte del juego
Descubridor	Aceptar su primer misión y completarla antes de tiempo
Constancia	Ser de los 5 mejores lugares en dos mes
Persistencia	Continuar en el juego después de pasar el nivel III

En la columna uno de la Tabla 1 se aprecia los nombres de algunas insignias, y enseguida se muestra el significado de cada una y los retos a cumplir para obtenerlas. Las insignias serán desbloqueadas dentro de la aplicación por reconocimiento a desempeño tanto grupal como individual.

Niveles: Dentro del juego se contemplan cinco niveles cuya dificultad va cambiando al igual que las recompensas obtenidas por misiones. En la Tabla 2 se muestran los niveles y los puntos necesarios para progresar dentro del juego

Tabla 2 Niveles y Puntos para pasar de Nivel Versión 1.0

Número Y Nombre de Nivel	*Puntos de Inicio*	*Puntos de Progreso*
0 Trainee	1000	2000
1 Asistente	3000	5000
2 Ejecutivo	8000	4000
3 Manager	12000	3000
4 Director	15000	5000
5 CEO	20000	“N”

En la primer columna “Número y Nombre de Nivel” de la Tabla 2 se aprecian los cinco niveles del juego así como los nombres asignados en cada nivel, los nombres de los niveles fueron asignados acorde a los nombres dentro de una organización formal; la columna 2 “Puntos de Inicio” indica los puntos acumulados necesarios para desbloquear cada nivel, y finalmente la columna 3 “Puntos de Progreso” muestra los puntos necesarios que el alumno debe obtener para poder progresar entre los niveles. Se puede observar en la última celda de la Tabla 2, que los puntos para progresar del nivel cinco a niveles posteriores no tienen un número asignado, debido a que los niveles siguientes no existen, cuando un alumno llega al nivel 5, simplemente se le otorgan beneficios exclusivos. Para que un alumno apruebe el juego con la nota mínima aprobatoria equivalente a 6, debe desbloquear el nivel tres y para obtener una nota equivalente a 10 debe desbloquear el nivel 5. Esto significa que, para poder ganar el juego, al menos deberá realizar un mínimo de dos misiones con valor de mil puntos o su equivalente durante el semestre.

Tablas de calificación: Las tablas de calificación es una sección dentro de la aplicación donde el alumno podrá visualizar sus puntos, insignias, niveles, y misiones completadas así como la retroalimentación de su desempeño.

Sorpresas: Son aquellos refuerzos extrínsecos que la institución esté dispuesta a otorgar por el desempeño en específico de ciertos elementos del grupo, los alumnos no deben tener conocimiento de la existencia de este tipo de recompensas.

Libre elección: Este componente está presente en todo el juego ya que el alumno sabrá que decisiones tomar, que retos aceptar, y tendrá la opción de continuar o no en el juego al completar el nivel 3. La libre elección es infalible para determinar el perfil de liderazgo de los involucrados.

Retroalimentación: Al aceptar y concretar o no una misión los alumnos recibirán una retroalimentación constructiva de su desempeño en la misión por parte de los integrantes del grupo como del profesor involucrado.

Cuentas regresivas. Este es el componente fundamental para controlar las misiones y su cumplimiento, se mostraran cuentas regresivas por misión a los involucrados.

ISBN 978-607-8242-11-5

Dinámicas

Las dinámicas manejadas principalmente dentro de este sistema son de reto, asociación y sensación, es decir se busca la interacción de los alumnos entre ellos para la solución de problemas y retos, generando sensaciones de satisfacción, competitividad, y diversión sin llegar al punto de ansiedad.

Mecánicas (Reglas del Juego)

En este apartado se enlistan las 21 reglas esenciales del juego, las cuales tanto los alumnos participantes como el profesorado involucrado tendrán que seguir para mantener la estética del juego.

1. Se reclutarán estudiantes que deseen participar en la prueba de la versión 1.0 del juego.
2. Se les informará del cómo ganar así como del puntaje mínimo requerido y se procederá a la selección de los involucrados.
3. Automáticamente se les asignaran 1000 puntos a los estudiantes participantes como recompensa a su iniciativa y valentía.
4. Este grupo llevará la Gamification como complemento a una materia por semestre dentro de su plan de estudios, es decir cada semestre el juego cambiará, al igual que la materia y el profesorado involucrado.
5. El grupo será integrado por un mínimo de 15 personas y un máximo de 50
6. Formarán equipos dentro del grupo los cuales se modificarán cada dos meses, los equipos constarán de un mínimo de 3 y un máximo de 5 personas.
7. Para progresar en el juego el alumno o el grupo de trabajo debe aceptar unánimemente la misión descrita y se dará inicio a la cuenta regresiva.
8. Para poder progresar en el juego todas las actividades deben desarrollarse de manera individual o grupal según se indique en las instrucciones dentro del juego. Existiendo ambas durante el curso.
9. Cada dos meses se hará la ceremonia para reconocer a los mejores equipos y asignar los cambios.
10. Se diseñará una aplicación móvil exclusiva del juego donde el usuario podrá ver su estatus personal, grupal y las gráficas de su desempeño bimestral.
11. Las pruebas serán diseñadas para mantener un nivel de "*flow"* adecuado sin llevar a los alumnos al borde de la ansiedad ni del aburrimiento.
12. El mejor equipo será determinado por desempeño grupal, mediante la resolución de estudios de caso, y los puntos obtenidos en el promedio de sus prácticas individuales y grupales.
13. Es responsabilidad del alumno no cerrar su sesión dentro de la aplicación, puesto que habrá misiones sorpresa y bonos extras por realizar actividades con tiempo límite.
14. Cada mes el alumno deberá contestar dos test uno acerca de su personalidad y uno acerca de la aplicación y el juego para implementar mejoras.
15. Las insignias serán otorgadas grupal por el cumplimiento en tiempo récord de ciertas actividades que necesitan colaboración de uno o más equipos.
16. Las insignias individuales solo podrán ser desbloqueadas por su rendimiento individual, existirá una insignia por competencia desarrollada, dichas insignias serán desbloqueadas por votación grupal bajo supervisión del profesor.
17. Existirán algunas insignias que solo podrán ser desbloqueadas por el profesor.
18. Existirán insignias temporales que solo podrán ser obtenidas en cierta época del año.
19. Algunas insignias brindan beneficios extrínsecos a los equipos, pero el ganar estas insignias requerirá de un extra de trabajo.
20. La narrativa será diseñada acorde a las preferencias del alumnado
21. Al final de cada curso se le otorgara al alumno un descubrimiento sobre su personalidad pudiendo ser, nivel de maquiavelismo, tipo de liderazgo, locus de control, tipo de aprendizaje entre otros.

Como Ganar

Para ganar el juego y obtener y nota sobresaliente en el sistema el alumno de acumular un mínimo de 12,000 puntos que son el equivalente a un 6 de calificación al desbloquear el nivel 3, en ese momento el alumno tendrá la opción de continuar en el juego e incrementar sus puntos o dejarlo y tomar sus recompensas obtenidas sin penalización alguna.

Estas reglas fueron diseñadas para crear un beneficio especialmente en el alumnado acorde a Zichermann & Cunningham (2011), el propósito de dicha reglas es alcanzar los principales beneficios de la gamification en la educación los cuales son, 1) Genera cooperación, 2) Se brinda conocimiento al alumno de las capacidades que poseen y que tal vez no lo sabían 3) Informa al estudiante sobre su progreso evaluado más allá que por

 ISBN 978-607-8242-11-5

un examen 4) Incrementa la motivación, 6) Crea un lugar seguro para aprender, 7) Favorece la retención del conocimiento a través de experiencias, recordando con base en empírica (Observatorio de Innovación Educativa & Tecnológico de Monterrey, 2016).

Al final del juego se hará una sesión de dos horas donde a los alumnos que aun sigan en el juego recibirán un taller de Gamification para que tengan conocimiento del proceso en el que fueron envueltos y de como ellos pueden replicarlo a su favor en su trayectoria como profesionista.

CONCLUSIONES

Retomando los beneficios de la Gamification, se concluye que ésta estrategia es una excelente opción para el desarrollo de competencias dentro del aula, complementando a los procesos de enseñanza tradicionales. Brindando al alumno una nueva experiencia al aprender, descubriendo siempre algo nuevo, que refuerce sus competencias como futuro profesionista. En México existen universidades que aplican la Gamification como refuerzo al proceso de aprendizaje en el nivel superior, como el Tecnológico de Monterrey, sin embargo, se considera que esta es una estrategia que toda universidad pública o privada debería implementar, para medir el impacto tanto en el aprendizaje, como en la eficiencia terminal de cada uno de los involucrados y los no involucrado, se recomienda hacer una prueba piloto de juego con muestras pareadas para poder medir de manera más certera el impacto de estas herramientas dentro de la educación superior. Las TIC son un pilar esencial dentro de la Gamification puesto que sin ellas no sería posible llevarla a cabo, motivo por el cual se propone la inversión en desarrollo de software educacional, o inversión en la compra de softwares comerciales para Gamificar el aula.

La aplicación móvil para mejorar el proceso de la adquisición de competencias es un pilar fundamental para la inclusión de las TIC como estrategia dentro de las IES, y para la implementación de la Gamification en una forma más sofisticada.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo al Instituto Politécnico Nacional-Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Proyecto SIP 20161046 Las Habilidades Informáticas Del Capital Humano Como Fuente De Crecimiento Económico.

REFERENCIAS

Brull, S., y Finlayson, S. (2016). Importance of Gamification in Increasing Learning, *47*(8), 372–375. https://doi.org/10.3928/00220124-20160715-09

Cano, E. (2008). La evaluación por competencias en la educación superior. *Profesorado: revista de currículum y formación del profesorado*, *12*(3), 11.

Cano O, N. (2010). Transición hacia el modelo educativo institucional., (2). Recuperado a partir de http://www.modalidaddistancia.escasto.ipn.mx/gaceta/wp-content/uploads/2011/08/Gaceta-2010-Ag-Sep.pdf

Deterding, S., Sicart, M., Nacke, L., O'Hara, K., & Dixon, D. (2011). Gamification. Using game-design elements in non-gaming contexts. En *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2425–2428). ACM. https://doi.org/10.1145/1979742.1979575

Espinar, M. A. (2017). *Taller de Gamificación el arte de Motivar*. España.

Landers, N, Armstrong B., M., & Collmus B., A. (2016). How to Use Game Elements to Enhance Learning: Applications of the Theory of Gamified Learning. *Serious Games and Edutainment Applications*:, *2*, 457–483. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51645-5_21

Observatorio de Innovación Educativa, & Tecnológico de Monterrey. (2016). Gamificación en la Educación.

Robson, K., Plangger, K., Kietzmann, J. H., McCarthy, I., & Pitt, L. (2015). Is it all a game? Understanding the principles of gamification. *Business Horizons*, *58*(4), 411–420. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.006

 ISBN 978-607-8242-11-5

Villa, A., & Poblete, M. (2007). *Aprendizaje basado en competencias. Una propuesta para la evaluación de competencias genéricas.* Universidad de Deusto Bilbao: Ediciones Mensajero.

Werbach, K., & Hunter, D. (2012). *For the Win: How Game Thinking Can Revolutionize Your Business*. Wharton Digital Press.

Zichermann, G., & Linder, J. (2010). *Game-Based Marketing: Inspire Customer Loyalty Through Rewards, Challenges, and Contests*. John Wiley & Sons.

Zichermann, G., & Cunningham, C. (2011). *Gamification by Design: Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps*. O'Reilly Media, Inc.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Model Order Reduction Enhancement with Optimization Metaheuristics

Yussef Guardia Ismael Acle [1] and Francisco Damasceno Freitas[1]
(1) Department of Electrical Engineering, University of Brasilia, Brasilia-DF, Brazil. CEP: 70910-900
E-mail: yussef.acle@gmail.com; ffreitas@ene.unb.br

Abstract

The paper proposes the application of an efficient optimization metaheuristic method, the Bees Algorithm (BA), to enhance Reduced Order Models (ROM) that fail to represent original Full Order Model (FOM) due to any reason (e.g., unsatisfactory parameter tuning in the reduction process, inoperative reduction method, etc.). The method allocates information regarding the poles, zeros and gain of a SISO system into an array in a search space where scaling parameters are subject to optimization BA method, thus adjusting the transfer function and generating a new ROM. The BA works to reduce frequency response error between new ROM and FOM, subject to an appropriate cost function. Several tests suggest that a combination of error measurement quantities might improve the optimization process. Several experiments were conducted on 2 SISO test systems whose FOMs where obtained from real electrical system models linearized at an system operation point. The test results presented a significant improvement in the new ROMs, compared to original defective ROMs. The analysis can be extended to MIMO systems.

Keywords: Model order reduction, Frequency response enhancement, Optimization Metaheuristics, Bees Algorithm

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

Several research areas fall into models described by system of linear differential and even also algebraic equations, such that the order of the system may exceed thousands and even millions of states (Schilders, 2008). Performing analysis techniques, such as time and frequency response, may become impracticable due to the elevated order, what justifies the adoption of Model Order Reduction (MOR). MOR obtains from a Full Order Model (FOM), usually in descriptor system or state-space representation, a Reduced Order Model (ROM). This process maintains the FOM time and frequency responses for all inputs with minimal error, and much smaller state matrix order. One of the most attractive and adequate MOR method to obtain high fidelity ROMs is the Balanced Truncation (BT) (Benner, 2005). Several techniques and improvements have been developed in this area, as the Sparse LRCF-ADI Method (Freitas, 2008) and the Krylov Subspaces projection-type method (Simoncini, 2007).

Nevertheless, some model reduction processes may result in ROMs that are unable to adequately represent original FOM. This can be due to any reason (e.g., unsatisfactory parameter tuning in the reduction process, inoperative reduction method, etc.). In this case, the defective ROMs are usually discarded and other reduction processes are carried on to achieve better results.

This paper proposes and investigates an implementation with an efficient metaheuristic optimization method, the Bees Algorithm (Pham, 2009), in order to improve defective ROMs with respect to their frequency response. Therefore, a new ROM is generated, with reduced frequency response error between new ROM and original FOM.

Numerical test were conducted on 2 SISO test systems whose FOMs where obtained from real electrical system models linearized upon a small-signal stability analysis (Kundur, 1994). The first test system, whose FOM has order 1142, has an original ROM of order 40 with poor performance at lower frequencies. The second test system, with order 5727 FOM, has an original ROM of order 40 that highly diverges from the FOM frequency response at most frequencies. The test results with new generated ROMs with the BA implementation presented a significant improvement, compared to original defective ROMs. The analysis can be extended to MIMO systems.

LINEAR SYSTEM MODELING AND MODEL REDUCTION

A linear and time invariant system can be described in a state-space form as Σ_{SS} (Freitas *et al*, 2008):

$$\Sigma_{SS} \equiv \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) \end{cases} \tag{1}$$

where $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ and $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^q$ are the state, input and output vectors, respectively. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is the state matrix, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ is the input matrix and $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ is the output matrix. In some cases a term $D\mathbf{u}(t)$ can be added to the expression of $\mathbf{y}(t)$. However, this term is not usual in most problems. Then, by simplicity and without loss of generality, this term will be omitted in this paper. The transfer function (TF) associated to the system (1) is defined by $H(s) = C(sI - A)^{-1}B$.

An implicit form of Σ_{SS} is treated in (Freitas et al., 2008) and presented as a descriptor system

$$\Sigma_J \equiv \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) &= J_1\mathbf{x}(t) + J_2\mathbf{z}(t) + B_1\mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{0} &= J_3\mathbf{x}(t) + J_4\mathbf{z}(t) + B_2\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= C_1\mathbf{x}(t) + C_2\mathbf{z}(t) \end{cases} \tag{2}$$

where $\mathbf{z}(t) \in \mathbb{R}^{n_z}$ is a vector of n_z algebraic variables, $J_1[n \times n]$, $J_2[n \times n_z]$, $J_3[n_z \times n]$, $J_4[n_z \times n_z]$, $B_1[n \times m]$, $B_2[n_z \times m]$, $C_1[q \times n]$ and $C_2[q \times n_z]$ are sparse matrices of adequate size. For real power systems and small-signal stability studies we assume that J_4 is nonsingular (Martins et al., 1996).

Algebraic operations are more convenient by using the descriptor system implicit form since the operations involve several computations with sparse matrices. This same process when implemented considering the state-space form is computationally more intensive and not recommended for large-scale systems (Freitas et al., 2008).

ISBN 978-607-8242-11-5

The problem of Model Order Reduction addressed here is to approximate Σ_{SS} with another dynamical system

$$\hat{\Sigma}_{SS} = \begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \hat{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \hat{B}\mathbf{u}(t) \\ \hat{\mathbf{y}}(t) = \hat{C}\hat{\mathbf{x}}(t) \end{cases} \tag{3}$$

where $\hat{\mathbf{x}}(t) \in \mathbb{R}^k$ with $k \ll n$ is the reduced state vector, $\hat{\mathbf{y}}(t) \in \mathbb{R}^q$ is the output, and $\hat{A} \in \mathbb{R}^{k\times k}$, $\hat{B} \in \mathbb{R}^{k\times m}$ and $\hat{C} \in \mathbb{R}^{q\times k}$ are the reduced system state matrices.

There exist infinitely many state-space representations $\hat{\Sigma}_{SS}$ that satisfy (3). The general expressions are of the form:

$$\hat{A} = T_L^T A T_R, \quad \hat{B} = T_L^T B, \quad \hat{C} = C T_R, \tag{4}$$

where both matrices T_L and $T_R \in \mathbb{R}^{n\times k}$ and $T_L^T T_R = I_{k\times k}$. One of the most attractive and adequate MOR method to obtain high fidelity ROMs is the Balanced Truncation (BT). Several techniques and improvements have been developed in this area, as the Sparse LRCF-ADI Method (Freitas, 2008) and the Krylov Subspaces projection-type method (Simoncini, 2007).

THE BEES ALGORITHM (BA)

Given an optimization problem (OP) defined as

$$\underset{\rho \in \mathbb{R}^{N_{dv}}}{Minimize} \quad F(\rho)$$
$$\text{subject to constraints} \tag{5}$$

where F is the cost or objective function; ρ is an array/vector with all N_{dv} decision variables. The constraints might appear as equalities and also inequalities. Among several techniques and optimization methods, there is the category of metaheuristic methods, which are mostly nature-inspired or bio-inspired (Yang, 2010) and use trial-and-error, learning and adaptation to solve optimization problems. Global optimal solutions are not guaranteed; however, these methods usually find very good solutions in a reasonably and practically short time (Yang, 2010).

The Bees Algorithm (BA) is an efficient metaheurisitc optimization method inspired in the behavior of bee colonies. In nature, a bee colony prospers sending harvesting bees to good food sources, with lesser efforts (Pham *et al.*, 2009). In order to accomplish this, the food sources must be located and rated according to their quality and distance from the hive. Initially, scout bees are sent to randomly explore the search space, evaluating each food source found. When scout bees return to the hive, they deposit the food they have collected during the search process. The bees that found the best rated food sources signal their discovery to other bees in the colony, through a ritual named 'waggle dance' (Pham *et al.*, 2009), in order to recruit spectator bees to follow the dancing bees for a local search nearby the best rated food sources. Also, the 'waggle dance' intensity and duration is proportional to the rating the scout bee gives to food source (Castellani, 2005). Therefore, while a small fraction of the colony is constantly conducting a global random search, the best rated food location neighborhoods are locally searched by dancing bees and their followers. While the best rated food sources remain profitable, they will continue to be announced through the 'waggle dance' .The recruited bees may also perform this dance, increasing even more the recruiting to highly rewarding food sources. Because of this feedback process, the colony rapidly allocates their efforts to harvest the most profitable food sources (Pham *et al.*, 2009).

The implementation of BA allows OP solving with linear or nonlinear cost functions, static or dynamic cost functions, and it even does not need an analytical expression for the cost function (Yang, 2010). It has been implemented for continuous domains optimization as also for discrete optimization. The BA is very efficient in finding multiple or even all global OP solutions, for a proper set of the method parameters configuration (Castellani, 2005). This work is based in the implementation by (Yarpiz, 2015), which allows inequalities constraints in the form of lower and upper bounds for the decision variables. Whether more complex

ISBN 978-607-8242-11-5

constraints are required, it may need to be complemented by using penalties or barrier methods. Some additional disadvantages are that the stop criterion is not very developed, the number of bees is finite, the convergence is not guaranteed as it is a metaheurisitc method, and because of the use of random search, the performance of the BA is frequently excellent, other times, it is moderate, and it may not work a few times.

Algorithm 1 presents the implementation of BA used according to (Yarpiz, 2015). There is an initial iteration where all N_{scout} scout bees explore randomly the global search space. In the remaining iterations, most of the bees proceed to local searches, and a small fraction of the N_{scout} scout bees keep a global random search. The selected sites for local search are divided into elite sites and non-elite sites, with the former with a higher number of recruited bees than the latter. The local search is conducted randomly within a search radius r from each selected site for local search. This search radius diminishes at each iteration, in order to concentrate and enhance precision of local search. At the end of each iteration, the best N_{scout} rated bees positions are maintained, whereas the other solutions are discarded.

Algorithm 1 : Bees Algorithm (Yarpiz, 2015)

INPUT: BA parameters, cost function
OUTPUT: Best rated solutions and respective cost function value

1. Initialization (initial calculations)
2. Initial iteration (global random search)
   2.1. **For** $j = 1,\ldots,$Number of scout bees
   Random global search of *j*-th scout bee
   Evaluation of cost function for *j*-th scout bee position in $\mathbb{R}^{N_{dv}}$
   end
   2.2. Sort positions from best rated bee to worst rated
3. Remaining iterations
   For $it = 2,\ldots,$ Number of Iterations
   3.1. Local search at Selected Elite sites
   For $i = 1,\ldots,$ Number of Elite Sites
   For $j = 1,\ldots,$ Number of Recruited Bees for Elite Sites
   Random local search of *j*-th recruited bee, within search radius r from *i*-th elite site
   Evaluation of cost function for *j*-th recruited bee position in $\mathbb{R}^{N_{dv}}$
   If the *j*-th recruited bee position is better rated than the recruiter's position
   recruited bee position replaces recruiter's position and recruited bee becomes recruiter
   end if
   end
   end
   3.2. Local search at Selected Non-Elite sites
   For $i =$ (Number of Elite Sites +1),…,Number of Selected Sites
   For $j = 1,\ldots,$Number of Recruited Bees for Selected Non-Elite Sites
   Random local search of *j*-th recruited bee, within search radius r from *i*-th non-elite site
   Evaluation of cost function for *j*-th recruited bee position in $\mathbb{R}^{N_{dv}}$
   If the *j*-th recruited bee position is better rated than the recruiter's position
   recruited bee position replaces recruiter's position and recruited bee becomes recruiter
   end if
   end
   end
   3.3. Global search Non-Selected sites
   For $i =$ (Number of Selected Sites +1),…,Number of Scout Bees
   Random global search of *i*-th scout bee
   Evaluation of cost function for *i*-th scout bee position in $\mathbb{R}^{N_{dv}}$
   end
   3.4. Sort and maintain all N_{scout} (Number of Scout Bees) best rated solutions
   3.5. Update local search radius $r = 0.99r[it-1] + r[0]$
   end

ISBN 978-607-8242-11-5

THE BEES ALGORITHM APPLIED IN MODEL ORDER REDUCTION ENHANCEMENT

In this section, we propose the application of BA metaheuristics optimization method to enhance ROMs. All that is required is the defective ROM and the FOM frequency response. Given an original SISO ROM system, that we intend to enhance, with $p_1, p_2, \ldots p_m$ poles, $z_1, z_2, \ldots z_q$ zeros and gain K, such that $q < m$, the first step consists in acquiring all m poles, q zeros and gain of original ROM as in the transfer function (TF) of the original ROM:

$$H_{originalROM}(s) = \frac{K[(s-z_1)(s-z_2)\ldots(s-z_q)]}{[(s-p_1)(s-p_2)\ldots(s-p_m)]} \tag{6}$$

Since only real systems are treated, the poles and zeros appear as either real or complex conjugate pairs. We define N_{RP}, N_{CP}, N_{RZ}, N_{CZ} as the number of real poles, complex poles conjugate pairs, real zeros and complex zeros conjugate pairs, respectively. Once all this data is retrieved, it is allocated in an array ψ_{par} format such as

$$\psi_{par} = [RP,\ \ \mathrm{Re}(CP),\ \ \mathrm{Im}(CP),\ \ RZ,\ \ \mathrm{Re}(CZ),\ \ \mathrm{Im}(CZ),\ \ gain\ K] \in \mathbb{R}^{1\times(q+m+1)} \tag{7}$$

where $\mathrm{Re}(\cdot)$ and $\mathrm{Im}(\cdot)$ are the real and imaginary part respectively; $RP \in \mathbb{R}^{1\times N_{RP}}$, $CP \in \mathbb{R}^{1\times N_{CP}}$, $RZ \in \mathbb{R}^{1\times N_{RZ}}$ and $CZ \in \mathbb{R}^{1\times N_{CZ}}$ are row arrays with all real poles, complex poles with positive imaginary part, real zeros, complex zeros with positive imaginary part of the original ROM to be enhanced, respectively.

Given an appropriate cost function, the Bees Algorithm is used to find an array ρ of scaling coefficients ρ_j, $j = 1,\ldots,(q+m+1)$, that generate a new array ψ_{par}^{new} by the element-wise multiplication of ρ with the former array ψ_{par}:

$$\left[\psi_{par}^{new}\right]_j = [\rho_j][\psi_{par}]_j, \qquad j = 1,\ldots,(q+m+1). \tag{8}$$

where ρ happens to be the array of decision variables of an optimization problem, with $N_{dv} = q+m+1$. Thus, array ψ_{par}^{new} contains information of a new set of m poles, q zeros and gain K, that can be written as:

$$\psi_{par}^{new} = \left[RP^{new},\ \ \mathrm{Re}(CP^{new}),\ \ \mathrm{Im}(CP^{new}),\ \ RZ^{new},\ \ \mathrm{Re}(CZ^{new}),\ \ \mathrm{Im}(CZ^{new}),\ \ gain\ K^{new}\right] \in \mathbb{R}^{1\times(q+m+1)}, \tag{9}$$

which can be used to rebuild a new TF:

$$H_{newROM}(s) = \frac{K^{new}\left[\prod_{j=1}^{N_{RZ}}(s-[RZ^{new}]_j)\right]\left[\prod_{i=1}^{N_{CZ}}(s-[CZ^{new}]_j)(s-[conj(CZ^{new})]_j)\right]}{\left[\prod_{j=1}^{N_{RP}}(s-[RP^{new}]_j)\right]\left[\prod_{i=1}^{N_{CP}}(s-[CP^{new}]_j)(s-[conj(CP^{new})]_j)\right]} \tag{10}$$

where $conj(\cdot)$ stands for complex conjugate. Therefore a new ROM system has been generated.

The BA works to reduce frequency response error between the new generated ROM and original FOM, subject to an appropriate cost function. Given that the frequency responses of both FOM and new ROM were acquired for N_{freq} sample points, the cost function might be an expression to measure error between H_{FOM} and H_{ROM}. The analysis can be extended to MIMO systems.

ISBN 978-607-8242-11-5

TESTS AND RESULTS

In order to demonstrate the efficiency and ROM enhancement with the proposed methodology, numerical test were conducted on 2 SISO test systems whose FOMs where obtained from real electrical system models linearized upon a small-signal stability analysis (Kundur, 1994), adequate for electromechanical oscillation studies. The test systems were derived from two practical Brazilian Interconnected Power System (BIPS) models, and both defective ROMs were acquired by BT via projection onto Extended Krylov Subspace (Simoncini, 2007) with poor parameter adjustment. The first test system, whose FOM has order 1142, has an original ROM of order 40 ($m = 40$, $q = 39$) with poor performance at lower frequencies. The second test system, with order 5727 FOM, has an original ROM of order 40 ($m = 40$, $q = 39$) that highly diverges from the FOM frequency response at most frequencies. The BA parameters, explained is Section 'THE BEES ALGORITHM (BA)', used for both test systems were set according to the Table 1.

Table 1: Bees Algorithm parameters used in tests

BA parameter	First test system	Second test system
Number of scout bees	10	20
Upper bound for scaling ρ_j	1000	1000
Lower bound for scaling ρ_j	0.001	0.001
Number of iterations	10^4	10^4
Nr. of Selected Non-Elite Sites	8	16
Number of Selected Elite Sites	1	2
Number of Recruited Bees for Selected Non-Elite Sites	2	4
Number of Recruited Bees for Selected Elite Sites	4	8
Neighborhood Local Search Radius	$r = 0.99r[it-1] + 0.1$ $r[0] = 0.001 \times [Upperbound - Lowebound]$	$r = 0.99r[it-1] + 0.1$ $r[0] = 0.001 \times [Upperbound - Lowebound]$

Several tests suggest that a combination of error measurement quantities might improve the optimization process, as for example the cost function $F = \alpha \|H_{FOM} - H_{ROM}\|_2 + \beta \|H_{FOM} - H_{ROM}\|_\infty$, where H, $\|\cdot\|_2$ and $\|\cdot\|_\infty$ stand for TF, 2-norm and infinity norm, respectively, with α and β adjustable parameters. The cost function used in test system 1 is

$$F_1 = 10^{-4} \times \|H_{FOM} - H_{ROM}\|_2 + 10^{-3} \times \|H_{FOM} - H_{ROM}\|_\infty . \tag{11}$$

The cost function used in test system 2 is

$$F_2 = 1 - \theta_{xy}(|H_{FOM}|, |H_{ROM}|) + 10^{-4} \times \|H_{FOM} - H_{ROM}\|$$
$$\theta_{xy}(H_{FOM}, H_{ROM}) = \frac{E[(|H_{FOM}| - \mu_{H_{FOM}})(|H_{ROM}| - \mu_{H_{ROM}})]}{\sigma_{H_{FOM}} \sigma_{H_{ROM}}} \tag{12}$$

where $\|\cdot\|$ stands for 1-norm; $|\cdot|$ means absolute value; $\theta_{xy}(H_{FOM}, H_{ROM})$ is the correlation coefficient of H_{FOM} and H_{ROM} (Hsu,1997); $E[\cdot]$ is the expectation (Meyer,1970); μ and σ stand for mean value and standard deviation, respectively.

Referring to the test system 1, Figure 1 presents frequency response magnitude and phase, respectively, of the original FOM system, the original defective ROM (referred as ROM Original) and the enhanced ROM generated from the BA (referred as ROM BA). It can be seen that original ROM has poor performance at lower frequencies, whereas the new ROM BA curve is closer to the FOM curve. In order to measure a relative error along each sampled frequency point, a relative error defined as

$$[relative\ error](f_i) = \frac{|H_{FOM}(f_i) - H_{ROM}(f_i)|}{|H_{FOM}(f_i)|}, \quad i = 1, \ldots, N_{freq} \tag{13}$$

where f_i is the i-th sampled frequency of N_{freq} points used in frequency response.

ISBN 978-607-8242-11-5

Figure 2 presents this relative error along frequency for test system 1. It can be inferred that there was an enhancement of the ROM performance at lower frequencies, but at the expense of some increase in relative error at other frequencies.

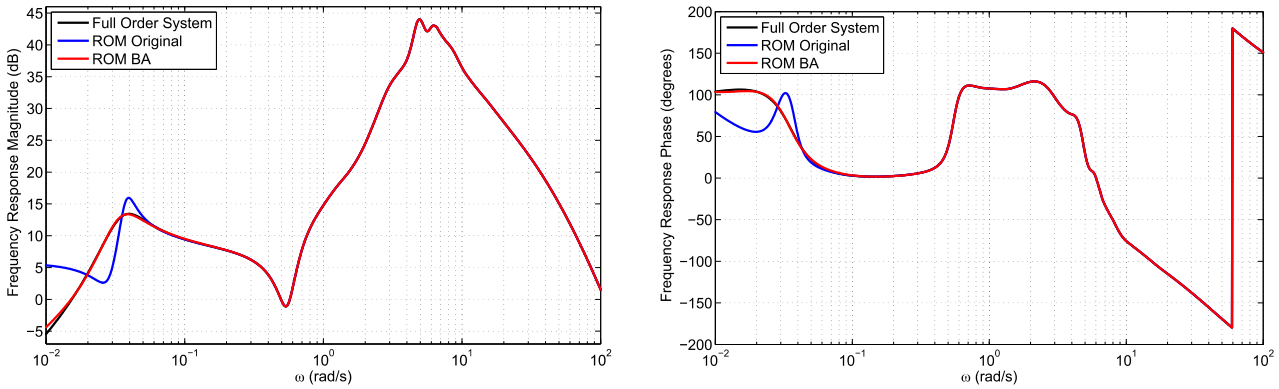


Fig. 1: Frequency Response Magnitude and Phase, test system 1.

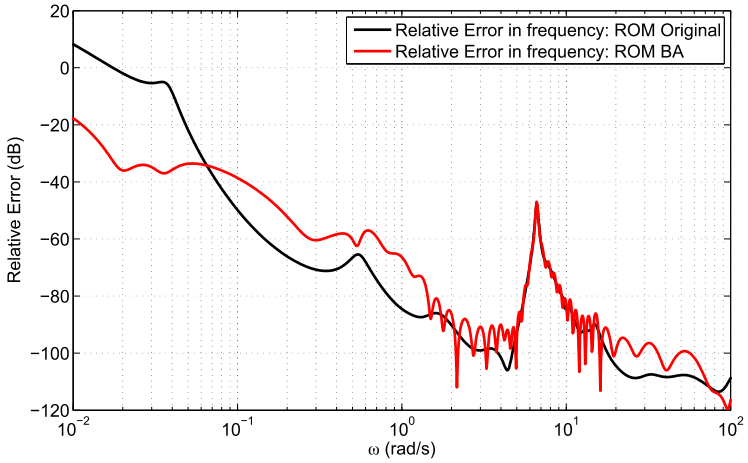


Fig. 2: Relative Error in Frequency Response, test system 1.

Referring to the test system 2, Figure 3 presents frequency response magnitude and phase, respectively, of the original FOM system, the original defective ROM (referred as ROM Original) and the enhanced ROM generated from the BA (referred as ROM BA). It can be seen that original ROM highly diverges from the FOM frequency response at most frequencies, whereas the new ROM BA curve is much closer to the FOM curve.

Figure 4 presents this relative error along frequency for test system 2. It can be seen a significant improvement of performance of the ROM generated from BA compared to the original ROM elevated errors.

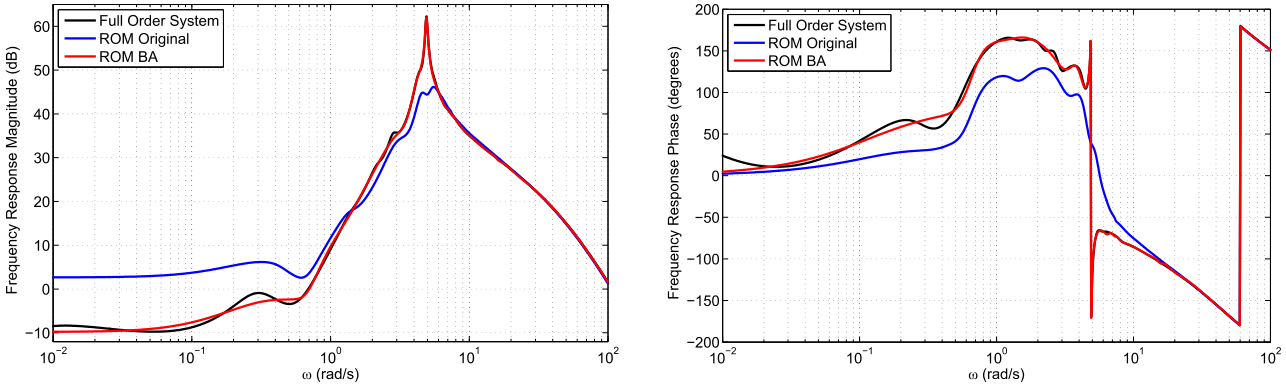


Fig. 3: Frequency Response Magnitude and Phase, test system 2.

ISBN 978-607-8242-11-5

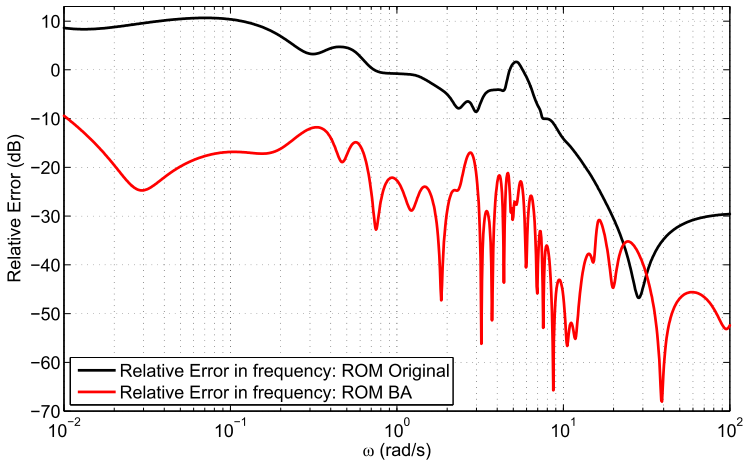


Fig. 4: Relative Error in Frequency Response, test system 2.

Figure 5 shows the cost function value evolution with iterations, for each test system. It can be seen from the cost function evolution along iterations that the BA method rapidly decreases the cost function for the initial iterations, but the rate of decreasing diminishes for later iterations. For further improvements, we recommend switching the expressions for cost function when the evolution of cost function value seems to become stagnant. A new cost function then is used in order to help the BA to better explore the search space. Also, we remark that it must be verified that the previous cost function is decreasing as the new cost function is also decreasing in order to the process of switching works.

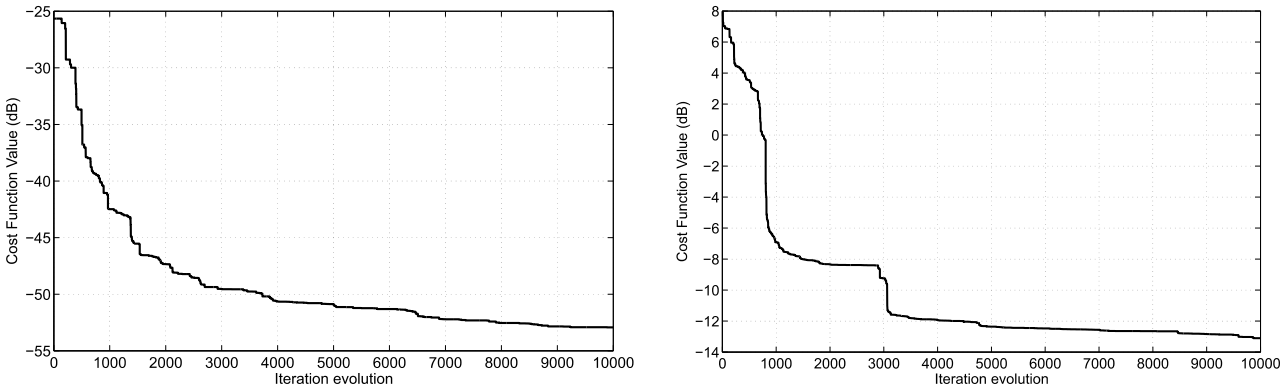


Fig. 5: Cost Function value evolution with iterations, test systems 1 and 2, respectively.

Table 2 presents the mean value and standard deviation (Meyer,1970) of time demand for each BA iteration, after realization of 10^4 iterations, for each test system. It can be seen that BA iterations can be computed cheap and efficiently, with low time demand.

Table 2: Time demand (mean value and standard deviation) for BA iteration, after 10^4 iterations

Test System	Mean value (second)	Standard Deviation (second)
1	0.023394	0.0024964
2	0.022847	0.0022739

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONS

An implementation of the efficient optimization metaheuristic method Bees Algorithm (BA) in Reduced Order Model (ROM) enhancement was proposed, where an appropriate cost function is used in order to reduce frequency response error between new generated ROM and Full Order Model (FOM.)

The test results with new generated ROMs with the BA implementation presented a significant improvement, compared to original defective ROMs. The methodology can be extended to MIMO systems

For future works and researches, we recommend testing the proposed methodology with different metaheuristic optimization methods, e.g., Genetic Algorithms and Ant Algorithms (Yang, 2010).

REFERENCES

Benner, P.; "*Numerical Linear Algebra for Model Reduction in Control and Simulation*". [Online]. Available: http://www-user.tuchemnitz.de/˜benner/pub/, (2005).

Castellani, M. , "*The Bees Algorithm Website*", Website maintained by m.castellani@bham.ac.uk, (2005). Available at: http://beesalgorithmsite.altervista.org/BeesAlgorithm.htm.

Freitas, F. D., Rommes, J. and Martins, N.; "*Gramian-Based Reduction Method Applied to Large Sparse Power System Descriptor Models*", IEEE Trans. on Power Systems, v. 24, no. 2, pp. 1258–1270, Aug. (2008).

Hsu, H.; *Probability, random variables, & random processes*, Schaum outlines, McGraw-HILL, (1997);

Kundur, P.; "*Power System Control and Stability*". McGraw-Hill, (1994).

Meyer, P. L.; *Introductory Probability and Statistical Applications*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company Inc. –USA (1970);

Pham, D.T. and Castellani, M.*; "The Bees Algorithm – Modelling Foraging Behaviour to Solve Continuous Optimisation Problems"*. Proc. ImechE, Part C, 223(12), 2919-2938, (2009);

Schilders, W. H. A.; Vorst, H. A. and Rommes, J.; "*Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications*". Springer, Mathematics in Industry, Berlin, Germany, (2008).

Simoncini, V.; "*A new iterative method for solving large-scale Lyapunov matrix equations*", SIAM J. Sci. Comput., vol. 29, no. 3, pp. 1268-1288, May (2007).

Yang, X., "*Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*", chapter 14, JOHN WILEY & SONS (2010).

YARPIZ MATLAB CODE. Home > Metaheuristics > Bees Algorithm (BeA) in MATLAB > YPEA115 Bees Algorithm, (2015). Downloaded at: http://yarpiz.com/315/ypea115-bees-algorithm

 ISBN 978-607-8242-11-5

Programa de computador en MS-Excel para cálculos de equilibrio líquido-vapor mediante una EoS cúbica y reglas de mezclado de Huron-Vidal

Luis A. Forero G.[1], Elizabeth Rincón P. [1,2] y Jorge A. Velásquez J.[1]
(1) Univ. Pontificia Bolivariana, Fac. de Ing. Química, A.A. 56006, Medellín-Colombia
(2) Colegio Gimnasio Los Pinares, Dpto. de Ciencias, Medellín-Colombia
E-mail: luis.foreroga@upb.edu.co

Resumen

Se ha desarrollado un programa de computador en Visual Basic para aplicaciones (VBA) para el cálculo de propiedades termodinámicas de sistemas multicomponente en hojas de cálculo de Excel mediante una versión modificada de la ecuación de estado de Peng-Robinson publicada recientemente por los autores Forero y Velásquez. En conjunto con las reglas de mezclado de Huron y Vidal, se ha desarrollado un algoritmo eficiente para el cálculo del equilibrio líquido-vapor a alta presión donde los algoritmos tradicionales tienden a dar soluciones triviales o que no tienen sentido. El método propuesto inicialmente busca soluciones a baja presión mediante los algoritmos típicos. La temperatura se va incrementando paulatinamente hasta que el algoritmo arroja una solución trivial. En este punto se recupera la última solución no trivial y se utiliza como valor inicial para formular y resolver el sistema de las ecuaciones de equilibrio mediante el método de Newton-Raphson. El incremento paulatino de la temperatura se hace hasta la presión deseada. Para facilitar los cálculos repetitivos en hojas de cálculo de MS-Excel se han desarrollado funciones de usuario que permiten determinar propiedades tales como: volúmenes molares, coeficientes de fugacidad parcial, presiones de burbuja, presiones de rocío. El propósito es que el programa de computador pueda ser utilizado en labores investigativas y académicas. Por ejemplo, con el programa creado y en conjunto con la herramienta SOLVER de Excel, se ha desarrollado un modelo generalizado para describir el equilibrio líquido-vapor de mezclas del tipo alcano/alcano incluyendo compuestos entre propano y eicosano a bajas y altas presiones. En general los valores calculados con el modelo concuerdan con los datos experimentales, incluyendo diagramas de equilibrio Txy, Pxy, isopletas y diagramas para el lugar de puntos críticos.

Palabras clave: Ecuación modificada de Peng-Robinson, Reglas de Huron-Vidal, presiones de burbuja y rocío, Visual Basic para aplicaciones (VBA), Excel

ISBN 978-607-8242-11-5

Introducción

Para calcular propiedades termodinámicas, los ingenieros emplean normalmente ecuaciones de estado (EdEs), las cuales son consideradas la piedra angular de los modelos termodinámicos. Mediante una EdE, es posible representar el equilibrio de fases en amplios intervalos de temperatura y presión y al mismo tiempo calcular propiedades térmicas y volumétricas (Kontogeorgis y Economou, 2010).

De los diferentes tipos de ecuaciones de estado disponibles en la literatura, las EdEs cúbicas son las más utilizadas en ingeniería debido a su simplicidad, ya que es posible realizar cálculos rápidos y confiables para diferentes aplicaciones prácticas (Valderrama, 2003), principalmente el cálculo de equilibrio de fases en mezclas (Cismondi y Mollerup, 2005).

Para realizar cálculos de equilibrio, es necesario seleccionar un conjunto de expresiones matemáticas con las cuales se estiman los parámetros de la EdE para la mezcla de interés. Dichas expresiones se conocen como reglas de mezclado y existen diferentes alternativas, entre las que se destacan las reglas clásicas o de van der Waals y las reglas EdE+G^E que combinan una EdE cúbica con un modelo de actividad. En general, la selección de la regla de mezcla se realiza con base en la naturaleza de los compuestos. Para el caso de mezclas con compuestos no polares, especialmente gases e hidrocarburos, las reglas clásicas han sido empleadas ampliamente en la industria del gas y del petróleo, mientras que para mezclas con compuestos altamente polares como agua y alcoholes buenos resultados se pueden obtener con las reglas EdE+G^E (Kontogeorgis y Folas, 2010).

Por otro lado, es importante señalar que una vez seleccionadas las reglas de mezclado, la calidad de los resultados depende de los valores de los parámetros de interacción binaria, los cuales se determinan normalmente mediante el ajuste de datos experimentales, en muchos casos mediante la minimización del porcentaje de error en la presión de burbuja cuando se trabaja con datos de equilibrio líquido-vapor. Para resolver el problema, se debe disponer de rutinas de cálculo directo para el factor de compresibilidad y el coeficiente de fugacidad parcial. Estas propiedades son necesarias durante el planteamiento de un sistema de ecuaciones asociado al punto de burbuja, el cual se debe resolver mediante una rutina iterativa.

El cálculo de presión de burbuja, se puede realizar usando algoritmos tradicionales disponibles en la literatura (Elliot y Lira, 2012) que se fundamentan en la solución del sistema de ecuaciones mediante métodos de punto fijo. Sin embargo, a condiciones de alta presión y alta temperatura, los algoritmos tradicionales pueden conducir a soluciones triviales que generan problemas durante la determinación de parámetros de interacción binaria o cuando se desea evaluar la capacidad de predicción de una EdE especialmente cerca del lugar de puntos críticos de una mezcla. Para resolver esto, se plantea una metodología alternativa basada en la solución del sistema de ecuaciones asociado al punto de burbuja mediante el método de Newton-Raphson. Todas las rutinas se implementan en Visual Basic para aplicaciones, debido a la posibilidad de generar funciones de usuario en Excel con las cuales es posible verificar el carácter trivial o no de una solución numérica.

Modelo Termodinámico y descripción del software

La EdE elegida, corresponde a la propuesta recientemente por Forero y Velásquez (2016a), la cual básicamente es una modificación de la EdE original de Peng y Robinson (1976) que se puede utilizar para sustancias no polares y polares. Como reglas de mezclado, se han elegido las propuestas por Huron y Vidal (1979) en conjunto con el modelo de actividad NRTL (Renón y Prausnitz, 1968) ya que de acuerdo con Kontogeorgis y Coutsikos (2012), estas reglas son una gran herramienta para correlacionar el equilibrio de fases de mezclas complejas, además, Forero y Velásquez (2016 b) mostraron que es posible desarrollar expresiones generalizadas para los parámetros de interacción binaria, capaces de representar adecuadamente el equilibrio líquido vapor de mezclas del tipo alcohol/alcano.

En la tabla 1, se presentan las expresiones básicas que definen el modelo termodinámico. La ecuación (1) resulta de la traslación en el volumen del volumen molar de la EdE original de Peng-Robinson (v^{PR}). De acuerdo con las expresiones (2 y 3) para las sustancias puras son necesarias las propiedades críticas (T_{ci}; P_{ci}), el factor acéntrico (ω_i), el factor polar de Halm y Stiel (χ_i) (1967) y el volumen trasladado (c_i). Estos parámetros se encuentran reportados en la literatura para alrededor de 260 sustancias (Forero y Velásquez, 2016 a). Para el caso de mezclas, las expresiones (4) indican que para una mezcla de dos componentes son necesarios tres parámetros de interacción binaria que corresponden a los parámetros de energía de interacción (A_{12} y A_{21}) y la constante de mezclado no aleatorio (α_{12}).

La ecuación (5) se puede resolver mediante métodos algebraicos tradicionales, reportados en la literatura (Elliot y Lira, 2012) para obtener el factor de compresibilidad Z y el volumen molar v, con los cuales se calcula el coeficiente de fugacidad parcial de acuerdo con la ecuación (6).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1. Expresiones básicas para la EdE cúbica propuesta por Forero y Velásquez

Descripción	Expresiones	
Forma explícita en P	$P = \frac{RT}{v+c-b} - \frac{a(T)}{v^2+2(b+c)v+c^2+2cb-b^2}$	(1)
Parámetros de sustancias puras	$a_i(T) = 0.45724\frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}}\exp\left(m_{Hi}\left(1-T_{ri}^{n_{Hi}}\right)\right)$ $b_i = 0.0778\frac{RT_{ci}}{P_{ci}}$ $c_i = \left[v_i^{PR} - v_i^{DIPPR}\right]_{Tr=0.7}$	(2)
Expresiones generalizadas	$n_{Hi} = \frac{\gamma_{ci}}{\beta_{ci}-1} + \beta_{ci}$ $m_{Hi} = \frac{\beta_{ci}-1}{n_{Hi}}$ $\beta_{ci} = 1.3469+1.4923\omega_i+1.4252\chi_i-0.1204\omega_i^2+2.8166\chi_i^2+0.3127\omega_i\chi_i$ $\gamma_{ci} = -0.3759-1.4419\omega_i+6.2044\chi_i-0.6747\omega_i^2+15.586\chi_i^2-0.7058\omega_i\chi_i$	(3)
Reglas de Huron-Vidal	$a = b\left[\sum_i x_i\frac{a_i}{b_i} - \frac{G^E}{0.6232}\right] \quad ; \quad b_i = \sum_i x_i b_i \quad ; \quad c = \sum_i x_i c_i$ $\frac{G^E}{RT} = \sum_i x_i\left(\frac{\sum_j x_j\frac{A_{ji}}{RT}\exp\left(-\alpha_{ji}\frac{A_{ji}}{RT}\right)}{\sum_k x_k\exp\left(-\alpha_{ki}\frac{A_{ki}}{RT}\right)}\right)$	(4)
Polinomio cúbico	$Z^3+(3C+B-1)Z^2+\left(3C^2-2C+2BC-3B^2-2B+A\right)Z$ $+\left(C^3+C^2(B-1)+C\left(A-3B^2-2B\right)+B^3+B^2-AB\right)=0$ $A = \frac{aP}{(RT)^2} \quad ; \quad B = \frac{bP}{RT} \quad ; \quad C = \frac{cP}{RT} \quad ; \quad Z = \frac{Pv}{RT}$	(5)
Coeficiente de fugacidad parcial	$\ln\left(\hat{\varphi}_i\right) = \ln\left[\frac{v}{v+c-b}\right] + \left[\frac{\partial nb}{\partial n_i} - \frac{\partial nc}{\partial n_i}\right]\frac{1}{v+c-b} + \frac{1}{RT}\left[\frac{1}{n}\frac{\partial n^2 a}{\partial n_i} - \frac{a}{b}\frac{\partial nb}{\partial n_i}\right]$ $\frac{1}{2\sqrt{2}b}\ln\left[\frac{v+c+b-\sqrt{2}b}{v+c+b+\sqrt{2}b}\right] + \frac{1}{b}\left[\frac{1}{v+c-b} - \frac{P}{RT}\right]\left[\frac{\partial nc}{\partial n_i}b - \frac{\partial nb}{\partial n_i}[v+c]\right] - \ln Z$ $\frac{\partial nb}{\partial n_i} = b_i \quad ; \quad \frac{\partial nc}{\partial n_i} = c_i \quad ; \quad \frac{1}{n}\frac{\partial n^2 a}{\partial n_i} = b\left[\frac{a_i}{b_i} - \frac{RT\ln\gamma_i}{0.6232}\right] + b_i\left[\sum_j x_j\frac{a_j}{b_j} - \frac{G^E}{0.6232}\right]$	(6)

En el equilibrio líquido-vapor, a partir de las ecuaciones de la Tabla 1, se puede plantear la ecuación de equilibrio de acuerdo con:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$x_i \hat{\varphi}_i^L = y_i \hat{\varphi}_i^V \quad \therefore \quad i = 1,2,...N \tag{7}$$

En una mezcla de N componentes, La ecuación (7) es válida para cada especie que se encuentra presente en la fase líquida (L) y vapor (V) respectivamente y constituye la base para realizar cálculos de punto de burbuja y punto de rocío. En cada punto se debe plantear una relación adicional de acuerdo con:

$$\sum_i y_i = 1 \tag{8}$$

$$\sum_i x_i = 1 \tag{9}$$

A partir de N expresiones para la ecuación (7) y la ecuación (8) se construye un sistema de N+1 ecuaciones, con el cual se deben encontrar N+1 variables normalmente definidas como la presión de burbuja y las N composiciones de la fase vapor (y_i) a partir de valores conocidos de las composiciones en la fase líquida (x_i) y la temperatura. De forma similar, a partir de las ecuaciones (7) y (9) se construye el sistema de N+1 ecuaciones que permite a partir de la temperatura y composiciones de la fase vapor, estimar la presión de rocío y las composiciones de la fase líquida en equilibrio.

Las ecuaciones (1) a (9) son la base de un software para cálculos de equilibrio líquido-vapor a partir del modelo termodinámico elegido. El software pone a disposición del usuario una serie de funciones que se pueden usar directamente en las hojas de cálculo y que se encuentran descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Funciones para el desarrollo del programa para cálculos de ELV con base en la EdE de Forero y Velásquez con reglas de Huron-Vidal.

Nombre de la función	Argumentos de entrada	Variables de salida	Descripción
zlmezclaFVHV o zv mezclaFVHV	Temperaturas y presiones críticas (T_{ci}, P_{ci}), Constantes de la función alfa de Heyen (m_{Hi}, n_{Hi}), Volumen trasladado (c_i), fracciones molares de la mezcla (x_i o y_i), Temperatura(T), presión (P).	Factor de compresibilidad (Z) de la mezcla en fase líquida o vapor.	Calcula el factor de compresibilidad de una mezcla mediante la solución de la ecuación (5).
fiilmezclaFVHV o fiivmezclaFVHV		Coeficiente de fugacidad parcial de un componente (fi) en fase líquida o vapor.	Calcula el coeficiente de fugacidad de un componente en una mezcla mediante la ecuación (6).
PburbujayiLVFVHV	Temperaturas y presiones críticas (T_{ci}, P_{ci}), Constantes de la función alfa de Heyen (m_{Hi}, n_{Hi}), Volumen trasladado (c_i), fracciones molares de la fase líquida (x_i), Temperatura(T).	Presión de burbuja (Pb) y fracciones molares de la fase vapor (yi).	Calcula la presión de burbuja de una mezcla y las fracciones molares de la fase vapor mediante el algoritmo tradicional (Sandler, 2006) incluyendo una homotopía en la composición para mejorar la convergencia.
ProcioxiFVHV	Temperaturas y presiones críticas (T_{ci}, P_{ci}), Constantes de la función alfa de Heyen (m_{Hi}, n_{Hi}), Volumen trasladado (c_i), fracciones molares de la fase vapor (y_i), Temperatura(T).	Presión de rocío (Pd) y fracciones molares de la fase líquida (xi).	Calcula la presión de rocío de una mezcla y las fracciones molares de la fase líquida mediante el algoritmo tradicional (Sandler, 2006) incluyendo una homotopía en la composición para

ISBN 978-607-8242-11-5

			mejorar la convergencia.
PBurbujayiLVFVHVInicialNewton	Temperaturas y presiones críticas (T_{ci}, P_{ci}), Constantes de la función alfa de Heyen (m_{Hi}, n_{Hi}), Volumen trasladado (c_i), fracciones molares de la fase líquida (x_i), Temperatura(T), valores iniciales de la presión de burbuja (Pb) y las fracciones molares de la fase vapor (yi)	Presión de burbuja (Pb) y fracciones molares de la fase vapor (yi).	Calcula la presión de burbuja de una mezcla y las fracciones molares de la fase vapor mediante la solución de las ecuaciones (7) y (9) utilizando el método de Newton a partir de un valor inicial dado por el usuario.
PRocioxiFVHVInicialNewton	Temperaturas y presiones críticas (T_{ci}, P_{ci}), Constantes de la función alfa de Heyen (m_{Hi}, n_{Hi}), Volumen trasladado (c_i), fracciones molares de la fase vapor (y_i), Temperatura(T), valores iniciales de la presión de burbuja (Pd) y las fracciones molares de la fase líquida (xi)	Presión de rocío (Pd) y fracciones molares de la fase líquida(xi)	Calcula la presión de rocío de una mezcla y las fracciones molares de la fase líquida mediante la solución de las ecuaciones (7) y (9) utilizando el método de Newton a partir de un valor inicial dado por el usuario.

De las funciones descritas en la Tabla 2, aquellas nombradas como PburbujayiLVFVHV, ProcioxiFVHV, PBurbujayiLVFVHVInicialNewton y PRocioxiFVHVInicialNewton son las principales para realizar cálculos de equilibrio líquido vapor. Las funciones se caracterizan por ser funciones matriciales de Excel, es decir, la respuesta de la función es un vector fila o una matriz de dimensiones 1*N+1 que contiene la presión calculada y las composiciones de las fases en equilibrio. Dado que los algoritmos para las funciones de presión rocío son análogos a los de las funciones para la presión de burbuja, se muestran enseguida únicamente las descripciones de los algoritmos desarrollados para las dos funciones correspondientes a la presión de burbuja:

Algoritmo para la función PburbujayiLVFVHV

La composición del líquido se guarda e inicialmente se parte de una mezcla muy concentrada o prácticamente pura en el componente de mayor Tc. Las presiones de vapor de todas las sustancias se estiman a la T de interés a partir ddel modelo de Lee-Kesler (Reid et al., 1987) o del método corto (Elliott y Lira, 2012), dependiendo de si la T dada es mayor o no que la crítica de la sustancia. Para todas las sustancias se supone un factor de acéntrico de 0.5. El valor inicial de Pb se fija como la presión de saturación del componente con mayor Tc. Con estos valores iniciales se halla Pb y la composición del vapor mediante el algoritmo tradicional (Sandler, 2006). Posteriormente, se modifican las fracciones molares de la fase líquida, se utiliza el algoritmo tradicional, pero usando los valores calculados del paso anterior como iniciales. El proceso se repite hasta que las fracciones molares de la fase líquida coinciden con los valores conocidos. Este procedimiento es básicamente una homotopía en la composición para mejorar la convergencia. El cambio en las fracciones molares se hace normalmente en 10 pasos mediante las siguientes fórmulas: si el componente no es el de mayor Tc, x=xdada*k/10 y si es el de mayor Tc, x=1-(1-xdada)*k/10, k representa los pasos que varían entre 1 y 10 y xdada es la fracción molar conocida a la cual se quiere calcular la presión de burbuja.

Algoritmo para la función PBurbujayiLVFVHVInicialNewton

Para el uso de esta función se requieren valores iniciales de la presión de burbuja y la composición del vapor. La misma es de mucha utilidad cuando la función anterior da como resultado una solución trivial o una solución que no tiene sentido especialmente en la zona cercana al punto crítico de una mezcla.
A partir de los valores iniciales suministrados por la función PburbujayiLVFVHV se construye el sistema de

 ISBN 978-607-8242-11-5

ecuaciones representado por las ecuaciones 7 y 8. Dicho sistema de ecuaciones se resuelve mediante el método convencional de Newton para múltiples ecuaciones. Para obtener una respuesta es necesario que los valores iniciales sean muy cercanos a la respuesta, esto se consigue moviendo la temperatura en intervalos tan pequeños como sea necesario hasta llegar a la temperatura deseada a partir de la última temperatura que dio solución no trivial mediante el algoritmo de la función *PburbujayiLVFVHV*.

En la figura 1 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos por los dos algoritmos en la construcción de la isopleta para la mezcla butano/tetradecano con 49.93% molar de butano. En la zona de baja temperatura las funciones coinciden en sus resultados y las líneas se solapan. Se observa que, en la vecindad del punto crítico, la función PburbujayiLVFVHV da valores incorrectos deformando el comportamientp de la isopleta. Para la función PBurbujayiLVFVHVInicialNewton, los valores iniciales son los resultados obtenidos en la temperatura previa. En el caso de la función ProcioxiFVHV se observa que es incapaz de dar resultados correctos para presiones mayores a la de la cricondenterm, pues como existen dos soluciones el algoritmo solo es capaz de hallar una, la de la presión menor. Solo la función PRocioxiFVHVInicialNewton es capaz de hallar las dos soluciones correctas, de nuevo los valores iniciales se obtienen de la respuesta obtenida en la temperatura previa.

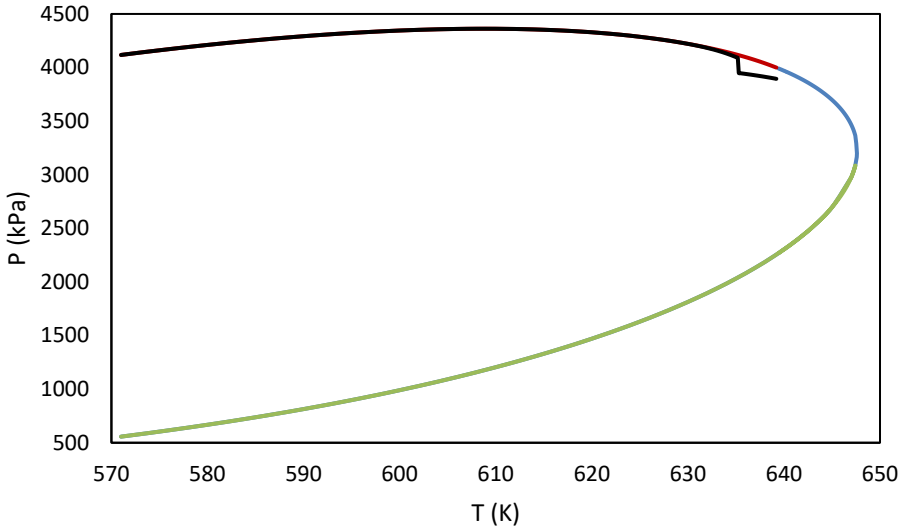


Fig. 1. Isopleta para la mezcla butano-tetradecano con 49.93% molar de butano con base en la EdE de Forero y Velásquez con reglas de Huron-Vidal utilizando diferentes algoritmos. Línea roja: PBurbujayiLVFVHVInicialNewton, línea negra: PburbujayiLVFVHV, línea azul: PRocioxiFVHVInicialNewton, línea verde: ProcioxiFVHV.

Resultados y discusión

Para ilustrar las capacidades del programa y con el complemento SOLVER de Excel, se desarrolló un modelo generalizado para describir el equilibrio líquido-vapor de mezclas del tipo alcano/alcano. El modelo se obtiene a partir de la solución del siguiente problema de optimización con restricciones:

$$O.F. = \sum_{j=1}^{NM} \sum_{i=1}^{ND_j} \left[\frac{P^i_{b\,exp} - P^i_{b\,cal}}{P^i_{b\,exp}} \right]_j \tag{10}$$

s.t:

$$A_{ij} = a_{ij} \left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_i \left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_j + b_{ij} \left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_i + c_{ij} \left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_j + d \tag{11}$$

La ecuación (10) es la suma total en la desviación para un conjunto de NM mezclas y NDj representa el número total de datos experimentales para la mezcla j. La elección de la ecuación (11) se basa en el trabajo de Forero y Velásquez (2016 b) quienes encontraron que con una expresión similar es posible representar el equilibrio de fases de mezclas de alcoholes con alcanos a baja y alta presión. Adicionalmente, para el parámetro α_{ij} se supuso un valor de 0.3. Es importante aclarar que en la ecuación (11), el compuesto i corresponde a aquel con menor valor del cociente RTc/Pc. Las expresiones generalizadas para los parámetros A_{ij} son:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$A_{12} = -1454.07\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_1\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_2 + 3716.17\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_1 + 2944.35\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_2 - 3944.65 \quad (12)$$

$$A_{21} = 577.75\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_1\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_2 - 2131.24\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_1 - 1098.97\left(\frac{RT_c}{P_c}\right)_2 + 1370.88 \quad (13)$$

Las ecuaciones (12) y (13) se obtuvieron a partir de 736 datos de presión de burbuja experimentales que corresponden a un total de 29 mezclas que incluyen compuestos entre el propano y el eicosano. Las mezclas utilizadas y los respectivos errores obtenidos se reportan entre la Tabla 3. Los datos utilizados incluyen presiones hasta alrededor de 30 Atm. Los resultados muestran una desviación absoluta promedio en la presión de burbuja del 2.0%. Para todas las mezclas las desviaciones se encuentran por debajo del 5.92% Para el 80%% de los casos, la desviación absoluta promedio se encuentra por debajo del 2.5%. Solo en el caso de seis mezclas se obtienen desviaciones entre el 2.5 y 5.9%.

Tabla 3. Mezclas y desviaciones en la presión de burbuja obtenidas durante el desarrollo del modelo generalizado para mezclas del tipo alcano/alcano.

Sustancia 1	Sustancia 2	T(K)	P(kPa)	ND	|%ΔP|	Ref
propano	butano	260	61.1-314.5	10	1.73	(Kay,1970)
propano	pentano	331.95-456.45	2068.4-2757.9	22	2.06	
propano	hexano	273.15-283.15	53.7-574.5	20	1.82	(Kay,1971)
propano	heptano	331.65-519.15	2068.4	11	1.38	
propano	octano	339.55-566.95	2413.2	8	1.69	(Kay et al., 1974)
propano	decano	277.59-310.93	0.038-1144.5	19	3.54	(Reamer y Sage, 1966)
propano	dodecano	419.15-457.65	406-7682	25	5.92	(Gardener et al., 2012)
propano	eicosano	279.29-358.56	403-3247	156	2.53	(Gregorowicz et al., 1992)
butano	pentano	398.15-463.95	2413.2-3102.6	46	0.53	(Kay et al., 1975)
butano	hexano	253.15-273.15	1.9-103	36	0.61	
butano	heptano	336.48-494.65	689.8-1379.5	30	1.73	(Kay, 1941)
butano	octano	389.55-566.75	2068.4-2413.2	22	0.98	(Kay et al., 1974)
butano	decano	344.26-410.93	2.8-2757.9	26	1.58	(Reamer y Sage, 1964)
pentano	hexano	303.7	25.6-83.8	14	3.24	(Rice y E-nikheli , 1995)
pentano	octano	303.7-313.7	2.6-118	33	2.42	
pentano	decano	317.7-333.7	0.65-218.3	23	1.33	
hexano	heptano	313.15	12.5-37.3	18	0.47	(Zielkiewicz, 1991)
hexano	octano	298.15	1.9-20.2	12	0.88	(Weiguoet al., 1990)
hexano	decano	308.15	0.36-30.6	14	1.62	(Ott et al., 1981)
hexano	undecano	308.15	0.12-30.6	14	2.12	
hexano	dodecano	308.15	0.04-30.6	14	2.98	
hexano	hexadecano	298.15-303.15	2-24.9	22	2.13	(Weiguoet al., 1990)
octano	decano	349.05-392.95	20	25	0.76	(Dejoz et al., 1996)
octano	dodecano	349.05-431.25	20	25	1.99	
octano	hexadecano	298.15	0.19-1.9	18	2.34	(Weiguoet al., 1990)
decano	dodecano	392.95-431.25	20	25	2.53	(Dejoz et al., 1996)
butano	2-metilpropano	329.76-342.64	800	21	0.69	(Onken y Artl, 1990)
2-metilpentano	hexano	298.15	20.2-28.3	11	1.32	(Chen y Zwolinski, 1974)
3-metilpentano	hexano	298.15	20.2-25.5	16	1.45	

ISBN 978-607-8242-11-5

Para ilustrar el desempeño del modelo propuesto, en la Figura 2 se presentan los resultados de varias isotermas para una mezcla simétrica (propano/isopentano) y una asimétrica (hexano/hexadecano). En ambos casos, se incluyen isotermas donde la temperatura es mayor que la temperatura crítica de uno de los componentes de la mezcla. Para la primera mezcla, los resultados son completamente predictivos, ya que la misma no fue usada durante el desarrollo del modelo. La desviación promedio es de 4.69%y tal y como se observa en la figura, los valores predichos por el modelo se encuentran por debajo de aquellos reportados experimentalmente. Sin embargo, desde el punto de vista de cualitativo los resultados son adecuados. En general las desviaciones absolutas en la presión de burbuja se encuentran alrededor de 2 Atm para las 3 isotermas supercríticas con relación al propano (398.15, 423.15 y 443.15 K). En el segundo caso, a pesar de que la mezcla fue utilizada para desarrollar el modelo, los cálculos se realizaron a temperaturas entre 170 y 320 grados por encima de las condiciones reportadas en la Tabla 3. De forma similar a los resultados de la mezcla propano/isopentano, los resultados son correctos de forma cualitativa con desviaciones absolutas menores a 2 Atm para las isotermas a 572.5 y 623 K.

Los resultados reportados en las Tablas 3, así como aquellos ilustrados en la Figura 2, muestran que el modelo propuesto con ayuda del software desarrollado puede ser utilizado para cálculos de baja y alta presión. En la Figura 3, se ilustran las isopletas de la mezcla butano/tetradecano y propano/decano. En el primer caso, los valores calculados con el modelo concuerdan con datos experimentales de presión de burbuja reportados entre 1 y 40 Atm aproximadamente. En el segundo caso se presentan tres isopletas y el lugar de puntos críticos donde se puede observar que el modelo representa bien el comportamiento de las mezclas. Resultados similares a los de las Figuras 1 y 2 se pueden obtener para las mezclas reportadas en la Tabla 3.

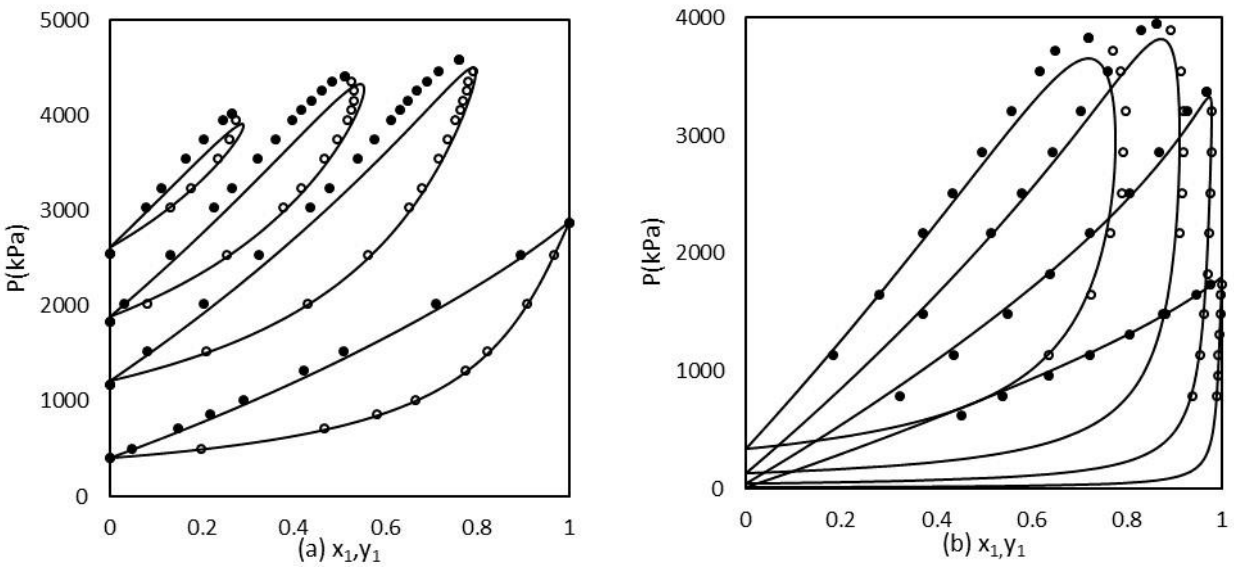


Fig. 2: Predicción del equilibrio líquido vapor con el modelo propuesto. Los símbolos son los datos reportados en la literatura. a) Mezcla propano/isopnetano (Vaughan y Collins, 1942). b) Mezcla hexano/hexadecano (Joyce y Thies, 1998)

ISBN 978-607-8242-11-5

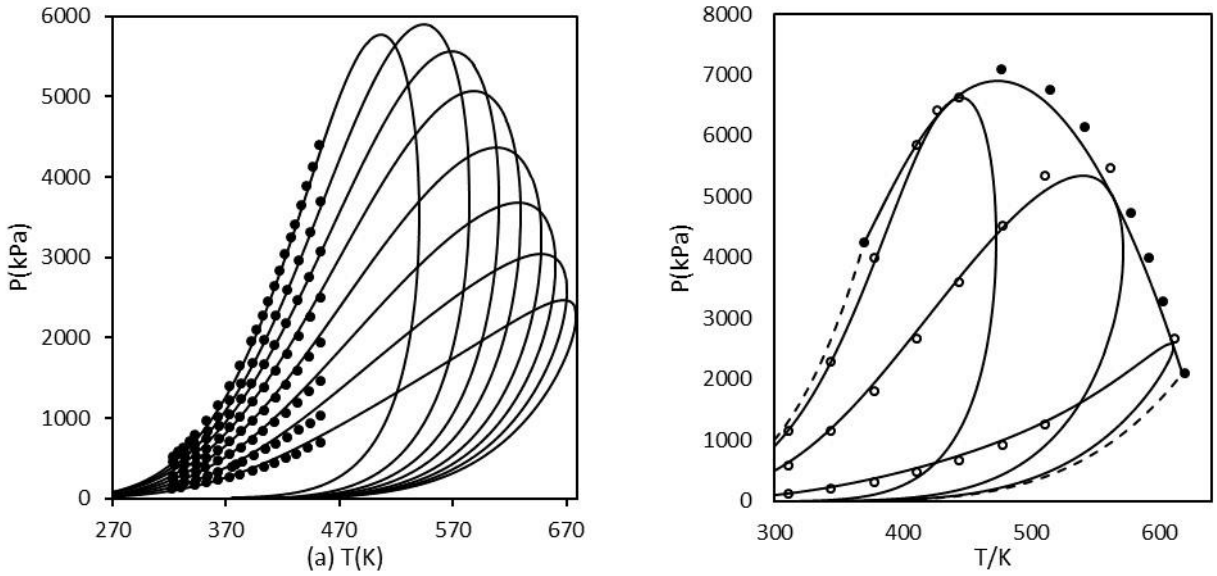


Fig. 3: Predicción isopletas con el modelo propuesto. a) Mezcla butano/tetradecano. b) Mezcla propano/decano.

Conclusiones

A partir del trabajo realizado se puede establecer que: *(i)* el software desarrollado puede utilizarse para realizar cálculos de equilibrio líquido-vapor a baja y alta presión incluyendo la región crítica *(ii)* la estructura del software por funciones de usuario permiten mediante las herramientas de gráficos en Excel construir fácilmente diagramas del tipo Txy, Pxy, isopletas y lugares de puntos criticos ; *(iii)* En conjunto con el SOLVER de Excel, el software es una herramienta de Investigación útil para la estimación de parámetros de interacción binaria o para el desarrollo de modelos generalizados partir de la EdE de Forero y Velásquez con las reglas de mezclado de Huron-Vidal. Finalmente, se debe destacar el potencial académico del software ya que es posible implementar el mismo en la enseñanza de cursos de termodinámica donde se cubren los tópicos de equilibrio de fases líquido-vapor,

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Departamento Administrativo de Ciencia,Tecnología e Innovación (Colciencias) por su apoyo económico a través del programa jóvenes investigadores e innovadores año 2015. También agradecen al Centro Integrado para el Desarrollo de la Investigación -CIDI- y a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana por su apoyo permanente.

Referencias

Chen, S.-S., Y B. J. Zwolinski, *"Excess thermodynamic functions of binary mixtures of normal and isomeric alkanes (C 5 and C 6)",*J. Chem. Soc. Faraday Trans*., 2*, 1133–1142 (1974)

Cismondi, M y J. Mollerup, "*Development and application of a three-parameter RK–PR equation of state",* Fluid Phase Equilib., 232, 74-89 (2005)

Dejoz, A., V. Gonzalez-Alfaro, P. J. Miguel y M. I. Vazquez,*" Isobaric Vapor−Liquid Equilibria for Binar Systems Composed of Octane, Decane, and Dodecane at 20 kPa",* J. Chem. Eng. Dat., 41, 93–96 (1996)

Elliot, J.R y C. T Lira, *"Introductory Chemical Engineering Thermodynamics"* Prentice-Hall, Estados Unidos (2012)

Forero, L.A y J. A. Velásquez, "*A generalized cubic equation of state for non-polar and polar substances",* Fluid Phase Equilib., 418, 74-87 (2016)

Forero, L.A y J.A. Velásquez *"A simple and generalized model to represent the vapor-liquid equilibria and the liquid-molar-volume of alcohol-alkane binary mixtures",* Fluid Phase Equilib., 430, 132-144 (2016)

Gardeler, H., K. Fischer, y J. Gmehling,*" Experimental Determination of Vapor−Liquid Equilibrium Data for Asymmetric Systems",* Ind. Eng. Chem. Res. 41, 1051–1056 (2002)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Gregorowicz, J., T. W. De Loos, y J. De Swaan Arons, *"The System. Propane+Eicosane: P, T, x Measurements in the Temperature. Range 288-358 K",*J. Chem. Eng. Dat., 37, 356–358 (1992)

Halm, R.L y L.I Stiel, *"A fourth parameter for the vapor pressure and entropy of vaporization of polar fluids"*, AIChE Journal, 13, 351-355 (1967)

Huron, M-J y J. Vidal, "*New mixing rules in simple equations of state for representing vapour-liquid equilibria of strongly non-ideal mixtures"*, Fluid Phase Equilib., 3, 255-271 (1979)

Joyce, P. C. y M. C. Thies, *"Vapor−Liquid Equilibria for the Hexane + Hexadecane and Hexane + 1-Hexadecanol Systems at Elevated Temperatures and Pressures",* J. Chem. Eng. Data, 43 819–822 (1998).

Kay, W. B., "*Vapor-liquid equilibrium relations of binary systems. n-Butane-n-heptane System*" Ind. Eng.Chem., 15, 46–52 (1970)

Kay, W. B., "*Vapor-liquid equilibrium relations of binary systems. Propane-n-alkane systems. n-Butane and n-pentane*" J. Chem. Eng. Dat., 15, 46–52 (1970)

Kay, W. B., "*Vapor-liquid equilibrium relations of binary systems. Propane-n-alkane systems, n-hexane, and n-heptane"*, J. Chem. Eng. Dat., 33, 590-594 (1941)

Kay , W. B., J. Genco y D. A. Fichtner , *"Vapor-Liquid Equilibrium Relationships of Binary Systems Propane-n-Octane and n-Butane-n-Octane*", J. Chem. Eng. Dat., 19, 275– 280 (1974)

Kay, W. B., R. L. Hoffman, y O. Davies, *"Vapor-liquid equilibrium relations of binary systems n-butane-n-pentane and n-butane-n-hexane",* J. Chem. Eng. Data, 20, 333–338 (1975)

Kontogeorgis, G.M y I. G. Economou, *"Equations of state: From the ideas of van der Waals to association theories"*, The J. of Super. Fluids., 55, 421-437 (2010)

Kontogeorgis, G. M. y P. Coutsikos, "*Thirty Years with EoS/GE Models—What Have We Learned?"*, Ind. Eng. Chem. Res., 51, 4119-4142, (2012)

Onken, U. y W. Arlt, *"Recommended Test Mixtures for Distillation Columns Institution of Chemical Engineers,"* The Institute of Chemical Engineers., 1990.

Ott, J. B., K. N. Marsh, y R. H. Stokes,*" Excess enthalpies, excess volumes, and excess Gibbs free energies for (n-hexane + n-dodecane) at 298.15 and 308.15 K",* J. Chem. Thermodyn., 13, 371–376 (1981)

Peng, D-Y. y D. B. Robinson, "*A New Two-Constant Equation of State"*, Ind. Eng. Chem. Fundam., 15, 59-64 (1976)

Reamer, H. y B. Sage, *"Phase Equilibria in Hydrocarbon Systems. Phase Behavior in the n-Butane-n-Decane System",* J. Chem. Eng. Data, 9, 24–28 (1964)

Reamer, H. y B. Sage, *"Phase Equilibria in Hydrocarbon Systems. Volumetric and Phase Behavior of the Propane-n-Decane System",* J. Chem. Eng. Dat. 11, 17–24 (1966)

Reid, R.C., J.M. Prausnitz y B.E. Poling, *"The propertiesof Gases and Liquids"* McGraw-Hill, Estados Unidos (1987)

Renon, H y J. M. Prausnitz, "*Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures"*, AIChE Journal, 14, 135-144 (1968)

Rice, P. y A. E-nikheli, *"Isothermal vapour-liquid equilibrium data for the systems n-pentane with n-hexane, n-octane and n-decane",*Fluid Phase Equilib., 107, 257-267 (1995)

Sandler, S.I, *"Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics"* Wiley, Estados Unidos (2006)

Valderrama, J.O, "*The State of the Cubic Equations of State",* Ind. Eng. Chem. Res.,42, 1603-1618 (2003)

Vaughan, W.E. y F. C. Collins, "*P-V-T-x Relations of the System Propane-Isopentane*", Ind. EnG. Chem., 34,885-890 (1942)

Weiguo, S., A. X. Qin, P. J. McElroy, y A. G. Williamson, *"(Vapour + liquid) equilibria of (n-hexane + n-hexadecane), (n-hexane + n-octane), and (n-octane + n-hexadecane)",* J. Chem. Thermodyn., 22, 905-914 (1990)

Zielkiewicz, J., *"(Vapour + liquid) equilibria in (propan-1-ol + n-hexane + n-heptane) at the temperature 313.15 K",* J. Chem. Thermodyn.,23, 605–612 (1991)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Design of control strategy for the automatically microalgae cultivation in the photobioreactors

Arnaldo Verdeza[1], Leonardo Di Mare[2], Iván D. Portnoy[2], Yuhan A. Lenis[2]
(1) Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla-Colombia
(2) Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, Barranquilla-Colombia
e-mail:averdeza@unisimonbolivar.edu.co, ldimare@uninorte.edu.co, ylenis@uninorte.edu.co

Abstract

Microalgae are a taxonomically diverse group of microscopic organisms, which can thrive in a wide spectrum of ecosystems and environmental conditions. Nevertheless, when only some particular species are required to be cultured, environmental conditions need to be carefully maintained in specific ranges. Therefore, there exist several microalgae culturing techniques which aim to favor stable and adequate conditions to guarantee fast growing and success of the cultured species. Photobioreactors are among the best alternatives for microalgae culturing for they are designed to supply optimum levels of light, pH, and CO_2 and nutrients contents (Singh and Sharma, 2012). This culture equipment allows precise control of these parameters to keep ideal growing conditions, improving productivity and materials usage efficiency. (Eriksen, 2008). Main parameters to be controlled in photobioreactors are light intensity, CO_2 content, temperature, pH, and nutrients content. This work presents the development of a control strategy aiming to improve the operation of a photobioreactor, in terms of microalgae harvesting yield, by controlling temperature and pH. These variables have a meaningful incidence in biomass productivity, thus, keeping them in optimum ranges should help in improving microalgae productivity. Moreover, the proposed automatic control strategy has been designed to periodically carry out a microalgae culturing-growing-harvesting cycle with narrow human intervention, using a pH-based indicator as criterion to start a new cycle.

Keywords: Automatic Control, Photo bioreactor, Microalgae, Temperature, pH.

 ISBN 978-607-8242-11-5

1. INTRODUCTION

The wide diversity of products that can be obtained with microalgae usage, as well as their capacity for capturing CO_2, have encouraged researchers worldwide to develop better and more efficient culturing and harvesting techniques (Madigan, 2004). There exist two main approaches for microalgae culturing; open culturing systems, such as uncovered ponds and open tanks, and closed culturing systems, such as vessels, tubes and photobioreactors (Andersen, 2005). Major drawbacks on open microalgae culturing technologies include the culture contamination, which in turn makes difficult the task of growing particular desired species. On the other hand, closed technologies enhance specific-targeted culturing since they allow suitable control of main variables affecting growing and development of microalgae (Richmond, 2004).

A good design of an efficient closed microalgae culturing system requires the knowledge of their physiology and metabolic dynamics, as well as aspects of hydrodynamics, optics and mass transfer (Ugwu et al., 2008). Light may constitute a major energy expense in algae culturing, and therefore open systems are still popular as they profit on solar energy as much as the environment allows it. Medium circulation is another important energy consumer in growing microalgae. Open ponds usually employ mechanical devices that reduce the energy efficiency of those systems. Gas exchange is required both to supply CO_2 (the main nutrient of photoautotrophic algae) and to remove O_2 that, otherwise, might impair the culture yield (Rosello, et al., 2007; De-Andrade, et al., 2016). As it is necessary to ensure gas exchanging, many designers have used this gas flow also as a dragging potential to ensure circulation inside closed reactors. Doing so, proper lighting and suitable gas concentrations are ensured. On the other hand, temperature influences significantly biomass production rates, as shown in Figure 1.

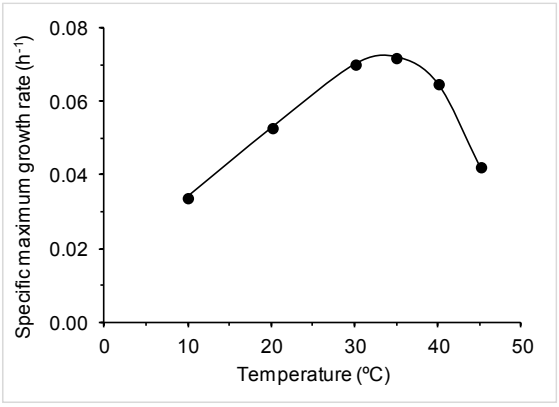


Fig. 1:Dependance of biomass growth on temperature, adapted from (Sánchez, et al., 2008)

As a thumb rule, culture temperature variations should not exceed ± 2 °C respect the design operating condition (Behrens, 2005). Therefore, special attention must be payed to cooling control loops to compensate for overheating due to energy sources, such as lighting and metabolic activity (Morita, et al., 2001). Theoretical conversion of red light into chemical energy has an efficiency of 31%, which means 69% of the incoming energy is wasted as heat. Regarding the effects of pH, within a narrow pH range biomass productivity reaches its maximum, descending for values higher and lower than that range boundaries. Figure 2 shows this effect for a particular strain; *Scenedesmus Almeriensis*.

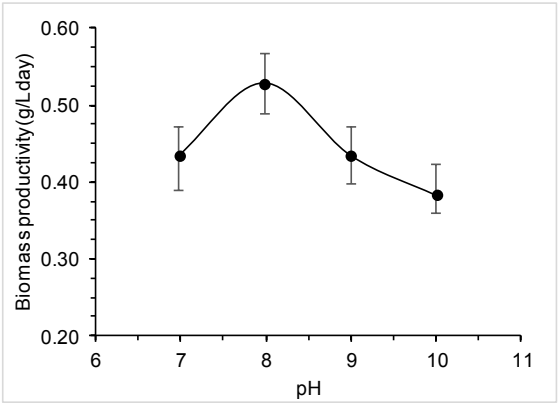


Fig. 2:Dependence of biomass growth on pH, for Scenedesmus Almeriensis, adapted from (Sánchez, et al., 2008).

ISBN 978-607-8242-11-5

Other nutrients supply is required to guarantee the biomass productivity of the culture. These nutrients are usually dissolved in water and supplied regularly to the culture. In case they are not properly supplied, nutrient scarcity may constitute an additional limitation to microalgae growing.

2. PROCESS MODELING

The purpose of this work is developing a control strategy to improve the operation of a photobioreactor by controlling two of its main operation parameters: temperature and pH. Additionally, this strategy has been designed to periodically perform a microalgae culturing-growing-harvesting cycle with little human intervention, using a pH-based indicator as criterion to start a new cycle. As it can be inferred from Figures 1 and 2, temperature and pH have a significant incidence on biomass productivity. Consequently, keeping them in optimum ranges should help improving algal productivity.

There are more relations between different parameters in this organic system; unfortunately most of them are not fully characterized for most of the microalgal strains. A general landscape of algal dynamics in a photobioreactor is shown in Figure 3.

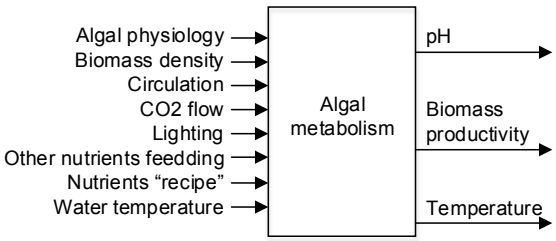


Fig. 3:Factors affecting the performance of a photobioreactor

When these factors are studied in more detail, a set of more complex relationships is found. Figure 4 is an attempt to schematize them.

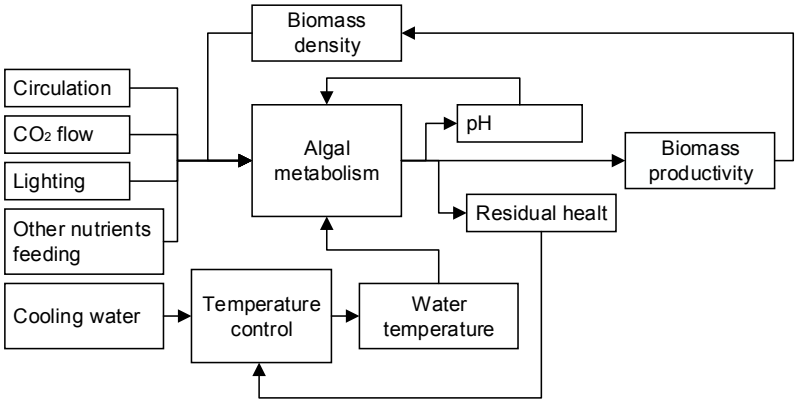
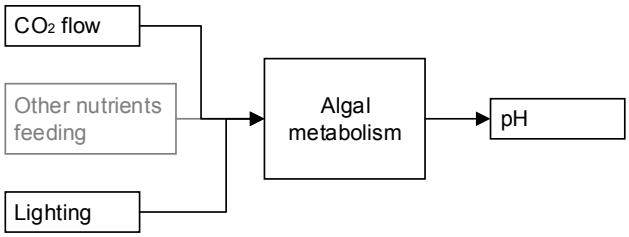


Fig 4:Parameter dynamic in the photobioreactor

Two sub-cycles were analyzed in order to design the control strategy: temperature and pH. In order to do so, many assumptions were made: residual heat is a fixed proportion of incoming lighting energy, nutrient feeding and biomass density are kept constant, and culture circulation has negligible influence in both temperature and pH. Resulting sub-cycles are shown in Figure 5.



ISBN 978-607-8242-11-5

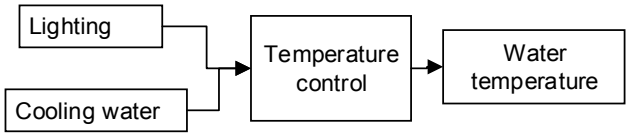


Fig. 5:Temperature and pH sub-cycles in a photobioreactor dynamic

The photobioreactor to be controlled comprises a series of vertical transparent cylinders where the medium flows up and down alternatively. Cooling water, at 15ºC is fed the coils in order to keep temperature in the desired set point. Carbon dioxide is supplied for both circulation and pH control purposes. Excess gases (particularly oxygen) are collected in the upper region of the reactor. There is an exhaust two-way valve used to either recycle the growing algae or harvest them once they have reached maturity conditions. Figure 6 shows a sketch of the modeled photobioreactor.

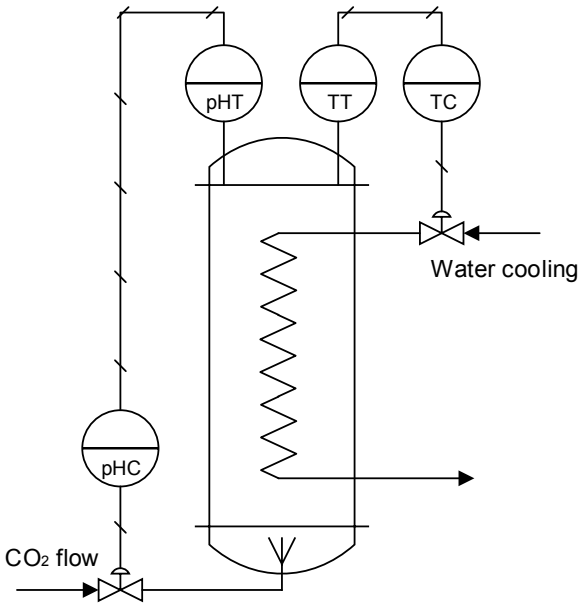


Fig. 6 Sketch of the controlled photobioreactor

Lighting to this reactor comes from solar radiation. At night, a set of fluorescent white-light lamps supplies part of the irradiation to the system. However, these lights were not considered in the model.

2.1. Model equations

In order to evaluate the control strategy performance, thermal behavior of the reactor was modeled with equations proposed by Verdeza et al. (Verdeza, et al., 2016), where inlet irradiance is the input and heat removed by the water-cooling system is the output. Energy components related to microalgae metablic activities were neglected. Energy balnce is shown in Equation 1.

$$\dot{q}_{light} - \dot{m}_{cw} c_p (T_o - T_i) = V_{rct} \rho c_p \frac{d(\Delta T_{rct})}{dt} \quad (1)$$

After algebraic manipulation, the mathematical relation between temperature and both irradiance and cooling water flow is described with the transfer functions (in the Laplace domain) shown in a block diagram in Figure 7.

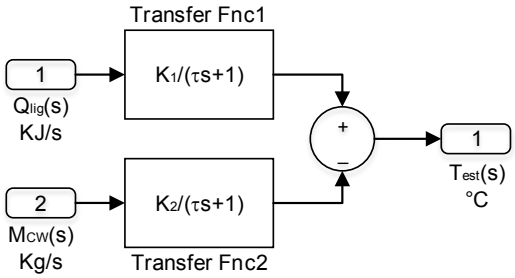


Fig. 7:Process block diagram

ISBN 978-607-8242-11-5

Equation 2 sumarizes the meaning of parameters contained in the block diagram of Figure 7.

$$\tau = \frac{V_{rct}\rho}{\dot{m}_{cw0}\mu}, \qquad K_1 = \frac{1}{\dot{m}_{cw0}c_p\mu}, \qquad K_2 = \frac{(T_o - T_i)_{ss}}{\dot{m}_{cw0}\mu} \tag{2}$$

where: V_{rct} is the reactor volume, ρ is density of the culture medium, μ is the cooling coil efficiency, $\dot{m}_{cw0}$ is the cooling water mass flow, c_p is the specific heat for water and T is used for temperatures, subscripts 'i' and 'o' are used for input and output respectively.

On the other hand, there are two main sources of pH change: nitrate consumption by microalgae, which increases it, and CO2 dilution, which reduces it (Behrens, P., 2005). As nitrate consumption is driven by photosynthesis, and it is led by light radiation, this term may be represented as a function of the radiation level. An expression for this relationship was developed by Berenguel, Rodríguez, Acién and García (Berenguel, et al., 2003) using the following expression:

$$pH = \frac{K_1}{(1+\tau s)}\frac{K_2\omega_n^2}{(s^2+2\delta\omega_n+\omega_n^2)}e^{-t_r s}[CO_2] + \frac{K_r}{(1+\tau_r s)}I_{sat} \tag{3}$$

This expression considers a double incidence of the carbon dioxide: a first order one related to the gas feeding and a second order dealing with recycling of dissolved gas with recycled medium.

Parameters used in our model for this expression are listed in table below.

Table 1. Photobioreactor parameters

Parameter	Value	Units
K_1	-7,143	1/%VP
K_2	0,0111	1/%VP
K_r	0,074	m^2/W
τ	22	min
t_r	4	min
τ_r	20	min
ω_n	1,5	Rad/min
δ	0,85	

A block diagram is made out of this information, enhancing its dynamic modelling. A simplified block diagram is shown in Figure 8.

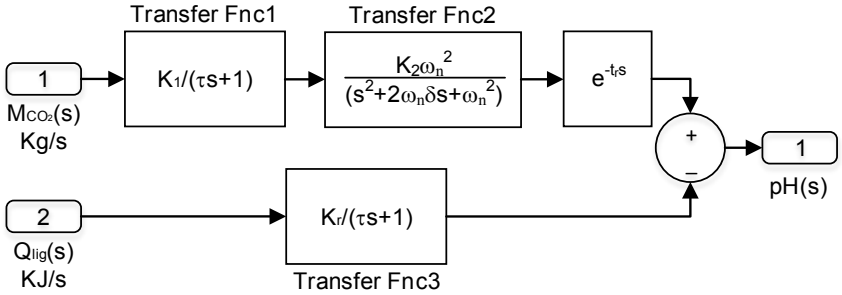


Fig. 8: Block diagram of pH control

ISBN 978-607-8242-11-5

2.2. General strategies

Even though a couple of controllers may keep the system in a fair operating condition, there are some events that cannot be controlled using that simple strategy. One of those unconsidered events is the circulation: carbon dioxide feeding supplies energy for keeping algae movement. This movement allows optimum light incidence on the algae, adequate gas exchange, proper heat transfer, and pH control (Behrens, P., 2005). However, when circulation is accomplished by carbon dioxide injection only, CO_2 supply should stop.

An alternative to overcome this difficulty is supplying air as a circulation driver when carbon dioxide goes to zero. Air may be compressed directly from the surroundings, but this requires a significant energy amount, thus the idea is to feed only the difference between the optimum inlet flow rate and the actual carbon dioxide supply.

Another missing element is harvesting, after some time, algae growth reaches a maximum and no further photosynthesis is accomplished by the culture. It makes no sense to keep algae circulating, wasting carbon dioxide, air pressure if algae will not grow any more. PH may be used as a harvesting criterion as it will not change when photosynthesis finish. If this condition is kept for a given time, that could be considered as signal of culture maturity. In order to harvest in a reasonable time, energy supplied by circulation gases should be increased with some extra impulse, medium feeding is proposed as a source for this momentum.

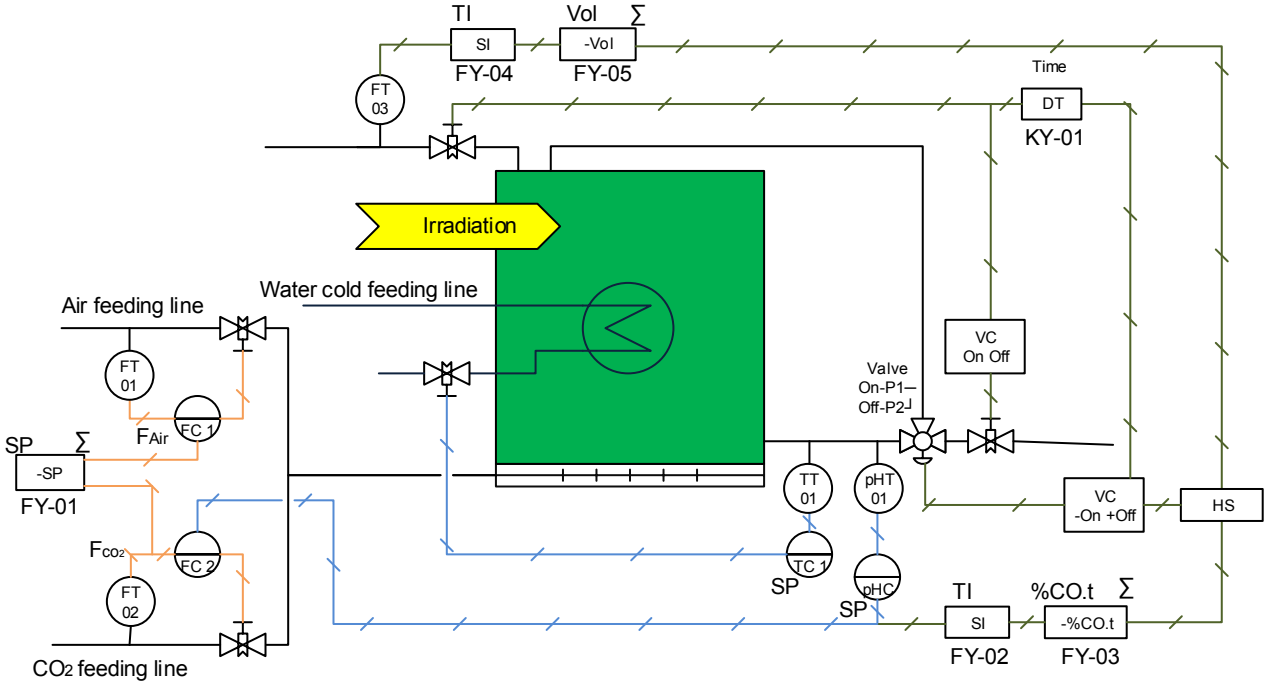


Fig. 9: Scheme of the proposed strategy

Proposed strategy is shown in Figure 9. It mainly requires two additional controllers, one for the air feeding and another one for the carbon dioxide feeding. The second one is fed with a set point coming from the pH controller. Flow signal coming from the carbon dioxide stream is used to compute the set point to the air line (thus guaranteeing a constant circulation gas flow to the photobioreactor).

When pH reaches a value of 7, the pH controller demands no carbon dioxide from the source. Air supply reaches its maximum and remains in that point until pH rises again. If this condition is stable for an hour or more, it is evident that algae are not accomplishing any photosynthesis. Then a signal is sent to the two-way valve and the solenoid valves to change their positions, initiating the harvesting process, in which the current culture is taken to a new (harvesting) tank. After 90% of the photobioreactor volume is removed (calculated from the amount of nutrient medium that has entered the reactor), harvest stops and remaining culture medium works as inoculums to regenerate the culture. Then, new nutrient-rich medium is set up in the reactor to start another cycle.

3. RESULTS AND DISCUSION

Once the model is implemented, a simulation scenario considering the photobioreactor operation in a period of 10 days was carried out. In this simulation scenario the proposed automatic control strategy was also implemented. Moreover, a sinusoidal-shaped solar radiation pattern is simulated. Regarding to temperature control, this is the main disturbance the control strategy must deal with. On the other hand, regarding to pH

ISBN 978-607-8242-11-5

control, the main disturbance is the microalgae growing curve. This curve is modeled according to experimental data. Figure 10 shows the response of the medium temperature, as well as its set point and the implemented solar radiation pattern

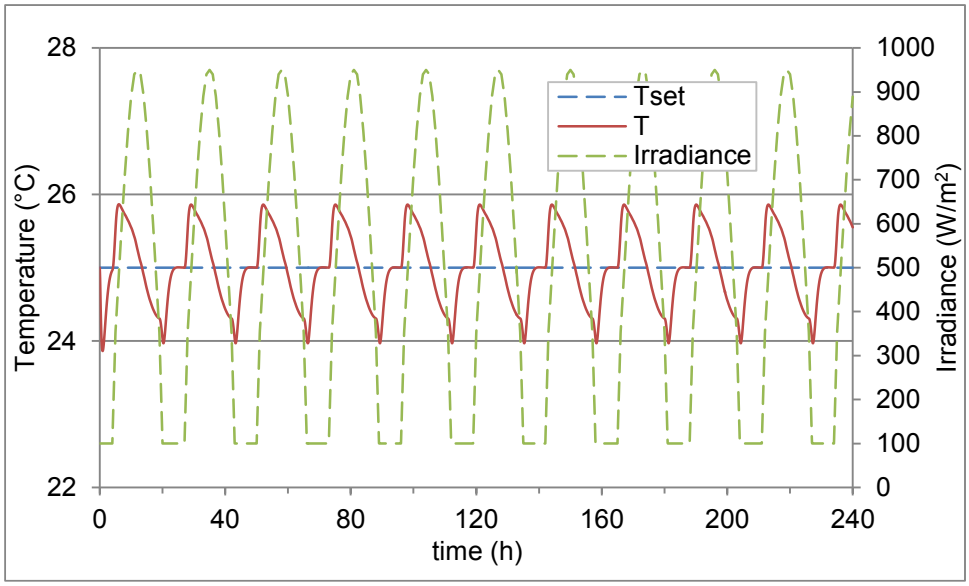


Fig. 10:Photobioreactor performance with integrated control strategy.

As can observed in Figure 10, regardless the disruptive solar radiation changes taking place in the simulation scenario, temperature variations are not larger than $\pm 2℃$, which means the microalgae population survival is guaranteed. Figure 11 shows the response of the pH, as well as its set point and the microalgae growth (in % culture maturity).

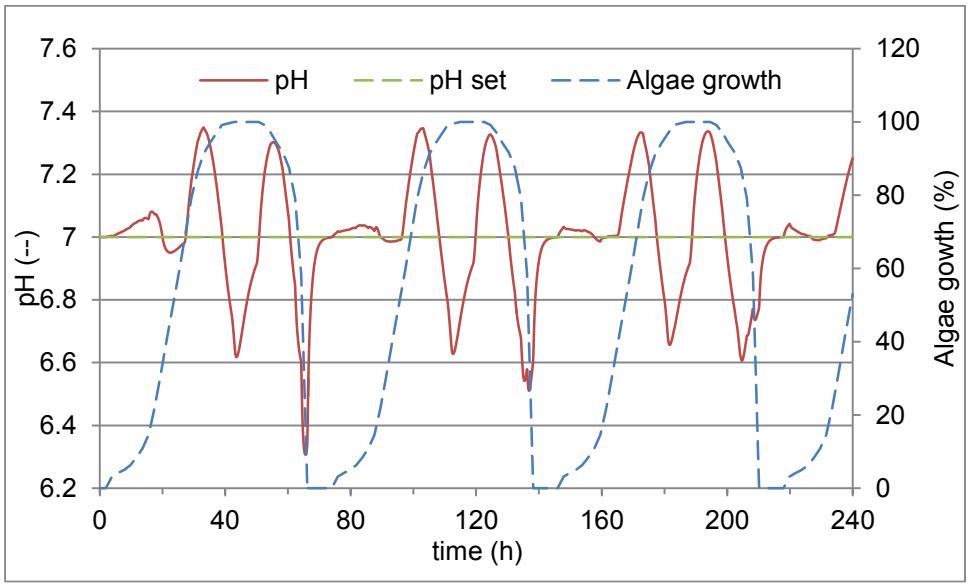


Fig. 11:Photobioreactor performance with integrated control strategy.

As observed in Figure 11, despite the pH controller efforts, this variable exhibits changes from 6.3 to 7.38. This is due to its high dependence on not only CO_2 content but also on lighting level. However, the highest pH variation takes place in the transient periods of culture renewing, i.e. between the harvesting and the re-culturing processes. This is not only unavoidable but also normal and harmless for the upcoming and the outgoing cultures. Figure 12 shows the behavior of the manipulated variables, i.e. CO_2 and water flow.

ISBN 978-607-8242-11-5

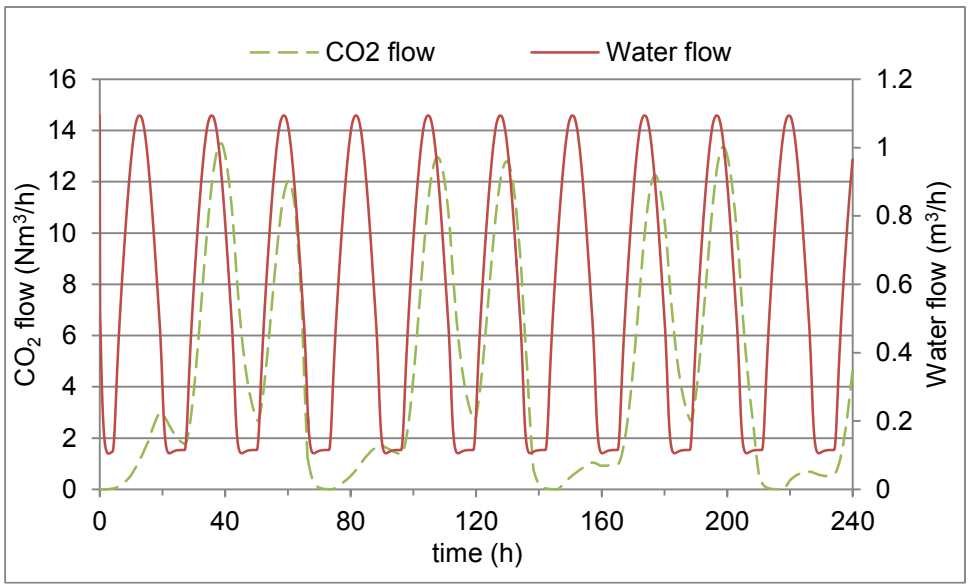


Fig. 12: Photobioreactor performance with integrated control strategy

Figure 12 illustrates the corrective actions taken by the temperature and the pH controllers. As expected, the trend observed in the water flow is similar to the solar radiation pattern, while the trend observed in the CO_2 flow is more complex due to the pH dependence on both the solar radiation pattern and the microalgae growth pattern, since these patterns exhibit different shapes and periods.

Previous strategy, though, does not differentiate whether the microalgae are alive or not when the harvest process begins (pH may become stable too when microalgae die). Consequently, operators should check biomass conditions to determine whether inoculums are needed to the new culture. An alternative to overcome this drawback may be using a turbidimeter to check the medium turbidity, which grows faster than photosynthesis decays.

CONCLUSIONS

In this work, a new control strategy for improving performance of microalgae cultures with narrow human intervention is proposed. In order to assess the proposed strategy effectiveness, a dynamic model of a photobioreactor is developed, which shows the response for all important variables as function of the manipulated input variables (water and CO_2 flows) and principal disturbances (lighting level and microalgae growth). Then, the proposed strategy is implemented in the photobioreactor model and a simulation scenario is carried out.

Response of the controlled variable show an accurate control performance since temperature and pH are constrained in safe operating ranges, so that microalgae culture integrity is well preserved. Moreover, the simulation mimics successfully an automatic microalgae culturing-growing-harvesting cycle, which can run over long time periods without much human intervention.

There are several opportunities for improvement, though. Sensing turbidity and dissolved oxygen may result in more precise criteria to determine the optimum harvest time. Turbidity may also constitute an effective tool for algae counting. Additionally, measuring incident radiation represents an further improvement opportunity: light is the main driver of temperature and photosynthesis, and the latter is the main cause of pH rising. Therefore, radiation levels may allow implementing feedforward control of temperature and pH.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCES

Andersen, R., *"Algal Culturing Techniques"*, Elsevier, Burlington- EUA (2005).

Behrens, P., *"Photobioreactors and Fermentors: The Light and Dark Sides of Growing Algae"*, 189-203. Andersen, R., Algal Culturing Techniques, (2005).

Berenguel, M., Rodríguez, F., Acién, F., and García J., *"Model predictive control of pH in tubular photobioreactors"*, Journal of Process Control, 14, 377–387 (2004).

De-Andrade, G., Berenguel, M., Guzmán, J., Pagano, D., and Acién, F., *"Optimization of biomass production in outdoor tubular photobioreactors"*, Journal of Biotechnology, 37, 58-69 (2016).

Eriksen, N., *"The technology of microalgal culturing"*, Biotechnology Letters, 30(9), 1525-1536 (2008).

Madigan, M., *"Brock, Biologia de Los Microorganismos"*, Pearson, España (2004).

Morita, M., Watanabe, Y., Saiki, H., *"Instruction of Microalgal Biomass Production for Practically Higher Photosynthetic Performance Using a Photobioreactor"*, Food and Bioproducts Processing, 79(3), 176-183 (2001).

Richmond, A., "*Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology",* Blackwell, Oxford - UK, (2004)

Rosello, R., Csögör, Z., Perner I., Fleck, P., ND Posten, C., *"Scale-down of microalgae cultivations in tubular photo-bioreactors—A conceptual approach"*, Journal of Biotechnology, 132(2), 127–133 (2007).

Sánchez, J., Fernández J., Acién, F., Cerón, M., Pérez, J., and Molina, E., *"Biomass and lutein productivity of Scenedesmus almeriensis: influence of irradiance, dilution rate and temperature"*, Applied Microbiology and Biotechnology, 79(5), 719–729 (2008).

Singh, R.N., Sharma, S., *"Development of suitable photobioreactor for algae production – A review"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), 2347-2353 (2012).

Ugwu, C.U., Aoyagi, H., and Uchiyama, H., *"Photobioreactors for mass cultivation of algae"*, Bioresource Technology, 99(10), 4021–4028 (2008).

Verdeza, A., Di-Mare, L., Sanjuan, M., and Bula, A., *"Design of tuning equations for PID controllers (Proportional-Integral-Derivative) Implemented in Photo-Bioreactors"*, Información tecnológica, 27(4), 121-132 (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Selección de micro algas apropiadas para la producción de biocombustibles en el Caribe Colombiano

Arnaldo Verdeza[1], Leonardo Di Mare [2], Arturo González [2], Antonio Bula[2].
(1) Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla-Colombia
(2) Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, Barranquilla-Colombia
e-mail: averdeza@unisimonbolivar.edu.co, ldimare@uninorte.edu.co, abula@uninorte.edu.co

Resumen

Hoy en día, los microorganismos se ven como una excelente alternativa para la elaboración de varios productos comerciales como suplementos alimentarios, micronutrientes, biocombustibles y bioactivos, los parámetros tenidos en cuenta para la elección de estos microorganismos son la tasa de crecimiento, lípidos, hidratos de carbono y contenido de nutrientes. Estas propiedades convierten estos microorganismos en una excelente fuente de biocombustibles como el biometanol, bioetanol y biodiesel. En este trabajo, se analiza la producción de biocombustible a partir de microalgas propias del Caribe Colombiano, de acuerdo con las condiciones que se exigen para los medios de cultivo, condiciones climáticas, requerimientos de agua, y nivel metabólico.

Palabras claves: micro algas, biocombustibles, Caribe Colombiano.

Micro Algal species selection suitable for biofuel production in the Colombian Caribe

Abstract

Nowadays, microorganisms are seen as an excellent alternative for elaborating several commercial products as food supplements, micro nutrients, biofuels and bioactives, parameters considered for choosing such microorganisms include growing rate, high lipid, nutrient and carbohydrate content. These properties turn these microorganisms in an excellent source for biofuels such as biomethane, bioethanol and biodiesel. In this work, the production of biofuel from Colombian Caribe microalgae is analyzed according to the conditions required for culture media, weather conditions, water requirements, and metabolic level.

Keywords: microalgae, biofuels, Colombian Caribe.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

Fermentation processes were among the first industrial uses of microorganisms; synthesis of pharmaceutical products, food additives, enzymes and other chemical products came later. These production processes are based on enhancing natural metabolic reactions of the microorganisms (Madigan, et al., 2004). According to the mechanisms employed for capturing carbon, microorganisms are divided in two broad groups: those who take it directly from CO_2, called autotrophs, and those that get it from other organic structures, heterotrophs. This paper focuses on autotrophic organisms that use energy from light (photoautotrophs) because of their ability for sequestering CO_2 to produce biomass and other complex compounds as shown in Figure 1. This category includes a wide variety of organisms such as green plants, algae and microalgae.

Photosynthesis

Photosynthesis consists in two coupled processes: light and dark reactions. Light reaction involves light (usually from the Sun) and cell pigments (as chlorophyll, beta carotene, and others) that form adenosine triphosphate (ATP) and nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH) as energy and hydrogen carriers for the dark reaction. Dark reaction (on behalf of the fact that it is not strictly light dependent) uses energy an hydrogen coming from the light one to impulse the Calvin cycle in which CO_2 is combined with hydrogen to make glucose and other organic compounds (Madigan, et al., 2004). Hydrogen for the process comes from water; it is split to hydrogen ions and oxygen (released to the environment) during the light reaction.

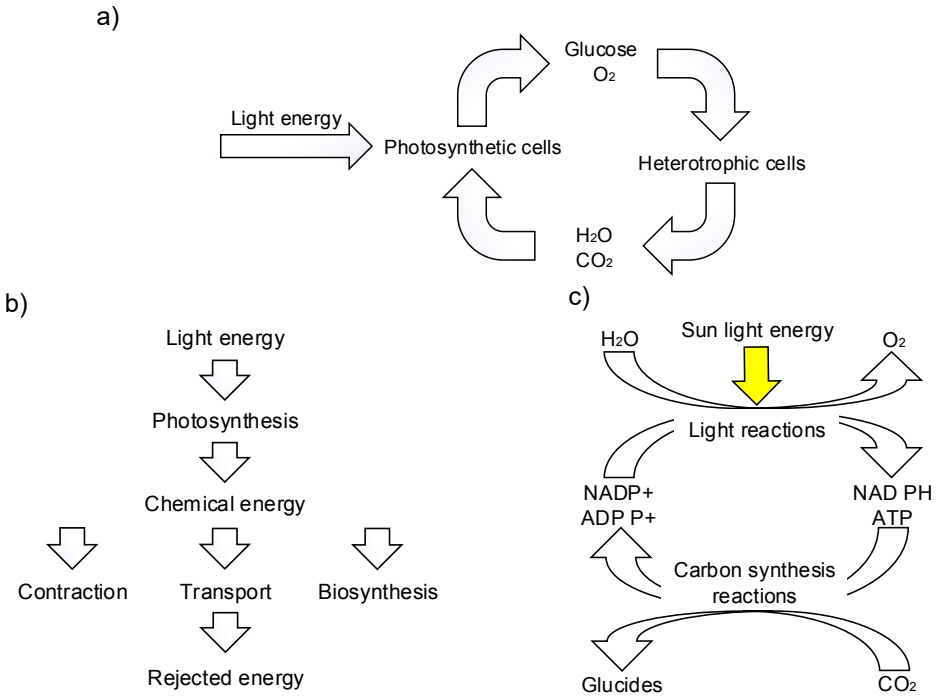


Fig. 1:(a) Carbon cycle in nature, (b) Energy flow in biosphere, (c) Photosynthetic reactions. (Madigan, et al., 2004).

Process may be also represented by Light Reaction, Eq. 1; Dark Reaction, Eq. 2; and Global Reaction, Eq. 3.

$$6H_2O + 12NADP^+ + P^+ + ADP \xrightarrow{light} 3O_2 + ATP + 12NADPH \quad (1)$$

$$CO_2 + NADPH + H^+ + ATP \rightarrow Glúcidos + NADP^+ + ADP + P^+ \quad (2)$$

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad (3)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Glucose $(C_6H_{12}O_6)$ constitutes the basis for producing carbohydrates, lipids and proteins. It is worth to say that the dark reaction represented by Eq. 2, is an over simplification of a quite complex reaction pathway that uses previous organic molecules to get simpler carbon compounds from CO_2, as triose phosphate triphosphoglycerate. A better approach to the actual process is shown in Figure 2.

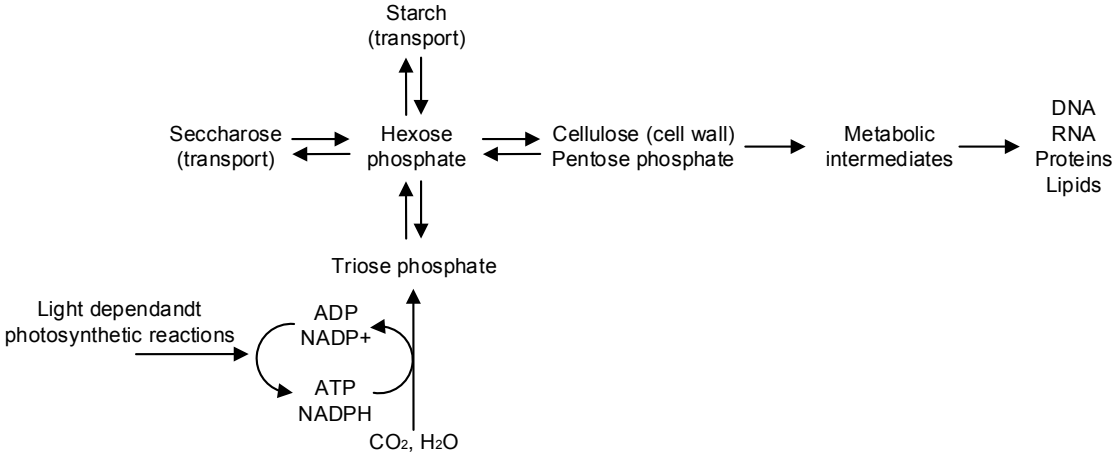


Fig. 2: Biomass biosynthesis (Nelson et al., 2005).

Long hydrocarbon fatty acid chains are very effective energy storages as they have completely reduced carbon and they represent a better energy reserve than carbohydrates, and several organisms employ lipids (many of them as triacylglycerol) as energy storage (Madigan, et al., 2004; Nelson et al., 2005; Mathews et ak., 2005).

Biomass production

Solar energy represents the main energy source in the biosphere; when captured by photosynthetic processes, it drives the chemical energy cycles on Earth. Indeed, most of the energy employed by human beings to meet their requirements for feeding, heat, light and electric power comes from photosynthesis as even coal and oil were generated by decomposition of ancient photosynthetic microorganisms (Nelson et al., 2005). Nowadays, microorganisms are seen as an excellent alternative for elaborating several commercial products as shown Figure 3.There is an increasing interest in using microorganisms in biofuel production, i.e. fat rich microalgae *Botryococcus braunii* (Madigan, et al., 2004). Parameters considered for choosing such microorganisms include growing rate, high lipid, nutrient and carbohydrate content. These properties turn this microorganisms in an excellent source for biofuels such as biomethane, bioethanol and biodiesel, as well as many medical and nutraceutical products (Song and Shi, 2008).

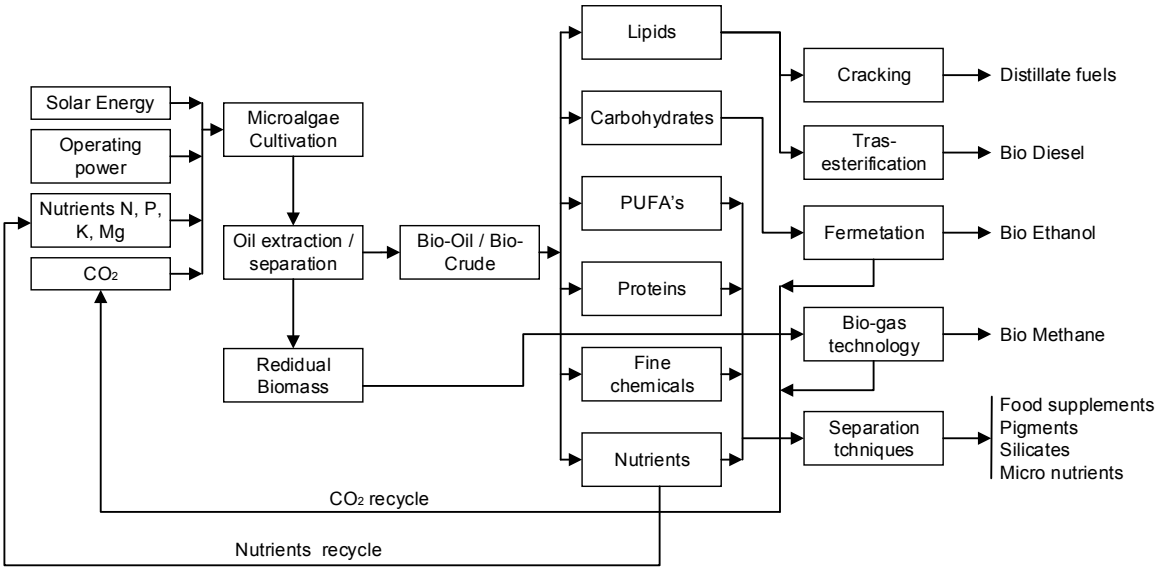


Fig. 3: Schematic proposed microalgae biorefinery (Singh and Gu, 2010).

ISBN 978-607-8242-11-5

Culture requirements

A growing culture demands conditions that guarantee adequate factors in their optimum levels for the growth of microorganisms, according to some authors among those factors are found (Andersen, 2005; Alveal et al., 1995): culture medium, light, temperature and pH. Main factors to consider for microalgal biomass production purposes are the following: growing rate (total cumulative biomass per unit time and volume), lipid content (triacylglycerol and free fatty acid), endurance to the fluctuation of environmental conditions (temperature, nutrients supply, light, and competition with other microalgae or bacteria), nutrient availability (carbon dioxide sources available for sequestering carbon), biomass separation and treatment, feasibility to obtain valuable chemical byproducts. After choosing the microalga, it is necessary to determine the reactor for growing it as well as the strategy for attaining optimal conditions that guarantee maximum growing rate (Mata et al., 2010). Figure 3 presents and schematic proposed by (Singh and Gu, 2010) for a microalgae refinery, while Figure 4 shows a sketch of the biodiesel production process.

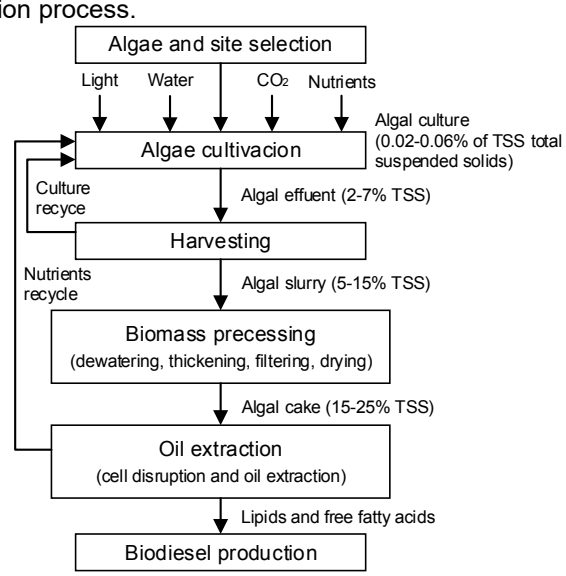


Fig. 4: Operations for the biodiesel production using microalgae (Mata et al., 2010).

Biofuels from microalgae biomass

Biodiesel: Biodiesel is one of the alternatives for biofuel production from microalgae as these microorganisms store lipids not only as an energy reserve but also as a mechanism for controlling their floatability. Some species, however, present higher lipid concentrations than others. Besides, some species can be stress induced to increase their lipid storage. All of these generate numerous alternative microalgal species available for producing biofuels. Among those promising microalgal species, it is found *Botryococcus braunii*; this cosmopolitan green colonial microalga (Metzger and Largeau, 2005) inhabits oligotrophic fresh water bodies at low to tropical temperatures almost everywhere but the Antarctica. It is characterized by an important production of lipids as hydrocarbon chains, particularly botryococcane and tetramethylsqualane (Summonsa et al., 2002). Lipid content in their biomass (dry basis) ranges between 25% and 75%). Other species with important lipid contents include chlorella (Liua et al., 2010), s Actinocyclus normanii (Prieto et al., 2005), *Dunaliella (Mousavi et al., 2011; Tang et al., 2011)* and *Nannochloropsis (Lee et al., 2009; Abou-Shanab et al., 2011)*. Those with lipid content higher than 20% of their dry weight are considered of interest, considering their growing rates (Mata et al., 2010; Balat, 2011; Brennana and Owendea, 2010). Table below lists many different microalgae species giving important information regarding their attitude for biofuel production.

ISBN 978-607-8242-11-5

Table 1. *Lipid content and productivity of different microalgal species under diverse culture conditions* (Chen et al., 2011).

Microalga especies	Cultivation condition	Biomass productivity (g/L/d)	Lipid content (% of DCW)	Lipid productivity (mg/L/d)
*Botryococcus braunii (*UTEX 572)	Phototrophic[a]	0.03	20.8	5.5
*Chaetoceros calcitrans (*CS 178)	Phototrophic[a]	0.04	39.8	17.6
*Chaetoceros muelleri (*FandM-M43)	Phototrophic[a]	0.07	33.6	21.8
*Chlorella emersonii (*CCAP211/11N)	Phototrophic[b]	0.04	25.0–34.0	10.3–12.2
*Chlorella emersonii (*CCAP 211/11N)	Phototrophic[a]	0.03–0.05	29.0–63.0	8.1–49.9
*Chlorella minutissima (*UTEX 2341)	Phototrophic[a]	0.02–0.03	31.0–57.0	9.0–10.2
*Chlorella protothecoides (*CCAP 211/8D)	Phototrophic[a]	0.002–0.02	11.0–23.0	0.2–5.4
Chlorella protothecoides	Heterotrophic[f]	4.0–4.4	43.0–46.0	1881.3–1840.0
Chlorellaprotothecoides	Heterotrophic[c]	2.2–7.4	50.3–57.8	1209.6–3701.1
Chlorella protothecoides	Heterotrophic[c,g]	2.0	46.1	932.0
Chlorella protothecoides	Heterotrophic[c]	1.7–2.0	43.0–48.7	732.7–932.0
*Chlorella sorokiniana (*UTEX 1230)	Phototrophic[a]	0.003–0.005	20.0–22.0	0.6–1.1
*Chlorella sorokiniana (*IAM-212)	Phototrophic[a]	0.23	19.3	44.7
Chlorella sp. (F&M-M48)	Phototrophic[a]	0.23	18.7	42.1
Chlorella sp.	Phototrophic[a]	0.37–0.53	32.0–34.0	121.3–178.8
*Chlorella vulgaris (*KCTC AG10032)	Phototrophic[a]	0.10	6.6	6.9
Chlorella vulgaris (#259)	Phototrophic[a]	0.01	33.0–38.0	4.0
Chlorella vulgaris (#259)	Heterotrophic[c,d]	0.08–0.15	23.0–36.0	27.0–35.0
Chlorella vulgaris (#259)	Mixotrophic[c,e]	0.09–0.25	21.0–34.0	22.0–54.0
*Chlorella vulgaris(*INETI 58)	Phototrophic[b]	0.18	5.1	7.4
Chlorella vulgari Beijerinck (CCAP 211/11B)	Phototrophic[a]	0.03–0.04	18.0–40.0	5.4–14.9
Chlorella vulgaris Beijerinck (CCAP 211/11B)	Phototrophic[b]	0.02–0.04	28.0–58.0	11.2–13.9
*Chlorella vulgaris (*CCAP 211/11B)	Phototrophic[a]	0.17	19.2	32.6
*Chlorella vulgaris (*F&M-M49)	Phototrophic[a]	0.20	18.4	36.9
Chlorococcum sp. (UMACC 112)	Phototrophic[a]	0.28	19.3	53.7
*Dunaliella tertiolecta (*IPIMAR)	Phototrophic[b]	0.12	16.7	20.0
*Dunaliella tertiolecta (*ATCC 30929)	Phototrophic[a]	0.10	60.6–67.8	60.6–69.8
Ellipsoidion sp. (F&M-M31)	Phototrophic[a]	0.17	27.4	47.3
Isochrysis sp. ((T-ISO) CS 177)	Phototrophic[a]	0.17	22.4	37.7
Isochrysis sp. (F&M-M37)	Phototrophic[a]	0.14	27.4	37.8
*Monodus subterraneus (*UTEX 151)	Phototrophic[a]	0.19	16.1	30.4
Nannochloris sp. (UTEX LB1999)	Phototrophic[a]	0.04–0.35	29.9–40.3	15.6–109.3
*Nannochloropsis (*CS 246)	Phototrophic[a]	0.17	29.2	49.7
*Nannochloropsis oculata (*NCTU-3)	Phototrophic[a]	0.37–0.48	22.7–29.7	84.0–142.0
Nannochloropsis sp.	Phototrophic[b]	0.09	28.7	25.8
Nannochloropsis sp. (F&M-M24)	Phototrophic[a]	0.18	30.9	54.8
Nannochloropsis sp. (F&M-M26)	Phototrophic[a]	0.21	29.6	61.0
Nannochloropsis sp. (F&M-M27)	Phototrophic[a]	0.20	24.4	48.2
Nannochloropsis sp. (F&M-M28)	Phototrophic[a]	0.17	35.7	60.9
Nannochloropsis sp. (F&M-M29)	Phototrophic[a]	0.17	21.6	37.6
*Neochloris oleabundans (*UTEX 1185)	Phototrophic[a,b]	0.03–0.15	15.9–56.0	10.7–38.8
*Neochloris oleabundans (*UTEX 1185)	Phototrophic[b]	0.09	29.0	26.1
*Neochloris oleoabundans (*UTEX 1185)	Phototrophic[a]	0.31–0.63	7.0–40.3	38.0–133.0
*Pavlova lutheri (*CS 182)	Phototrophic[a]	0.14	35.5	50.2
*Pavlova salina (*CS 49)	Phototrophic[a]	0.16	30.9	49.4
Phaeodactylum tricornutum (F&M-M40)	Phototrophic[a]	0.24	18.7	44.8
Porphyridium cruentum	Phototrophic[a]	0.37	9.5	34.8
Scenedesmus obliquus- FCTU Coimbra	Phototrophic[b]	0.09	17.7	15.9
Scenedesmus obliquus	Phototrophic[b]	0.06	12.7	7.14
Scenedesmus obliquus	Mixotrophic[c]	0.10–0.51	6.6–11.8	11.6–58.6
Scenedesmus quadricauda	Phototrophic[a]	0.19	18.4	35.1
Scenedesmus sp. (KCTC AG20831)	Phototrophic[a]	0.22	9.5	20.7
Scenedesmus sp. DM	Phototrophic[a]	0.26	21.1	53.9
Scenedesmus sp. (F&M-M19)	Phototrophic[a]	0.21	19.6	40.8
*Skeletonema costatum (*CS 181)	Phototrophic[a]	0.08	21.1	17.4
Skeletonema sp. (CS 252)	Phototrophic[a]	0.09	31.8	27.3
*Spirulina máxima (*LB 2342)	Phototrophic[b]	0.21	4.1	8.6
Tetraselmis sp. (F&M-M34)	Phototrophic[a]	0.30	14.7	43.4
*Tetraselmis suecica (*F&M-M33)	Phototrophic[a]	0.32	8.5	27.0
*Tetraselmis suecica (*F&M-M35)	Phototrophic[a]	0.28	12.9	36.4
*Thalassiosira pseudonana (*CS 173)	Phototrophic[a]	0.08	20.6	17.4

a) CO_2,b) Air, c) Glucose, d) Acetate, e) Glycerol, f) Jerusalem artichoke hydrolysate (JAH), g) Corn powder hydrolysate (CPH).

ISBN 978-607-8242-11-5

Lipid acids synthesized by distinct microalgae differ depending on the species. There are polar lipids, neutral lipids, waxes, sterols, phospholipids, glycolipids, carotenoids, terpenes, tocopherols, quinones, etc. Only neutral lipids, though, are suitable for biodiesel production as they are easily transesterificated; this process is more cumbersome for other lipids (Madigan, et al., 2004; Brennana and Owendea, 2010).

Table 2. *Comparison of CO_2 capture capacity and biodiesel productivity of microalgae and higher plants*, adapted from (Chen et al., 2011; Zeng et al. 2011).

Organism	CO_2 Capture capacity (%)[a]	Productivity ($g/m^2/day$)	Max. Theoretical Productivity (%)	Biomass Lipid content (%)	Biodiesel productivity ($g/m^2/day$)[b]
Theoretical	100	77	100	–	N/A
Green microalgae	26–52	20–40	27–54	30–45	6–12
Chlorella	22–26	17–20	22–27	40–60	5.4–6
Miscanthusgiganteus	10–22	8–17	11–22	N/A	2.4–5.4
Oilseed rape	1–2	0.8–1.6 (of seed)	1.0–1.2 (of seed)	40–44 (of seed)	0.24–0.48
Soja	N/A	0.65 (of seed)	0.8 (of seed)	20 (of seed)	0.2
Jatropha	N/A	2.2 (of seed)	2.8 (of seed)	30 (of seed)	0.66

[a] Theoretically, 3.6mol (158.4g) of CO_2 are captured by autophyte to produce 77g of biomass.
[b] It is assumed that 30% of the biomass is lipid

Alcohol: Ethanol from microalgae is produced by a biochemical conversion that transforms carbohydrates to alcohol. This process requires an initial treatment for getting fermenting sugars; it is done by either chemical or enzymatic hydrolysis (Sun and Cheng, 2002). Once those sugars are obtained, fermentation proceeds using yeast like zymomonas mobilis, pichiastiptis or saccharomyces cerevisiae, resulting in ethanol and carbon dioxide, the last one might be reused in algae cultures (Harun et al., 2010). An important fact related to the alcohol production is that it can be performed on the biomass resulting after extracting lipids from the cells. Even more, alcohol is required for the lipid transesterification process in order to obtain biodiesel (Singh and Gu, 2010); so alcohol production may be a convenient complement in the biodiesel production from microalgae. More appropriate algae for the alcohol production are those with the higher carbohydrate content. Table 3 shows protein and carbohydrate contents in various species of microalgae.

Table 3. *Protein and carbohydrate contents from various species of microalgae*, adapted from (Singh and Gu, 2010).

Algae strain	Protein (% dwt)	Carbohydrate (% dwt)
Scenedesmus obliquus	50–56	10–17
Scenedesmus quadricauda	47	–
Scenedesmus dimorphus*8*	8–18	21–52
Chlamydomonas rheinhardii	48	17
Chlorella vulgaris	51–58	12–17
Chlorella pyrenoidosa	57	26
Spirogyra *sp*	6–20	33–64
Dunaliella bioculata	49	4
Dunaliella salina	57	32
Euglena gracilis	39–61	14–18
Prymnesium parvum	28–45	25–33
Tetraselmis maculate	52	15
Porphyridium cruentum	28–45	40–57
Spirulina platensis	52	8–14
Spirulina maxima	28–39	13–16
Synechoccus *sp.*	46–63	15
Anabaena cylindrical	43–56	25–30

Carbohydrates in microalgae are usually found as cellulose, a compound requiring hydrolysis as an intermediate step before fermentation; this fact would increase alcohol production costs, making it more attractive to use alcohol from other sources (sugar cane, for instance). There are studies, however, pointing to the bacteria usage as a way to accomplish fermentation in a straight forward manner. Clostridium thermocellum and clostridium acetobutylicum (also known as Weizmann microorganism, on behalf of Jaim Weizmann who employed it for the first time) are able to ferment algal cellulose; the latter, acetobutylicum, can produce acetone and bio butanol out of microalgal cellulose.

Thermochemical processes, like pyrolysis, gasification, and liquefaction, can decompose microalgal biomass to obtain methane, methanol y some other hydrocarbons. Even direct combustion (to obtain thermal energy) can be considered as carbon dioxide from it may be used to feed new microalgae, and therefore it would not

ISBN 978-607-8242-11-5

contribute to global warming. All of these options shall be considered when determining energy balances and carbon foot print analysis of the production processes from microalgae (Singh and Gu, 2010).

Hydrogen: Biologic production of hydrogen is accomplished by a process known as bio photolysis. It could be either direct or indirect.

*Direct bio photolysis***:** green algae photosynthetically produce hydrogen and oxygen from water, using sunlight:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (4)$$

This reaction proceeds as an effect of an enzyme called hydrogenase; its production is induced by growing the microalga in anaerobic dark conditions; afterwards, when the alga is placed in light anaerobic conditions, it is able to produce gaseous hydrogen.

Indirect bio photolysis: carbohydrates produced by cyanobacteria and green-blue algae fix to endogenous hydrogen rich substrates where they decompose to hydrogen and CO_2 by the action of enzymes as nitrogenase and hydrogenase in a sequence process.

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad (5)$$

$$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 12H_2 + 6CO_2 \quad (6)$$

Two culture systems are required: one for the normal photosynthetic process and a different one for hydrogen production (Melis and Melnicki, 2006).

MiCROALGAE SELECTION

An assessment of their economic potential is accomplished for the microalgal species identified in water bodies of the Colombian Caribe Region. Habitat, biomass production, CO_2 capture efficiency, and commercial value are the considered criteria. Tabla 4 shows the grades assigned for these criteria to microalgal species identified in a couple of water bodies of the Caribe Region: Luruaco lake and the Magdalena river, close to Sabanagrande, both in Atlantico department of Colombia. These grades are based in reported behaviors by different authors.

Table 4. Comparison among identified microalgal species for selection purposes.

Microalgal species	Regular habitat	Biomass production (gr/L)	CO_2 capture efficiency (%)	Commercial value for their products (5-50 $USD/g)	General grade
Chlorella sp.	4	2,016	1,48	3	35,804
Dunaliella salina	1	0,448	1	3	1,344
Spirulina sp.	3	0,368	0,28	4	1,236
Botryococcus braunii	4	0,048	1	1	0,192
Scenedesmus obliquus	3	0,352	0,84	2	1,774
Chaetocerus gracilis	1	0,031	1	3	0,098
Ankistrodesmus gracilis	3	0,688	1	3	6,192
Tetraselmis suecica	1	0,352	1	3	1,056
Isochrysis galbana	1	1,536	1	3	4,608
Nannochloropsis sp.	1	0,304	1,36	3	1,24
Thalassiosira pseudonana	1	0,128	1	3	0,384

Scenedesmus obliquus, *Scenedesmus sp., Chlorella sp., Selenastrum sp., Cosmarium sp., Pinnularia nobilis* and *Navicula sp.* were found in Luruaco lake; while *Oscilatoria sp.* and *Chlorella sp.* were the only species identified in Magdalena river (close to Sabanagrande). Previous assessment favors Chlorella sp. because of its rapid growth requiring CO_2, water, sunlight and minimum mineral quantities only. Chlorella sp. (Figure 1) Is potencially useful for biofuel production, CO_2 capture and wastewater treatment (Burlew, 1953).

ISBN 978-607-8242-11-5

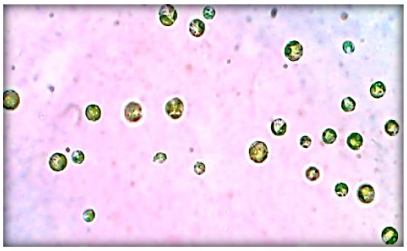


Figure 1. *Chlorella sp*. Microalgae Laboratory, Universidad del Norte.

Even though not all of the identified species count on reported information enough for accomplishing their assessment, there is evidence for choosing Chlorella sp. as a good candidate for developing further research aiming to biofuel production and CO_2 capture.

CONCLUSIONS

Metabolism in living organisms constitutes a chemical process able to produce several simple and complex substances out of inorganic ones. Even simple microorganisms, like microalgae, may represent a whole refinery process that could be used for human benefit. Among those benefits, micro algae have a great potential for biofuel production, furthermore, they are considered as precursors for biorefinieries due to their ability for producing different types of biofuels and other useful substances. One of the main requirements for algae production is light, solar radiation constitutes a cheap source for light that should be used in areas where there is plenty of solar radiation all year long. According to climatic conditions, water requirements, culture media, etc., microalgae may be selected in order to attain maximum production rates of specific biofuels.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to acknowledge support from Universidad del Norte – Energy Initiative and Fundación Rubiales (Contract No. 40-337 2012, “Microalgae Biodiversity.”)

REFERENCES

Abou-Shanab, R., Hwang, J., Cho, Y., Min, B. and Jeon, B., "Characterization of microalgal species isolated from fresh water bodies as a potential source for biodiesel production", Applied Energy, 88(10), 3300–3306, (2011).

Alveal, K., Ferrario M., Oliveira E. and Sar E., *"Manual de Métodos Ficológicos"*, Anibal Pinto, Chile, (1995).

Andersen, R., *"Algal Culturing Techniques"*, Elsevier Academic Press, United States, (2005).

Balat, M., *"Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work"*, Energy Conversion and Management, 52(2), 1479–1492, (2011).

Brennana, L. and Owendea, P., "Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(2), 557–577, (2010).

Burlew, J. Algal culture: from laboratory to pilot plant. Carnegie (1953).

Chen C., Yeh K., Aisyah R., Lee D. and Chang J., *"Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review"*, Bioresource Technology, 102(1), 71-81, (2011).

Harun, R., Danquah, M. and Forde, G., *"Microalgal biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production",* Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 85(2), 199–203, (2010).

Lee, C., Kwon, J. and Kim, E., *"Biodiesel production from marine microalga, Dunaliella tertiolecta, Tetraselmis chui and Nannochloris oculata"*, Journal of Bioscience and Bioengineering, 108(1), S130–S131, (2009).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Liua, J., Huanga, J., Wai Fan, K., Jiang, Y. Zhong. Y., Sun, Z., and Chen, F., *"Production potential of Chlorella zofingienesis as a feedstock for biodiesel"*, Bioresource Technology, 101(22), 8658–8663, (2010).

Madigan, M., Martinko, J. and Parker, J. *"Brock Biologia de Los Microorganismos"*, Pearson, España, (2004).

Mata, T., Martins, A. and Caetano, N., *"Microalgae for biodiesel production and other applications: A review"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 217-232, (2010).

Mathews, C., Ahern, K. and Van-Holde, K. *"Bioquímica"*, Addison Wesley, España, (2005).

Melis, A. and Melnicki, M., *"Integrated biological hydrogen production"*, International Journal of Hydrogen Energy, 31(11), 1563–1573, (2006).

Metzger, P. and Largeau, C., *"Botryococcus braunii: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids"*, Applied Microbiology and Biotechnology, 66(5), 486-496, (2005).

Mousavi, P., Najafabady, N., Amini, S. and Ghasmi, Y., *"Biodiesel production from Dunaliella salina"*, European Biotechnology Congress, 22, S149, (2011).

Nelson, D., Cox, M. and Cuchillo, C. *"Principios de Bioquímica"*, Omega, Wisconsin, (2005).

Prieto, M., Mogollon, M., Castro, A. and Sierra, L., *"Environmental and crop conditions efects on three sea diatomean productivity (yield) with acuicol potential"*, MVZ Cordoba, 10(1), 544-554, (2005).

Singh, J. and Gu, S., *"Commercialization potential of microalgae for biofuels production"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9), 2596–2610, (2010).

Song, D., Fu, J. and Shi, D. *"Exploitation of Oil-bearing Microalgae for Biodiesel"*, Chinese Journal of Biotechnology, 24(3), 341–348, (2008).

Summonsa, R., Metzgerb, P., Largeaub, C., Murrayc, A. and Hopec, J., *"Polymethylsqualanes from Botryococcus braunii in lacustrine sediments and crude oils"*, Organic Geochemistry, 33(2), 99–109, (2002).

Sun, Y. and Cheng, J., *"Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review",* Bioresource Technology, 83(1), 1–11, (2002).

Tang, H., Abunasser, N., Garcia, M., Chen, M., Simon, K. and Salley, S., *"Potential of microalgae oil from Dunaliella tertiolecta as a feedstock for biodiesel"*, Applied Energy, 88(10), 3324–3330, (2011).

Zeng, X., Danquah, M., Chen, X. and Lu, Y., *"Microalgae bioengineering: From CO_2 fixation to biofuel production"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(6), 3252–3260, (2011).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Optimización del Inventario en Sistemas de Bicicletas Compartidas

G. Steve Williams, Adrián Ramírez-Nafarrate y Luis A. Moncayo-Martínez
Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones, ITAM, Río Hondo 1, CDMX-México
E-mail: gerardostevewilliams@gmail.com; adrian.ramirez@itam.mx; luis.moncayo@itam.mx

Resumen

Los sistemas de bicicletas compartidas se han convertido en un modo de transporte muy popular en grandes urbes, lo cual permite que los usuarios incrementen su actividad física y se reduzcan los efectos negativos del tránsito de vehículos automotor. Sin embargo, para incentivar su uso se requiere otorgar un alto nivel de servicio a los usuarios. En este artículo se modela un sistema de bicicletas compartidas con simulación de eventos discretos para estudiar el impacto del inventario inicial en el nivel de servicio recibido por los usuarios de la hora pico matutina. El nivel de servicio se mide de tres formas: tiempo promedio de espera de los usuarios para tomar/dejar una bicicleta, fracción promedio de usuarios cuya demanda se satisface inmediatamente después de llegar a una estación y fracción del tiempo que las estaciones del sistema se encuentran completamente llenas/vacías. Los resultados demuestran el conflicto existente entre colocar pocas bicicletas y asignar muchas bicicletas a las estaciones. Sin embargo, clasificar a las estaciones en perfiles de acuerdo con su demanda puede servir para definir una política de inventario estandarizada que optimice las tres medidas de desempeño simultáneamente.

Inventory Optimization in Bike Sharing Systems

Abstract

Bike sharing systems have become an efficient transportation mode in large cities around the world. These systems not only allow users to increase their physical activity, but they contribute to reduce the negative effects caused by traffic of motor vehicles. However, fostering bicycle usage requires delivering a high service level to users. In this paper, we model a bike sharing system through a discrete-event simulation model to study the impact of initial inventory policies in the service level during the morning rush hours. The service level is measured in three different ways: average time to take/return a bicycle, average fraction of users whose demand is satisfied immediately upon arrival to a station and average fraction of time that stations of the system are completely full or empty. The results show the trade-off between allocating few bicycles and allocating many bicycles at the stations. However, classifying the stations on profiles according to their demand may help defining a standardized inventory policy that optimizes the three performance measures simultaneously.

Keywords: bike sharing systems, inventory policy, service level, simulation-optimization.

ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las bicicletas se han convertido en un modo popular de transporte debido a su eficiencia para hacer viajes de corta duración. Esta es una característica importante en grandes ciudades donde frecuentemente el transporte público es insuficiente y/o ineficiente. Además, usar bicicleta para el transporte diario tiene múltiples beneficios que incluyen el mejoramiento de la salud debido a la actividad física, reducción de congestión vehicular y reducción de emisiones contaminantes al aire por vehículos automotores. De acuerdo con un reporte del Earth Policy Institute en 2013 había aproximadamente 500 ciudades alrededor del mundo con un sistema de bicicletas compartidas (Larsen, 2013). Actualmente, se estima que puede haber más de 1000 ciudades que han implementado este tipo de sistemas (Wikipedia, 2017).

Los sistemas de bicicletas compartidas incentivan el uso de bicicletas localizando estaciones esparcidas a través de la ciudad. En un momento específico, cada estación tiene una cierta cantidad de bicicletas disponibles para iniciar un viaje y una cantidad de espacios disponibles para estacionar una bicicleta. Los usuarios pueden tomar una bicicleta de cualquier estación, viajar y regresar la bicicleta a otra (o posiblemente a la misma) estación.

Existen diferentes configuraciones de operación de los sistemas de bicicletas compartidas. Algunos sistemas requieren el registro previo de los usuarios en un programa, otros limitan el tiempo de viaje para no incurrir en una penalización.

La experiencia y satisfacción de los usuarios dependen de la disponibilidad de recursos: bicicletas para iniciar un viaje y lugares para estacionarse después de culminar uno. Cada estación tiene ambos tipos de recursos. La disponibilidad de un tipo de estos recursos está correlacionado negativamente con la disponibilidad del otro recurso. Es decir, si una estación está llena de bicicletas, entonces, un usuario que quiera regresar una bicicleta no encontrará un espacio disponible. Similarmente, si una estación está vacía, los usuarios que quieran iniciar un viaje inmediatamente no podrán hacerlo.

Por lo tanto, el inventario de bicicletas es un factor importante a considerar en la evaluación del nivel de servicio. En este artículo, analizamos el efecto del inventario inicial de bicicletas (i.e., inventario al inicio del día) en el nivel de servicio recibido por los usuarios. Con esta finalidad, modelamos un conjunto de estaciones de un sistema de bicicletas compartidas usando simulación de eventos discretos y evaluamos diferentes políticas de inventario inicial para medir el nivel de servicio recibido por los usuarios. El nivel de servicio está expresado de tres formas: tiempo promedio de espera para tomar o dejar una bicicleta, fracción de usuarios promedio que pueden tomar o dejar una bicicleta inmediatamente después de su llegada a una estación y fracción promedio del tiempo que una estación está completamente vacía o llena.

En la literatura actual destacan algunos trabajos relacionados. Por ejemplo, Raviv y Kolka (2013) definen una función de insatisfacción de los usuarios basado en penalizaciones incurridas cuando la demanda, ya sea para bicicletas o estacionamiento, no es satisfecha en una estación. Los autores prueban que esta función es convexa en el inventario inicial. Por lo tanto, el artículo propone un método para obtener el inventario inicial óptimo en un periodo donde no ocurre reposicionamiento. Los autores también demuestran que el modelo de inventario es robusto a fallas en el cálculo de los parámetros de penalización. Una extensión de este artículo incluye el análisis del efecto de bicicletas en mal estado (Kaspi et al., 2017).

El artículo de O'Mahony y Shmoys (2015) propone una metodología para analizar la demanda de bicicletas y optimizar las operaciones de rebalanceo en el sistema de bicicletas compartidas de Nueva York (CitiBike). En la metodología propuesta, los autores primero analizan la demanda para clasificar a cada estación en una de tres categorías basado en el flujo neto de bicicletas: consumidoras (estaciones con alta demanda de bicicletas), productoras (estaciones que acumulan bicicletas) y auto-balanceables (flujo neto cercano a cero). Después, formulan un modelo de programación entera para rebalancear las estaciones durante las horas pico y diseñan una estrategia operacional para asegurarse que cada usuario pueda encontrar una bicicleta disponible o estacionamiento dentro de una distancia razonable.

Schuijbroek et al. (2017) proponen una heurística de dos fases para definir grupos de estaciones y determinar la ruta de un vehículo de rebalanceo con el objetivo de minimizar el costo de transportación y satisfacer niveles de servicio pre-definidos. Los autores analizan el nivel de servicio, definido como la fracción de usuarios cuya demanda puede satisfacerse en función del inventario. La formulación del nivel de servicio en una estación en particular está basada en una cadena de Markov y se define una expresión para determinar cotas en el inventario necesarias para satisfacer el nivel de servicio para la demanda de bicicletas o estacionamientos.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Vogel et al. (2014) formulan un modelo de programación entera mixta para optimizar el inventario de bicicletas con el objetivo de minimizar el costo esperado de rebalanceo. Debido a que este modelo es muy complejo para resolverse de forma exacta, los autores proponen una metaheurística basada en búsqueda de vecindario que mejora la solución obtenida por un método exacto para un modelo simplificado.

El artículo de Jian et al. (2016) también utiliza heurísticas de simulación-optimización para analizar el impacto del inventario en sistemas de bicicletas compartidas. Los autores proponen una heurística para optimizar el nivel de inventario con el objetivo de minimizar la cantidad de demanda no satisfecha (bicicletas y estacionamientos). La heurística iterativamente intercambia bicicletas y estacionamientos entre estaciones similar a un procedimiento de búsqueda de gradiente.

En este artículo presentamos un modelo basado en simulación-optimización para analizar el inventario inicial de un conjunto de estaciones de un sistema de bicicletas compartidas. Se utiliza un software comercial para comparar tres estrategias de inventario: un método ingenuo que utiliza una fracción constante de la capacidad de la estación para determinar el inventario inicial de bicicletas, una política basada en el modelo de simulación-optimización y una política estandarizada con base en el perfil de demanda de cada estación. Diferente a otros estudios, este artículo mide el nivel de servicio con base en tres métricas: tiempo promedio de espera para tomar o dejar una bicicleta, fracción de usuarios promedio que pueden tomar o dejar una bicicleta inmediatamente después de su llegada a una estación y fracción promedio del tiempo que una estación está completamente vacía o llena.

SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BICICLETAS COMPARTIDAS

Un sistema de bicicletas compartidas consiste de múltiples estaciones esparcidas a través de una ciudad. Cada estación tiene una capacidad instalada dada por el número de espacios de estacionamiento. Dependiendo de la localización de la estación y su demanda, la capacidad instalada puede ser diferente entre estaciones. Los usuarios llegan a una estación demandando una bicicleta para iniciar un viaje. La tasa de llegada de usuarios también depende de la localización de la estación y de la hora del día. Cuando los usuarios obtienen la bicicleta, inician un viaje con una duración aleatoria. Después de culminar el viaje, los usuarios regresan la bicicleta a una estación del sistema. Por lo tanto, la disponibilidad de recursos es muy importante para determinar el nivel de servicio recibido por los usuarios.

El análisis presentado en este artículo consiste en una simulación de eventos discretos de un conjunto de 22 estaciones del sistema de bicicletas de la Ciudad de México (Ecobici). Ecobici cuenta con alrededor de 450 estaciones y aproximadamente 12000 lugares de estacionamiento y 6000 bicicletas. Las estaciones seleccionadas dentro de este estudio se localizan en un vecindario muy activo y conjuntamente tienen una capacidad total de 558 estacionamientos. El modelo incluye una estación adicional que consolida el comportamiento de las estaciones que están fuera del alcance del estudio.

El análisis se enfoca en la demanda de usuarios presentada de lunes a viernes, ya que en un análisis estadístico previo se identificó que el patrón de la demanda en estos días es muy estable, mientras que en los fines de semana el patrón es muy variable. En particular, el estudio de este artículo se enfoca a las primeras horas de operación del día, entre 6 am y 10 am. Los datos analizados para obtener la entrada al modelo de simulación consisten de los viajes realizados durante el 2016, los cuales están disponibles en la página de Ecobici (Datos abiertos, 2017). Estos datos muestran que, en promedio, 279 viajes inician de las estaciones seleccionadas durante el periodo bajo estudio, mientras que otros 5063 viajes inician desde las otras estaciones. Es decir, cerca del 5% de todos los viajes inician en las estaciones seleccionadas durante ese periodo.

La simulación desarrollada en el software comercial captura la dinámica descrita anteriormente. El modelo incluye la capacidad real de cada estación. La llegada de usuarios buscando bicicleta a cada estación se modelo con un proceso Poisson no homogéneo cuya tasa media de llegada se obtuvo a través de los datos históricos en intervalos de 15 minutos.

Cuando un usuario obtiene una bicicleta, el modelo determina la estación de destino con base en la probabilidad p_{ij}, que se define como la probabilidad de salir desde la estación *i* hacia la estación *j*, donde *i* y *j* son índices de las estaciones que pertenecen al sistema. Esta probabilidad es calculada como se indica en la Ecuación 1. En esta ecuación, D_{ij} es el número total de viajes realizados entre las estaciones *i* y *j* que están registrados durante el periodo bajo análisis y SBC son las estaciones incluidas en el análisis del sistema de bicicletas compartidas.

$$p_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sum_{\forall k \in SBC} D_{ik}} \quad (1)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Después de obtener la bicicleta, el usuario realiza un viaje y la libera en la estación destino. El tiempo de viaje está modelado como una distribución lognormal con media de 11.93 minutos y desviación estándar de 8.53 minutos. Esta distribución fue obtenida a través de la prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrada usando una muestra aleatoria de 200 viajes realizados entre las estaciones bajo análisis durante el periodo bajo estudio. El valor *p* de esta prueba es 0.28, que fundamenta la hipótesis de que los viajes se ajustan razonablemente a esta distribución.

Las estaciones seleccionadas para el análisis exhiben diferentes patrones de demanda durante las horas pico matutinas. Para determinar el perfil de demanda de una estación se obtuvo el flujo neto durante el lapso de duración de *s* unidades de tiempo, dado por:

$$F_i(s) = A_i(s) - D_i(s) \tag{2}$$

En esta expresión, $F_i(s)$ es el flujo neto de bicicletas en la estación *i* observado en el periodo de duración *s*, $A_i(s)$ es el número total de bicicletas que llegaron a la estación *i* durante el periodo de duración *s* y $D_i(s)$ es el número total de bicicletas que salieron de la estación *i* durante el periodo de duración *s*. Con base en el flujo neto, una estación puede clasificarse como demandante, acumuladora o auto-balanceable. La Fig. 1 muestra el flujo neto de tres estaciones con cada uno de estos perfiles.

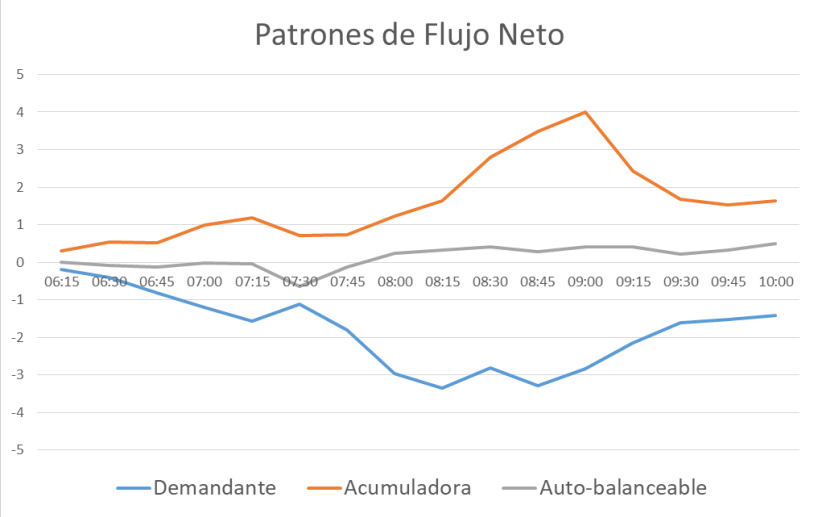


Fig. 1: Perfiles de estaciones con base en el flujo neto de bicicletas

EVALUACIÓN DEL NIVEL DE SERVICIO DE UN SISTEMA DE BICICLETAS COMPARTIDAS

En este artículo se busca optimizar el nivel de servicio de los usuarios de sistemas de bicicletas compartidas. El nivel de servicio está definido a través de tres medidas de desempeño:

1. Tiempo promedio que los usuarios esperan para tomar/dejar una bicicleta.
2. Fracción de usuarios que pueden tomar/dejar una bicicleta inmediatamente después de su llegada a la estación.
3. Fracción del tiempo que las estaciones del sistema están llenas/vacías.

Para estimar estas medidas de desempeño consideremos *i* = {1, 2, …, *n*} como los índices de las estaciones bajo análisis y *k* como el recurso que un usuario está buscando, *k* = {bicicleta, estacionamiento}. Entonces, el tiempo promedio de espera para acceder al *k*-ésimo recurso en la estación *i* está dado por:

$$W_i^k = m^{-1} \sum_{j=1}^{m} W_{i,j}^k \tag{3}$$

En esta expresión, $W^k_{i,j}$ es el tiempo de espera del *j*-ésimo usuario que llega a la estación *i* buscando el *k*-ésimo recurso y *m* es el número total de usuarios que llegaron a la estación *i* buscando el *k*-ésimo recurso. En este artículo, *m* es el número de usuarios simulados. De esta forma, el tiempo promedio de espera en el sistema por el *k*-ésimo recurso está definido como:

$$W_{SBC}^k = n^{-1} \sum_{i=1}^{n} W_i^k \tag{4}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Similarmente, la fracción de usuarios que encuentran una bicicleta/estacionamiento disponible inmediatamente después de su llegada a la estación está definida como:

$$Q_i^k = m^{-1} \sum_{j=1}^{m} I(W_{i,j}^k) \quad (5)$$

En esta expresión, *I* es una función indicadora que toma el valor de 1 si $W^k_{i,j}$ es igual que cero y toma el valor de 0 de otra manera. A nivel sistema, la fracción de usuarios que pueden tomar/dejar una bicicleta inmediatamente después de su llegada a la estación está dada por:

$$Q_{SBC}^k = n^{-1} \sum_{i=1}^{n} Q_i^k \quad (6)$$

Finalmente, la fracción del tiempo que la estación *i* está llena o vacía está dada por:

$$R_i^k = s^{-1} \int_0^s I_i(k,t)\, dt \quad (7)$$

En esta expresión, *k* es el estado de la estación *k* = {llena, vacía}, *s* es el tiempo total de simulación e $I_i(k,t)$ es una función indicadora que toma el valor de 1 si la estación *i* está llena (vacía) al tiempo *t* y toma el valor de 0 de otra manera. A nivel sistema, la fracción del tiempo que estaciones del sistema están llenas o vacías está dada por:

$$R_{SBC}^k = (ns)^{-1} \int_0^s I(k,t)\, dt \quad (8)$$

En esta expresión, $I(k,t)$ es una función que toma el valor de *I* si *I* estaciones del sistema están llenas (vacías) al tiempo *t* y toma el valor de 0 de otra manera.

En este artículo se comparan diferentes políticas de inventario para cada estación bajo estudio con el objetivo de optimizar el desempeño promedio, definido como:

1) Minimizar $W_{SBC} = \alpha\, W_{SBC}^{\text{Bici}} + (1 - \alpha)\, W_{SBC}^{\text{Espacio}}$
2) Minimizar $Q_{SBC} = \alpha\, Q_{SBC}^{\text{Bici}} + (1 - \alpha)\, Q_{SBC}^{\text{Espacio}}$
3) Minimizar $R_{SBC} = \alpha\, R_{SBC}^{\text{Vacía}} + (1 - \alpha)\, R_{SBC}^{\text{Llena}}$

Donde α es el peso relativo dado al primer objetivo, tal que $\alpha \in [0, 1]$.

ANÁLISIS DE POLÍTICAS DE INVENTARIO INICIAL

En esta sección se analiza el desempeño de diferentes políticas de inventario inicial de bicicletas con base en las métricas definidas en la sección anterior. En primer lugar se analiza una política ingenua que establece el inventario inicial en la estación *i*, definida como $B_i(0)$, con base en una fracción constante *q* de la capacidad instalada C_i. Es decir,

$$B_i(0) = \lceil q C_i \rceil \quad (9)$$

En el primer conjunto de experimentos *q* varía entre 0 y 1 en pasos de 0.1. Cada escenario fue replicado 50 veces y la duración de cada réplica es de 4 horas que simula el tráfico que es usualmente observado entre lunes y viernes de 6 am a 10 am. Los resultados de las diferentes métricas para α = 0.5 se muestran en la Tabla 1.

Esta tabla muestra el conflicto entre colocar muchas bicicletas en las estaciones o dejarlas casi vacías al inicio del día. La tabla sugiere que establecer el inventario inicial en aproximadamente 60% de la capacidad instalada de las estaciones produce un buen desempeño en las tres métricas. Para complementar el análisis de esta tabla, la Fig. 2 muestra el comportamiento de las medidas de desempeño para diferentes valores de α. Estas figuras demuestran la convexidad de las funciones W_{SBC}, 1- Q_{SBC} y R_{SBC}.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Desempeño de la política ingenua para α = 0.5

q	W_{SBC} (min)	Q_{SBC}	R_{SBC}
0	10.89	0.79	0.23
0.1	5.84	0.87	0.22
0.2	3.85	0.91	0.20
0.3	2.52	0.93	0.17
0.4	1.77	0.941	0.15
0.5	1.49	0.944	0.13
0.6	1.47	0.943	0.12
0.7	2.10	0.92	0.15
0.8	3.40	0.89	0.17
0.9	6.20	0.83	0.22
1	11.92	0.75	0.24

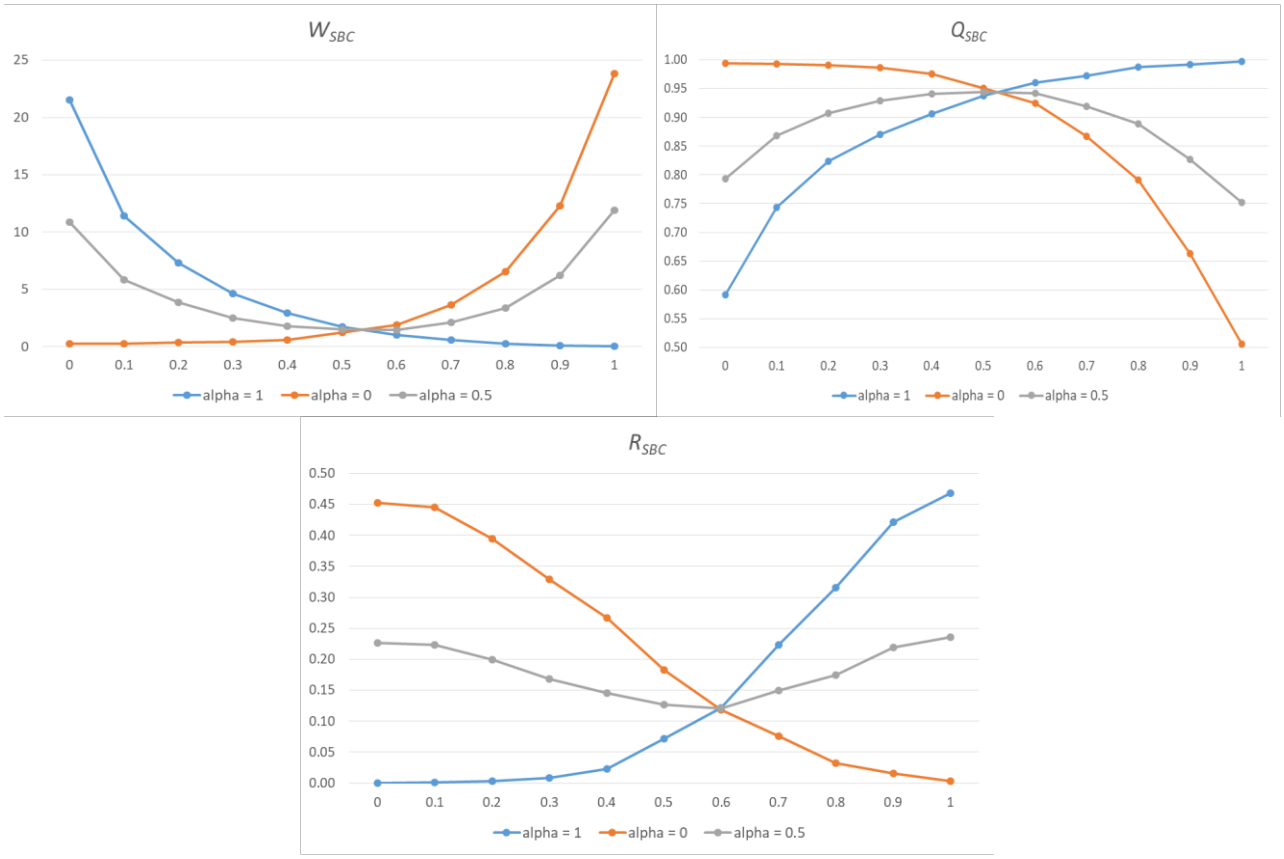


Fig. 2: Desempeño de la política ingenua para α = {0, 0.5, 1}.

De acuerdo con estos resultados los usuarios tienen que esperar menos de 1.5 minutos para obtener el recurso que necesitan si el inventario inicial se establece al 60% de la capacidad instalada de cada estación. Este tiempo parece no ser excesivo durante las horas pico. Sin embargo, satisfacer menos del 95% de los usuarios inmediatamente después de llegar a la estación o que las estaciones estén llenas/vacías más del 10% del tiempo puede no ser satisfactorio. Por lo tanto, una política inicial que considere el perfil de demanda de la estación podría producir mejores resultados que la política ingenua.

Con este objetivo se utilizó una herramienta de optimización incluida en el software comercial de simulación. Esta herramienta utiliza múltiples algoritmos para generar, evaluar y mejorar escenarios con el objetivo de optimizar W_{SBC}, Q_{SBC} y R_{SBC} usando α = 0.5. En este nuevo conjunto de experimentos, el mecanismo de optimización buscó políticas de inventario inicial a través de 200 escenarios de las 1.08 x 10^{31} posibles soluciones. El inventario inicial de cada estación puede ser un número entero entre 0 y C_i. Para acelerar la búsqueda de soluciones, el número de réplicas de cada escenario se estableció entre 5 y 10. Posteriormente, los mejores 10 escenarios se simularon 50 veces cada uno. Los mejores resultados obtenidos a través de la política ingenua y este mecanismo de simulación-optimización se muestra en la Tabla 2. Esta tabla muestra que las políticas encontradas con simulación-optimización superan los mejores resultados encontrados por la política ingenua. El tiempo promedio de espera se reduce en 50%, la fracción

ISBN 978-607-8242-11-5

promedio de usuarios cuya demanda se satisface inmediatamente después de su llegada se reduce en 8% y la fracción promedio del tiempo que las estaciones se encuentran llenas/ vacías se reduce en 42%.

Tabla 2. Comparación de las políticas ingenua y simulación-optimización usando $\alpha = 0.5$.

Política	W_{SBC} (min)	Q_{SBC}	R_{SBC}
Ingenua	1.47	0.944	0.12
Simulación-optimización	0.737	0.867	0.07
Diferencia relativa (%)	-50	-8	-42

No obstante que las políticas encontradas por el mecanismo de simulación optimización producen muy buenos resultados, podría dificultarse su implementación ya que la configuración inicial de cada estación depende del objetivo que se quiera optimizar. Por lo tanto, los tomadores de decisiones deben decidir qué objetivo es el primordial.

Sin embargo, en un nuevo conjunto de experimentos se combinan las diferentes políticas con mejores resultados para estudiar si se obtiene una con un desempeño razonable. Con este fin se obtiene la política estandarizada cuyo inventario inicial se determina con el porcentaje promedio de la capacidad instalada basada en el perfil de la estación. En nuestro estudio, de las 22 estaciones seleccionadas 11 son acumuladoras y su inventario inicial se establece en 44% de C_i, 6 estaciones son auto-balanceables y su inventario inicial es 45% de su capacidad y 5 estaciones son demandantes y su inventario inicial es 67% de su capacidad. Los resultados de la política estandarizada y su comparación con la política ingenua y simulación-optimización se muestran en la Fig. 3.

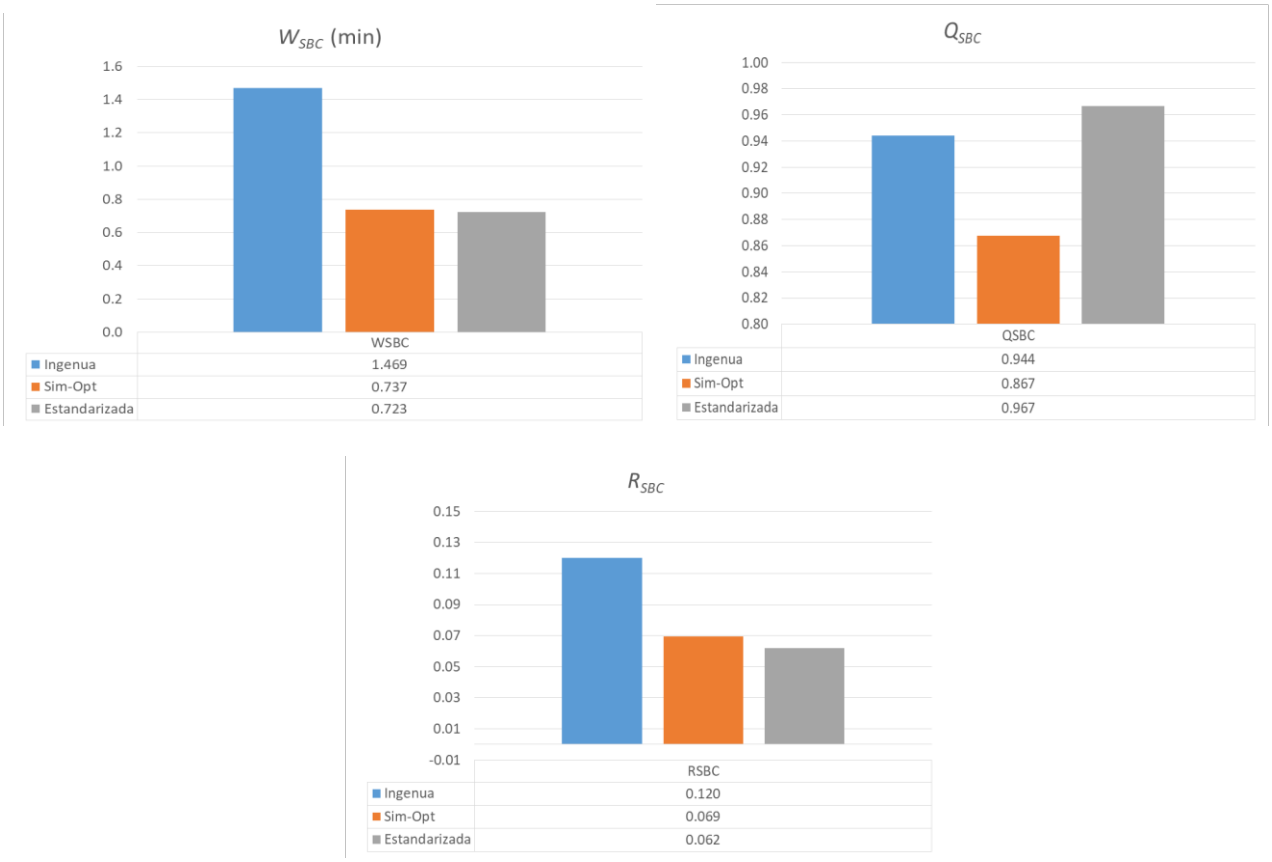


Fig. 3: Desempeño de las políticas ingenua, simulación-optimización y estandarizada usando $\alpha = 0.5$.

Esta figura muestra que la política estándar supera a las otras dos políticas en todas las medidas de desempeño. Esto no solo permite identificar una política que es Pareto óptima, sino que también es fácil de implementar ya que el inventario inicial se determina como un porcentaje de la capacidad instalada dependiendo del perfil de demanda de la estación.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

En este artículo se analizaron diferentes políticas de inventario inicial usando simulación para un sistema de bicicletas compartidas. Los resultados aquí presentados sugieren que usar un porcentaje de la capacidad instalada dependiendo del perfil de demanda para determinar el inventario inicial puede producir un desempeño satisfactorio y maximizar el nivel de servicio recibido por los usuarios. La sencillez de la política además tiene la ventaja de que es fácil de implementarse operativamente.

Las medidas de desempeño consideradas en este artículo son intuitivas para los tomadores de decisiones y no necesitan la definición de parámetros en funciones de penalización. Además, este artículo ilustra el conflicto en el desempeño asociado a diferentes recursos. Sin embargo, la política aquí propuesta puede potencialmente optimizar todas las métricas simultáneamente.

Futuras extensiones de este trabajo incluyen el estudio de otros métodos para definir el perfil de las estaciones, estudiar otras políticas de inventario, analizar el efecto de la relación bicicletas:estacionamientos en todo el sistema y expandir el análisis por simulación a un sistema de bicicletas compartidas de gran escala.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo y colaboración de Ecobici en este proyecto. Esta investigación es apoyada por la Asociación Mexicana de Cultura A.C. Esta investigación es apoyada por CONACYT a través del convenio 2015-01-1234.

REFERENCIAS

Datos abiertos. Accedido: 16 de Febrero de 2017. URL: https://www.ecobici.cdmx.gob.mx/es/informacion-del-servicio/open-data

Jian, N., D. Freund, H.M. Wiberg y S.G. Henderson, "*Simulation Optimization for a Large-scale Bike-Sharing System*", Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, 602-613, IEEE Press (2016).

Kaspi, M., T. Raviv y M. Tzur, "*Bike-Sharing Systems: User Dissatisfaction in the Presence of Unusable Bicycles*", IISE Trans., 49(2), 144-158 (2017).

Larsen, J., "*Bike-Sharing Programs Hit the Streets in over 500 Cities Worldwide*", Earth Policy Institute, 25(1) (2013).

List of bicycle-sharing systems. Accedido: 29 de Mayo de 2017, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List of bicycle-sharing systems"

O'Mahony, E. y D.B. Shmoys, "*Data Analysis and Optimization for (Citi) Bike Sharing*", Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 687-694 (2015).

Raviv, T., y O. Kolka, "*Optimal Inventory Management of a Bike-Sharing Station*", IIE Trans., 45(10), 1077-1093 (2013).

Schuijbroek, J., R. Hampshire y W.J. van Hoeve, "*Inventory Rebalancing and Vehicle Routing in Bike Sharing Systems*", Eur J Oper Res, 257(3), 992-1004 (2017).

Vogel, P., B.A.N. Saavedra y D.C. Mattfeld, "*A Hybrid Metaheuristic to Solve the Resource Allocation Problem in Bike Sharing Systems*", Proceedings of the International Workshop on Hybrid Metaheuristics, 16-29, Springer (2014).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Dispositivo Electrónico Para Determinar La Humedad De Secado Del Café En Tiempo Real - DHS

Diego López C.[1,2]
(1) Grupo de Investigación GIDIT Fac. Ciencias e Ingeniería, Univ. De Manizales-Caldas-Colombia.
(2) Univ Nacional de Colombia sede Manizales
e-mail: dlopez@umanizales.edu.co, dilopezca@unal.edu.co

Resumen

El presente Dispositivo realiza el control de la calidad del secado de un lote de café pergamino seco en patios y en silos de forma horizontal, vertical y circular, donde se establece una relación directamente proporcional entre la pérdida de peso y la humedad del grano bajo el método analítico cuantitativo de gravimetría (Quichimbo,2016), en tiempo real, durante el proceso de secado, a través del seguimiento y control de una muestra de café donde se registra la pérdida de peso para determinar la humedad del grano. Durante el proceso, por medio de GSM/GPRS, a las personas a cargo, que estén o no presentes durante el tiempo de operación, el circuito emite señales continuas para su control, emitiendo tambien alarmas sonoras y de led una vez determinado el peso de terminación.

En la mayoría de las fincas cafeteras, el control del proceso de secado se hace artesanalmente; el encargado de realizar esta tarea extrae algunos granos de café del silo en medio del proceso y basado en su criterio subjetivo, ya sea por color, olor o dureza, determina en qué parte del proceso de secado se encuentra el café. Esta tarea, si se hace en silos industriales, el operario se somete a riesgos profesionales por manejar temperaturas superiores a los 50°C, debido a que no se cuenta con ningún tipo de herramienta de precisión que trabaje en tiempo real. Los dispositivos electrónicos existentes en el mercado trabajan luego de 4 horas de reposo del grano, obligando a re-procesos (CENICAFE,2015).

Se ha diseñado un Dispositivo electrónico para determinar la Humedad del Café (DHS) portátil, económico y fácil de manipular el cual es capaz de monitorear, en tiempo real, todo el proceso de secado del café, utilizando un sensor, apoyado en un sistema de control el cual se encarga de avisar al encargado en qué etapa del proceso de secado se encuentra el café a través de mensajes de texto. Se utiliza la relación directamente proporcional entre la pérdida de peso y la pérdida de humedad, la cual ha sido establecida y perfeccionada a través de un estudio realizado por años en fincas del eje cafetero, de forma manual (Oliveros *et al,* 2010).

El dispositivo consta de dos partes separables las cuales van unidas por un cable de aproximadamente 3 metros resistente al calor, la primera parte realiza la toma de datos dentro del silo utilizando un sensor de peso y la segunda parte se encarga de procesar estos datos y realizar el control en tiempo real del proceso.

Este circuito incluye un microcontrolador PIC16F874A/877A. que permite la lectura y registro del sensor de peso por medio de una celda de carga, debido a que la señal que emite el sensor esta en el orden de los micro voltios, esta señal debe pasar por un circuito de amplificación el cual transforma los micro voltios en mili voltios, pasando después por un proceso de filtrado el cual remueve cualquier señal no deseada y por último la señal llega al microcontrolador para ser visualizada en un display que se encuentra en el estado de la tecnica compatible con el microcontrolador.El circuito cuenta con una función de set la cual permite modificar el ajuste del peso requerido.

Se han fabricado 50 dispositivos que se han colocado en funcionamiento en diferentes fincas cafeteras con total éxito, se está es el proceso de diseño del modelo industrial. Ha sido registrado en la superintendencia de Notariado y Registro de Colombia y está en proceso de patente.

Referencias

OLIVEROS T., C.E.; LÓPEZ V., L.; BUITRAGO, C.M.; MORENO, E.L. Determinación del contenido de humedad del café durante el secado en silos. CAENICAFE 2010. Disponible en http://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/revista_cenicafe/revista_cenicafe_arc061_02_108-118

QUICHIMBO, Pablo. EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO POR GRAVIMETRÍA Y REFLECTOMETRÍA. *ECUADOR ES CALIDAD-Revista Científica Ecuatoriana*, 2016, vol. 4, no 1.

CENICAFÉ. Beneficio del café II: Secado del café pergamino. Cartilla. Disponible en file:///D:/2015/A%20PARABOLICO%20FOTOVOLTAICO/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf

 ISBN 978-607-8242-11-5

Validación del DHS - Dispositivo para medir el contenido de humedad en el café pergamino

RESUMEN

El DHS es un dispositivo electrónico e inalámbrico que permite determinar el rango de humedad, en tiempo real, durante el proceso de secado del café. Al funcionar por el método de gravimetría, el dispositivo DHS utiliza la pérdida de peso como variable de comparación.

Como parte del proceso de validación, se realizaron 50 pruebas en fincas de la zona cafetera en el centro sur del departamento de Caldas. El dispositivo se instaló tanto en secadores de patio como en silos industriales, usando diferentes volúmenes de café y variando los tipos de combustible.

En cada dispositivo se colocó una muestra de 300 gramos y al final del proceso se tomó una muestra de control para ser medida en un dispositivo oficialmente reconocido – *Kappa 60B* -. Todos los resultados se ajustaron dentro del rango de humedad exigido (10%-12%). El promedio de humedad de los datos alcanzados con el dispositivo fue de 10.9%, mientras que el medido con el aparato oficialmente reconocido fue del 11%, con una desviación estándar del 0.8% y 0.7% respectivamente, alcanzando que el 95% de los datos están bajo la curva de Gauss.

El DHS cumple con su propósito: determinar el grado de humedad del café pergamino en tiempo real, reduciendo riesgos profesionales y aumentando la competitividad del productor.

Validation of the DHS device to measure the dampness content in the parchment coffee

ABSTRACT

The DHS is an electronic wireless device that works with solar power, during the process of coffee dried, allowing to determine in real time the range of dampness for the gravimetric method.

The DHS device uses the loss of weight as measure of comparison. 50 tests on farms in the coffee region of south central department of Caldas were made. The device was used in solar dryers' patios and industrial silos with different volumes and types of fuel.

A sample of 300 grams was placed in the device and then finishing the process proceeded to take a control sample to be measured in an officially recognized *KAPPA* device. All samples were in the required range. The accuracy of the DHS method varies between 0.07% and 1.45%, comparable with those obtained with the use of *KAPPA* device.

INTRODUCCION

Para ser comercializado nacional e internacionalmente, el café pergamino debe contener una humedad entre el 10% y el 12%, medida en equipos previamente calibrados y basados en la constante dieléctrica del café, según el método de la norma ISO 6673/83N(Roa *et al*, 1999).

El pequeño y mediano caficultor colombiano, mide la humedad del café pergamino mediante procedimientos tradicionales empíricos basados en el color del grano, el ruido que genera si se agita en el hueco de las manos, o la resistencia cuando se somete a presión de corte. Estos métodos no son seguros dadas las condiciones ambientales cuando se realiza la medición, es decir, si se hace por color, no es lo mismo mirarlo en horas de la mañana cuando el analista está comenzando la tarea diaria, a medirla por la tarde luego de un día agitado; lo mismo ocurre con los otros métodos, dependiendo de las condiciones de luz, cansancio, ruido, agotamiento, entre otras; su determinación de forma empírica no asegura que siempre determine la humedad en el rango requerido.

La determinación final de la humedad depende de la experticia de quien realiza tal medición y por lo general, se toma luego de finalizar un proceso de secado que comienza con una humedad promedio del 53% (Oliveros *et al*, 2010 p110) y debe llegar dentro del estándar para cumplir con las condiciones exigidas de calidad.

Los pequeños productores secan el café en patios al calor del sol, proceso que demora, dependiendo de las condiciones climáticas entre 5 y 15 días, aprovechando la entalpía del aire y la radiación solar para sustraer

 ISBN 978-607-8242-11-5

la humedad del grano (Gutierrez y Copete, 2009); mientras que los medianos y grandes lo hacen industrialmente usando silos a altas temperaturas que usan como combustible carbón mineral, gas o cisco. Los silos funcionan utilizando el flujo de aire caliente con temperaturas superiores a los 50 grados centígrados (Oliveros et al, 2007). Este proceso que dura alrededor de 22 horas, el operario de los silos toma constantemente muestras para verificar las condiciones de humedad del grano, sometiéndose a riesgos profesionales por estar expuesto a escenarios extremos de temperatura y humedad.

Se estima que el 12% de la producción nacional se comercializa con una humedad por debajo del 10%, y un 35% por encima del rango permitido (Oliveros et al, 1989). Si el café es ofrecido con niveles de humedad mayores o por debajo del estándar, se afecta negativamente la calidad del grano y el productor recibe menos ingresos, perdiendo competitividad. Si la humedad está por fuera del rango exigido del 10%-12% de humedad, se le castiga el precio por el aumento de peso y por el estar el comprador obligado a realizar reprocesos de mezcla de lotes de café con diferentes humedades para poder homogenizarla.

Para determinar la humedad de forma exacta existen métodos llamados directos, como el método del horno, costoso, destructivo por tener la necesidad de utilizar de tres a cinco muestras de 100 gramos cada una, basado en destilación cuyo proceso demora más de 20 minutos (Jimenez y Bulgarelli, 1992); y los métodos indirectos como los medidores electrónicos, rápidos, costosos, basados en la correlación entre la constante dieléctrica y la permisividad eléctrica de los granos por la alta cantidad de agua contenida en ellos. La mayoría de instrumentos ofrecidos en el mercado están basados en la medición de la constante dieléctrica del grano, sin embargo dado que la humedad periférica del grano es inferior a la de su interior, no es recomendable para medirla en tiempo real, por mostrar datos diferentes al tomar la medida con el café caliente que es diferente al café a temperatura ambiente.

En el mercado colombiano existen dispositivos electrónicos importados con costos superiores a los 1.500 dólares basados en este método de la constante dieléctrica(Jaramillo, 2016) para determinar la humedad del grano, por su elevado costo, sólo los grandes productores y comercializadores los poseen, relegando al pequeño y mediano productor a seguir acudiendo al método tradicional. Además, deben ser usados hasta cuatro horas después de terminar el proceso de secado, es decir, que sólo cuando el café esté en temperatura ambiente se puede tomar la medida.

Para verificar que se cumple con el rango requerido (Parra, 2008), estos dispositivos funcionan de forma adecuada, son confiables, siendo el tipo *KAPPA* 60B uno de los equipos oficialmente reconocido por la Federación Nacional de cafeteros (Jurado, 2009).

CENICAFE (Centro Nacional de Investigaciones del café) ha diseñado un dispositivo de bajo costo, que trabaja externamente utilizando la pérdida de peso; es útil para ayudar al productor a controlar la variable de peso e ir deduciendo la gradual pérdida de humedad, pero funciona mediante la toma constante de muestras, lo que conlleva a asumir riesgos de seguridad industrial por estar el operario expuesto a condiciones de un flujo de aire húmedo con temperaturas que superan los 50° grados centígrados.

En éste orden de ideas, se ha desarrollado un dispositivo electrónico para medir en tiempo real, la humedad del café pergamino; electrónico, trabaja con energía solar, su funcionamiento es inalámbrico y permite el control simultáneo de las variables de temperatura, peso y tiempo de secado. Puede usarse durante el secado tradicional al sol, o con los más avanzados silos.

Con este dispositivo se minimizan los riesgos profesionales, y se libera de tiempo al operario para poder ejercer otras labores, dado que puede monitorear el sistema desde su teléfono Celular.

Con el objetivo de determinar en tiempo real el rango de humedad del café pergamino, se implementaron pruebas con el dispositivo DHS, cuyos resultados fueron comparados con los datos obtenidos luego de utilizar los equipos oficialmente usados en el medio.

MÉTODO

Muestra: Se seleccionó en la ciudad de Chinchiná, municipio ubicado en la zona cafetera del centro sur del departamento de Caldas, cinco fincas con silo industrial y cinco con secador de patio que utilizan energía solar para el proceso. En todas las fincas se utilizan los métodos tradicionales para medir la humedad del café y contrastarlo con el resultado obtenido al utilizar el dispositivo DHS y contrastarlo con el medidor Kappa 60B.

 ISBN 978-607-8242-11-5

D*ispositivo DHS y procedimiento para valorar la humedad del café*

El dispositivo DHS (Figura 1) consta de:

a) Un cilindro interno perforado, donde se deposita una muestra hasta de 300 gramos, se realizaron pruebas con 100 y 200 gramos. Este cilindro está soportado por una galga extensiométrica que se encarga de medir la pérdida de peso durante el proceso, por la evaporación del agua. b) Un cilindro externo con su tapa que contiene: la galga extensiométrica y el cilindro interno; su función es aislar el cilindro interno de la masa total para que pueda registrar el peso sin interferencias. c)Sensores de temperatura y dispositivos electrónicos para el envío inalámbrico de las señales al circuito electrónico externo. d) Una caja de controles que contiene el circuito que registra las variaciones de temperatura, tiempo de secado y peso. Incluye un display para la visualización de resultados y los botones de control para encender, apagar, aumentar o disminuir valores.

La finca que tenía proceso mecánico utilizó durante el proceso, cantidades entre 35 y 80 arrobas de café pergamino húmedo para ser secado, mientras que los que secaron en patio, utilizaron cantidades entre 4 y 8 arrobas.



Figura 1. Uso del dispositivo DHS

Para todas las pruebas, se tomó una muestra de 300 gramos pesado en el dispositivo DHS y contrastado en una gramera electrónica. En los silos industriales se colocó la muestra en medio de la masa total, lo mismo que en los patios.

Para determinar la relación de pérdida de peso con la humedad, se tomaron diferentes experiencias realizadas por CENICAFE en el diseño de un método para medir dicha pérdida de peso del grano durante el proceso de secado, por lo tanto use utilizó la ecuación 1, adaptada de la ecuación encontrada por Oliveros (2009). Para el caso de 300 gramos, la humedad requerida entre el 10% y 12% se logra cuando el DHS determina pesos finales de 158 gramos con una variación de más o menos 2 gramos (Oliveros et al, 2009), dependiendo del volumen utilizado y de la experticia del operador.

$$H(e) = (1-((Pi/Pf)*(1-Hi))*100 \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Dónde: H(e): humedad esperada; Pi: peso inicial de la muestra
Pf: peso final; Hi: humedad inicial (53%)

Una vez el DHS alcanzaba el peso de 158±2 gramos, mediante el uso de una luz intermitente en el display y la activación de un mensaje de texto enviado por el sistema al equipo móvil del operador, se avisa que el café ya está en el rango requerido para que él, mediante sus métodos empíricos verificara el secado del café. Se sacó la muestra, se dejó en reposo el tiempo necesario hasta alcanzar la temperatura ambiente y se procedió a comprobar su humedad utilizando el equipo Kappa 60B.

Luego de frío el café, se tomó una muestra de la masa total, tanto en el silo o en el patio, para tomar la humedad en el dispositivo Kappa 60B y contrastar la humedad alcanzada con la que se logró en la muestra de 300 gramos ubicada en el cilindro. Los datos de las humedades medidas tanto en el cilindro como en la masa de cada prueba, se pueden observar en la tabla 1.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1. Datos tomados de cada prueba, por tipo de secador para diez fincas

Pruebas en secador de patio solar				**Pruebas en silo mecánico**			
Finca	No	DHS	KAPPA 60B	Finca	No	DHS	KAPPA 60B
1	1	9,8	10,0	1	1	9,6	9,7
	2	9,9	10,1		2	11,0	10,8
	3	10,9	10,7		3	11,7	11,0
	4	12,0	11,4		4	11,8	11,7
	5	12,1	10,7		5	11,8	12,2
	6	10,0	10,5		6	10,6	11,1
	7	10,2	10,9		7	10,9	10,5
	8	11,0	11,7		8	10,9	11,5
	9	11,3	11,1		9	11,6	11,6
	10	11,9	11,2		10	12,0	11,4
2	11	10,5	9,9	2	11	9,9	10,3
	12	10,7	10,1		12	10,1	10,5
	13	10,9	11,2		13	11,0	10,6
	14	11,5	10,9		14	11,0	11,5
	15	11,9	11,8		15	11,1	10,6
	16	10,5	11,0		16	10,5	10,9
	17	11,0	11,3		17	12,0	10,9
	18	11,6	10,9		18	10,7	11,1
	19	11,9	11,6		19	10,7	11,2
	20	10,1	11,3		20	10,9	11,3
3	21	9,7	10,3	3	21	10,0	9,8
	22	10,2	10,7		22	10,9	10,9
	23	11,1	10,7		23	11,6	11,9
	24	11,7	10,9		24	9,9	10,5
	25	11,9	11,7		25	11,6	10,9
	26	10,1	10,1		26	10,8	11,5
	27	10,2	10,7		27	11,6	11,0
	28	9,9	10,5		28	10,9	10,5
	29	11,9	10,7		29	11,5	10,9
	30	11,2	11,9		30	11,8	11,4
4	32	10,0	10,4	4	31	11,6	11,4
	32	10,3	10,7		32	10,5	9,9
	33	10,7	10,7		33	11,0	11,5
	34	9,9	10,5		34	10,8	11,3
	35	12,0	11,7		35	10,1	10,5
	36	10,3	11,0		36	11,8	11,6
	37	11,0	10,1		37	11,2	10,6
	38	11,5	10,7		38	11,5	11,0
	39	10,5	11,2		39	12,0	11,6
	40	10,1	11,0		40	10,6	10,2
5	41	11,9	11,3	5	41	11,9	11,6
	42	10,2	10,9		42	10,7	11,0
	43	10,7	10,7		43	10,6	11,2
	44	11,7	11,4		44	10,9	10,5
	45	10,9	11,1		45	10,1	10,9
	46	12,0	11,2		46	10,2	10,7
	47	10,2	10,5		47	11,8	11,5
	48	11,0	11,6		48	11,0	10,5
	49	11,9	11,1		49	12,0	11,6
	50	10,6	11,0		50	10,1	10,2
media		10,9	10,9	media		11,0	11,0
Desv Estándar		0,8	0,5	Desv Estándar		0,7	0,6

ISBN 978-607-8242-11-5

Este procedimiento se repitió cinco veces en la misma finca durante un período de un año, se dejó que el operador determinara la humedad utilizando el dispositivo colocando una muestra de 300 gramos dentro del DHS, y verificando que, cuando el dispositivo llegaba al peso programado, se activa una alarma y se le envía un mensaje de texto al teléfono móvil.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Los datos reales de la pérdida de humedad durante el proceso de las pruebas realizadas en cada una de las fincas se pueden observar en la figura 2. El 95% de la muestras se ubicaron en el rango del 10% a 12%, evidenciándose que, cuando el operador adquiere confianza en el uso del DHS, tiende a obtener humedades del café pergamino cercanas al tope superior. Las medidas de humedad utilizando el *Kappa 60B* son parecidas a las obtenidas con el DHS. No se evidencian cambios sustanciales.

En las 50 pruebas realizadas se observó que la diferencia absoluta estuvo entre el 2.5% para ambas muestras con una probabilidad del 95%.

El peso registrado por el dispositivo DHS durante las 50 pruebas estuvo entre 156 gramos y 160 gramos. Los rangos de humedad obtenidos en el Kappa 60B estuvieron en el rango de 9.7% y 12.2%, mientras que el rango de humedad de las muestras de control que se realizaron con el medidor oficial estuvieron entre el 9.6% y el 12.1%. El 95% de las pruebas estuvieron en el rango del 10% al 12%.

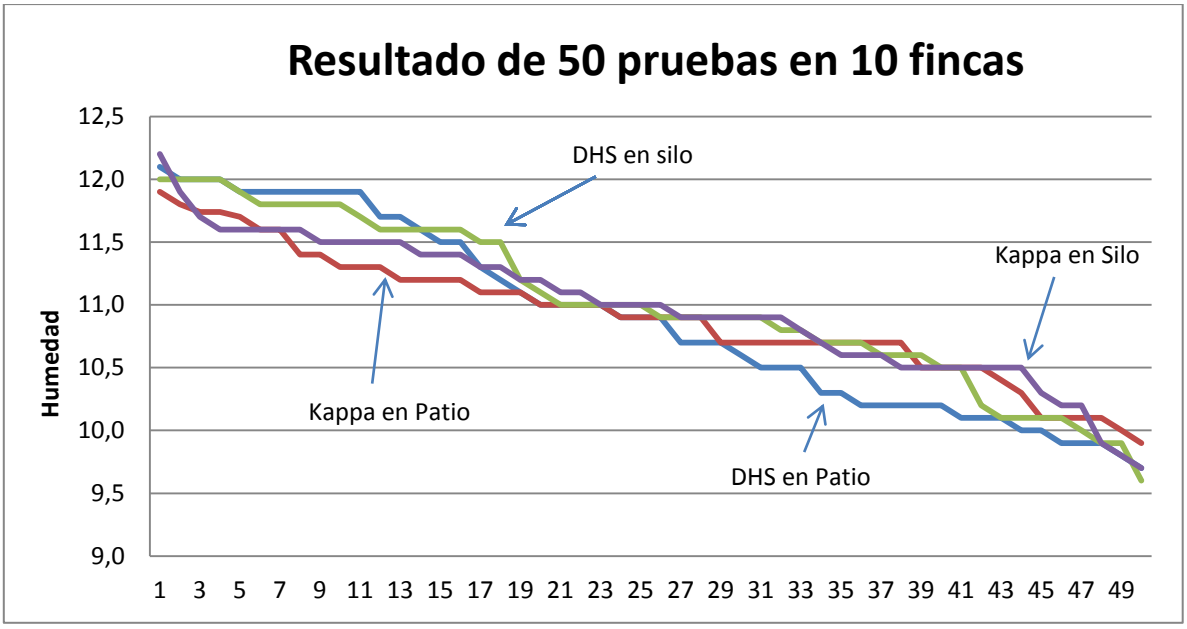


Figura 2. Comparación de los resultados obtenidos de cada método

DISCUSIÓN

La mayor contribución de ésta investigación se refiere a la validación de un dispositivo que logra medir con precisión variaciones en el peso, para determinar por gravimetría y en tiempo real el contenido de humedad del café pergamino, permitiendo al caficultor tener control confiable sobre las variables de la pérdida de peso de la muestra, la temperatura y el tiempo de secado.

En cuanto al procedimiento: Se permite liberar tiempo al administrador porque el dispositivo le informa a través de mensajes de texto y en tiempo real, los avances del proceso, pudiendo dedicarse a otras labores complementarias mientras el grano llega a su punto.

Se incrementa la competitividad del productor, dado que puede comercializar el café ajustado a los rangos exigidos de calidad, establecer métodos para vender el grano con humedades cercanas al límite superior, obteniendo mayor peso y mayores ingresos.

Al reducir riesgos industriales, porque con el uso del dispositivo ya no se tiene que estar abriendo el silo y sometiéndose a nocivas presiones por el aire caliente y húmedo (+- 50°).

ISBN 978-607-8242-11-5

El dispositivo tendrá un precio favorablemente bajo, comparado con los existentes en el mercado, lo que permitirá obtenerlo a todo tipo de caficultor; el costo de la inversión en el dispositivo se recuperará en el primer año de uso con el mayor ingreso recibido, dada la minimización del riesgo de vender el grano por fuera del rango permitido.

CONCLUSIONES

Más del 95% de las mediciones realizadas con el dispositivo DHS alcanzaron una humedad entre el 10% y 12%, cuya precisión está entre el 1,45% y 0.07%, comparada con los obtenidos con el uso del dispositivo *Kappa 60B* oficialmente reconocido por la FNC. Se permite concluir que no hay diferencia significativa entre los resultados alcanzados por los dos métodos (DHS y *Kappa 60B*).

La desviación estándar fue de 0.8, que comparada con la media de 11.0, significa que los datos son homogéneos y normales y se ubican en el rango.

El dispositivo DHS permite al productor cumplir con las normas técnicas nacionales e internacionales para comercializar el café, logrando una mejor calidad física del grano, sin diferencias en el método de secado, ya sea con silos industriales o en secadores de patio, y presenta un funcionamiento óptimo en la determinación, en tiempo real, del contenido de humedad del café pergamino, reduciendo riesgos profesionales y aumentando la competitividad del productor.

El dispositivo DHS se puede acondicionar para ser utilizado con otros granos como cacao, maíz, fríjol, arroz, arveja, entre otros.

REFERENCIAS

Gutiérrez Flórez, Jhony Mauricio, Copete López, Henry, Hacia la mejora del secado mecánico del café en ColombiaTecno Lógicas [en linea] 2009, (Diciembre-Sin mes) : [Fecha de consulta: 11 de julio de 2017] Disponible en:<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234316007> ISSN 0123-7799

Jaramillo Garzón, H. J., García, Q., & Patricio, J. (2016). Implementación de un módulo de instrumentación para medir y controlar variables de presión, temperatura, caudal y nivel, en el laboratorio de automatización industrial en la Facultad de Mecánica de la ESPOCH (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Jurado C., J.J.; Montoya R., E.C.; Oliveros t., C.E.; García A., J. (2009) Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café. 60(2): 135-147. 2009.

Jimenez, Ronald y Bulgarelli, Juan (1992) Determinación del contenido de humedad en granos de café (coffea arabica L.) con los medidores Motomco919 y Tecator P25. Agronomía costarricense 16(2): 211-218-1992

Oliveros T., C.C.; Roa M., G.; Alvarez G.m J. (1989) Medidor rústico de humead para café pergamino. Canicafé (Colombia) 40(2): 40-53 1989

Oliveros, C.E.; Ramirez, C.A.; Sanz, J.R.; Peñuela, A.E., (2007). Separador hidráulico de tolva y tornillo sin fin. Avance Técnico No.360, Cenicafé, Chinchiná-Caldas.

Oliveros T., C.E.; Peñuela M., A.E.; Jurado C.J. (2009). Controle la humedad del café en el secado solar, utilizando el método GRAVIMET. Chinchiná, Cenicafé, 2009. 8p (Avance Técnico No. 387).

Oliveros T., C.E.; López V., L.; Buitrago, C.M.; Moreno, E.L. (2010) Determinación del contenido de humedad del café durante el secado en silos. Cenicafé 61 (2):108-118.2010

Parra C., a.; Roa M., G.; Oliveros T., C.E. (2008) SECAFÉ: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico del café. Revista brasilera de Engenharia Agrícola e Ambiental 12(4): 415-427. 2008

Roa, G., Oliveros, C.E.; Álvarez, J.; Ramírez, C.A.; Sanz, J.R.; Dávila, M.T.; Álvarez, J.R.; Zambrano, D.A.; Puerta, G.I.; Rodríguez, N, (1999). Beneficio Ecológico del Café, Primera edición, Cenicafé, Chinchiná-Caldas. 160-179 P.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Sensibilidad Paramétrica de la Reacción de Síntesis de Nitroanilina en un Reactor Batch: Análisis de un Accidente en una Planta Industrial

Guillermo H. Gaviria[1a], Edison GilPavas[1a,2], Izabela Dobrosz-Gómez[1b,2], Miguel-Ángel Gómez*[1a,2]

(1) PRISMA: Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados. [a]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [b]Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(2) GIPAB: Grupo de Investigación en Procesos Ambientales, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
(e-mail: ghgavirial@unal.edu.co; egil@eafit.edu.co; idobrosz-gomez@unal.edu.co; *magomez@unal.edu.co)

Resumen

Los sistemas reactivos industriales pueden responder de diversas formas a cambios en las condiciones de operación. Cuando pequeñas variaciones en los valores de los parámetros del sistema conllevan a respuestas no proporcionales, se dice que el sistema tiene alta sensibilidad paramétrica (Varma, *et. al*, 1999). Tales condiciones tienen como consecuencia la baja controlabilidad del sistema, debido a la ocurrencia de fugas térmicas (del inglés *thermal runaway*) caracterizada por el aumento progresivo de la velocidad de generación de calor, temperatura, y presión.

Para el estudio de la sensibilidad paramétrica de los reactores químicos, se han desarrollado diferentes metodologías basadas en el análisis de los balances de materia y energía del reactor. Por ejemplo, Varma y colaboradores (1999) definieron el parámetro de sensibilidad local (S) de una variable dependiente, y, respecto a un parámetro, ϕ_j, como el cambio en y ocasionado por pequeñas variaciones del parámetro ϕ_j. En este trabajo se analiza la sensibilidad paramétrica de un reactor batch para la producción de nitroanilina a partir de o-nitroclorobenceno y amoniaco. Este sistema reactivo es de especial interés debido a que fue el causante de un severo accidente en una planta de Monsanto, en Sauget, Illinois, Estados Unidos. Un error en la carga del reactor, provocó una fuga térmica. El aumento descontrolado de la temperatura elevó la presión dentro del reactor. Como consecuencia el reactor sufrió ruptura, provocando heridas graves a cuatro personas, a una severamente, y destruyendo el edificio del proceso (American Institute of Chemical Engineers, 2016). Con los datos disponibles en la literatura respecto a los valores de los parámetros de operación el día de la explosión, se calcularon los coeficientes de sensibilidad según la metodología propuesta por Varma y colaboradores (1999). Se determinó la sensibilidad de la temperatura respecto a la concentración del reactivo límite. Los resultados muestran que el proceso es sustancialmente sensible a los cambios de temperatura. Se concluye que existe una fuerte dependencia entre el aumento de la temperatura en el reactor respecto a la concentración inicial de reactivo.

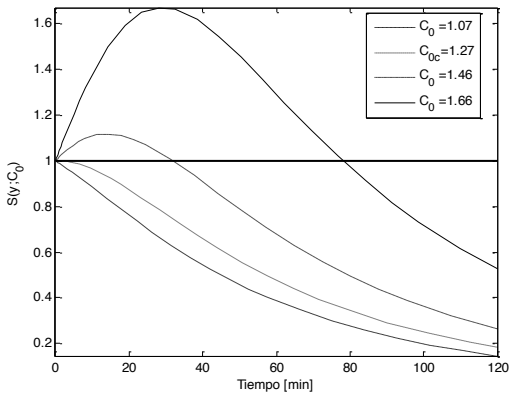


Figura 1. Parámetro de sensibilidad a diferentes conentraciones de alimento.

Referencias

Varma, A., Morbidelli, M., & Wu, H. (1999). *Parametric sensitivity in chemical systems*. Cambridge: Cambridge University Press.
American Institute of Chemical Engineers. (2016). *Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineer.* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta para la optimización del proceso Fenton como tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de café soluble

Harold Ibarra[1a], Edison GilPavas[1a,2], Izabela Dobrosz-Gómez[1b,2], Miguel-Ángel Gómez*[1a,2]

(1) PRISMA: Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados. [a]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [b]Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(2) GIPAB: Grupo de Investigación en Procesos Ambientales, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
(*e-mail:hnibarrat@unal.edu.co, egil@eafit.edu.co, idobrosz-gomez@unal.edu.co, magomez@unal.edu.co)

Resumen

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influenciada por varias variables. Es una herramienta efectiva para optimizar un proceso cuando hay una combinación de diversas variables independientes y sus interacciones afectan a las respuestas deseadas. La optimización mediante MSR implica la aplicación de los siguientes pasos: (i) el uso del diseño estadístico de experimentos, (ii) la estimación de los coeficientes de un modelo matemático utilizando la técnica de análisis de regresión; (iii) la predicción de respuesta, y (iv) la verificación de la adecuación del modelo (Myers y Montgomery, 2016). Recientemente, esta metodología se ha aplicado para la optimización de varios PAO´s como Fenton, foto-Fenton, fotocatálisis (UV/TiO_2), fotólisis (UV/H_2O_2), electrocoagulación, electro-foto-Fenton y electro-Fenton (GilPavas *et al*., 2017; Cruz *et al*., 2012).

En este trabajo se utiliza la MSR a partir de un diseño estadístico de experimentos Box-Behnken (DBB) para determinar el potencial del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de café soluble. La justificación de la investigación proviene del hecho que el manejo de estas aguas es un problema latente en Colombia. Es importante anotar que el país ocupa el tercer lugar en el mundo en exportaciones de café soluble (International Coffee Organization, 2015) y que por cada kilogramo de café se generan de 40 a 45 litros de aguas residuales, que contienen una mezcla de sustancias complejas y pigmentos que dificultan el tratamiento mediante métodos convencionales.

La selección del proceso Fenton como opción de tratamiento se basa en que el proceso ha demostrado su capacidad de eliminar diversos tipos de sustancias tales como melanoidinas y compuestos fenólicos que caracterizan las aguas residuales de estudio (Tokumura *et al*. 2008). Los factores analizados en el diseño experimental fueron la [H_2O_2], la [Fe^{2+}] y el pH. La MSR permitió definir factores que afectan la eficiencia del proceso y encontrar las condiciones óptimas de operación para alcanzar el más alto grado de reducción de DQO y color. Las condiciones óptimas obtenidas fueron: 6000 mg/L de H_2O_2, 411 mg/L de Fe^{2+} y un pH de 3,6. Con estas condiciones, se evaluó la cinética de degradación del color, DQO y COT durante tres horas de operación, obteniendo degradaciones del 65% de color, 67 % de la DQO y 41 % de mineralización (COT) Esta información adicional puede permitir la implementación de la tecnología en una empresa productora de café soluble con el objetivo de convertir los vertimientos originales a aguas residuales con baja carga de contaminantes y sin requerir altos gastos energéticos ni de infraestructura.

Referencias

Cruz, K., Torres, O., García, A. Optimization of electro-Fenton/BDD process for decolorization of a model azo dye wastewater by means of response surface methodology. Desalination. 286, 63–68 (2012).

GilPavas E., Dobrosz-Gómez, I., Gómez-García, M. Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. J. Environ. Manag, 191, 189-197 (2017).

Myers, R.H. , Montgomery, D.C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments*, 4ta ed., John Wiley & Sons, USA (2016).

International Coffee Organization (ICO), *Comercio mundial de café soluble.* Disponible en: http://dev.ico.org/documents/cy2012-13/icc-110-5c-soluble.pdf [Consultado 2015/ 09/ 01].

Tokumura, M., Hussein T. Z.,Yoshinori K. *Decolorization of Dark Brown Colored Coffee Effluent by Solar Photo-Fenton Reaction: Effect of Solar Light Dose on Decolorization Kinetic.* Water Research: 42 (18). 4665–4673 (2008).

 ISBN 978-607-8242-11-5

DISEÑO DE UN MOTOR REGENERATIVO STIRLING TIPO ALFA

Tomás Fernández[1], Francisco Miranda[1], Elda Rosario[1], Roberto Rosales[1], Lizzeth Hernandez[1] Damian Villegas[1]
(1)Inst. Tec. Orizaba, Av. Oriente No. 9, Col. E. Zapata, Orizaba, Ver, México.C.P 94320.
fernandez_gt@yahoo.com

RESUMEN

Un motor Stirling es una maquina térmica con bajos niveles de ruido y emisiones toxicas, el cuál utiliza cualquier fuente de energía externa. En un futuro, estos motores podrían remplazar a los motores de combustión externa en algunas aplicaciones, debido a su alto rendimiento.
El motor de ciclo regenerativo es el único capaz de aproximarse al rendimiento máximo teórico, conocido como rendimiento de Carnot. Es de importancia la ayuda de programas como SolidWorks para dibujar las partes del motor en tres dimensiones, e implementar así los cálculos de esfuerzos y deformaciones correspondientes.
La finalidad de este trabajo, es aportar las bases para el diseño de un motor Stirling tipo Alfa, debido a que puede ser de gran utilidad, ya que solo necesita de aire para su funcionamiento.
Concluimos que, este dispositivo es una opción viable a causa de sus bajos costos de mantenimiento y alta eficiencia.

ABSTRACT

A Stirling engine is a thermal machine with low noise levels and toxic emissions, which makes use of any external energy source. In the future, these engines will be replaced with external combustion engines in some applications, due to their high performance.
The regenerative cycle engine is the only one able to approximate the maximum theoretical performance, known as Carnot performance. It is important to help programs such as SolidWorks to draw the parts of the engine in three dimensions, and to implement the calculations of stresses and corresponding deformations.
The purpose of this work is to provide the basis for the design of a Stirling type Alfa engine, because it can be very useful, since it only needs air for its operation.
We conclude that, this device is a viable option a cause of its low maintenance costs and high efficiency.

Key words: Machine, Calculations, Carnot, Design.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, principalmente desde la aparecieron de industrias y del motor de combustión interna, la atmósfera se ha visto afectada debido a cambios provocados por la aparición de los ya mencionados. Algunos efectos de esos cambios son el efecto invernadero y el calentamiento global, causando cambios en el clima a nivel mundial trayendo consigo una ola de desastres naturales.

ISBN 978-607-8242-11-5

Debido a que el planeta se encuentra en una crisis ambiental, tenemos que darnos la tarea y la forma de reemplazar combustibles que dañen la naturaleza, buscando otras formas de energía que reduzcan el daño al medio ambiente, es por eso que los motores Stirling son una alternativa viable, porque son de combustión externa, lo cual hace posible regular mejor la combustión y utilizar el aire como fuente de energía para su funcionamiento.
En 1816, el escocés Robert Stirling patentó un motor que funcionaba con aire caliente, al cual llamó Stirling. La patente de este motor era el exitoso final de una serie de intentos de simplificar las máquinas a vapor. Stirling consideraba demasiado complicado calentar agua en una caldera, producir vapor, expandirlo en un motor, condensarlo y, mediante una bomba, introducir de nuevo el agua en la caldera, por lo que decidió desarrollar un nuevo sistema que realice los mismos procesos, pero en forma más simple. Otro impulso para desarrollar un nuevo sistema fueron los accidentes fatales causados frecuentemente por las máquinas a vapor, ya que aún no se había inventado el acero y las calderas explotaban con facilidad.
Además al ser un motor de combustión externa, es más fácil controlar las emisiones toxicas, las vibraciones y el ruido del motor, a pesar de que la relación masa-potencia es más alta que la de los motores de combustión interna.
Los motores Stirling, a diferencia de los motores de combustión interna, tienen su gran ventaja en el aspecto pues la contaminación que producen es muy reducida o nula debido a que la fuente de energía a utilizar para su funcionamiento es el aire.
Por ultimo otra ventaja que tiene este motor es su larga duración debido a que en los últimos años los avances en diseño y construcción han permitido mejorar el funcionamiento llegando a rendir cerda de 100000 horas en motores experimentales.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING
El funcionamiento del motor Stirling se basa en el aprovechamiento de los cambios volumétricos del fluido de trabajo como resultado de los cambios de temperatura que éste sufre. Estos cambios volumétricos se deben al desplazamiento del fluido de trabajo entre la zona caliente y la zona fría en un cilindro cerrado.

A continuación se explicará el funcionamiento del motor con la ayuda de una serie de diagramas:

Si se tiene aire encerrado en un cilindro y luego se calienta, se observa que la presión dentro del cilindro se incrementa. Se asume que una de las tapas del cilindro es un émbolo y que éste es hermético; entonces habrá una expansión del gas y aumentará el volumen interior del cilindro hasta cierta posición final del émbolo.

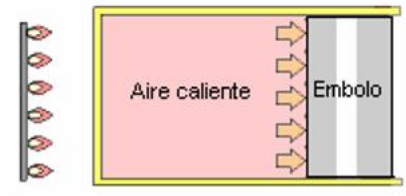


Figura 1 calentamiento del aire dentro de un cilindro

Si al mismo cilindro, en su estado de expansión, se enfría rápidamente, la presión disminuye; entonces, el volumen se contrae y la posición del émbolo vuelve al estado inicial.

ISBN 978-607-8242-11-5

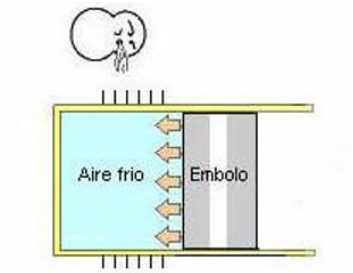


Figura 2 Enfriamiento del aire dentro de un cilindro

Si el proceso del estado 1 se repite, pero ahora uniendo el émbolo a una volante. El incremento de la presión forzará al émbolo a moverse ocasionando el giro de la volante, con lo cual se consigue que el “cambio volumétrico” se transforme en movimiento.

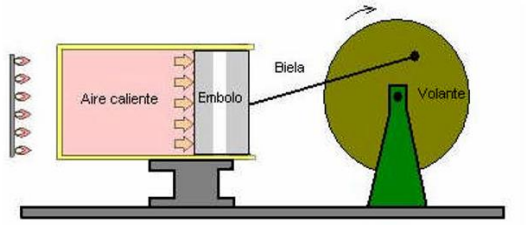


Figura 3 Conversión de la expansión del gas en movimiento, a través de un mecanismo.

Si se repite el proceso del estado 2, enfriando rápidamente, el pistón retorna por efecto del movimiento de la volante y se produce la disminución de la presión y el volumen.

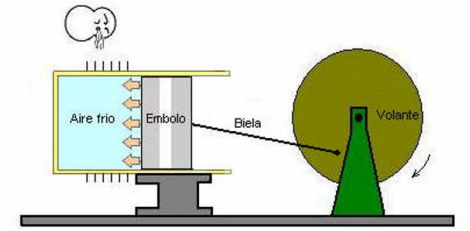


Figura 4 Conversión de la compresión del gas en movimiento, a través de un mecanismo
Si se juntan los procesos 3 y 4, en un solo cilindro, con un desplazador, se producirá el movimiento del motor debido a la expansión del gas, y, durante la compresión el pistón retornará a su posición debido a la energía de la volante.

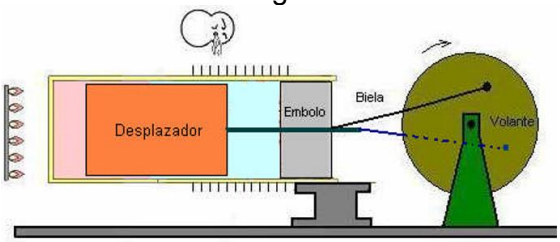


Figura 5 Esquema General de un motor Stirling

Principales parámetros de diseño de un motor Stirling
Los principales parámetros son cuatro:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\tau = \frac{T_C}{T_H}\ ; k = \frac{V_C}{V_E}; \alpha\ y\ X = \frac{V_D}{V_E}$$

Donde T_C y T_H son las temperaturas del fluido de trabajo en la zona fría y zona caliente respectivamente, V_C y V_E son los volúmenes de barridos por el pistón y desplazador respectivamente, α es el ángulo de desfase del mecanismo; y V_D es el volumen muerto dentro del motor.

No existe una combinación ideal de estos parámetros, porque los valores óptimos varían de acuerdo a un caso particular.

Teoría de Schmidt

La teoría de Schmidt es uno de los métodos de cálculo isotérmico para los motores Stirling. Es el método más simple y muy útil para el análisis del motor Stirling.

A continucacion se mostraran añgunas ecuaciones las cuales son utilizadas en el proceso de diseño de un motor Stirling tipo Alfa basadas en la teoria de Schmidt.

El volumen de expansion instantanea V_E se describe en la ecuacion 1 con un volumen de barrido del piston de expansion $V_{SE,}$ una expansion de volumen muerto $V_{DE,}$ bajo la condicion de requisitos (g).

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}\,(1 - COS\ X) + V_{DE} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

El volumen de compresion instantanea V_C se describe en la ecuacion 2 con el volumen de barrido de piston V_{SC} y como volumen de compresion V_{DC} y un angulo de fase dx

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2}\,(1 - \cos(x - dx)) + V_{DC} \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

El volumen total relativo es calculado en la ecuacion 3

$$V = V_E + V_R + V_C \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

La presion media

$$P_{mean} = \frac{1}{2\pi}\oint P dx = \frac{2mRT_C}{V_{SE}\sqrt{S^2 - B^2}} \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

Presion del motor

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{S^2 - B^2}}{S - B\cos(x - \alpha)} = \frac{P_{mean}\sqrt{1 - C^2}}{1 - C\cos(x - \alpha)} \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Trabajo

$$Q = W = \int P dv \quad \ldots\ldots$$

Eficiencia

$$n = \frac{W}{Q_{sum}} \qquad donde: \frac{W = trabajo\ mecanico\ util}{Q_{sum} = calor\ suministrado} \quad \ldots\ldots$$

Motor Stirling tipo alfa

En La mayor parte del gas de trabajo está en contacto con las paredes calientes del cilindro, se ha calentado y la expansión ha empujado el émbolo en la parte inferior de su viaje fría en el cilindro. La expansión continuó en el cilindro caliente, es decir, 90° detrás del pistón en el ciclo de frío, la extracción de más trabajo en el gas caliente. Como se muestra en la figura 6.

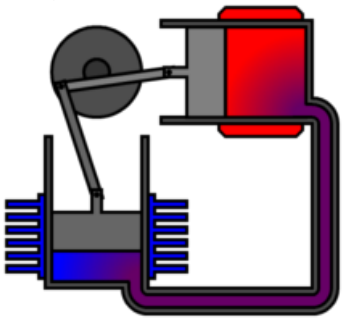


Fig. 6 Compresión y Expansión.

La tabla 1 muestra las propiedades de los materiales para la construcción de un motor Stirling.

	PROPIEDAD	ALUMINIO	ACERO 371
1	Esfuerzo (N/mm^2)	250	400
2	Elasticidad E, Modulo de Young (MPa)	70.000	210.000
3	Densidad (g/cm^3)	2,7	7,8
4	Punto de Fusión (°C)	660	1500
5	Rango de Temperatura de Trabajo (°C)	-250 a 150	-50 a 500
6	Conductividad Eléctrica (m/Ohm/mm)^2	29	7
7	Conductividad Térmica (W/m °C)	200	76
8	Coeficiente de expansión lineal x 10^{-6} / °C	24	12
9	No-Magnético	si	No
10	Toxico	no	No
11	Resistente a la corrosión	si	Si
12	Mecanizado	Fácil	Fácil
13	Maleable	si	Si
14	Costo	Barato	Caro

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1
Ciclo Stirling

El ciclo teórico de Stirling consta de las 4 etapas: 2 transformaciones isocoras en las que el gas de trabajo pasa a través de un regenerador absorbiendo o cediendo calor, y 2 transformaciones isotermas, en las que el gas está en contacto con una fuente caliente o una fría, a Tc y a Tf respectivamente. El ciclo se muestra en el diagrama 1 P-V. Veamos cada una de las etapas

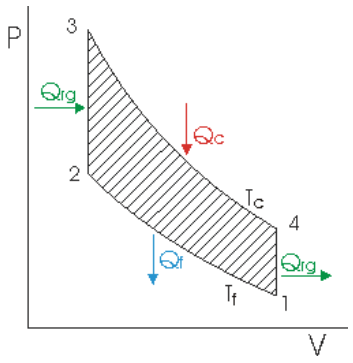


Diagrama 1

1-2: Compresión isoterma del gas a la temperatura inferior, Tf. Durante este proceso se cede al exterior una cantidad de calor, Qf, a la fuente fría.
2-3: Absorción de calor a volumen constante. El gas absorbe del regenerador una cantidad de calor Qrg y aumenta su temperatura, lo que provoca un aumento de presión.
3-4: Expansión isoterma del gas a alta temperatura, Tc. Durante este proceso se absorbe una cantidad de calor Qcde la fuente caliente.
4-1: Cesión de una cantidad de calor Qrg al regenerador a volumen constante, disminuyendo la temperatura del fluido.

Un sistema que realiza el ciclo Stirling está formado por un cilindro, un pistón de trabajo y un pistón de desplazamiento con un regenerador que divide al sistema en dos zonas, una zona caliente a Tc y una zona fría a Tf. Se observa en la figura 2.19 que en la posición 1 todo el gas se encuentra contenido en la parte fría del cilindro a una temperatura Tf y ocupando el volumen máximo.

En la figura 7 se produce la compresión del gas hasta el volumen mínimo. Esta compresión se ha realizado a temperatura constante cediendo una cantidad Qf de calor a la zona fría.

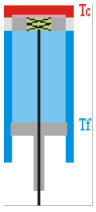


Fig. 8

ISBN 978-607-8242-11-5

En la figura 9 El fluido ha atravesado el regenerador absorbiendo una cierta cantidad de calor Qrg que lo eleva hasta una temperatura Tc.

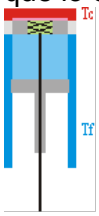


Fig. 9

En la figura 10 Se produce la expansión del gas hasta alcanzar el volumen máximo. Para ello se absorbe una cantidad de calor, Qc, de la zona a alta temperatura. En el paso de la posición 3 a la 4 es donde se obtiene trabajo.

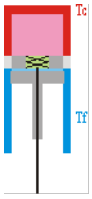


Fig. 10

Después pasaremos de nuevo a la posición 1, atravesando otra vez el regenerador, pero esta vez el gas cederá una cantidad de calor, Qrg, al regenerador y rebajando su temperatura hasta Tf .Fig. 11

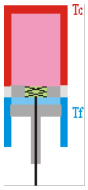


Fig. 11

Resumen de resultados

Se espera que al realizar este trabajo que como ya se menciono es el diseño de un motor regenerativo Stirling tipo Alfa sirva como base para futuros trabajos, con la finalidad de contribuir a la mejora del diseño de este motor para así llegar a la construcción de un prototipo que permita en base a la experiencia conocer en su totalidad un motor Stirling y su funcionamiento.

Conclusión

Como conclusión cabe señalar que este tipo de dispositivos de generación son una de las mejores opciones y además viable, a causa del encarecimiento de la energía. Esto se debe a su bajo costo de mantenimiento y a la versatilidad de las máquinas de combustión externa, por lo ya mencionado y principalmente por los bajos o nulos niveles de contaminación.

De igual manera el plantear un procedimiento para el diseño de este tipo de máquinas es importante, ya que a pesar de que tienen aproximadamente 90 años de existir, no son muy conocidas por la gente e incluso por los mismos ingenieros. La realización de este trabajo es una muy buena propuesta que cumple con las expectativas consideradas y que además de lo ya mencionado este se puede considerar como parte y/o apoyo de futuros trabajos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Recomendaciones

Una de las principales recomendaciones para futuros proyectos es la construcción del prototipo, debido que al llevar a cabo la manufactura y tener el motor en funcionamiento permite conocer más del tema brindando experiencia y permitiendo encontrar los errores y las áreas de mejora. Mediante la instrumentación se obtienen datos reales de las temperaturas de operación, eficiencias con la posibilidad de cambiar y/o corregir los parámetros para aumentar la eficiencia del motor y mejorar el diseño de este.

Como observación, al referirse a la construcción del prototipo, es importante señalar o especificar que la manufactura sea de precisión, pues es indispensable que los sellos y la capacidad de compresión del motor sea la diseñada, ya que si no es de esta manera, no es representativo. Y así nos permita alcanzar los estándares necesarios para que el prototipo sea tan bueno como su diseño.

Referencias

1. Fabio Zegarra Choque, Tesis para optar el grado de Ingeniero Mecánico "Estudio,Diseño y Construcción de un Motor Stirling Experimental Tipo Beta", FIM, UNI, Lima,Perú (2005).
2. F. Alva Dávila, "Diseño de Elementos de Maquinas I", FIM, UNI, Lima, Perú (1995)
3. James R. Senft "Theorical Limits on the performance of Stirling Engines". International Journal of Energy Research, Int. J. Energy Res., 22,991-1000 (1998).
4. James R. Senft, "Ringbom Stirling Engine", Oxford University Press.
5. James R. Senft, "Optimum Stirling engine geometry", International Journal of Energy
6. "Termodinámica" Kenneth Wark and D.E Richards 6ª Ed, Mc Graw-Hill, 2001.
7. "Termodinámica" Yunus Cengel and Boles; 4ª. Ed, Mc Graw-Hill, 20002
8. "William R. Martini", Stirling Engine Desing Manual National Aeromatics and Space Administration. USA 1978.
9. William Beale, "Undesrtanding Stirling Engines", VITA Technical Paper

ISBN 978-607-8242-11-5

Conditioning of Unstable Systems for Model Order Reduction Computation of Large-scale Systems

Yussef Guardia Ismael Acle [1] and Francisco Damasceno Freitas[1]
(1) Department of Electrical Engineering, University of Brasilia, Brasilia-DF, Brazil. CEP: 70910-900
E-mail: yussef.acle@gmail.com; ffreitas@ene.unb.br

Abstract

This paper describes studies involving reduced order models (ROMs) which are determined by applying the truncated balanced realization (TBR) approach. We are interested in dealing with unstable system models. These models are not usual when TBR is the focus of the investigation. Then, it is evaluated the stabilization of the unstable system through the shifting of all poles. With this aim, all poles are moved to the left side of the complex plane. Therefore, if *A* is the state matrix of the original system, through a shift-transformation a conditioned matrix is formed. The system input and output matrices are not modified along operations with the shifted system. Hence, a reduced order model is computed considering the modified state matrix of a stable model. The extended Krylov subspace (EKS) technique is applied in order to obtain the ROM. A sensitivity study of the shift-parameter is carried out to evaluate the best ROM. To evaluate the performance of the methodology, experiments in a 606-state system model were assessed. This model is used for small-signal stability analysis in power systems. From the experiments we can observe that the ROM is sensitive with relation to the value of the selected shift value. The best results occur for values near the maximum real part of the unstable pole. Therefore, an adequate value of shift value must be appropriately selected in order to get an adequate ROM for unstable system, when the TBR approach is employed. The study demonstrated that the conditioning of the state matrix through a shifting of the eigenvalues works on properly for determination of unstable system ROM.

Keywords: Model order reduction, Extended Krylov subspace, Small-signal stability, Power system, Truncated balanced realization, Unstable system

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

Balanced truncation (BT) methods are attractive and adequate to obtain high fidelity reduced order models (ROMs) with a relatively small number of poles and associated residues compared with a modal approach (Gugercin et al., 2004; Benner, 2005; Schilders et al., 2008). However, the high computational costs (CPU time and memory requirements) to solve two Lyapunov equations and a singular value decomposition of the system matrix, lend their direct use prohibitive for large-scale systems. Iterative methods based on low-rank solution Gramians have been proposed as a tool to determine approximate results for model order reduction (MOR) problems (Antoulas, 2005; Freitas et al., 2008).

Iterative techniques to compute Gramians are applied directly to stable linear systems (Benner, 2005). Some types of systems fill this property. Other systems have low damping characteristics or even have poles very close to zero (Kundur, 1994). In the most adverse situations, systems may be unstable. Apparently, in the latter situation the application of iterative methods would be ruled out. However, this fact must be rethought in the sense that some techniques to circumvent the problem have been successfully proposed (Varricchio, 2015). In this reference two approaches are presented to deal with unstable systems and obtain a ROM by using a square root BT (SRBT) method. The technique is applied to determine MOR of small-signal stability model in power systems. One of the approaches of the method exploits the fact that an unstable full order model (FOM) can be broken into 2-part system composed of an unstable and a stable parts. The unstable part is formed only by a few poles in such way that the huge stable part is the target of reduced order process. The other approach uses a shift strategy for moving the FOM eigenvalues to the left complex half-plane by an amount α constant. The sparse low-rank Cholesky factor – alternate direction implicit (SLRCF-ADI) method (Freitas et al., 2008) can be employed to obtain a MOR. Besides the shift parameter α other parameters called ADI needs to be used. The ADI parameters work on as a preconditioner to improve the method performance. However, the choice of the shift parameter constitutes a task that affects the numerical performance of the numerical strategy adopted. Another method to compute a ROM of unstable model and based on a BT technique was presented in (Zhu, 2016). This technique also uses the shift parameter to stabilize the FOM and compute the ROM. The method exploits projections of the FOM solution onto an extended Krylov subspace (EKS) originally proposed in (Simoncini, 2007). Although the EKS-based method renders the use of ADI parameters, besides the shift parameter, it is dependent of the number of Krylov vectors needed to form the EKS. This dependence can greatly affect the numerical computations both in accuracy and cost.

This paper presents a study of the impact of a shift parameter α on the quality of a MOR obtained from small-signal stability FOM in power system. The study is carried out by using an EKS-based method. Numerical sensitivity evaluations are verified through several test systems and results are presented for a 606-state system. The study demonstrates the importance of an adequate selection of the shift parameter to deal with system which has poles in the neighborhood of zero or even unstable poles.

LINEAR SYSTEM MODELING AND MODEL REDUCTION

A linear and time invariant system can be described in a state-space form as Σ_{SS} (Freitas et al., 2008):

$$\Sigma_{SS} \equiv \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) \end{cases} \tag{1}$$

where $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ and $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^q$ are the state, input and output vectors, respectively. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ is the state matrix, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ is the input matrix and $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ is the output matrix. In some cases a term $D\mathbf{u}(t)$ can be added to the expression of $\mathbf{y}(t)$. However, this term is not usual in most problems. Then, by simplicity and without loss of generality, this term will be omitted in this paper. The transfer function (TF) associated to the system (1) is defined by $H(s) = C(sI - A)^{-1}B$.

An implicit form of Σ_{SS} is treated in (Freitas et al., 2008) and presented as a descriptor system

$$\Sigma_J \equiv \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) &= J_1\mathbf{x}(t) + J_2\mathbf{z}(t) + B_1\mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{0} &= J_3\mathbf{x}(t) + J_4\mathbf{z}(t) + B_2\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= C_1\mathbf{x}(t) + C_2\mathbf{z}(t) \end{cases} \tag{2}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

where $\mathbf{z}(t) \in \mathbb{R}^{n_z}$ is a vector of n_z algebraic variables, $J_1[n \times n]$, $J_2[n \times n_z]$, $J_3[n_z \times n]$, $J_4[n_z \times n_z]$, $B_1[n \times m]$, $B_2[n_z \times m]$, $C_1[q \times n]$ and $C_2[q \times n_z]$ are sparse matrices of adequate size. For real power systems and small-signal stability studies we assume that J_4 is nonsingular (Martins et al., 1996).

Algebraic operations are more convenient by using the descriptor system implicit form since the operations involve several computations with sparse matrices. This same process when implemented considering the state-space form is computationally more intensive and not recommended for large-scale systems (Freitas et al., 2008).

Order Reduction of Systems

The problem addressed here is to approximate Σ_{SS} with another dynamical system

$$\hat{\Sigma}_{SS} = \begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \hat{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \hat{B}\mathbf{u}(t) \\ \hat{\mathbf{y}}(t) = \hat{C}\hat{\mathbf{x}}(t) \end{cases} \tag{3}$$

where $\hat{\mathbf{x}}(t) \in \mathbb{R}^k$ with $k \ll n$ is the reduced state vector, $\hat{\mathbf{y}}(t) \in \mathbb{R}^q$ is the output, and $\hat{A} \in \mathbb{R}^{k \times k}$, $\hat{B} \in \mathbb{R}^{k \times m}$ and $\hat{C} \in \mathbb{R}^{q \times k}$ are the reduced system state matrices.

There exist infinitely many state-space representations $\hat{\Sigma}_{SS}$ that satisfy (3). The general expressions are of the form:

$$\hat{A} = T_L^T A T_R, \quad \hat{B} = T_L^T B, \quad \hat{C} = C T_R, \tag{4}$$

where both matrices T_L and $T_R \in \mathbb{R}^{n \times k}$ and $T_L^T T_R = I_{k \times k}$. In the sequel, we describe techniques to compute T_L and T_R so that the reduced-order model satisfies the above requirements.

Balanced Truncation Method

Given a stable state-space system, Truncated Balanced Realization (TBR) produces a stable reduced model that is usually superior to models obtained by moment matching techniques, with a global frequency domain error bound (Antoulas, 2005).

The TBR method, which is computationally highly intensive, consists of three main steps (see Benner, 2005, and references therein for more details). The first step is to compute the dense $(n \times n)$ controllability and observability gramians P and Q, respectively, by solving the Lyapunov equations

$$AP + PA^T = -BB^T \tag{5}$$
$$A^T Q + QA = -C^T C. \tag{6}$$

The solution of (5) requires operations with the state matrix. To solve implicitly the problem by using the descriptor system model, a low-rank of P and Q method was proposed in (Freitas et al., 2008).

In this work the technique called sparse low-rank Cholesky factor - alternate direction implicit (SLRCF-ADI) is presented and used to compute approximations of the controllability and observabilty Gramians. In (Zhu, 2016) the Gramians are obtained implicitly, but they are computed by applying an extended Krylov subspace (EKS) method. The traditional (straightforward) use of the EKS method was firstly proposed in (Simoncini, 2007). Whichever one of the forms used, it is necessary to deal with stable models. In small-signals stability studies, depending on the way the problem is formulated, two null eigenvalues arise for the model. On the other hand, the accuracy achieved when we determine these eigenvalues are related to the defined precision to the solution of the power flow problem. Thus, the result can arise as two unstable eigenvalues. Also, there are situations where the own model operation point is unstable due to topological structure, loading and inadequate setting of control actions. In this case, the unstable eigenvalues may be located far away from the right of the complex plane imaginary axis. But, the usual methods for solving (5) require that the system model be stable. Note that a Lyapunov equation solution can be obtained by solving a linear equation system. Nevertheless, such procedure is not applicable for iterative solvers as we intend to use.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Action to stabilize or improve the system damping

Unstable models are not a restriction to the computation of Gramians by using low-rank iterative methods. To circumvent this shortcoming some numerical strategy needs to be implemented. Situations where the system model is unstable (or when the system operation point presents unstable eigenvalues in the neighborhood of zero) require a fictitious control action to stabilize the model. In this paper is studied a stabilization process based on eigenvalue shift process. This process was used empirically in (Freitas et al., 2008; Zhu, 2016). The procedure is equivalent to stabilize the system by feeding back locally each state of the system. The process is done assuming a same static gain value and the own state as input to the controller. In those works no explanation is presented with relation to the setting of feeding back gain, which in this work we define as a shift-parameter. The main purpose is to verify the impact of this parameter on the quality of a reduced order model. So sensitivity characteristics are investigated in the sense that a range of shift parameter are used and the respective ROM are obtained.

We consider a shift parameter α in the variable s of the Laplace transform such that $s = \rho + \alpha$, $\alpha > 0$. This operation transforms the older complex plane in the variable s now onto the new complex plane in the variable ρ. The new plane has its poles shifted to the left half-plane. For state-space representation, the problem consists in handling Σ_{SS} as follows.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A_\alpha \mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) = (A - \alpha I)\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) \end{cases} \tag{7}$$

where I is the identity matrix of order n and α must be greater than the real part of the rightmost eigenvalue of A.

We are interested on reduce model of the stable full order model (FOM) $A_\alpha = (A - \alpha I)$. If the state-space matrix of the reduced model associated to A_α is $A_{R\alpha}$, then the MOR of the original FOM is carried out by applying a reverse shift as

$$\hat{A} = A_{R\alpha} + \alpha I_{k\times k} \tag{8}$$

where $I_{k\times k}$ is an identity matrix of order k.

According to (3), the other matrices of the reduced model $\hat{B}$ and $\hat{C}$ are insensitive to the reverse shift operation.

All algebraic operations to compute the Gramians and consequently the MOR are done implicitly. So a shift on A is performed implicitly as

$$\begin{aligned} A - \alpha I = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3 - \alpha I = \\ (J_1 - \alpha I) - J_2 J_4^{-1} J_3 = J_{1\alpha} - J_2 J_4^{-1} J_3 \end{aligned} \tag{9}$$

The shift-parameter sensitivity can be carried out for the SLRCF-ADI and for the EKS technique. In this work we present only the description related to the EKS technique. Although this method does not require the use of ADI factors, it also depends on the number of vectors which are used to form the Krylov subspace.

KRYLOV SUBSPACE

The traditional and inverse Krylov subspace are used for modern iterative methods to approximate the largest and smallest system eigenvalues, respectively. The interpretation of this process is similar to the concept of the modal power method in the approximation of the largest and smallest eigenvalues of a given matrix.

The traditional Krylov subspace (TKS) of dimension w is of the form (Simoncini, 2007; Zhu, 2016):

$$\mathcal{K}_w(A, B) = \{B, AB, \ldots, A^{w-1}B\}, \tag{10}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

and the inverse Krylov subspace (IKS) of same dimension w is defined as (Simoncini, 2007; Zhu, 2016):

$$\mathcal{K}_w(A^{-1},B)=\{B,A^{-1}B,A^{-2}B,\ldots,A^{-(w-1)}B\}. \tag{11}$$

The idea is to combine the properties of both direct and inverse subspaces to form a larger subspace. This combination is referred to as extended Krylov subspace (EKS) (Simoncini, 2007; Zhu, 2016):

$$\begin{aligned}&\mathcal{K}_w^E(A,B)=\mathcal{K}_w(A,B)+\mathcal{K}_w(A^{-1},B)=\\&\{B,A^{-1}B,AB,A^{-2}B,\ldots,A^{(w-1)}B,A^{-w}B\}.\end{aligned} \tag{12}$$

As presented in (12), the EKS is formed from the vector pair $[B \quad A^{-1}B]$. The dimension of $\mathcal{K}_w^E(A,B)$ in this work will be fixed at $2w$.

The EKS-based truncated balanced method

The EKS-based truncated balanced method, called from this point just as EKS method depends on the computation of a matrix V, which presents orthonormal columns with each other. i.e, $V^TV=I_{2w\times 2w}$. These orthonormal columns are used to project low-rank solutions of Lyapunov equations of order n. The columns of the projection matrix, $V_{n\times 2w}$, are denominated Krylov vectors.

Consider the case for the computation of the controllability Gramian and the Krylov vectors obtained from columns of V. The construction of this matrix is carried out by using an Arnoldi's process and requires a reorthogonalization process of the Krylov vectors at each iteration w.

The matrix V_B then is used to project the Lyapunov equation $AX+XA^T=-BB^T$ onto the EKS. Defining $TV^T=V^TA$, and $E=V^TB$, the projection is obtained as follows (Simoncini, 2007)

$$\begin{aligned}V^T(AX+XA^T)V&=-V^T(BB^T)V\\(V^TA)XV+V^TX(V^TA)^T&=-V^TB(V^TB)^T\\T(V^TXV)+(V^TXV)T^T&=-EE^T\end{aligned} \tag{13}$$

For convenience the term (V^TXV) will be replaced by Y. Thus, the projected Lyapunov equation onto the EKS must be solved now as

$$TY+YT^T=-EE^T \tag{14}$$

The projected matrix T in (14) has dimension $(2w\times 2w)$, with $w\ll n$. Hence, the Lyapunov equation can be solved by the classical Bartels-Stewart method (Antoulas, 2005). The solution Y is used to determine an approximation $\hat{X}$ of the original solution X and $V_B=V$ as

$$\hat{X}_B=V_BYV_B^T \tag{15}$$

The solution $\hat{X}$ generates a residue $R=A\hat{X}+\hat{X}A^T+BB^T$. As a consequence, the following condition must be imposed to the residue R:

$$V^TRV=\mathbf{0}_{2w\times 2w} \tag{16}$$

i.e., the residue projection onto the EKS must be null – the Galerkin condition, (Simoncini, 2007).

The Algorithm 1 presents the steps for the computation of the approximate controllability Gramian $\hat{X}_B$ by the EKS-based method.

Similar computation can be done for the observability Gramian by using the Algorithm 1. In this case, B must be replaced by C^T , or B_1 by C_1^T , B_2 by C_2^T , and use A^T or J_i^T , $i=1,2,3,4$.

ISBN 978-607-8242-11-5

Algorithm 1 : Computation of X_B

INPUT: Matrices (A,B) or $(J_1,J_2,J_3,J_4,B_1,B_2)$, number of pairs of Krylov vectors (w)
OUTPUT: $(\hat{X}_B)$

1. Initialization (factorizations, initial calculations)
2. Computation of projection matrix V_B
   2.1. Compute implicitly $M_2 = A^{-1}B$ and $V_B^{(1)} = [B \quad M_2]$, with orthonormalization of the columns of $V_B^{(1)}$ with respect to each other.
   2.2. **For** $j = 2,\ldots,w$
   Select the last two columns of $V_B^{(j-1)}$: $[V_1 \quad V_2] = V_B^{(j)}(\ :\ ,(2w-1):2w)$
   Implicit computation of $M_1 = AV_1$ and $M_2 = A^{-1}V_2$.
   $V_B^{(j)} = [V_B^{(j-1)} \quad M_1 \quad M_2]$ and orthonormalization of the columns of $V_B^{(j)}$ with respect to each other.
   end
3. Projection of A and B : $T = V_B^T A V_B$ and $E = V_B^T B$.
4. Solve the Lyapunov equation by the Bartels-Stewart method: $TY_B + Y_B T^T = -EE^T$
5. Projection $\hat{X}_B$: $\hat{X}_B = V_B Y V_B^T$

The Algorithm 2 illustrates how the EKS method was employed to obtain a reduced order model in this work.

Algorithm 2 : Computation of reduced order model via EKS-based truncated balanced method

INPUT: Matrices (A,B,C,D) or $(J_1,J_2,J_3,J_4,B_1,B_2,C_1,C_2)$, (w), order k of the ROM, shift-parameter α.
OUTPUT: ROM $(\hat{A},\hat{B},\hat{C})$

1. Initialization (factorizations, shift by using α)
2. Computation of $\hat{X}_B$ and $\hat{X}_C$ by employing Algorithm 1.
3. Hankel singular value (HSV) decomposition : $[U_B,\Sigma,U_C] = SVD(X_B^* X_C)$
4. Truncation preserving the k-th highest HSV according to (20)
   $U_B^k = U_B(:,1:k); \quad \Sigma_k = \Sigma(1:k,1:k); \quad U_C^k = U_C(:,1:k)$ (17)
5. Determination of the transformation matrices T_L and T_R.
6. Computation of ROM $(\hat{A},\hat{B},\hat{C})$
   $\hat{A} = T_L^T A T_R; \quad \hat{B} = T_L^T B; \quad \hat{C} = CT_R$ (18)

Originally, the HSV decomposition on step 3 in Algorithm 2 is computed over $(X_B^* X_C) \in \mathbb{R}^{n\times n}$. As dimension n of FOM increases, the HSV decomposition may become substantially slow. In order to overcome this obstacle, each full rank Gramian is projected onto the EKS and the HSV decomposition is taken over

$$V_B^T(\hat{X}_B^*\hat{X}_C)V_C = (\hat{X}_B V_B)^*(\hat{X}_C V_C) = (Z_B^{proj})^*(Z_C^{proj}) \tag{19}$$

Also, since $\hat{X}_B = V_B Y_B V_B^T$, $\hat{X}_C = V_C Y_C V_C^T$ and $V^T V = I_{2w\times 2w}$, (17) is equivalent to

$$(\hat{X}_B V_B)^*(\hat{X}_C V_C) = (V_B Y_B)^*(V_C Y_C) = (Z_B^{proj})^*(Z_C^{proj}) \tag{20}$$

In addition, the transformation matrices from step 5 in Algorithm 2, which were originally computed by

$$\begin{aligned} T_L &= real(X_B)\, U_B^k\, \Sigma_k^{-1/2} \\ T_R &= real(X_C)\, U_C^k\, \Sigma_k^{-1/2}, \end{aligned} \tag{21}$$

need to be adapted due to changes from (20) as follows:

$$\begin{aligned} T_L &= real(Z_B^{proj})\, U_B^k\, \Sigma_k^{-1/2} \\ T_R &= real(Z_C^{proj})\, U_C^k\, \Sigma_k^{-1/2} \end{aligned} \tag{22}$$

In the next section we present some tests and results to demonstrate the impact of the shift parameter α on the determination of ROM.

ISBN 978-607-8242-11-5

TESTS AND RESULTS

To demonstrate the impact of the parameter shift on the quality of the MOR computation, experiments were carried out on 17 test systems. All test systems represent small-signal stability models adequate for electromechanical oscillation studies. Each model was described by a descriptor system form as presented in (2). The several test-systems were derived from two practical Brazilian Interconnected Power System (BIPS) models. The first one (BIPS98) relates to a 1998 heavy load condition. The second model, BIPS07, represents an evolved state of the same power grid and topology for the year 2007. The models were generated considering different load conditions and generator controller topology and setting. The smallest model has 606 states and 6529 algebraic variables. The biggest model presents 5727 states and 34639 algebraic variables. Four test-systems have unstable poles and other ones have poles at the neighborhood of zero. The 606-state system has two poles at zero. But, the numerical computation of them leads to two real poles approximately zero, one of them with an unstable part 0.00294.

The computational simulations were performed in the Matlab. All linear systems are solved by using the LUPQR factorization available from Matlab's lu script. This option has better performance than the traditional lu factorization.

In this work the order of the ROM and number of Krylov vectors were fixed for each model evaluated.

The quality of ROMs was evaluated taking into account simulations in the frequency domain. To better quantify the fitting quality between two curves, a relative error index is defined as

$$\text{Relative Error} = \frac{\|H_{FOM}(j\omega) - H_{ROM}(j\omega)\|}{\|H_{FOM}(j\omega)\|} \tag{23}$$

where each $\|\cdot\|$ is the norm-2 of each vector.

The EKS-based method is used to determine a MOR. The quality of the reduced models is studied verifying the sensitivity for the shift parameter and number of Krylov subspace $w = 120$. The ROM order is fixed as $k = 40$. Just the magnitude of the transfer function (TF) is shown since the phase of the TF has similar behavior.

Sensitivity to shift α

It is evaluated the quality of the MOR for the following shifts α: 1000, 100, 10, 1, 0.1, 0.0029451594. Fig. 1 illustrates the frequency response for these shift parameters.

In Fig. 1 smaller shifts lead to better results with relation to the quality of the fitting between ROM and FOM. The best performance occurs for α = 0.0029451594. Very high values of α dominates the response. As a consequence, the ROM captures only the contribution associated to very high frequency. The results indicate that the quality of the ROM is sensitive to the shift and the best shift is obtained for values near the rightmost eigenvalue. This information suggests that the real part of the rightmost eigenvalue associated to the FOM is an appropriated parameter to be adopted as a FOM shift, case the FOM be unstable. Fig. 2 illustrates the deviation between the FOM and ROM for the same parameters defined in Fig. 1. The results confirm the better performance when smaller shifts are used.

ISBN 978-607-8242-11-5

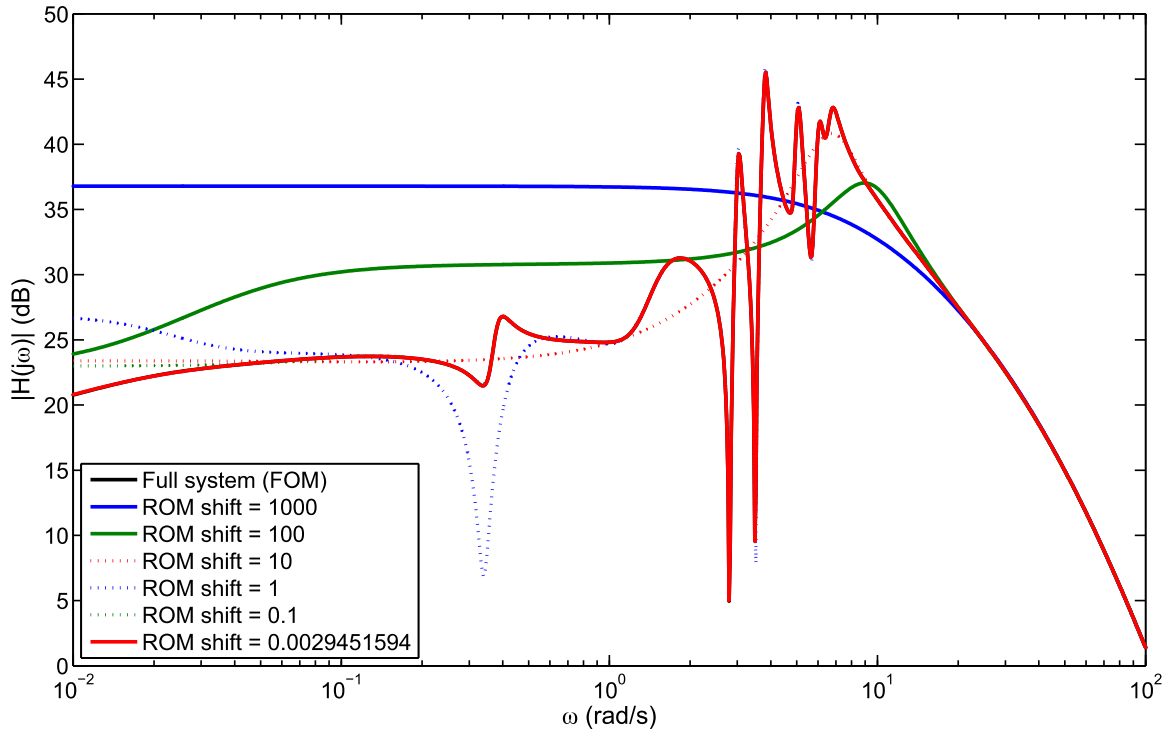


Fig. 1: Sensitivity of the frequency response for some shifts.

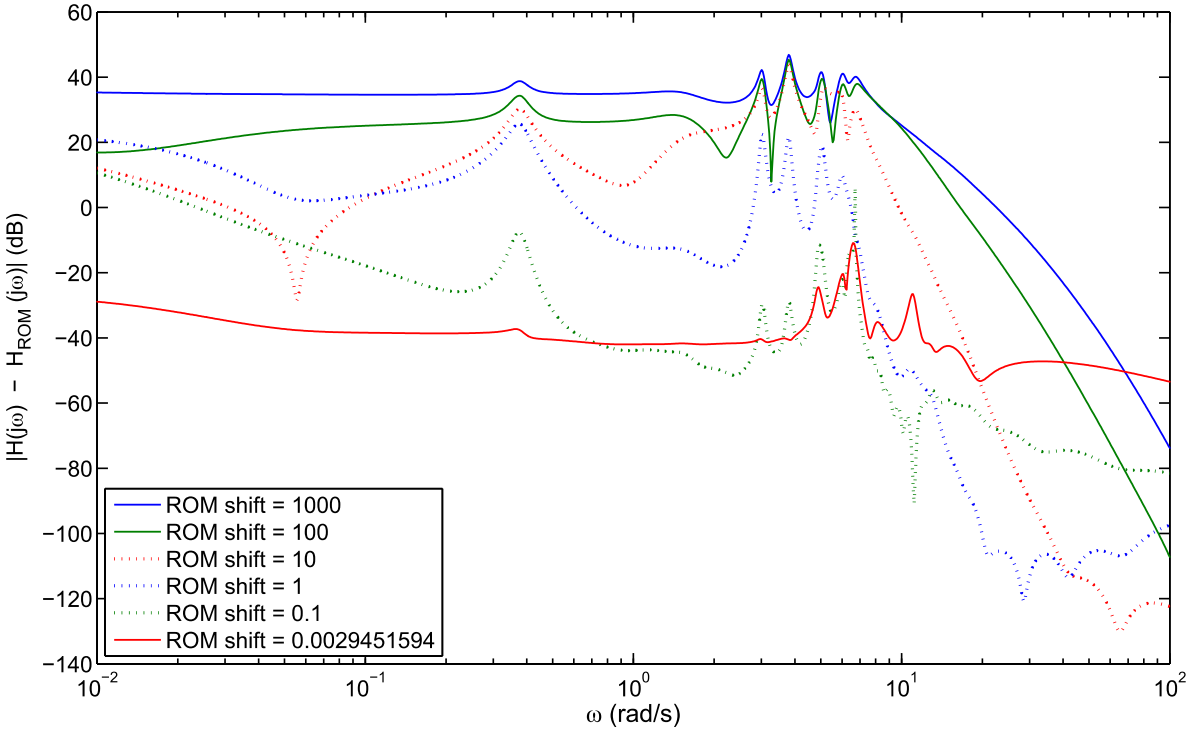


Fig. 2: Magnitude of the frequency response deviation.

In Figure 3 the Relative Error for parameter α are shown. The smaller indices are verified for α near the positive real part of the numerical rightmost eigenvalue. The reduction of the parameter α contributes to improve the quality of the ROM in the neighborhood of low frequencies. However, if the shift is exactly equal or extremely close to the positive real part of the numerical rightmost eigenvalue, it can allocate poles on the imaginary frequency axis, what might unable the model reduction, as can be seen in Figure 3.

ISBN 978-607-8242-11-5

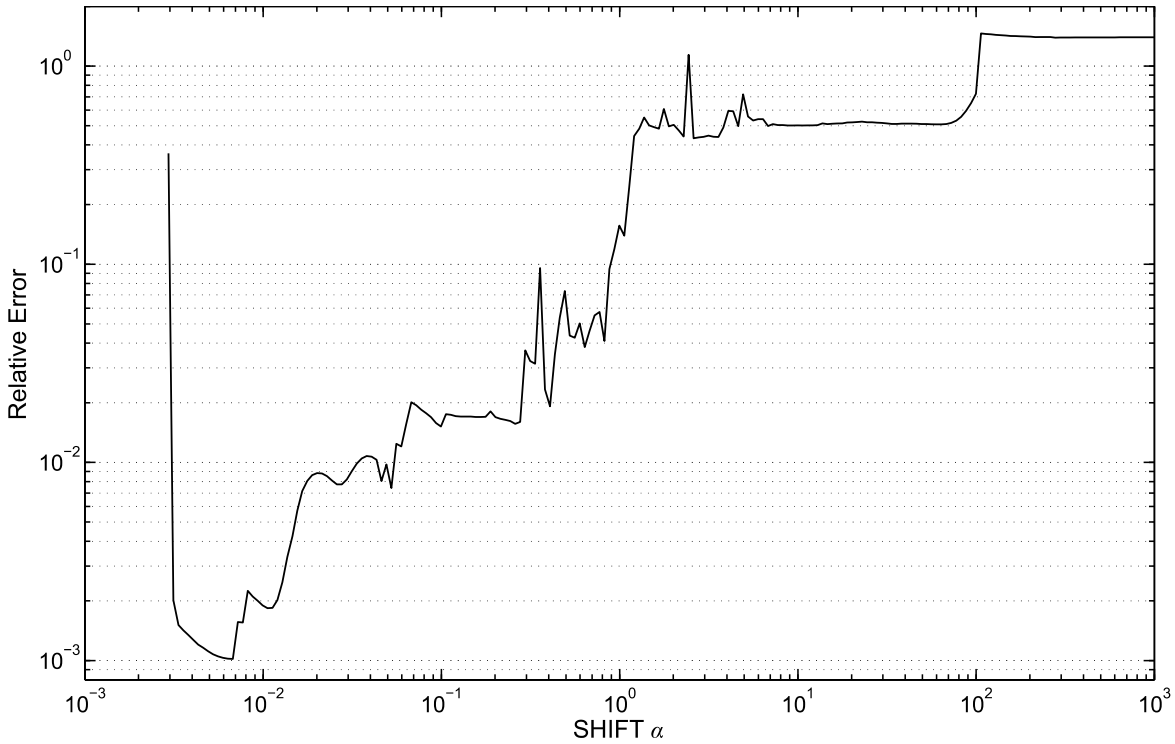


Fig. 3: Relative Error as a function of the shift α.

Figure 4 shows the poles of the system for the different shifts evaluated previously. The shifts with smaller values yield poles near the FOM poles. Note that a shift with the value 0.0029451594 gives the best fitting concerning the poles. This conclusion agrees with the results observed for the frequency response experiments.

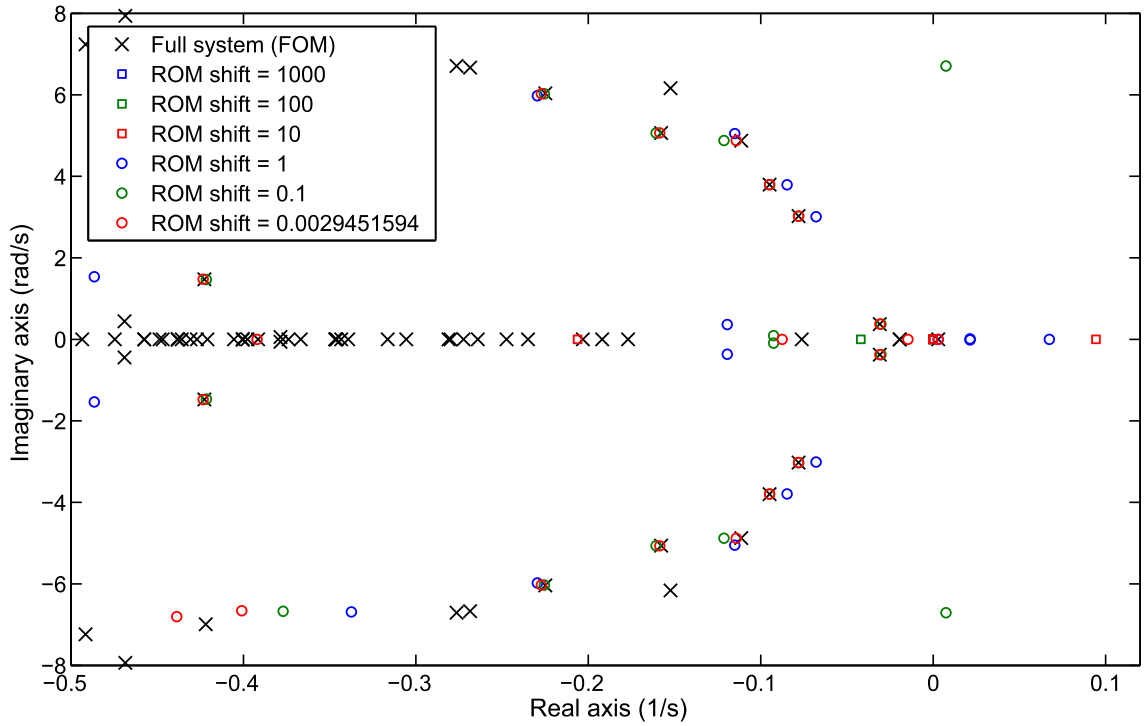


Fig. 4: Zoom near zero of the poles of the system.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONS

The impact of a parameter employed to shift all eigenvalues to the complex left half-plane was studied. The strategy is appropriated to be adopted when a ROM of an unstable FOM needed to be calculated.

The procedure can be interpreted as a stabilization action. So other control actions can also be investigated for allowing robust computation of reduced order models by using Gramians-based methods.

An extended Krylov subspace (EKS)-based method was implemented to compute the controllability and observability Gramians. These results are then used to determine the ROM. Numerical sensitivity experiments were verified through several test systems. But, only results for the smallest test system were shown. The study demonstrates the importance of an adequate selection of the shift parameter, because EKS-based balanced truncation methods are sensitive to unstable systems.

REFERENCES

Antoulas , A. C.; "*Approximation of Large-scale Systems*", SIAM Publications, (2005).

Benner, P.; "*Numerical Linear Algebra for Model Reduction in Control and Simulation*". [Online]. Available: http://www-user.tuchemnitz.de/˜benner/pub/, (2005).

Freitas, F. D., Rommes, J. and Martins, N.; "*Gramian-Based Reduction Method Applied to Large Sparse Power System Descriptor Models*", IEEE Trans. on Power Systems, v. 24, no. 2, pp. 1258–1270, Aug. (2008).

Gugercin, S. and Antoulas, A. C.; "*A Survey of Model Reduction by Balanced Truncation and Some New Results*", International Journal of Control, 20, v. 77, no. 8, pp. 748–766, May (2004).

Kundur, P.; "*Power System Control and Stability*". McGraw-Hill, (1994).

Martins, N., Lima, L. T. G. and Pinto, H. J. C. P.; "*Computing Dominant Poles of Power System Transfer Function*", IEEE Trans. on Power Syst., vol. 11, no. 1, pp. 162–170, (1996).

Schilders, W. H. A.; Vorst, H. A. and Rommes, J.; "*Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications*". Springer, Mathematics in Industry, Berlin, Germany, (2008).

Simoncini, V.; "*A new iterative method for solving large-scale Lyapunov matrix equations*", SIAM J. Sci. Comput., vol. 29, no. 3, pp. 1268-1288, May (2007).

Varricchio , S. L., Freitas, F. D. and Martins, N.; "*Hybrid modal-balanced truncation method based on power system transfer function energy concepts*", IET Generation, Transmission & Distribution, v. 09, no. 11, pp. 1186–1194, Aug. (2015).

Zhu, Z., Geng, G. and Jiang ,Q.; "*Power system dynamic model reduction based on extended Krylov subspace method*". IEEE Trans. on Power Systems, vol. 31, no. 6, pp. 4483-4494, (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE SERVICIOS DE SALUD PARA LA ENSEÑANZA DE LA TOMA DE DECISIONES EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Jaime A. Giraldo[1], José E. Martinez[1], Jessica Ortiz[1].
(1) Fac. de Ingeniería y Arquitectura, Dpto. de Ingeniería Industrial, Univ. Nacional de Colombia, Sede Manizales

Resumen

Se desarrolló un modelo didáctico de simulación como soporte a la metodología de aprendizaje basado en problemas (ABP), con el fin de brindar una herramienta práctica y acercada a la realidad para la enseñanza de la asignación y programación de recursos en sistemas de servicios de salud a estudiantes de ingeniería industrial. Mediante este modelo del sistema los discentes tendrán la posibilidad de simular diferentes escenarios que les permitirán comparar los resultados y tomar decisiones acerca del uso de los recursos, teniendo en cuenta variables como tiempos de espera, cantidad de personal médico y costos de operación tal y como se hace en la cotidianidad, logrando un mayor aprendizaje y apropiación de los conceptos teóricos enseñados en clase. En esta herramienta lo importante no es la solución del problema, sino el proceso que sigue el estudiante al analizar las posibles causas y efectos que tienen sus decisiones, permitiéndole entender la complejidad del sistema, además, de adquirir la capacidad para enfrentarse a problemas similares en su ejercicio profesional.

HEALTH SERVICES SIMULATION TOOL FOR THE TEACHING OF DECISION-MAKING IN INDUSTRIAL ENGINEERING

Abstract

A didactic simulation model was developed as support of the problem-based learning methodology (PBL), in order to provide to industrial engineering's students a practical and realistic tool for teaching assignment and resources programming in health services systems. Through this model the trainees will have the possibility to simulate different scenarios that will allow them to compare the results and make decisions about the use of the resources, taking into account variables such as waiting times, number of medical personnel and operation's costs as it is done in everyday life, achieving greater learning and appropriation of the theoretical concepts taught in class. In this tool the important thing is not the solution of the problem, but the process that the students follow when analyzing the possible causes and effects that have their decisions, allowing them to understand the complexity of the system, besides to acquire the capacity to face similar problems in their professional practice.

Keywords: modeling, PBL, simulation, didactic, health services centre, learning, industrial engineering

INTRODUCCIÓN

Dentro de su estilo de enseñanza, nuestro programa curricular de ingeniería industrial, ha desarrollado e implementado una metodología tipo taller, en la cual se busca que los estudiantes puedan adquirir conocimientos relacionados a su ámbito de trabajo a través del aprender haciendo; con esto, se busca que estén en la capacidad de formular preguntas e inquietudes que puedan llevarlos a mejorar su aprendizaje por medio de las consultas y prácticas que realicen para dar solución a las mismas.

Es así, como a lo largo de su formación los estudiantes tienen acceso a diferentes temáticas y áreas del conocimiento que ayudan a complementar su formación profesional; sin embargo, dichos tópicos en muchas ocasiones son enseñados a los estudiantes de forma intermitente, haciendo que no sea posible la adecuada aplicación de herramientas prácticas informáticas, de simulación, estadísticas y matemáticas que permitan mejorar esa formación bajo un estilo de aprendizaje basado en problemas (ABP).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Dicho tipo de aprendizaje basado en problemas, a lo largo de los años se ha venido convirtiendo en una herramienta y forma de enseñanza muy utilizada, ya que como lo mencionan Vizcarro, C., & Juárez, E. (2008), la metodología ABP pretende que el alumno aprenda a desenvolverse como un profesional capaz de identificar y resolver problemas, de comprender el impacto de su propios actos profesionales y de las responsabilidades éticas que este implica; además, de interpretar datos y diseñar estrategias; y en relación con todo ello, ser capaz de movilizar y de poner en juego, el conocimiento teórico que está adquiriendo en su formación. Para que esto sea posible, la metodología ABP señala que un objetivo fundamental de la formación universitaria actual debe ser que los estudiantes aprendan a aprender de forma independiente y sean capaces de adoptar de forma autónoma la actitud crítica que les permita orientarse en un mundo cambiante. Igualmente señalan que se hace necesario que los futuros profesionales sean capaces de trabajar en equipos, con frecuencia multidisciplinares, y hacerlo de forma natural y productiva siendo capaces de escuchar, de entender (y preguntar si no entienden), de tener en cuenta y respetar otros puntos de vista, de comunicar de forma efectiva lo que puede aportar al trabajo del grupo de forma constructiva.

Dicha metodología ABP, la cual surgió en una facultad de medicina de la Universidad de Mcmaster en Canadá en la década de los 60, como lo menciona Vizcarro, C., & Juárez, E. (2008) citando a Walsh 1978, a lo largo de los años ha pasado a ser una gran herramienta en la enseñanza de múltiples disciplinas, tales como las ingenierías, en las cuales se busca la integralidad de sus profesionales a través de instrucción de diferentes cátedras y cursos que buscan acercar mucho más a los estudiantes a la realidad misma que enfrentaran una vez culminen sus programas de pregrado o posgrado; la simulación, es una de esas herramientas que favorece dicho acercamiento y modelamiento de los fenómenos y escenarios que brinda la vida misma.

Blesa, Ainara G. Et al (2011), Citando a Shannon R.E. (1975) definió la simulación como “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experimentos con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias (dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos) para el funcionamiento del sistema”.

La Simulación es una técnica usada en el análisis de sistemas complejos y se entiende como una amplia colección de métodos y aplicaciones destinados a reproducir artificialmente el comportamiento de sistemas reales, normalmente mediante el uso de software. De hecho, se ha convertido en un término de carácter extremadamente general, dado el extenso rango de disciplinas, industrias y aplicaciones al que otorga soluciones, según Blesa, Ainara G. Et al (2011), pues anteriormente, se hacía necesaria la intervención y modificación del sistema real para así experimentar y tratar de llegar a una solución óptima aproximada, siendo esto poco útil y muy costoso para las empresas; además, de correr el riesgo de ser incapaces de regresar el sistema a su estado inicial y bajo el cual funcionaba antes de la intervención.

Mas a aun, y lo que toma gran importancia para este artículo, era imposible que un estudiante pudiese tener un acercamiento tan real al funcionamiento de un sistema objeto de estudio como se da con la simulación, ya que allí basado en un ABP podrá conocer las limitaciones reales del sistema objeto de estudio y podrá proponer soluciones mucho más acercadas a la realidad y a las necesidades inicialmente planteadas, enriqueciendo la experiencia tanto para el estudiante como para la organización proveedora del sistema a estudiar.

El empleo de la simulación permite acelerar el proceso de aprendizaje y contribuye a elevar su calidad. No puede constituir un elemento aislado del proceso docente, sino un factor integrador, sistémico y ordenado de dicho proceso. Su utilización debe tener una concatenación lógica dentro del plan calendario de la asignatura que se corresponda con las necesidades y requerimientos del plan de estudio y de los programas analíticos de las diferentes asignaturas. Salas y Ardanza (1995).

Hoy en día, gracias a la excelente tecnología proporcionada por los sistemas informáticos y la inmensa investigación en el campo de la Ciencia de la Computación, la simulación se ha consagrado como una de las herramientas más populares y potentes para apoyar los procesos de toma de decisiones. Blesa, Ainara G. Et al (2011).

En la literatura consultada se menciona un modelo de simulación del funcionamiento del entonces futuro complejo asistencial tecnológico de Navarra (CAMTNA). Dicho modelo debería reproducir su funcionamiento y proporcionar un dimensionamiento inicial, a partir del cual se podrían evaluar distintas políticas de gestión de la lista de espera, así como ayudar en la toma de decisiones relacionadas con la planificación del uso de los recursos tecnológicos y humanos. Dicho modelo de simulación se programa en Arena, un simulador de alto nivel que utiliza lenguaje Siman. Por otro lado, el sistema sanitario tenia igualmente preocupaciones

 ISBN 978-607-8242-11-5

relacionadas con el aumento del coste del servicio, con la calidad del mismo, la insatisfacción de los pacientes, las largas listas de espera, la falta de personal médico, de espacio, de camas y de otros recursos.

En cuanto a servicios y aplicación de hospitales, Gáfaro-Rojas, A. I., Mallor-Giménez, F., & Azcárate-Camio, C. (2013) detallan acerca de un estudio en el cual el objetivo fue construir un modelo de simulación para la consulta externa general del Hospital San Juan de Dios de Pamplona, Colombia (HSJD) que permitiera plantear una propuesta de mejora para reducir las grandes colas, los tiempos de espera y mejorar la calidad en el servicio.

Para diversos autores de la Universidad Autónoma de Barcelona (2012), la utilidad de las simulaciones en el ámbito hospitalario es innegable, especialmente en el servicio de urgencias, dada la dificultad de planificar los recursos para esta área, ya que el número de pacientes por atender varía durante todo el año, y pueden existir aumentos por epidemias o particularidades que traen las diferentes épocas del año, como el aumento de alergias en invierno.

Sin embargo, el modelo propuesto en este artículo, se diferencia por su carácter didáctico, ya que busca ser una herramienta para la enseñanza de la programación y operación de un sistema de servicios como lo es un sistema hospitalario, que permitirá a los estudiantes modificar y elegir las variables de decisión que logren un desempeño del sistema a bajos niveles de costo y espera de los pacientes con altas de tasas de utilización de los recursos programados, acercándose a niveles óptimos en la relación costo beneficio, dando así a los estudiantes la oportunidad de adquirir experiencias que les garanticen tener bases para su futuro profesional, dado el caso de que deba enfrentar situaciones similares en la programación de sistemas prestadores de servicios, lo cual puede considerarse que será altamente probable.

METODOLOGÍA

Modelo de simulación y decisión

Para la construcción del modelo se tuvo en cuenta la metodología propuesta por Giraldo (2014), el cual describe una serie de etapas a seguir, las cuales se presentan a continuación:

Definición y conceptualización del sistema a modelar.

Se seleccionó el funcionamiento de una clínica por la fácil identificación y comprensión de cada una de las partes que la componen, además debido a que la mayoría de las personas han estado en una clínica se pueden familiarizar con mayor facilidad con la tipología de pacientes que son atendidos en estos establecimientos; los tipos de pacientes que son procesados en esta simulación son seis, chequeo general, control pre-natal, pediatría, fisioterapia, cirugía y urgencias, este último se divide en tres, los cuales son: paciente urgencia, cita prioritaria y No urgencia, el proceso del paciente que llega a urgencias es uno de los más críticos y se puede detallar en el diagrama presentado en la figura 1. Debido a cuestiones de espacio es imposible mostrar el proceso de cada uno de los pacientes, por ello se ha publicado en el sitio web http://www.simulacionclinicasite.wordpress.com el cual hemos habilitado con el fin de compartir toda la información sobre el modelo.

ISBN 978-607-8242-11-5

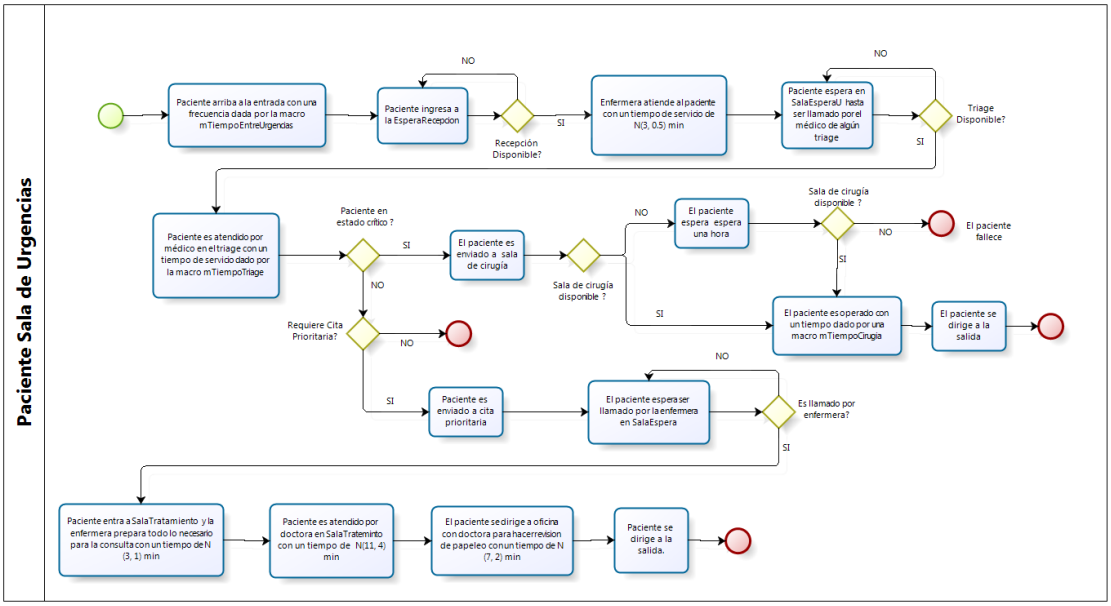


Figura 1. Proceso paciente de sala de urgencias. Elaboración propia con software Bizagi.

Así mismo la clínica está compuesta por dos partes principales, la primera es el cuerpo de la clínica la cual está constituida por una sala de espera, recepción, consultorios como el de chequeo general, pediatría, fisioterapia, pre-natal y cirugía, un baño y las oficinas del médico y del cirujano; la otra parte es la sala de urgencias la cual se compone de una sala de espera, recepción y dos consultorios (triage).

Recolección de datos.

Debido a la dificultad que presenta la recolección de datos en una clínica como lo son la toma de tiempos de procesamiento de cada consultorio y el tiempo entre arribos de los pacientes se decidió utilizar la estimación para determinar las distribuciones de probabilidad que para los estudiantes de ingeniería industrial son de mayor conocimiento, así mismo con el diseño que se plantea y la capacidad de atención que tiene la clínica se puede estimar el número de pacientes que podrán ser atendidos, para esto se sabe que una clínica asigna con anterioridad citas a los pacientes en diferentes horarios con 15 minutos entre cada una, la clínica a simular funciona en un horario de 8 am hasta 6:30 pm en jornada continua y se da capacidad de citas hasta las 4 pm de este modo se sabe que la clínica atenderá a 32 pacientes en un día.

Construcción y codificación del modelo

Una vez definidas las locaciones para la clínica y las diferentes secuencias del procesamiento de atención a cada uno de los pacientes, se desarrolló un modelo de simulación el cual como base tomó un modelo de entrenamiento que ofrece el software Promodel, con el que se buscó un acercamiento más próximo a la realidad del funcionamiento de una clínica. Para la construcción de este se tuvo en cuenta los diferentes comandos y funciones que ofrece Promodel para la codificación del mismo, estas se utilizan específicamente para el procesamiento y enrutamiento que tienen las entidades y el uso de los recursos dentro del modelo (ver figura 2), además las variables que intervienen en dicho sistema y sus correspondientes relaciones entre las diferentes partes de la clínica deben ser enlazadas en el código para el correcto funcionamiento del modelo.

ISBN 978-607-8242-11-5

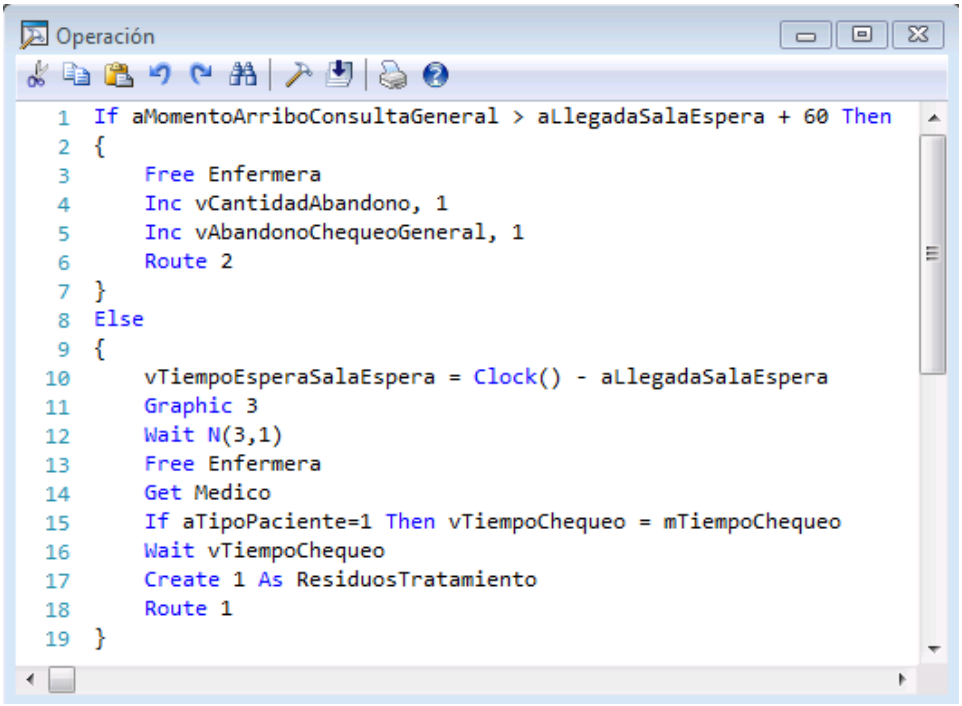


Figura 2. Ejemplo de código utilizado para paciente de chequeo general en sala de espera

Verificación y validación del modelo

Para verificar que el modelo funcione y no presente errores, Promodel tiene una ayuda que es el compilador que permite verificar si el código no presenta errores de sintaxis, además a medida que se iba generando el código y todo el proceso de enrutamiento se puede simular y observar la animación de tal manera de encontrar errores ya sea de enrutamiento o de algún comportamiento inconsistente. Una vez terminado todo el modelo se procede a la validación para ello existen varias maneras como las comparaciones estadísticas o la validación visual, en este caso se utilizó la última. Se sabe que el modelo desarrollado debe reflejar el comportamiento del sistema real y por eso con ayuda de la animación se logró aproximar el modelo a la realidad tal y como se muestra en la figura 3.

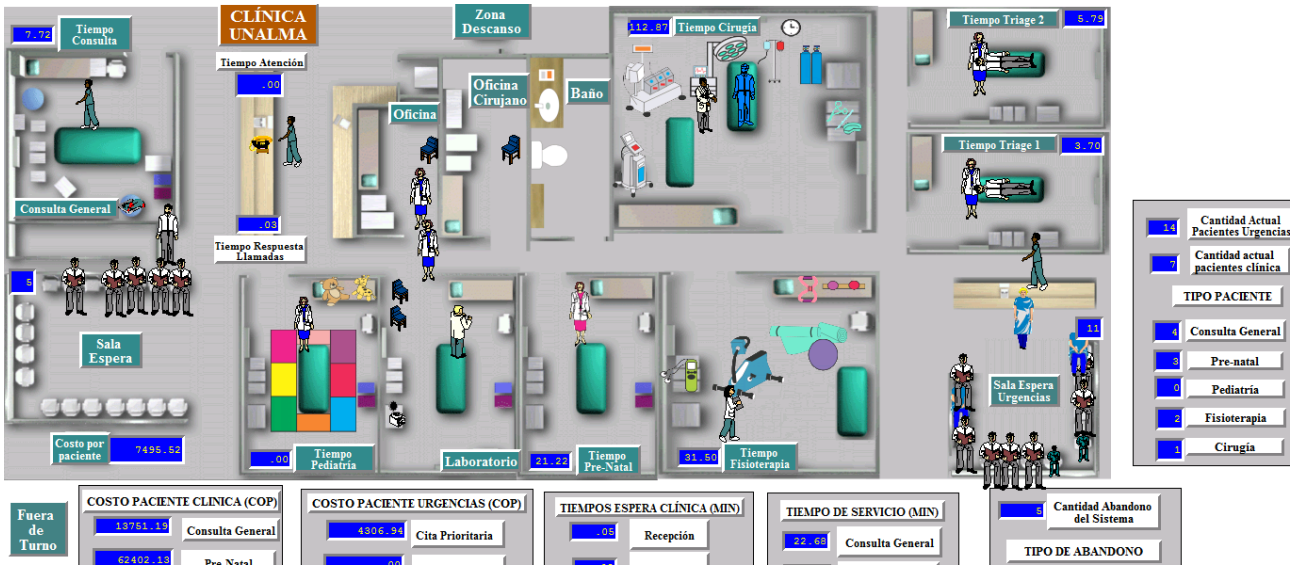


Figura 3. Representación gráfica del modelo de simulación de la clínica.

Diseño Experimental

Dado que el modelo planteado en esta investigación es de carácter educativo y su principal funcionalidad será la posibilidad para los estudiantes de la experimentación y resolución de problemas según la metodologia ABP, se ha decidido la realización del modelo bajo un enfoque de diseño por escenarios,

ISBN 978-607-8242-11-5

permitiendo generar una cantidad muy variada de situaciones de estudio, pues con solo modificar una variable se podrá obtener una problemática totalmente nueva que generará un escenario distinto al que se tenía anteriormente.

En la tabla 1 se observa un posible conjunto de las variables de decisión (m) con sus respectivas medidas de desempeño (n), dichas variables son las que el estudiante puede modificar para obtener diferentes escenarios los cuales podrá comparar con las medidas de desempeño obtenidas en cada una de las diferentes instancias de la simulación. La expresión (1) muestra el modelo lógico-matemático que es representado por la simulación.

$$y_j = f_j(x_{ij}) \quad (1)$$

Donde :

y_j: Representa la medida de desempeño j

x_{ij}: La variable de decisión i asociada a una medida de desempeño j.

$1 \leq j \leq n$

$1 \leq i \leq m$

Tabla 1. Representación del modelo de decisión en la simulación.

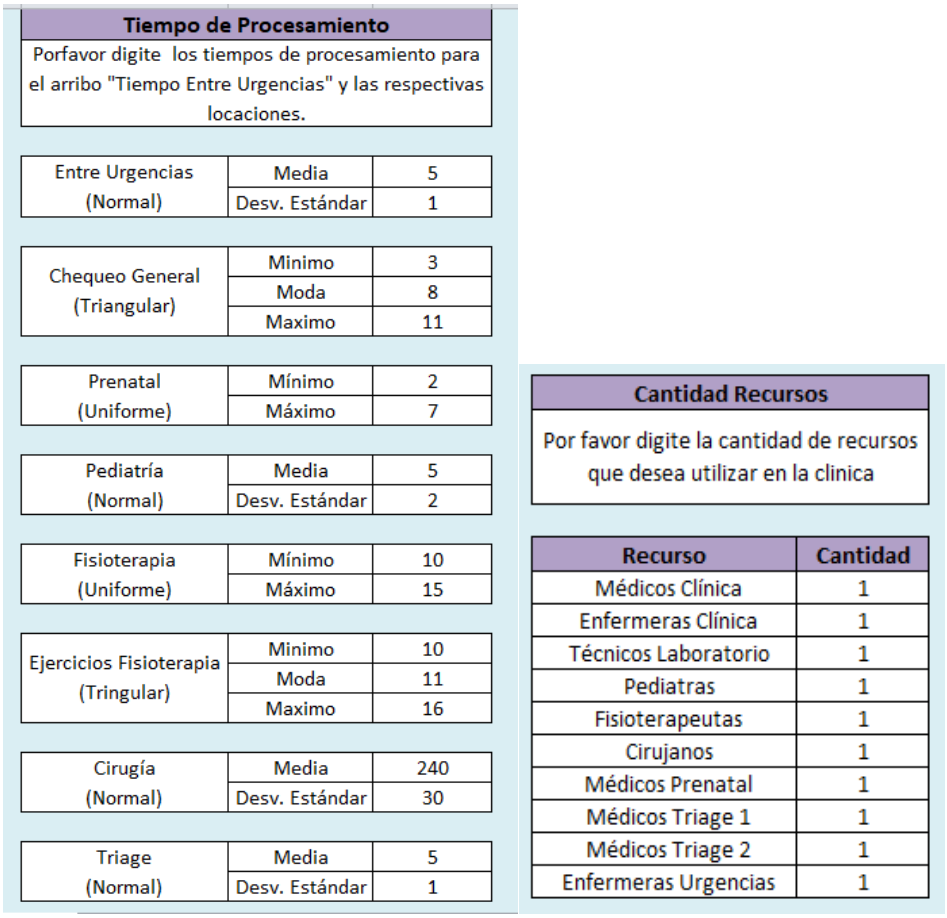
x_{ij}	Descripción de la variable de decisión	Medida de desempeño (y_j)
1,1	Tiempo de arribo entre pacientes para urgencias	(y_1) Tiempo promedio de servicio en urgencias
2,1	Tiempo de atención en el triage	
3,1	Cantidad médicos triage	
4,1	Cantidad enfermeras urgencias	
1,2	Tiempo de servicio chequeo general	(y_2) Tiempo promedio de servicio paciente chequeo general
2,2	Cantidad médicos clínica	
3,2	Cantidad enfermeras clínica	
1,3	Tiempo de servicio chequeo general	(y_3) Costo promedio paciente chequeo general
2,3	Cantidad médicos clínica	
3,3	Cantidad enfermeras clínica	
1,4	Tiempo de servicio fisioterapia	(y_4) Tiempo promedio de servicio paciente fisioterapia
2,4	Cantidad fisioterapeutas	
3,4	Cantidad enfermeras clínica	
4,4	Cantidad técnicos laboratorio	
1,5	Tiempo de servicio fisioterapia	(y_5) Costo promedio paciente fisioterapia
2,5	Cantidad fisioterapeutas	
3,5	Cantidad enfermeras clínica	
4,5	Cantidad técnicos laboratorio	

RESULTADOS Y DISCUSION

Una vez terminadas las anteriores etapas se puede empezar a correr la simulación, para ello el estudiante debe inicialmente establecer los tiempos y la cantidad de recursos con los que contara la clínica, esto se puede hacer a través de una interfaz en Excel para digitar dichos datos (ver figura 4). Los tiempos de procesamiento son valores aleatorios, estos representados por medio de distribuciones de probabilidad con sus respectivos parámetros, en el caso de la distribución normal con parámetros media y desviación estándar, la distribución triangular con parámetros mínimo, moda y máximo, la distribución uniforme con

ISBN 978-607-8242-11-5

parámetros mínimo y máximo. Para la cantidad de recursos se utilizan valores enteros y se digita en su respectiva tabla.



Tiempo de Procesamiento

Porfavor digite los tiempos de procesamiento para el arribo "Tiempo Entre Urgencias" y las respectivas locaciones.

Entre Urgencias (Normal)	Media	5
	Desv. Estándar	1
Chequeo General (Triangular)	Minimo	3
	Moda	8
	Maximo	11
Prenatal (Uniforme)	Mínimo	2
	Máximo	7
Pediatría (Normal)	Media	5
	Desv. Estándar	2
Fisioterapia (Uniforme)	Mínimo	10
	Máximo	15
Ejercicios Fisioterapia (Tringular)	Minimo	10
	Moda	11
	Maximo	16
Cirugía (Normal)	Media	240
	Desv. Estándar	30
Triage (Normal)	Media	5
	Desv. Estándar	1

Cantidad Recursos

Por favor digite la cantidad de recursos que desea utilizar en la clinica

Recurso	Cantidad
Médicos Clínica	1
Enfermeras Clínica	1
Técnicos Laboratorio	1
Pediatras	1
Fisioterapeutas	1
Cirujanos	1
Médicos Prenatal	1
Médicos Triage 1	1
Médicos Triage 2	1
Enfermeras Urgencias	1

Figura 4. Interfaz de ingreso de tiempos de procesamientos y cantidad de recursos.

Según lo presentado en la introducción, se debe plantear un problema a los estudiantes y a si mismo estos deben reunir unos requisitos mínimos para la solución del mismo, para ello según el marco del ABP la instancia del problema con el cual se va a experimentar se describe en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción de la instancia del problema a solucionar.

Enunciando del problema.	¿Cuáles deben ser los tiempos de procesamiento adecuados para la atención de cada uno de los diferentes pacientes y la cantidad de recursos necesarios para la disminución en ***x*** minutos del tiempo total de servicio y tiempo de espera en la sala de recepción y en ***z*** pesos el costo total de cada paciente?
Conocimientos previos.	Conceptos básicos en sistemas de servicios, gestión administrativa de recursos, estandarización de procesos.
Conocimientos desconocidos que requieren más información.	Los conceptos que el estudiante deberá consultar son: tiempos de procesamiento para diferentes pacientes y expresarlos en términos de distribuciones de probabilidad que más se ajusten, que actividades realiza un médico o especialista para determinado tipo de paciente, duración de jornada laborales en una clínica, etc.
Interés para los estudiantes.	El interés se da en que el estudiante podrá experimentar con un sistema virtual el comportamiento de la clínica con las decisiones que tome, todo esto sin riesgos de cometer errores en la vida real y a un costo cero.
Relevancia para los estudiantes	La relevancia se da a razón de poder trabajar en sistema de servicios de salud, los cuales son un campo de acción muy importante para el ingeniero industrial en el ámbito de la estandarización de procesos y que a su vez no son estudiados con mayor profundidad en la academia.

ISBN 978-607-8242-11-5

Objetivos de aprendizaje.	Aprender conceptos sobre tiempos de arribo, estandarización de procesos en los servicios de salud, tiempos de procesamiento probabilísticos en una clínica, causas de abandono, implementación de tecnologías en los consultorios médicos.
Complejidad del problema vs sistemas de la vida real.	La complejidad del sistema refleja las posibles instancias que pueden ocurrir en una clínica de la vida real, esto permite al estudiante poder realizar consultas y tomar posturas que le ayudaran a solucionar dichos problemas y tener una mejor formación académica.

En la tabla 3 se muestran dos escenarios diferentes para la solución de dicho problema, los valores que se muestran en las variables de decisión son probabilísticos lo cuales se representan mediante distribuciones de probabilidad con sus respectivos parámetros, las cuales son:

• Distribución normal: N(media, desviación estándar)

• Distribución uniforme: U(mínimo, máximo)

• Distribución triangular: T(mínimo, moda, máximo)

Las instancias que se pueden modelar son varias y debido a la cantidad de variables que se pueden modificar solo se muestra algunas para ver los efectos generados en las respectivas medidas de desempeño.

Tabla 3. Escenarios de simulación

x_{ij}	**Descripción de la variable de decisión**	**Escenario 1**	**Escenario 2**
1,1	Tiempo de servicio fisioterapia (minutos)	U(25, 5)	U(15, 5)
2,1	Cantidad fisioterapeutas	1	1
3,1	Cantidad enfermeras clínica	1	2
4,1	Cantidad técnicos laboratorio	1	1
1,2	Tiempo de servicio chequeo general (minutos)	T(3, 8, 11)	T(3, 5, 10)
2,2	Cantidad médicos clínica	1	2
3,2	Cantidad enfermeras clínica	1	2

Una vez realizada la simulación de cada uno de los escenarios en Promodel, los resultados se generan en dos archivos de Excel en el cual un archivo contiene la información de los pacientes de la clínica y el otro archivo posee la de los pacientes en urgencias. Esto permite que el estudiante pueda realizar cálculos con los resultados, determinar los valores mínimos, máximos, promedios, entre otros y poder realizar los respectivos análisis. A continuación, en la tabla 4 se muestran los resultados de dos medidas de desempeños para cada uno delos escenarios simulados anteriormente.

Tabla 4. Resultados de las medidas de desempeño en los escenarios simulados.

j	**Medida de desempeño**	**Escenario 1**	**Escenario 2**
1	Costo promedio paciente fisioterapia	$ 18.170,78	$ 19.666,52
2	Tiempo promedio paciente chequeo general	11,82 min	15,97 min

Los anteriores resultan reflejan los cambios que puede tener la clínica al tomar decisiones de tener más recursos como lo son las enfermeras y los médicos, esta decisión puede afectar el costo de cada paciente, debido a que hay más personal y por ello aumenta. Así mismo el uso de más recursos puede aumentar el tiempo debido a que solo hay un consultorio y por eso solo se puede atender un paciente a la vez. En el escenario dos se puede observar que el tiempo de atención disminuye debido a posibles causas como un nuevo método de trabajo para pacientes de fisioterapia o adquirir nuevas tecnologías que permiten agilizar los procesos. Estos análisis son algunas de las posibles soluciones o interpretaciones de los diferentes escenarios que el estudiante puede llegar a utilizar como alternativa de solución para el problema

 ISBN 978-607-8242-11-5

planteado, todo esto lo puede lograr por medio de las diferentes consultas y recolección de información que según el marco ABP el estudiante debe realizar.

Lo importante no es la solución del problema, sino el proceso que adquiere el estudiante para poder analizar todas las posibles causas y efectos que tiene una decisión en el sistema y poder entender la complejidad del mismo, realizar consultas que le permitan tener una mayor aproximación en la interacción con el sistema y poder enfrentarse a problemas que suceden en la cotidianidad.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones: 1) La simulación permite con facilidad la modelación de un sistema de servicios de salud propiciando un entorno didáctico para el aprendizaje desde el punto de vista de la gestión administrativa teniendo en cuenta las variable de decisión que pueden afectar el funcionamiento de dicho sistema y sus respectivas medidas de desempeño; 2) Mediante el uso de esta herramienta virtual a costo cero, se puede generar múltiples instancias de un problema obligando así a los estudiantes a consultar sobre los conceptos y elementos desconocidos que el sistema tiene consigo; 3) Se logra tener una aproximación de un sistema para que los estudiantes al interactuar con éste puedan entender la complejidad que tienen todos los sistemas de servicios de la salud en los cuales posiblemente puedan desempeñar cargos profesionales.

REFERENCIAS

Blesa, Ainara G. Et al (2011), Desarrollo y validación de un modelo de simulación para el complejo asistencial médico tecnológico de navarra (camtna), Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación, Pamplona.

Colección de autores (2012), Un avanzado simulador informático gestiona las urgencias hospitalarias, Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Gáfaro-Rojas, A. I., Mallor-Giménez, F., & Azcárate-Camio, C. (2013). Modelado de la atención en consulta externa en un hospital público: una herramienta de gestión. *Revista Gerencia y Políticas de Salud*, *13*(26), 106-118.

Giraldo Jaime A. (2014). Simulación de sistemas de producción y de servicios, 1ª ed., Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Colombia.

Salas y Ardanza (1995), La simulación como método de enseñanza y aprendizaje, Centro Nacional de Perfeccionamiento Médico y Medios de Enseñanza, Cuba.

Vizcarro, C., & Juárez, E. (2008). La metodología del Aprendizaje Basado en Problemas. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. (2008).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tuning equations for PID controllers based on First-Order-Plus-Dead-Time process parameters and minimization of IAE and controller signal variance

Ivan D. Portnoy[1], Yuhan A. Lenis [1], Marco Sanjuán[1], Arnaldo Verdeza[2].
(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica, Fundación Universidad del Norte, Barranquilla-Colombia
(2) Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla-Colombia
e-mail: iportnoy@uninorte.edu.co, ylenis@uninorte.edu.co, averdeza@unisimonbolivar.edu.co

Abstract

New tuning equations for PID controllers based on first-order-plus-dead-time (FOPDT) process parameters are developed in this work with new behavior criteria, i.e., minimizing a target function composed by a combination of integral-of-the-absolute-error (IAE) and the controller signal variance, which considers not only the controlled variable response but also the actuators safety. Two sets of tuning equations are obtained, one for $0.1 < (t_0/\tau) < 1.5$ and another one for $1.5 < (t_0/\tau) < 5$. Both tuning equation sets are assessed with benchmark processes and their performances are compared with the Minimum IAE, QDR, λ and λ' tuning.

Keywords: PID, tuning equations, signal variance, IAE.

Resumen

A partir de un modelo paramétrico para procesos de primer orden más tiempo muerto (FOPDT), se desarrollan ecuaciones de sintonía para controladores PID, siguiendo como criterio de optimización minimizar una función objetivo compuesta por una combinación de la integral del valor absoluto del error (IAE) y la varianza de la señal del controlador, el cual considera no sólo la respuesta de la variable controlada sino también la seguridad de los actuadores. Se obtienen dos conjuntos de ecuaciones de sintonía, uno para $0.1 < (t_0/\tau) < 1.5$ y otro para $0.1 < (t_0/\tau) < 1.5$. Ambos conjuntos de ecuaciones de sintonización se evalúan con procesos de referencia y sus resultados se comparan con el ajuste de Mínimo IAE, QDR, λ y λ'.

Palaras clave: PID, sintonía, varianza, IAE.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCTION

When the first PID controller, the Fulscope model 100, was introduced in the market in 1940, the setting of these controllers parameters was made basically by trial and error because there was no systematic way for tuning. John Ziegler and Nathaniel Nichols, engineers of Taylor, were the first to address the problem of tuning a PID controller in 1942 (Alfaro, 2005; Smith y Corripio, 1985). They considered that a good closed loop response (of the controlled variable) must exhibit a 25% of oscillation amplitude decay when a disturbance or setpoint change takes place (Alfaro, 2005; Duarte y Da Costa, 2004). With this criterion, they developed two set of tuning equations, one based on the closed loop ultimate controller gain and oscillation period, and another one based on a step-test process identification and approximation to a FOPDT system. The dynamics of many actual processes can be good fitted to a FOPDT transfer function, that is why the Ziegler-Nichols tuning, also known as QDR tuning, has been widely used. Because of the non-uniqueness of the QDR tuning, Paul W. Murril and Cecil L. Smith developed tuning relationships that were unique, using a FOPDT process parameters and minimizing the IAE, which was their target function (Padma et al., 2004; Ramasamy y Sundaramoorthy, 2008; Alfaro, 2005; Smith & Corripio, 1985). Other derivate formulations include the square of the error (ISE) and time weighted integrals, ITAE and ITSE. Another widely used tuning equation sets were developed by Dahlin, which favors responses with little overshoot (5%) or with no overshoot, called λ and λ' tuning respectively (Campi et al., 2002). New approaches have been developed for PID controllers tuning (Shen, 2002) and O'Dwyer (O'Dwyer, 1999) gives a good review of the tuning equation sets that there exist for PID controllers (O'Dwyer, 1999). In this work, new tuning equations sets for PID controllers tuning based on a FOPDT process identification is developed by approaching the minimization of a combination of IAE and controller signal variance, aiming to minimize both the deviations of the controlled variable from the setpoint and the controller output signal variability, which, in turn, aims to keep the actuators in safe operating conditions and avoid stress due to oscillations.

1. DESIGN AND ANALYSIS OF THE EXPERIMENT

Experiments are designed and performed to obtain new sets of tuning equations for PID controller based on FOPDT process parameters and a new performance criterion, i.e., a minimization of a defined target function, which is a combination of the IAE and the variance of the controller output signal $(m(t))$. Two experimental cycles are proposed in order to evaluate a great range of dead time-to-time constant ratio (t_0/τ). For both experimental cycles, four factors were considered. The first three factors are the FOPDT process parameters; its gain K_p, its time constant τ and its dead time-to-time constant ratio (t_0/τ). There is a fourth factor Γ which is called the controller signal-variance weight and is involved in the target function, which is defined as:

$$VP = \int |e(t)|dt + \Gamma\, \sigma^2(m(t)) \tag{1}$$

1.1. First experimental cycle

A 5^4 experiment was carried out. The defined levels for the factors are shown in Table 1. In each run of this experiment, the target function is minimized by varying the PID controller parameters; controller gain K_c , integral time T_i and derivative T_d, with the Matlab® function fmincon. These tuning parameters are the outputs of the experiment.

Table 1: Definition of levels for the first experimental cycle.

Level	K_p	τ	t_o/τ	Γ
Low	0.5	0.5	0.1	1
Middle Low	1.25	1.125	0.45	25.75
Medium	2	1.75	0.8	50.5
Middle High	2.75	2.375	1.15	75.25
High	3.5	3	1.5	100

The experiment analysis results are analyzed with the software Statgraphics Centurion XVI®. For the controller gain K_c, the significant factors are the process gain K_p, the dead time-to-time constant ratio (t_0/τ) and the controller signal-variance weight Γ. For the integral time T_i, the significant factors are the time constant τ, the dead time-to-time constant ratio (t_0/τ) and controller signal-variance weight Γ. For the derivative time T_d, the significant factors are the time constant τ, the dead time-to-time constant ratio (t_0/τ). Only first order effects

 ISBN 978-607-8242-11-5

were considered. With the experimental data, regression models where found out for the PID controller parameters, which are shown in Table 2 with their corresponding R^2 statistic.

Table 2: Regression equations for the PID controller parameters for the first experimental cycle.

Equation	Coefficients				
	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
$K_c = \frac{a_1}{K_p}\Gamma^{a_3}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_4}$	0.9952	-	-0.0848	-0.1956	0.8979
$T_i = a_1\tau^{a_2}\Gamma^{a_3}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_4}$	1.5806	0.998	-0.018	0.2285	0.9846
$T_d = a_1\tau^{a_2}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_4}$	0.2743	0.9965	-	1.0861	0.9707

This equations set is suited only for $0.1 < \left({}^{t_0}/_{\tau}\right) < 1.5$.

1.2. Second experimental cycle

A 3^4 experiment was carried out. The defined levels for the factors are shown in Table 3.

Table 3: Definition of levels for the second experimental cycle.

Level	K_p	τ	t_o/τ	Γ
Low	0.5	0.5	1.5	100
Medium	2	3	3.25	50005000
High	3.5	5.5	5	$1x10^8$

The experiment analysis is carried out with the software Statgraphics Centurion XV®. For the controller gain K_c, the significant factors are the process gain K_p and the dead time-to-time constant ratio (t_0/τ). For the integral time T_i, the significant factors are the time constant τ and the dead time-to-time constant ratio(t_0/τ). For the derivative time T_d, the significant factors are the time constant τ, the dead time-to-time constant ratio (t_0/τ) and the controller signal-variance weight Γ. Only first order effects were considered. With the experimental data, regression models where found out for the PID controller parameters, which are shown below in Table 6, with their corresponding R^2 statistics.

Table 4: First regression equations for the PID controller parameters for the second experimental cycle.

Equation	Coefficients				
	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
$K_c = \frac{a_1}{K_p}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_4}$	0.7211	-	-	-0.1845	0.9986
$T_i = a_1\tau^{a_2}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_4}$	1.7577	0.8643	-	0.5021	0.9776
$T_{d1} = a_1\tau^{a_2}\Gamma^{a_3}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_4}$	0.3997	0.9518	0.0095	0.6409	0.9801
$T_{d2} = a_1\tau^{a_2}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_4}$	0.3144	1.0305	-	0.6708	0.9729

As it may be observed, the regression equation for the derivative time T_d was obtained twice; first including Γ and then without including it. Even though Γ is a significant factor for T_d, it was the one most close to not be significant in the ANOVA (Analysis Of Variance) carried out by the Software. The regression equation that does not include Γ shows also a good fitting because its R^2 statistic is close to 1. Thus, if only T_{d2} is considered, we could set $\Gamma = 100$ (fixed), and the target function may be redefined as: $VP = \int|e(t)|dt + 100\,\sigma^2(m(t))$. This redefinition is only used if $1.5 < (t_0/\tau) < 5$. Finally, the second regression equations set for the PID controller parameters is:

ISBN 978-607-8242-11-5

Table 5: Final regression equations for the PID controller parameters for the second experimental cycle.				
Equation	Coefficients			
	a_1	a_2	a_3	R^2
$K_c = \frac{a_1}{K_p}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_3}$	0.7211	-	−0.1845	0.9986
$T_i = a_1\tau^{a_2}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_3}$	1.7577	0.8643	0.5021	0.9776
$T_d = a_1\tau^{a_2}\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{a_3}$	0.3144	1.0305	0.6708	0.9729

This equations set is suited only for $1.5 < \left({}^{t_0}/_{\tau}\right) < 5$.

2. ASSESSMENT OF THE TUNING EQUATION SETS

For the assessment of the proposed tuning equation set that were developed, two benchmark processes are used. One with $0.1 < (t_0/\tau) < 1.5$ and the other one with $1.5 < (t_0/\tau) < 5$. The performance of the developed tuning equations is compared with the QDR, Minimum IAE, Lambda and Lambda'.

2.1. Assessment for the first tuning equations set

The process used for the assessment of the first tuning equations set is a cooled reactor as shown in Figure1.

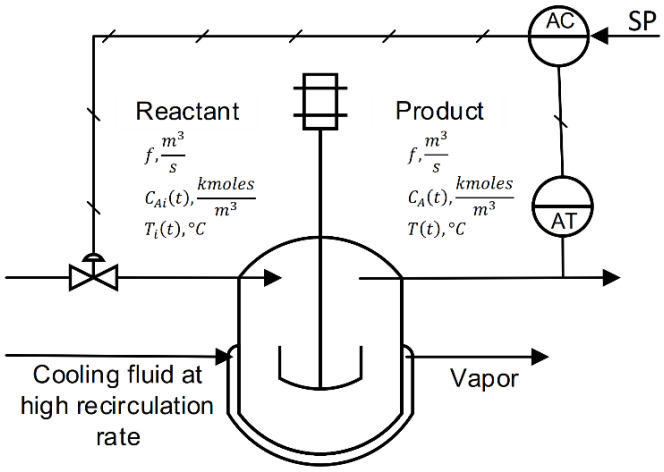


Fig. 1: Benchmark process for the assessment of the first tuning equations set.

There, the exothermic reaction $A \rightarrow B$ takes place. It is assumed the reactor is well stirred, isolated, and the heat capacity and density are the same for both the reactant and the product. Table 6 summarizes all the information regarding steady state values of the process. The process will be modeled by a molar balance of reactant A, an energy balance in the reactor, and the definition of a reaction rate equation. This is summarized in equations (2), (3) and (4) respectively.

$$fc_{A_i}(t) - fc_A(t) - Vr_A(t) = V\frac{dc_A(t)}{dt} \tag{2}$$

$$f\rho c_p T_i(t) - UA[T(t) - T_c] - f\rho c_p T(t) - Vr_A(t)(\Delta H_r) = V\rho c_v \frac{dT(t)}{dt} \tag{3}$$

$$r_A(t) = k_0 e^{-\frac{E}{RT(t)}} c_A(t) \tag{4}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Table 6: Process Information and Steady State Values

Variable	Symbol/Value
Process Information	
Reactor Volume	$V = 0.37\ m^3$
Sectional Area	$A = 3.34\ ft^2$
Activation Energy	$E = 64.71\ kJ/kmol$
Gas Constant	$R = 8.31447\ kJ/kmol\ K$
Density	$\rho = 1413\ kg/m^3$
Specific Heat at Constant Pressure	$C_p = 3.68\ kJ/kg\ K$
Enthalpy of Reaction	$\Delta H_r = -27.96kJ/kmol$
Heat Transfer Coefficient	$U = 0.68kW/m^2\ K$
Pre-exponential Factor	$k_0 = 1.73515 \times 10^{13} min^{-1}$
Steady state values	
Inlet Concentration of A	$C_{Ai}(t) = 14.39\ kmol/m^3$
Inlet Temperature	$T_i = 578°R$
Coolant Temperature	$T_c = 560°R$
Flow	$f = 1.3364\ ft^3/min$
Outlet Concentration of A	$C_A(t) = 2.07kmol/m^3$
Outlet Temperature	$T = 690°R$

2.1.1. Performance to set point changes

A test was performed making a set point change from 0.207 to $0.2277\ kmols/m^3$. Different tuning equations were implemented; QDR, Min IAE, λ, λ' (Smith & Corripio, 1985) and the first set of equations developed in this research, which was used with $\Gamma = 50$ and $\Gamma = 100$. The performance of these tuning equations was assessed through IAE and controller signal variance comparisons. The response shapes are plotted in Figure 2, showing also the exhibited IAE values.

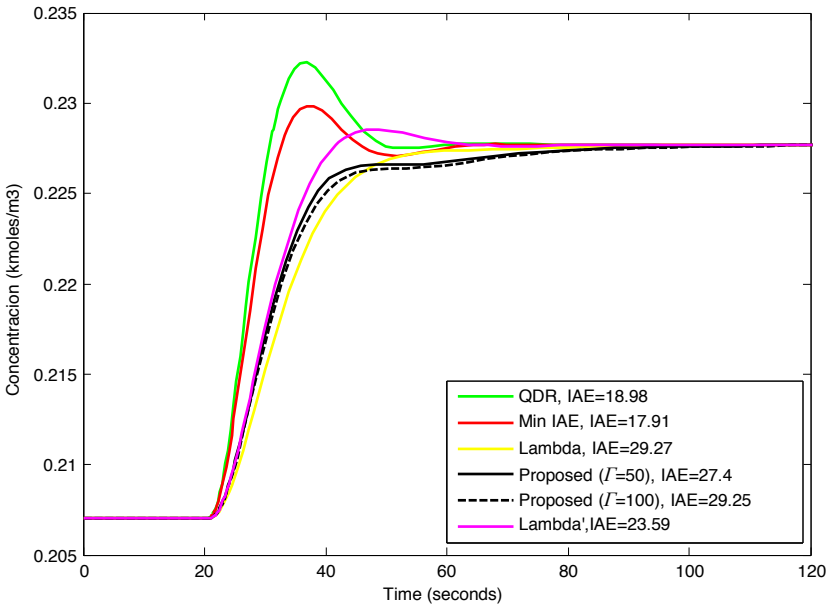


Fig. 2: Responses of different tunings after a set point change.

The IAE value exhibited with the proposed tuning equations, with $\Gamma = 50$, was greater than those obtained by QDR, Min IAE and λ'. On the other hand, the IAE value for the proposed tuning equations with $\Gamma = 100$ was greater than those shown by all the other tuning equations. Nevertheless, this result is not a surprise since, as aforementioned, the proposed tuning equations aim not only minimizing the IAE but also protecting the actuators integrity by avoiding unsafe oscillatory operation conditions. Now, the controller signal (and its calculated variance) for each tuning equation set is shown in a single plot in Figure 3.

ISBN 978-607-8242-11-5

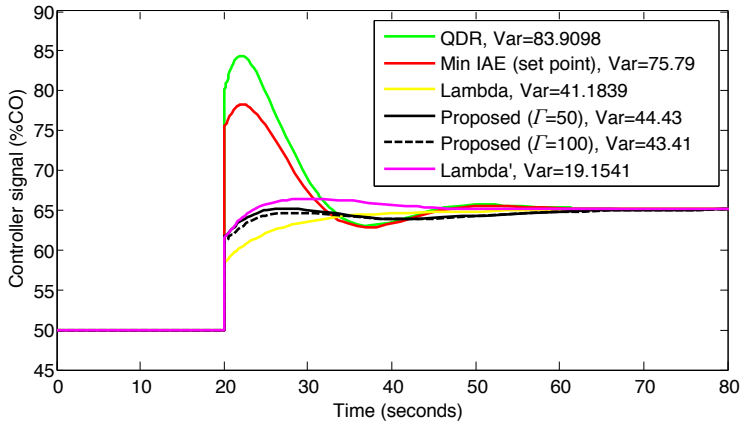


Fig. 3: Controller signal after set point change.

As it may be observed, values for controller signal variance exhibited with the proposed tuning equations (for both $\Gamma = 50$ and $\Gamma = 100$) are comparable to that showed when implementing the λ tuning, while are lower than those obtained with the Min IAE and the QDR tuning equations. Only the λ' tuning equations showed a significantly better (lower) result regarding controller signal variability. On the other hand, with the proposed tuning equations, the controlled variable reaches the setpoint neighborhood sooner than with the λ' tuning equations. Now, the performance after disturbances will be assessed.

2.1.2. Performance to disturbances

A test was performed making a step change in the inlet concentration from 14.39 to $15.25\ kmole/m^3$. The response shapes obtained with the different tuning equation sets are plotted in Figure 4, showing also the reached IAE values.

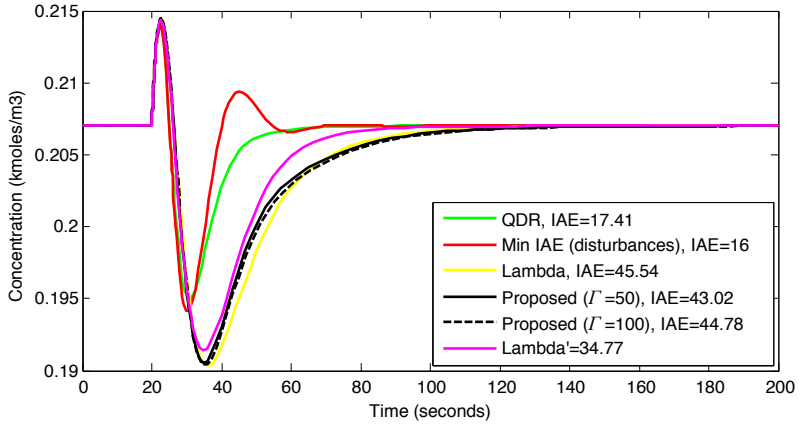


Fig. 4: Responses of different tunings after a set point change.

The controller signal (and its calculated variance) for each tuning is shown in a single plot in Figure 5:

ISBN 978-607-8242-11-5

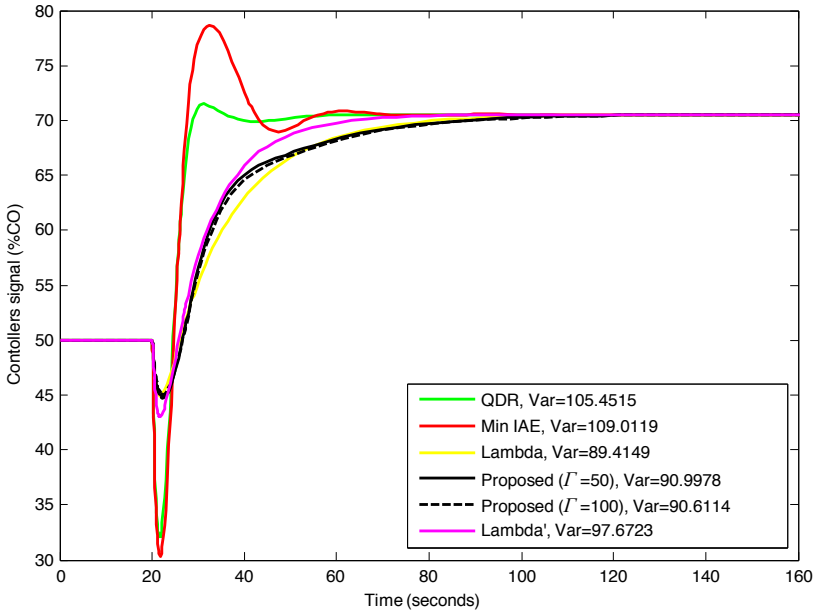


Fig. 5: Controller signal after a disturbance.

As it may be observed, the proposed tuning equations (for both $\Gamma = 50$ and $\Gamma = 100$) achieved an IAE value only comparable to that obtained with the λ tuning equations, and greater than those obtained with the other equation sets. Concerning to minimizing the controller signal variance, the proposed tuning is only barely overcome by the λ tuning, and exhibit a variance lower than that obtained with the other equation sets.

2.2. Assessment for the second tuning equations set

The process used for the assessment of the second tuning equation set is a Hot-Cold water mixing tank, which is illustrated in Figure 6.

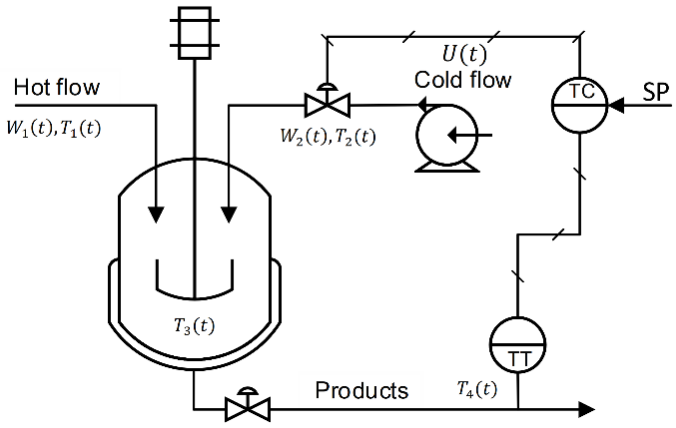


Fig. 6: Benchmark process for the second tuning equations set.

The controlled variable is the output temperature with a transport delay, while the manipulated variable is the input cold water flow. This process is nonlinear and has a large dead time, what means that $1.5 < (t_0/\tau) < 5$. The steady state output temperature is $\bar{T}_4 = 163.3°C$. Process information and steady state values are shown in Table 7.

ISBN 978-607-8242-11-5

Table 6: Process Information and Steady State Values

Variable	Symbol/Value
Process Information	
Tank	
Volume	$V = 0.37ft^3$
Downstream Pipe	
Length	$L = 125ft$
Sectional Area	$A_c = 0.2ft^2$
Valve (FC-P)	
Maximum Flow	$f_{max} = 400ft^3/min$
Time Constant	$\tau_v = 0.4$
Sensor/Transmitter	
Zero of the Instrument	$PV_{min} = 100°F$
Span	$span = 100°F$
Time constant	$\tau_T = 0.5\ min$
Stream	
Specific Heat at Constant Pressure	$c_p = 0.8\ Btu/lbm\ °F$
Specific Heat at Constant Volume	$c_v = 0.9Btu/lbm\ °F$
Density	$\rho = 60\ lbm/ft^3$
Steady state values	
Hot Stream Flow	$w_1 = 250lbm/min$
Cold Stream flow	$w_2 = 191.17lbm/min$
Hot Stream Temperature	$T_1 = 250°F$
Cold Stream Temperature	$T_2 = 50°F$

Equations ruling the dynamic behavior of this process are a mass balance, an energy balance and a transport delay. These equations are shown below.

$$w_1(t) + w_2(t) - w(t) = 0 \tag{5}$$

$$w_1(t)c_pT_1(t) + w_2(t)c_pT_2(t) - w(t)c_pT_3(t) = Vc_v\rho\frac{dT_3(t)}{dt} \tag{6}$$

$$T_4(t) = T_3(t - t_0(t)) \tag{7}$$

$$t_0(t) = \frac{LA\rho}{w(t)} \tag{8}$$

2.2.1. Performance to set point changes

A test was performed making a step set point change from $163.3°F$ to $173.3°C$. The same state-of-the-art tuning equation sets assessed in sub-section 2.1 will be assessed now and compared with the second equations set developed in this research. This evaluation is carried out through IAE and controller signal variance comparisons. Responses are plotted in Figure 7, showing also the exhibited IAE values.

ISBN 978-607-8242-11-5

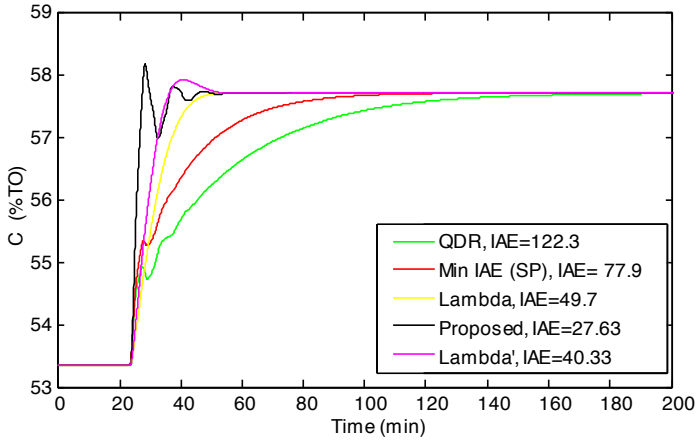


Fig. 7: Responses of different tunings after a set point change.

As it may be observed, with the proposed tuning equations the minimum value for the IAE was obtained. Now, the controller signal (and its calculated variance) obtained with each tuning equation set is shown in Figure 8. Also, the calculated variance for the proposed set is the lowest.

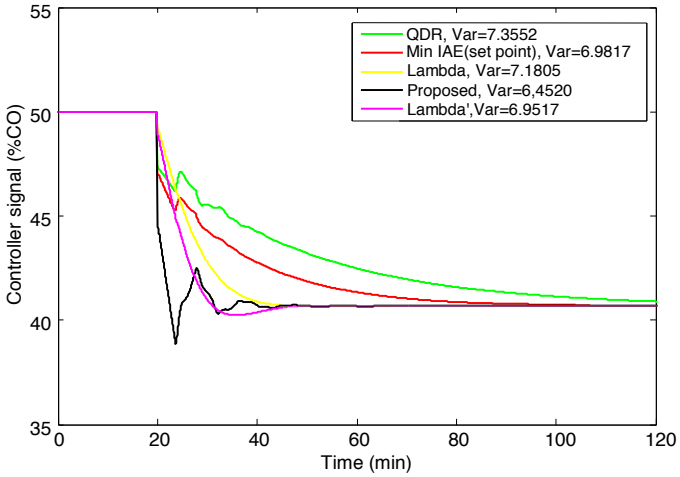


Fig. 8: Controller signal after set point change.

2.2.2. Performance to disturbances

A test was performed making a step change in the hot water flow from 31 to $26 gpm$. Performance is compared through IAE and controller signal variance. Responses are observed in Figure 9, showing also the reached IAE values.

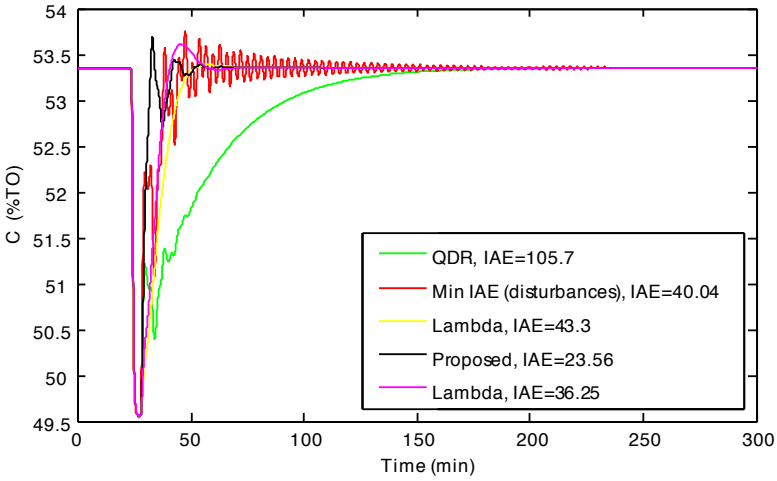


Fig. 9: Responses of different tunings after a disturbance.

ISBN 978-607-8242-11-5

As observed in Figure 2, the proposed tuning equation set achieved the minimum value of the IAE, and it also shows a fast response, reaching the setpoint neighborhood quickly with few overshoot and oscillations. Now, the controller signal (and its calculated variance) for each tuning is shown in a single plot in Figure 10.

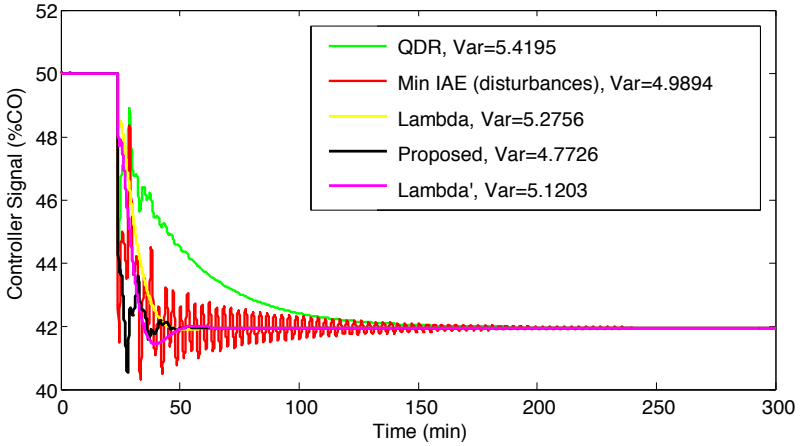


Fig. 10: Controller signal after a disturbance.

The calculated variance for the proposed tuning equation set is the lowest, exhibiting a smooth response with little oscillations. It is notable that the proposed equations have achieved a better performance, concerning to IAE and controller signal variance, when $1.5 < \left({}^{t_0}/_{\tau}\right) < 5$.

3. CONCLUSIONS

New tuning equation sets for PID controllers based on FOPDT process identification were developed for $0.1 < (t_0/\tau) < 1.5$ and $1.5 < (t_0/\tau) < 5$. Unlike traditional tuning equations, those proposed in this work consider not only the controlled variable response, but also favors responses with low variability of signals to the actuators, looking for safe operating conditions.

Equations developed in this work were compared to four state-of-the-art tuning equations, implementing them in two benchmark processes and evaluating their performance regarding the minimization of the IAE and the controller output signal variability. These proposed equations showed a good performance in processes with $1.5 < (t_0/\tau) < 5$, overcoming the other assessed tuning equations concerning to minimizing the IAE and the controller signal variance, showing also a fast answer with little and smooth oscillations. However, in processes with $0.1 < (t_0/\tau) < 1.5$, the proposed tuning showed a behavior comparable with the Lambda tuning, i.e., a non-oscillatory and slow answer.

REFERENCES

Alfaro, V., *"Actualización del Método de Sintonización de Controladores de Ziegler y Nichols"*, Ingeniería, 15 (1,2), 39-52 (2005).

Alfaro, V., *"Estimación del Desempeño IAE Óptimo de los Reguladores y Servomecanismos PID"*, Ingeniería, 15(1), 79-90 (2005).

Campi, M., Lecchini, A. and Savaresi, S.M., *"Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers"*, Automatica, 38(8), 1337 – 1346 (2002).

Duarte, V. and Da Costa, J., *"Tuning of fractional PID controllers with Ziegler-Nichols type rules"*, Signal Processing, 86(10), 2771–2784 (2006).

O'Dwyer, A., *"PI and PID controller tuning rules for time delay processes"*, Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference, National University of Ireland, Galway (1999).

Padma, R., Srinivas, M.N. and Chidambaram, M., *"A simple method of tuning PID controllers for stable and unstable FOPDT systems",* Computers and Chemical Engineering, 28(11), 2201-2218 (2004).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Ramasamy, M., and Sundaramoorthy, S., *"PID controller tuning for desired closed loop responses for SISO systems using impulse response"*, Computers and Chemical Engineering, 32(8), 1773–1788 (2008).

Shen, J.C., *"New tuning method for PID controller",* ISA Transactions, 41(4), 473–484 (2002).

Smith, C.A. and Corripio, A.B., *"Principles and practice of automatic process control"*, Florida, San Diego (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Adsorción de Cromo Cr(VI) Usando Carbón Activado de Origen Bituminoso. Metodología de Superficie de Respuesta como Herramienta de Optimización

Camilo Santa[1a], Edison GilPavas[1,2a], Josephine Hill[3], Izabela Dobrosz-Gómez*[1b], Miguel-Ángel Gómez[1a]

(1) PRISMA: Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados. [a]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. [b]Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Campus La Nubia, Apartado Aéreo 127, Manizales, Caldas, Colombia
(2) GIPAB: Grupo de Investigación en Procesos Ambientales, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
(3) Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, T2N 1N4
(e-mail: csantao@unal.edu.co; egil@eafit.edu.co; jhill@ucalgary.ca ;*idobrosz-gomez@unal.edu.co; magomez@unal.edu.co)

Resumen

Diversos procesos industriales como los de galvanoplastia, metalurgia, procesadoras de pieles y textiles, minería entre otros, utilizan Cromo hexavalente, Cr(VI), en su actividad productiva. Estos procesos tienden a generar efluentes líquidos con altas concentraciones de este metal en sus seis estados de oxidación (de 0 a VI). Sin embargo, sus formas tri y hexavalentes son las más estables en el ambiente. El cromo trivalente (Cr(III)) es un elemento esencial para la nutrición humana. Por otro lado, se ha reportado que el Cr(VI) es 500 veces más tóxico para animales y seres humanos que el Cr(III) y es reconocido como un agente carcinogénico y mutagénico. Durante los últimos años, en Colombia (América del Sur) la concentración media de Cr(VI) procedente de las descargas de curtido de cuero y la industria de metales fue de aproximadamente 13 $mg.L^{-1}$ y 62 $mg.L^{-1}$, respectivamente. En respuesta a esta situación, los gobiernos han legislado y establecido límites de concentración de Cr(VI) en aguas residuales. Para el caso colombiano, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante Resolución 0631 del 2015, estableció los límites máximos permisibles de Cr(VI) según la procedencia industrial del efluente (estos varían entre 0,01 y 1,5 $mg.L^{-1}$ para las industrias cerámicas y de curtiembre de pieles, respectivamente). Este escenario legal promueve la implementación de métodos de tratamiento para su remoción. Actualmente se cuenta con diferentes alternativas para su tratamiento, entre ellas la precipitación química, el intercambio iónico, la adsorción, la filtración con membranas y las tecnologías electroquímicas (Hua *et al.*, 2012). Así, la adsorción puede ser ventajosa debido a que permite adsorber el Cr(VI) de las aguas residuales y posteriormente recuperarlo (desorberlo) para ser reincorporado al proceso productivo, regenerando el adsorbente.
En este trabajo se estudió la adsorción de Cr(VI) de aguas residuales sintéticas, con una concentración de Cr(VI) de 100 $mg.L^{-1}$, usando carbón activado del origen bituminoso (CAB). La muestra de CAB se preparó como se describió en detalle por Karami *et al.* (2013). El material adsorbente de partida se produce en abundancia en Alberta, Canadá, como subproducto del proceso de tratamiento de las arenas bituminosas y se está almacenando en grandes cantidades (72 millones de toneladas a fines de 2011). Aunque el CAB es un recurso barato, aun hay problemas con su procesamiento (emisiones de azufre) y su uso (lixiviación). La isoterma de adsorción-desorción de N_2 del CAB puede clasificarse como de Tipo I (con carácter microporoso). El área superficial BET y el volumen de poros de la muestra son 428,6 $m^2.g^{-1}$ y 0,26 $cm^3.g^{-1}$, respectivamente. El punto de carga cero del CAB, determinado por el método de titulación, fue de 7,5, lo que indica su carácter ligeramente básico. Se aplicó la metodología de superficie de respuesta como herramienta para la optimización de las condiciones de operación del proceso de remoción de Cr(VI) junto con un diseño experimental del tipo Box-Behnken multinivel. Como variable de respuesta se definió la eficiencia de remoción de cromo (R_{Cr}, %), y como variables de operación se evaluaron el pH (2-7), la temperatura (T = 20-40 °C), y la dosis del adsorbente (Ads = 2-6 $g.L^{-1}$). La concentración de Cr(VI) se estimó espectrofotométricamente mediante el método de difenilcarbazida, midiendo la absorbancia a una longitud de onda de 540 nm. Así, se realizaron quince pruebas con réplicas aleatorias para evitar errores sistemáticos. Los experimentos de adsorción por lotes se realizaron en los frascos cónicos que contenían 10 ml de solución de Cr(VI) y la dosis de adsorbente apropiada, durante 60 minutos, bajo agitación constante. Fue posible remover el 100% del Cr(VI) a las siguientes condiciones: pH = 2, T = 40 ° C y Ads = 5,99 $g.L^{-1}$. A estas condiciones, la capacidad de adsorción de Cr(VI) fue de 16,6 $mg.g^{-1}$, requiriendo 45 min para alcanzar el equilibrio.

Referencias

Hua, M., Zhang, S., Pan, B., Zhang, W., Lv, L. and Zhang, Q. (2012) J. Hazard. Mater. 211–212, 317.
Karami, A., Thinon, O., Fournier, J., Hill, J.M., (2013) Can. J. Chem. Eng. 1500-1507, 91.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Control Predictivo Generalizado para el Seguimiento de Trayectorias de un Vehículo Cuatrirotor.

José L. Mendoza-Soto y H. Rodríguez Cortés
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, D.F., 07360
E-mail: eemsj03@yahoo.com.mx , hrodriguez@cinvestav.mx

RESUMEN

Este artículo propone una estrategia de control basada en el control predictivo generalizado (GPC) restringido en combinación con un controlador geométrico de orientación para el seguimiento de trayectorias de un vehículo cuatrirotor. El enfoque de control predictivo generalizado permite seguir trayectorias variantes en el tiempo utilizando acciones de control óptimas para cumplir con las restricciones en la trayectoria deseada. El controlador de orientación sigue la referencia definida por el controlador predictivo generalizado. El controlador propuesto se prueba experimentalmente en un cuatrirotor de bajo costo equipado con un sistema de medición inercial y un sistema de posicionamiento basado en cámaras infrarrojas.

INTRODUCCIÓN

El cuatrirotor es una excelente plataforma para la investigación y evaluación de algoritmos de control debido a su naturaleza subactuada y no lineal. El trabajo en (Zulu y John, 2014) presenta un resumen que analiza los algoritmos de control aplicados a un cuatrirotor. El estudio incluye control PID, cuadrático lineal (LQR), modos deslizantes, backstepping, linealización por retroalimentación, control adaptable, control robusto, estrategias óptimas tales como L_1, H_∞, lógica difusa y redes neuronales artificiales. El resumen describe las ventajas y desventajas de estas diferentes estrategias de control. Además, los autores proponen una estrategia de control basada en la teoría de sistemas híbridos.

En aplicaciones de seguimiento de trayectorias donde el cuatrirotor interactúa con el medio ambiente, es deseable dotar al cuatrirotor de la capacidad de evadir obstáculos. En algoritmos de control basados en procesos de optimización, como el Control Predictivo basado en Modelos (MPC), la evasión de obstáculos puede considerarse naturalmente como una restricción. La implementación de la evasión de obstáculos en un vehículo aéreo mediante el empleo de MPC es costosa desde el punto de vista computacional, por lo que debe implementarse utilizando estrategias eficientes. La carga computacional aumenta con el nivel de detalle del modelo dinámico utilizado para la síntesis del MPC. Por lo tanto, se consideran diferentes enfoques para simplificar el modelo dinámico no lineal del cuatrirotor y para implementar el MPC en tiempo real.

Suponiendo que la constante de tiempo del controlador de orientación es lo suficientemente pequeña, (Mueller y D'Andrea, 2013) propone un generador de trayectoria para la dinámica de traslación de un cuatrirotor como un problema de control óptimo. Los resultados experimentales mostraron que los problemas relacionados con la implementación en tiempo real de un algoritmo de optimización se resuelven. En (Engelhardt et al., 2016) se presenta un generador de trayectoria basado en MPC. El algoritmo MPC considera un modelo dinámico con linealización entrada-salida. Las pruebas en vuelo se llevan a cabo con un multirotor Pelican de Ascending Technologies (AscTec) con un procesador Intel Core i7.

El trabajo en (Bangura y Mahony, 2014) lleva a cabo una reducción en la dinámica de orientación, como resultado de un controlador de alta ganancia para la velocidad angular del cuadrotor, y se utiliza un controlador de linealización por retroalimentación dinámica de entrada-salida para la dinámica restante. Los autores proponen un algoritmo MPC para el sistema lineal equivalente por realimentación. Los resultados experimentales muestran el rendimiento del controlador. El MPC lineal funciona a 16 Hz mientras que el controlador de alta ganancia funciona a 200 Hz en un piloto automático PX4.

Para captar mejor la dinámica del cuatrirotor, el estudio de (Kostas et al., 2016) emplea una aproximación lineal del modelo no lineal completo desacoplado en dinámica lateral y longitudinal. Considerando las perturbaciones desconocidas como entradas del modelo lineal desacoplado, se diseña un esquema robusto de MPC. Los resultados experimentales en dos tipos diferentes de cuatrirotor ilustran que el esquema de MPC robusto propuesto atenúa los efectos de las ráfagas de viento, las perturbaciones externas y las colisiones físicas.

El artículo (Mahyar et al., 2013) considera un cuadrotor con dinámicas lateral y longitudinal desacopladas para ángulos de orientación pequeños; el rango de ángulos de orientación se considera en la síntesis del MPC como una restricción. Entonces se propone un algoritmo MPC eficiente para el modelo reducido y se prueba experimentalmente en un multirotor Quanser Qball-X4.

El esquema MPC propuesto en (Neunert et al., 2016) emplea la dinámica completa no lineal de un

 ISBN 978-607-8242-11-5

cuatrirotor y utiliza un algoritmo secuencial cuadrático lineal óptimo (SLQ). Se presenta evidencia experimental del esquema propuesto, utilizando un hexacóptero Firefly de Ascending Technologies que tiene una unidad de control de vuelo (FCU) basada en el microcontrolador Cortex-M4.

En (Bemporad et al., 2009), se propone un enfoque jerárquico híbrido de dos niveles de control MPC para el seguimiento de trayectorias. El primer nivel de control utiliza un enfoque de MPC híbrido basado en un modelo dinámico híbrido del cuatrirotor y su entorno para generar trayectorias sin obstáculos mientras que el segundo nivel estabiliza asintóticamente el error de seguimiento de la trayectoria. El primer nivel de control se ejecuta en un período de muestreo más largo que el segundo nivel de control. Las simulaciones numéricas en conjunto con la visualización virtual 3D muestran el rendimiento del algoritmo de control. En (Bemporad y Rocchi, 2011), esta estrategia híbrida MPC se emplea para la estabilización, la navegación autónoma de un grupo de cuatrirotores con restricciones definidas en el empuje del rotor, los ángulos de orientación y la posición espacial de los vehículos para evitar colisiones. Las simulaciones numéricas validan el diseño del control. Los autores de (Rochefort et al., 2012) presentan una estrategia de control para guiar a un grupo de cuatrirotores en tareas de cooperación utilizando MPC. La estrategia utiliza modelos cinemáticos en tiempo discreto y toman en cuenta los movimientos relativos de los vehículos para evitar colisiones. El desempeño del controlador se evalúa por medio de simulaciones numéricas. En (Ribeiro et al., 2015), se presenta un enfoque de control predictivo no lineal con restricciones para el control de una formación de cuatrirotores. Los autores utilizaron las fórmulas de Serret-Frenet para definir la cinemática del modelo del multirotor y resolver el problema de coordinación y seguimiento de trayectorias. El esquema propuesto se verifica empleando simulaciones numéricas.

Este trabajo propone una combinación de dos técnicas de control para resolver el problema de seguimiento de trayectorias restringidas para un helicóptero cuatrirotor. Las limitaciones en la trayectoria deseada, modelan la presencia de obstáculos que el vehículo debe evitar. Un esquema de control predictivo generalizado (GPC) basado en un modelo lineal de la dinámica de traslación del cuatrirotor genera las referencias de la orientación del vehículo. El modelo lineal para el control de traslación resulta de la estructura en cascada con la dinámica no lineal del cuatrirotor. El seguimiento de las referencias de la orientación definidas por el algoritmo GPC se realiza utilizando un controlador geométrico de orientación (Taeyoung et al., 2010). Para abordar las cuestiones relativas a la restricción sobre la trayectoria, el controlador predictivo generalizado tiene dos lazos como en (Bemporad et al., 2009). El primer lazo genera la trayectoria deseada teniendo en cuenta las restricciones mientras que el segundo lazo genera las referencias de orientación. Ambos lazos de control se ejecutan en diferentes tiempos de muestreo. El rendimiento del algoritmo de control propuesto se evalúa mediante vuelos experimentales. Debido a la carga computacional, los algoritmos GPC se ejecutan en un ordenador personal. La salida del control GPC se envía al procesador de señales digitales a bordo, a través de una conexión WiFi, donde se ejecuta el controlador de orientación.

La organización de este artículo es la siguiente. Después de una breve introducción al concepto de control predictivo generalizado se describe el modelo del cuatrirotor, se muestran los desarrollos para sintetizar el controlador propuesto, los resultados experimentales y finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo.

Control predictivo generalizado (GPC)

En los últimos años, el control predictivo basado en modelos (MPC) ha sido ampliamente utilizado en la industria para resolver problemas de regulación y seguimiento de trayectorias debido a su capacidad para manejar perturbaciones, restricciones, incertidumbre paramétrica y retardos. El enfoque MPC utilizado en este trabajo, para los dos lazos de control, es el control predictivo generalizado (GPC). El GPC es un esquema de control con algunas diferencias con el MPC tradicional. Por ejemplo, en el caso de ausencia de restricciones, es posible obtener una solución analítica, puede tratar con sistemas de fase inestable o no mínima, y tiene un parámetro de ajuste adicional llamado horizonte de control.

El enfoque GPC utiliza un modelo CARIMA (Auto Regressive Integrated Average Mobile Controller) con n salidas y m entradas (Camacho y Bordons, 2004) de la forma

$$\mathbf{A}\left(z^{-1}\right)y(t)=\mathbf{B}\left(z^{-1}\right)u(t-1)+\frac{1}{\Delta}\mathbf{C}\left(z^{-1}\right)e(t) \tag{1}$$

donde $\mathbf{A}\left(z^{-1}\right)$ y $\mathbf{C}\left(z^{-1}\right)$ son matrices polinomiales mónicas de orden $n\times n$ y $\mathbf{B}\left(z^{-1}\right)$ es una matriz polinomial de orden $n\times m$. El operador Δ se define como $\Delta=1-z^{-1}$. Las variables $y(t)$, $u(t)$ y $e(t)$ son los vectores de salida, control y ruido de orden $n\times 1$, $m\times 1$, y $n\times 1$, respectivamente. Es común considerar por simplicidad $e(t)$ como ruido blanco. El objetivo del control GPC es encontrar la secuencia de control que minimice el siguiente criterio cuadrático con horizonte finito.

ISBN 978-607-8242-11-5

$$J_c\left(N_p, N_u\right)=\sum_{j=1}^{N_p}\left\|\hat{y}\left(t+j\,|\,t\right)-w\left(t+j\right)\right\|_{R_y}^2+\sum_{j=1}^{N_u}\left\|\Delta u\left(t+j-1\right)\right\|_{Q_u}^2 \tag{2}$$

donde $\hat{y}\left(t+j\,|\,t\right)$ es una predicción de salida óptima j pasos por delante de la salida del sistema calculada en el tiempo t. Es posible calcular la predicción óptima si se conocen los últimos vectores de entrada y salida y la referencia de secuencia futura. N_p y N_u son los horizontes de predicción y de control, respectivemente. $w\left(t+j\right)$ es el vector de la secuencia de referencia para el vector de salida. R_y y Q_u son matrices de ponderación positivas definidas.

La predicción de la salida puede expresarse en forma compacta como

$$\mathbf{y}=\mathbf{G}\mathbf{u}+\mathbf{f} \tag{3}$$

con $\mathbf{f}$ la respuesta libre y $\mathbf{G}\mathbf{u}$ la respuesta forzada del sistema (1) (Camacho y Bordons, 2004).

Si no hay restricciones, el control óptimo puede expresarse como

$$\Delta\mathbf{u}\left(t\right)=K\left(\mathbf{w}-\mathbf{f}\right) \tag{4}$$

donde $K=\left(\mathbf{G}^T R_y\mathbf{G}+Q_u\right)^{-1}\mathbf{G}^T R_y$.

En el caso de un problema de control con restricciones, es necesario resolver un problema de programación cuadrática en cada paso de muestra para obtener la secuencia de control óptima. No hay una expresión analítica para la política de control. Las restricciones pueden definir límites en las señales de control, la trayectoria deseada, el sobrepaso máximo, entre otras características de la respuesta del sistema. En este caso, se trata de un problema de optimización cuadrática sujeto a restricciones de la forma

$$\mathbf{R}_r\mathbf{u}\le\mathbf{c} \tag{5}$$

MODELO DEL VEHÍCULO CUATRIROTOR

Para describir el modelo dinámico del cuatrirotor es necesario definir dos marcos de referencia (ver Figura 1), el marco de referencia fijo al cuerpo (x^b, y^b, z^b), y el marco referencia inercial (x^e, y^e, z^e).

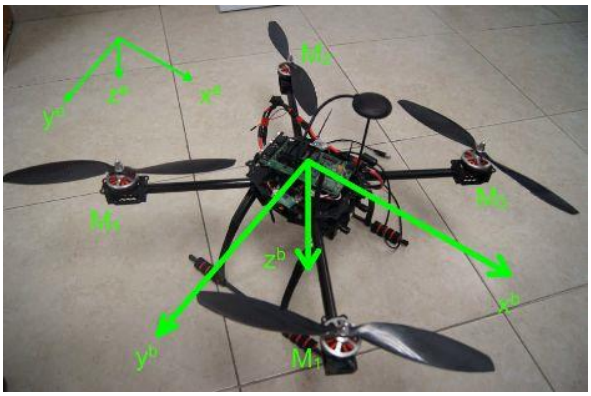


Figura 1: Marcos de Referencia

La dinámica rotacional del cuatrirotor está dada por

$$J\dot{\Omega}+\Omega\times J\Omega=M_e \tag{6}$$

$$\dot{R}=R\hat{\Omega} \tag{7}$$

donde $\Omega=\begin{bmatrix}p & q & r\end{bmatrix}$ es el vector de velocidad angular alrededor de los ejes x^b, y^b y z^b. El mapeo $\hat{\cdot}:\mathbb{R}^3\to\mathbf{so}(3)$ se define como $\hat{x}\,y=x\times y$. R es la matriz de rotación desde el marco de referencia inercial (x^e, y^e, z^e) al marco de referencia fijo al cuerpo (x^b, y^b, z^b). La dinámica de traslación, en el marco de referencia inercial se describe mediante la siguiente ecuación

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\dot{X} = ge_3 - \frac{1}{m_a} T_T R e_3 \tag{8}$$

con $X = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T$ el vector de posición de traslación, e_3 el vector unitario en la dirección del eje z^b, m_a la masa del cuatrirotor, g la constante de gravedad, T_T el empuje total dado por

$$T_T = \sum_{i=1}^{4} T_i \tag{9}$$

El objetivo de control se establece como sigue. Considere el modelo dinámico del cuatrirotor descrito por las ecuaciones (6), (7) y (8). Diseñar una ley de control para resolver el seguimiento de la trayectoria con la capacidad de considerar las restricciones en la trayectoria deseada.

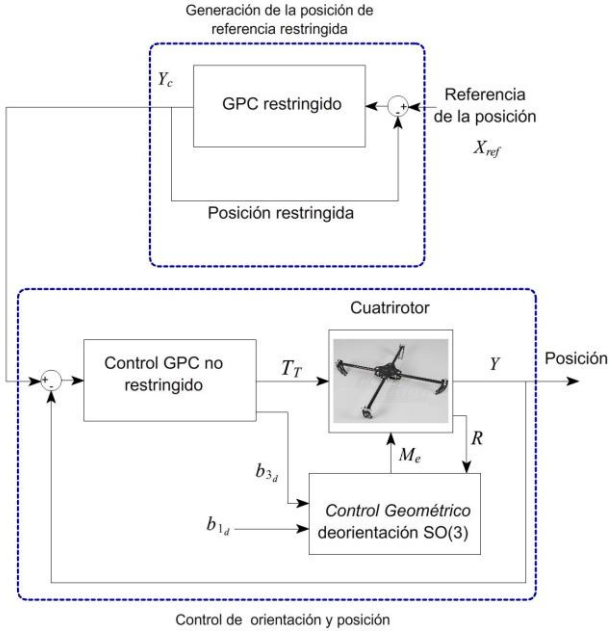


Figura 2: Arquitectura de Control

METODOLOGÍA Y DISEÑO DE CONTROL

La Figura 2 presenta un diagrama de la solución propuesta. La imagen muestra los dos bucles de control para la dinámica de traslación y el bucle de control de orientación. El GPC restringido genera trayectorias de referencia que no violan las restricciones impuestas. El GPC sin restricciones estabiliza el error de seguimiento de traslación definido como la diferencia entre la posición del cuatrirotor y la referencia generada por el GPC restringido. El GPC sin restricciones define las referencias de actitud para el controlador geométrico de orientación.

El GPC sin restricciones utiliza un modelo lineal obtenido a partir de la interconexión en cascada entre la dinámica de traslación y rotacional del vehículo. Este modelo lineal aparece a partir del análisis mostrado en (Taeyoung et al., 2010). Se define

$$\begin{aligned} T_T &= u^{\mathrm{T}} b_3 \\ b_{3_d} &= \frac{u}{\|u\|} \end{aligned} \tag{10}$$

con $u = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \end{bmatrix}^T$ la nueva entrada de control, b_3 es la tercera columna de la matriz R, b_{3_d} es la referencia deseada para la tercera columna de la matriz de rotación y $\|\bullet\|$ es la norma Euclidiana. De (10), la dinámica traslacional (8) se puede expresar como

$$m_a \ddot{X} = m_a g e_3 - u - \Phi(u, b_3) \tag{11}$$

con

$$\Phi(u, b_3) = u^{\mathrm{T}} b_3 b_{3_d}^{\mathrm{T}} b_3 \left[\left(b_{3_d}^{\mathrm{T}} b_3 \right) b_3 - b_{3_d} \right] \tag{12}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Si el controlador hace que b_3 converja a b_{3_d} entonces $\Phi(u, b_3)$ converge a cero. Por lo tanto, asumiendo una constante de tiempo suficientemente pequeña como en (Mueller y D'Andrea, 2013) o utilizando un controlador de orientación de ganancia alta similar al controlador de ganancia alta en (Bangura y Mahony, 2014), es posible considerar una dinámica de translación lineal para el cuatrirotor. Este artículo utiliza el controlador geométrico de orientación propuesto en (Taeyoung et al., 2010).

Control de posición GPC sin restricciones

La siguiente ecuación diferencial describe el modelo de traslación del cuatrirotor para la síntesis del controlador de GPC sin restricciones

$$m_a \ddot{X} = m_a g e_3 - u \tag{13}$$

El modelo lineal (13) se puede expandir como

$$\dot{x} = v_x \qquad \dot{y} = v_y \qquad \dot{z} = v_z$$

$$\dot{v}_x = -\frac{1}{m_a} u_x \qquad \dot{v}_x = -\frac{1}{m_a} u_y \qquad \dot{v}_z = g - \frac{1}{m_a} u_z \tag{14}$$

Desde donde se obtienen las funciones de transferencia siguientes

$$\frac{X(s)}{U_x(s)} = \frac{Y(s)}{U_y(s)} = \frac{Z(s)}{U_z(s)} = -\frac{1}{m_a}\frac{1}{s^2} \tag{15}$$

La constante de aceleración de gravedad toma el lugar de una perturbación desconocida que el controlador compensa. Entonces, se obtiene

$$\frac{X(z^{-1})}{U_x(z^{-1})} = \frac{Y(z^{-1})}{U_y(z^{-1})} = \frac{Z(z^{-1})}{U_z(z^{-1})} = \frac{-T_s^2}{2m_a}\frac{z^{-1}+z^{-2}}{(1-z^{-1})^2} \tag{16}$$

donde T_s es el tiempo de muestreo.

Ahora, es posible definir las matrices polinomiales del modelo CARIMA (1) de la siguiente manera

$$\mathbf{A}(z^{-1}) = diag\left[1 - 2z^{-1} + z^{-2}\right] \tag{17}$$

$$\mathbf{B}(z^{-1}) = diag\left[-\frac{T_s^2}{2m_a} - \frac{T_s^2}{2m_a} z^{-1}\right] \tag{18}$$

Las matrices polinomiales para la dinámica de translación del cuatrirotor $\mathbf{A}(z^{-1})$ y $\mathbf{B}(z^{-1})$ tienen dimensión 3×3.

La acción de control u se obtiene minimizando la función de costo

$$J_{c2}(N_{p_2}, N_{u_2}) = \sum_{j=1}^{N_{p_2}} \left\| \hat{Y}(t+j \mid t) - Y_c(t+j) \right\|^2_{R_{y_2}} + \sum_{j=1}^{N_{u_2}} \left\| \Delta u(t+j-1) \right\|^2_{Q_{u_2}} \tag{19}$$

donde $Y = [x \quad y \quad z]^T$. $Y_c = [x_c \quad y_c \quad z_c]^T$ es el vector de referencia generado por el controlador GPC restringido.

Control de la orientación en el espacio $SO3$

Este trabajo considera el controlador geométrico de orientación propuesto en (Taeyoung et al., 2010). Como se define en (Taeyoung et al., 2010), los errores de orientación e_R y de velocidad angular e_Ω se definen como

$$e_R = \frac{1}{2}\left(R_d^T R - R^T R_d\right)^\vee \tag{20}$$

$$e_\Omega = \Omega - R^T R_d \Omega_d \tag{21}$$

donde el mapeo $\check{\cdot} : \mathbf{so}(3) \to \mathbb{R}^3$ es el mapeo inverso de $\hat{\cdot}$, y R_d, Ω_d son las referencias deseadas para la

ISBN 978-607-8242-11-5

matriz de rotación y el vector de velocidad angular, respectivamente. Entonces, la ley de control se propone como sigue

$$M_e = -k_R e_R - k_\Omega e_\Omega + \Omega \times J\Omega - J\left(\hat{\Omega} R^T R_d \Omega_d - R^T R_d \dot{\Omega}_d\right) \tag{22}$$

con k_R, k_Ω matrices definidas positivas. La definición del siguiente vector

$$b_{2_d} = \frac{b_{3_d} \times b_{1_d}}{\left\| b_{3_d} \times b_{1_d} \right\|} \tag{23}$$

con b_{1_d} definiendo la rotación alrededor del eje z_e, completa la matriz de rotación deseada como $R_d = \left[b_{2_d} \times b_{3_d}, b_{2_d}, b_{3_d} \right]$.

Generador de trayectoria con MPC restringido

La combinación del controlador MPC sin restricciones y el controlador geométrico de orientación estabiliza la dinámica completa del cuatrirotor. Para la generación del modelo que se utiliza para la generación de referencias restringidas, se utiliza el sistema de bucle cerrado mostrado en la Figura 3, que ya está controlado por el GPC sin restricciones. La entrada de este modelo se define como $U_a = \left[u_{ax} \quad u_{ay} \quad u_{az} \right]^T$ y la salida como $Y_c = \left[x_c \quad y_c \quad z_c \right]^T$.

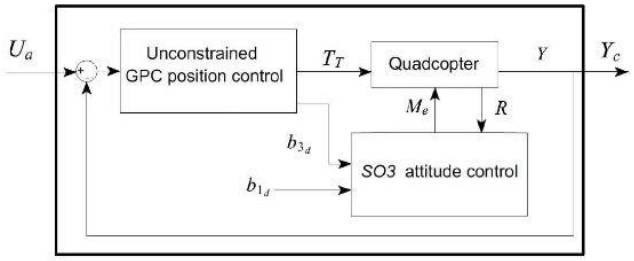


Figura 3: Esquema para identificaicón de modelo

La Figura (4) muestra la respuesta a entrada escalón de las posiciones traslacionales obtenidas experimentalmente. Hay un cambio en el signo de la trayectoria en el eje z con respecto al sistema de coordenadas mostrado en la Figura 1 para mostrar una gráfico con valores positivos. A partir de la respuesta a entrada escalón y utilizando el tiempo pico t_p y el sobrepaso máximo M_p, se obtienen tres sistemas lineales de segundo orden que modelan la dinámica de bucle cerrado. La Tabla 1 muestra las funciones de transferencia para cada sistema de segundo orden. La discretización de las funciones de transferencia se realiza por el método de retención de orden cero con un periodo de muestreo de 0.08 segundos.The path constraints along the axes x, y and z are included as described in Section 1.

La predicción de las señales de salida $x_c(t)$, $y_c(t)$ y $z_c(t)$ se obtiene de acuerdo con el procedimiento estándar de GPC resolviendo una ecuación Diofantina (Camacho y Bordons, 2004) con las funciones de transferencia discretas mostradas en la Tabla 2. Las trayectorias restringidas se generan entonces minimizando la siguiente función de costo

$$J_{c1}\left(N_{p_1}, N_{u_1}\right) = \sum_{j=1}^{N_{p_1}} \left\| \hat{Y}_c(t+j \mid t) - X_{ref}(t+j) \right\|^2_{R_{y_1}} + \sum_{j=1}^{N_{u_1}} \left\| \Delta u_a(t+j-1) \right\|^2_{Q_{u_1}} \tag{24}$$

$$suj.$$

$$\underline{Y}_c < Y_c < \overline{Y}_c \tag{25}$$

donde $X_{ref} = \left[x_{ref} \quad y_{ref} \quad z_{ref} \right]^T$ es el vector de referencia para la posición y $u_a = \left[u_{ax} \quad u_{ay} \quad u_{az} \right]^T$ es el vector de entradas de control para las funciones de transferencia mostradas en la Tabla 1. Un algoritmo de programación cuadrática calcula la secuencia de control óptima con la función de coste (24) sujeto a restricciones (25).

ISBN 978-607-8242-11-5

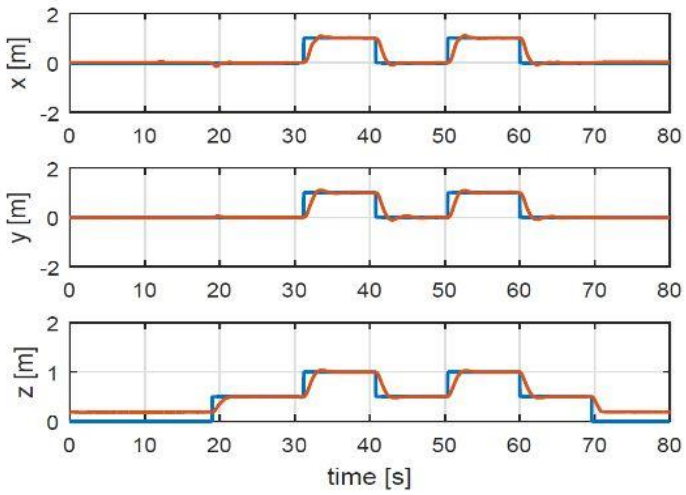


Figura 4: Respuestas a entrada escalón

Tabla 1: Funciones de transferencia en lazo cerrado para el segundo nivel de control

	$F(s)=\dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$
x	$\dfrac{X_c(s)}{U_{ax}(s)}=\dfrac{3.0835}{s^2+2.1616s+3.0835}$
y	$\dfrac{Y_c(s)}{U_{ay}(s)}=\dfrac{2.8757}{s^2+2.0645s+2.8757}$
z	$\dfrac{Z_c(s)}{U_{az}(s)}=\dfrac{3.1251}{s^2+2.2979s+3.1251}$

Tabla 2: Funciones de transferencia en lazo cerrado discretas para el segundo nivel de control

	$F(z^{-1})$
x	$\dfrac{X_c(z^{-1})}{U_{ax}(z^{-1})}=\dfrac{0.009307z^{-1}+0.008786z^{-2}}{1-1.823z^{-1}+0.8412z^{-2}}$
y	$\dfrac{Y_c(z^{-1})}{U_{ay}(z^{-1})}=\dfrac{0.008703z^{-1}+0.008236z^{-2}}{1-1.831z^{-1}+0.8478z^{-2}}$
z	$\dfrac{Z_c(z^{-1})}{U_{az}(z^{-1})}=\dfrac{0.009399z^{-1}+0.00884z^{-2}}{1-1.814z^{-1}+0.8321z^{-2}}$

El algoritmo de control propuesto puede resumirse en los siguientes pasos

1. Calcular la predicción $\hat{Y}_c(t+j\,|\,t)$ con horizontes N_{p_1} y N_{u_1} usando loslos modelos mostrados en la Tabla 2.
2. Minimizar la función (24) sujeta a (25) para calcular la acción de control $u_a(t)$.
3. Aplicar la acción de control $u_a(t)$ al primer nivel de control. La respuesta $Y_c(t)$ sirve como referencia al segundo nivel de control.
4. El segundo nivel de control calcula $\hat{Y}(t+j\,|\,t)$ con horizontes N_{p_2} y N_{u_2} usando el modelo (16).

ISBN 978-607-8242-11-5

5. La función de coste sin restricciones (19) se minimiza para obtener la secuencia de control $u(t)$.
6. La primera componente de la señal $u(t)$ se envía al cuatrirotor real.
7. De $u(t)$, se calcula (10) y luego el control de orientación con (22).
8. Se repite el paso 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5 muestra la infraestructura empleada para realizar una implementación en tiempo real de la estrategia de control propuesta. El sistema de fotogrametría Optitrack mide la posición del cuatrirotor usando marcadores. La posición del vehículo llega a una computadora personal donde se ejecutan los dos bucles de control MPC. Los algoritmos MPC se programaron en lenguaje C++ donde se utilizó el código de programación cuadrática obtenido de (Furfaro et al., 2008). La computadora envía al quadcopter, mediante un módem y a través del protocolo Wifi, las acciones de control u_x, u_y y u_z. Estas acciones de control se alimentan al procesador de señales digitales (DSP) a bordo, el cual calcula el controlador de orientación geométrico. El DSP incorporado recibe la orientación del cuatrirotor desde una sistema de medición inercial a bordo. Finalmente, el DSP envía las señales de control de los motores a cada controlador de velocidad electrónico (ESC). Se decidió implementar el esquema de control completo en dos procesadores diferentes porque los DSP incorporados no tienen suficiente capacidad para soportar los algoritmos MPC. Sin embargo, hay opciones para calcular el controlador completo en un solo dispositivo. Por ejemplo, utilizando microordenadores que están actualmente en auge como Raspberry Pi, Odroid o Jetson TK1, que tienen suficiente capacidad de procesamiento.

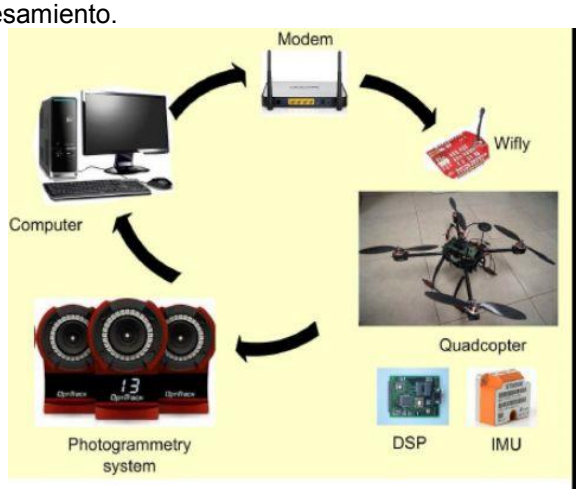


Figura 5: Plataforma experimental

La figura 6 muestra la trayectoria del cuatrirotor a lo largo de los ejes x, y y z, utilizando el GPC sin restricciones y el controlador geométrico de orientación. Las señales de referencia se muestran como líneas discontinuas, mientras que las posiciones medidas del cuatrirotor se muestran como líneas continuas. Las referencias deseadas para este experimento son $x_{ref}=0[m]$, $y_{ref}=0[m]$, $z_{ref}=-0.5[m]$. Con esta referencia el cuatrirotor despega. A continuación, se asignan dos puntos de referencia el primero en $x_{ref}=0.7[m]$, $y_{ref}=0[m]$, $z_{ref}=-0.5[m]$, y el segundo en $x_{ref}=0[m]$, $y_{ref}=0.7[m]$, $z_{ref}=-0.5[m]$. Una vez que el quadrotor visita ambos puntos se asigna una referencia circular. La referencia circular se define como $x_{ref}=0.7\cos(\omega t)$ $[m]$, $y_{ref}=0.7\sin(\omega t)$ $[m]$ con $\omega=3.14[rad/s]$ y una altitud constante $z=-0.5$ $[m]$. Finalmente, el cuatrirotor se envía a la posición inicial $x_{ref}=0[m]$, $y_{ref}=0[m]$, $z_{ref}=-0.05[m]$, donde aterriza. La posición $z(t)$ muestra que el cuatrirotor despega y aterriza a una altura de $0.2[m]$ debido a la altura de los marcadores en el vehículo. Se observa que debido a la velocidad de rotación del cuatrirotor alrededor del círculo de referencia existen perturbaciones inducidas en la posición $z(t)$, pero el controlador GPC mantiene el sistema oscilando alrededor de la referencia. Además, se observa que aunque la fuerza de la gravedad no se tiene en cuenta en el diseño, el controlador puede compensarla como una perturbación.

ISBN 978-607-8242-11-5

La Figura 7 presenta la trayectoria del cuadrotor bajo la acción de los dos bucles de control MPC y el controlador de orientación. La trayectoria deseada tiene restricciones en el plano cartesiano. En este experimento, las restricciones de desplazamiento se ajustaron como $-0.9 < x < 0.9$ y $-0.9 < y < 0.9$. Se puede observar que el cuatrirotor sigue la referencia deseada respetando las restricciones impuestas y regresa a la trayectoria de referencia. La Figura 8 muestra la trayectoria restringida tridimensional.

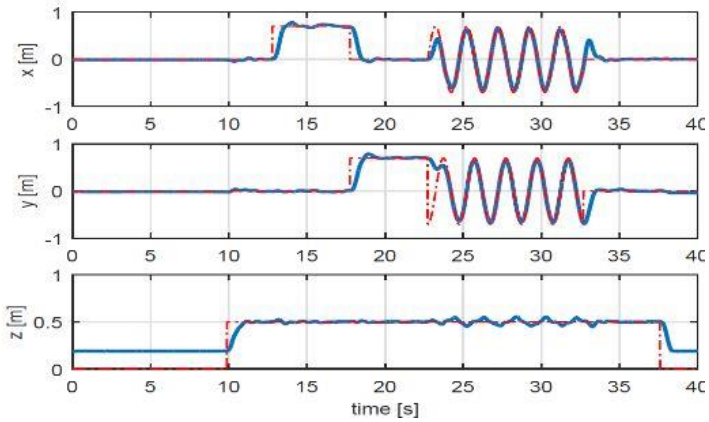


Figura 6: Posición x, y, z con GPC no restringido

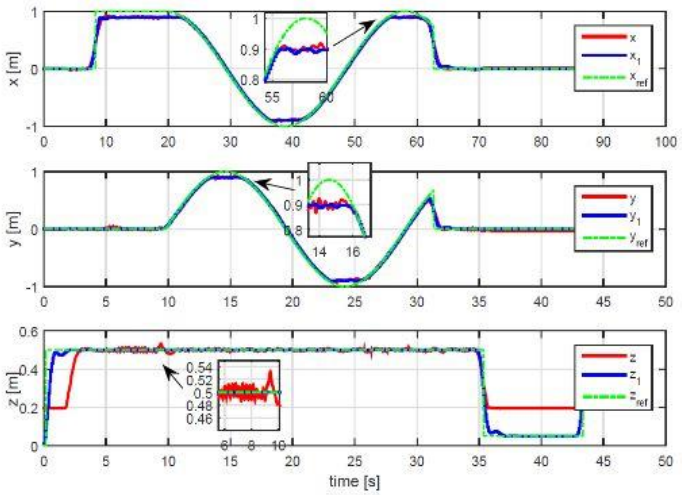


Figura 7:Trayectorias x, y, z restringidas.

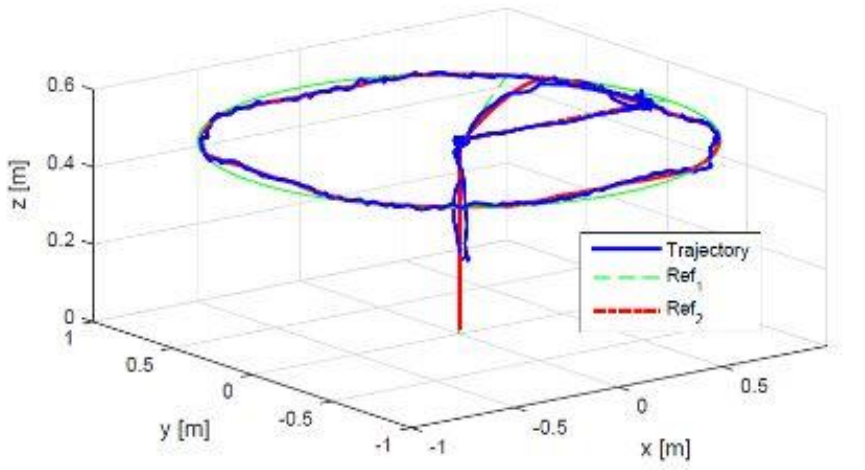


Figura 8: Trayectoria restringida en tres dimensiones

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIÓN

En este trabajo, se ha propuesto un controlador para el seguimiento de la trayectoria restringida de un helicóptero cuatrirotor utilizando una combinación de control geométrico y el enfoque de control predictivo generalizado restringido. La incorporación de restricciones en la trayectoria deseada permite el funcionamiento del vehículo, ya que es posible modelar obstáculos a través de restricciones para llevar a cabo la evasión de obstáculos. La estrategia seguida permitió la implementación experimental en un sistema multirotor de bajo coste.

REFERENCIAS

Abdolhosseini Mahyar, Zhang YM, and Alain Rabbath Camille. An efficient model predictive control scheme for an unmanned quadrotor helicopter. *Journal of intelligent & robotic systems*, pages 1–12, 2013.

Bangura Moses and Mahony Robert. Real-time model predictive control for quadrotors. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):11773–11780, 2014.

Bemporad A., Pascucci C. A., and Rocchi C.. Hierarchical and hybrid model predictive control of quadcopter air vehicles. In *3rd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems*, pages 14–19, Zaragoza, Spain, September 16-18 2009.

Bemporad A., and Rocchi C. Decentralized linear time-varying model predictive control of a formation of unmanned aerial vehicles. In *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, pages 7488–7493, Orlando, FL, USA, December 12-15 2011.

Camacho E. F. and Bordons C. *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, Great Britain, 2004.

Engelhardt T., Konrad T., Schäfer B., and Abel D. Flatness-based control for a quadrotor camera helicopter using model predictive control trajectory generation. In *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 852–859, June 2016.

Furfaro Angelo and Di Gaspero Luca. quadprogpp: Fast quadratic programming for r. *https://github.com/fnoorian/quadprogpp*, 2008.

Kostas Alexis, Papachristos Christos, Siegwart Roland, and Tzes Anthony. Robust model predictive flight control of unmanned rotorcrafts. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 81(3-4):443–469, 2016.

Mueller Mark W. and D'Andrea Raffaello. A model predictive controller for quadrocopter state interception. In *Control Conference (ECC), 2013 European*, pages 1383–1389. IEEE, 2013.

Neunert M., de Crousaz C., Furrer F., Kamel M., Farshidian F., Siegwart R., and Buchli J.. Fast nonlinear model predictive control for unified trajectory optimization and tracking. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1398–1404, May 2016.

Ribeiro T. T., Conceicao A. G. S., Sa I., and Corke P.. Nonlinear model predictive formation control for quadcopters. *IFAC-PapersOnLine)*, 48:39–44, 2015.

Rochefort Y., Bertrand S. H., Piet-Lahanier, Beauvois D., and Dumur D.. Cooperative nonlinear model predictive control for flocks of vehicles. In *Embedded Guidance, Navigation and Control in Aerospace (EGNCA)*, pages 1–6, Bangalore, India, February 13-15 2012.

Taeyoung Lee, Melvin Leok, and McClamroch Harris N. Geometric tracking control of a quadrotor uav on se(3). In *49th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 5420–5425, Atlanta, GA USA, December 2010.

Zulu Andrew and John Samuel. A review of control algorithms for autonomous quadrotors. *Open Journal of Applied Sciences*, 4:547–556, 2014.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Simulación de la Evolución Termo-Estructural del Calentamiento de una Probeta Dilatométrica por Efecto Joule

Martín Herrejón-Escutia[1], Sixtos A. Arreola-Villa[1], Gildardo Solorio-Díaz [1], Héctor J. Vergara-Hernández[2], Gerardo M. Chávez-Campos[2], Octavio Vázquez-Gómez[2,4,*]

[1]Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mujica s/n Cd. Universitaria, Morelia 58030, México
[2]División de Estudios Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Lomas de Santiaguito, Morelia 58820, México
[3]Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Av. Insurgentes 1582, Crédito Constructor, Ciudad de México 03940, México.
*Autor corresponsal: ovazquezgo@conacyt.mx

Resumen

Se desarrolló un modelo matemático para predecir la respuesta dilatométrica de una probeta cilíndrica hueca de acero durante el calentamiento continuo por efecto Joule. El modelo fue planteado mediante un balance de energía acoplando el término de generación de calor por efecto Joule, las ecuaciones de deformación térmica por dilatación (Dieter 1986, Gere y Goodno 2013), el modelo cinético de Avrami (Avrami 1939, 1940, 1941) y un modelo difusivo tipo Arrhenius (Poirier y Geiger 2009). A partir de la geometría y dimensiones de la probeta se consideró que el calentamiento es newtoniano en la dirección radial, reduciéndose la complejidad del problema. Por otro lado, las ecuaciones establecidas se resolvieron mediante el método de diferencias finitas (Malek 2011), a partir de la formulación y codificación de un algoritmo propio en el paquete de computo de licencia libre Scilab®. El modelo considera las propiedades termofísicas y eléctricas del acero en función de la temperatura y la función de corriente eléctrica dependiente del tiempo. Previamente, el modelo fue validado para un acero que no presenta transformación de fase mediante la comparación de la historia térmica y la dilatación térmica experimental con la simulada. Los experimentos se llevaron a cabo en un dispositivo de calentamiento directo. Finalmente, para la etapa de transformación, la curva dilatométrica fue modelada utilizando el coeficiente de expansión térmica lineal instantáneo acoplado al modelo cinético y difusivo mediante la regla de fases.

Palabras clave: modelo matemático; calentamiento continuo; efecto Joule; dilatometría; método de diferencias finitas

Simulation of the Thermo-Structural Evolution of the Heating of a Dilatometric Specimen by Joule Effect

Abstract

A mathematical model was developed to predict the dilatometric response of a hollow cylindrical steel specimen during continuous heating by Joule effect. The model was proposed by means of an energy balance coupling the heat generation by Joule effect, the equations of thermal strain by dilatation (Dieter 1986, Gere and Goodno 2013), the kinetic model of Avrami (Avrami 1939, 1940, 1941) and an Arrhenius type diffusive model (Poirier and Geiger 2009). From the geometry and dimensions of the specimen, it was considered that the heating is Newtonian in the radial direction reducing the complexity of the problem. On the other hand, the established equations were solved by the finite difference method (Malek 2011), based on the formulation and coding of a proprietary algorithm in the Scilab® free license computer package. The model considers the thermophysical and electrical properties of the steel as a function of temperature and the function of electric current dependent on time. Previously, the model was validated for a steel that does not present phase transformation by comparing the thermal history and the experimental thermal expansion with the simulated. The experiments were carried out in a direct heating device. Finally, for the transformation stage, the dilatometric curve was modelled using the instantaneous coefficient of thermal expansion coupled to the kinetic and diffusive model by the phase rule.

Keywords: mathematical model; continuous heating; Joule effect; dilatometry; finite difference method

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Durante la fabricación de los aceros intervienen un gran número de variables que impactan directamente sobre las propiedades mecánicas y la calidad del producto final, además, que al tratarse de aceros multifásicos, su caracterización se vuelve más compleja, lo que representa tiempo y costo en la realización de pruebas en el diseño microestructural de un acero. Una forma de mejorar las propiedades mecánicas de los aceros es mediante la modificación de la estructura. Los tratamientos térmicos han sido desde hace muchos años la forma primordial de lograr este fin, sin embargo, el diseño de tratamientos se realiza para una composición química específica, dimensión y medio de enfriamiento, mediante la metodología de prueba y error, por lo que al tener un cambio en algún parámetro del proceso se debe repetir para obtener las propiedades mecánicas deseadas. Una alternativa a la metodología de prueba y error, es la ingeniería microestructural que se encarga del desarrollo de modelos matemáticos que permiten simular los procesos de transformación y reducir el número de pruebas, volviéndose una herramienta fundamental para el desarrollo y optimización de los tratamientos térmicos.

La dilatometría es una de las técnicas de análisis térmico más utilizadas en el estudio de las transformaciones de fase sólido-sólido en los aceros (Garcia de Andres et al., 2002), ya que permite monitorear, en tiempo real, la evolución microestructural en términos de los cambios dimensionales que se producen mediante la aplicación de un ciclo térmico. Cuando un material experimenta un cambio de fase, la estructura cristalina se modifica, esto se manifiesta como un cambio de volumen. Esta técnica de análisis permite determinar los diagramas de transformación isotérmica (IT: Isothermal Transformation) y de enfriamiento o calentamiento continuo (CCT-CHT: Continuous Cooling Transformation-Continuous Heating Transformation) (Martímez 2012). Estos diagramas de transformación son de inmenso valor en algunas aplicaciones metalúrgicas, como en la simulación y el diseño tratamientos térmicos y en la predicción de propiedades mecánicas.

En general, las probetas dilatométricas son de forma cilíndrica sólida, hueca o plana de dimensiones muy pequeñas, esto asegura que los cambios de volumen son exclusivos de la transformación de fase y no de la distorsión térmica. Los equipos comerciales pueden emplear distintas formas de calentamiento como la: inducción magnética, radiación térmica y por efecto Joule. El enfriamiento suele realizarse con inyección de algún gas inerte a alta presión, como argón, helio o nitrógeno.

En este trabajo se plantea un modelo matemático para predecir la respuesta dilatométrica de una probeta cilíndrica hueca de acero AISI 1045 durante el calentamiento continuo por efecto Joule, capaz de predecir las temperaturas críticas de transformación A_{c1} y A_{c3} así como la fracción en volumen de austenita formada durante el calentamiento.

MODELO MATEMÁTICO

Se considera una probeta dilatométrica cilíndrica hueca con un radio exterior r_o de 3.5 mm, un radio interior r_i de 2.5 mm y un largo L de 30 mm y se plantea un balance de energía para el elemento de volumen de espesor dz, localizado en la sección transversal media de la probeta. El calor generado durante el calentamiento de la probeta por efecto Joule, es transferido principalmente en la dirección axial y radial. Debido a la geometría y las dimensiones de la probeta, y a que es calentada bajo una atmosfera de aire quieto, se prevé que el número adimensional de Biot sea menor a 0.1, cumpliendo con el criterio para un calentamiento newtoniano (Poirier y Geiger 2009).

Bajo la condición de calentamiento newtoniano no existen gradientes de temperatura en la dirección radial debido al espesor de pared de la probeta. Por otro lado, debido al tipo de calentamiento se requiere de un sistema de mordazas de contacto que suministren la corriente eléctrica a la probeta y que sean mantenidas a una temperatura baja, ya que las mordazas se calientan por conducción de calor a partir de la probeta, generando un perfil de temperaturas parabólico y simétrico a lo largo del eje axial.

Modelo térmico

Analizando la sección media del cilindro se puede establecer una condición térmica de simetría donde el flux de calor es igual $q_z = -kdT/dz = 0$, generándose un plano completamente isotérmico. Este plano isotérmico se puede representar como un volumen de control, donde se realiza el balance de energía para estimar el gasto energético del sistema durante el calentamiento, considerando los temimos de acumulación y generación de calor por efecto Joule, así como la pérdida de calor por convección y radiación a través de la superficie interior y exterior de la probeta. De lo anterior, se establece la ecuación (1), la cual describe el

 ISBN 978-607-8242-11-5

perfil de temperaturas en cualquier punto de la sección media de la probeta, resuelta mediante el método de diferencias finitas (Malek 2011):

$$\pi\rho C_p\left(r_o^2-r_i^2\right)dz\frac{T^{n+1}-T^n}{t^{n+1}-t^n}=\frac{I^2}{\sigma_e}\left[\frac{dz}{\pi\left(r_o^2-r_i^2\right)}\right]-2\pi\left[h_o\left(T^n-T_o\right)r_o+h_i\left(T^n-T_i\right)r_i\right]dz\,, \tag{1}$$

donde el primer término representa el calor acumulado en la probeta expresado a través de T^{n+1} que es la temperatura en el tiempo futuro t^{n+1}, T^n es la temperatura en el tiempo actual t^n, ρ es la densidad y C_p es el calor especifico. El segundo término de la ecuación representa el calor generado por efecto Joule (Holman 1989), asociado con la potencia eléctrica generada por el paso de corriente I, la conductividad eléctrica σ_e del material y el radio exterior e interior de la probeta, r_o y r_i, respectivamente. La pérdida de calor a través de la superficie exterior e interior de la probeta es representada por el tercer término y se define a partir de los coeficientes de transferencia de calor h_o y h_i, el valor de los coeficientes engloban la transferencia de calor por radiación y convección, mientras que T_o y T_i son las temperaturas del medio ambiente exterior e interior de la probeta, respectivamente.

Deformación por dilatación térmica

Para la mayoría de los materiales, el cambio de temperatura produce una dilatación térmica (expansión o contracción) (Gere, y Goodno 2013), generando una deformación térmica proporcional al cambio de temperatura. Esta deformación por dilatación térmica está relacionada con la probeta dilatométrica a partir de la deformación real, la cual se define en términos del cambio de longitud o desplazamiento instantáneo. Considerando la expansión térmica lineal en la dirección radial, se mantendrá una relación proporcional entre la dilatación del radio interior y exterior; es decir, la diferencia entre radios Δr será constante durante la dilatación térmica, provocando que el área inicial sea menor al área instantánea durante la expansión térmica, implicando una deformación por compresión de acuerdo a la convención de signos de la deformación real, de acuerdo a esto se puede relacionar la deformación por dilatación con el radio exterior de la probeta a partir de:

$$-\alpha^{'}\cdot\Delta T=\ln\left(\frac{2r_o-\Delta r}{2r_o^{'}-\Delta r}\right), \tag{2}$$

Por lo tanto, la ecuación (2) define la evolución del radio instantáneo $r_o^{'}$ como una función del cambio de temperatura $\Delta T=\left(T^{n+1}-T^n\right)$, el coeficiente de expansión térmica lineal instantáneo (CETLI) $\alpha^{'}$, el espesor de la probeta Δr y el radio exterior inicial.

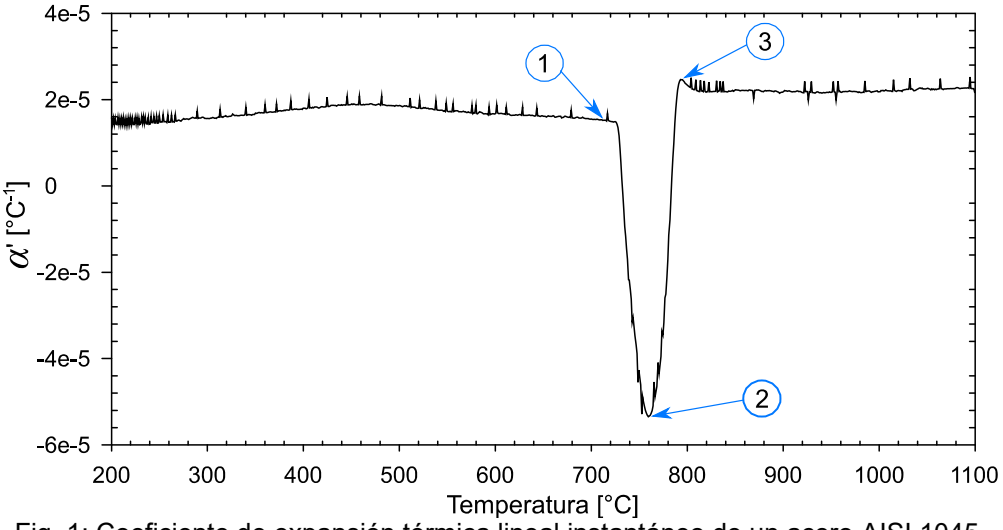


Fig. 1: Coeficiente de expansión térmica lineal instantáneo de un acero AISI 1045.

ISBN 978-607-8242-11-5

En la Fig. 1 se presenta el CETLI, para el acero AISI 1045 determinado de forma experimental a través de la técnica de dilatometría. En esta figura se pueden apreciar las diferente etapas y valores del CETLI durante el calentamiento continuo de un acero AISI 1045, hasta una temperatura de 480 °C. El CETLI puede considerarse como una función lineal y proporcional a la temperatura, seguida de una ligera disminución hasta 710 °C marcada por ①, en este punto inicia la transformación de fase y consecuentemente ocurre una contracción de la muestra indicada por ②, en este punto se apunta el valor mínimo del CETLI durante el calentamiento, la contracción en ② corresponde aproximadamente a un 50 % de la fracción en volumen transformada. A partir de este punto el CETLI empieza a incrementarse, aunque la contracción del material continua hasta ③ a una temperatura de 785 °C donde concluye la transformación, después de este punto el CETLI regresa a un comportamiento lineal respectó a la temperatura.

Modelo de austenización Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov durante el calentamiento continuo de un acero de medio carbono

Las transformaciones de fase que ocurren en los aceros se pueden describir mediante modelos semi-empíricos como el modelo de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK), quienes desarrollaron una ecuación para calcular la cinética de trasformación isotérmica (Avrami 1939, 1940, 1941). Sin embargo, este modelo es aplicable a otros procesos de transformación basados en los mecanismos de nucleación y crecimiento de una fase. Por ejemplo, este modelo puede ser utilizado para determinar la fracción en volumen de austenita formada durante el calentamiento continuo de un acero junto con el principio de aditividad modificado por Christian (Christian 2002); es decir, la ecuación puede describir la transformación de una mezcla de fases entre ferrita y perlita en austenita, $\alpha + P \rightarrow \gamma$, durante calentamiento continuo mediante la siguiente ecuación:

$$f_\gamma = 1 - \exp\left\lfloor -k \cdot t^n \right\rfloor, \tag{3}$$

Donde k y n son los parámetros cinéticos, t es el tiempo de transformación y f_γ es la fracción en volumen de austenita. Para aplicar la ecuación (3) bajo condiciones de calentamiento continuo, los parámetros k y n deben ser independientes de la rapidez de calentamiento, por lo tanto se requiere que n sea constante e independiente de la temperatura y k sea una función del sobrecalentamiento ΔT requerido para llevar a cabo la transformación de fase, el ΔT se expresa como la diferencia de temperaturas entre T^n y A_{c1}. En la Fig. 2 se muestran el comportamiento del parámetro cinético k con un valor constante de $n = 0.4$ para un acero AISI 1045. El tiempo se transformación *t* se puede calcular a partir de la siguiente ecuación,

$$t = \Delta t + \left[-\ln \frac{1 - f_\gamma}{k} \right]^{1/n}, \tag{4}$$

A partir de las ecuaciones (3) y (4), se puede estimar la evolución de la fracción en volumen de austenita formada a partir del tiempo $t = 0$, continuando en intervalos de tiempo Δt hasta completar la trasformación de austenita.

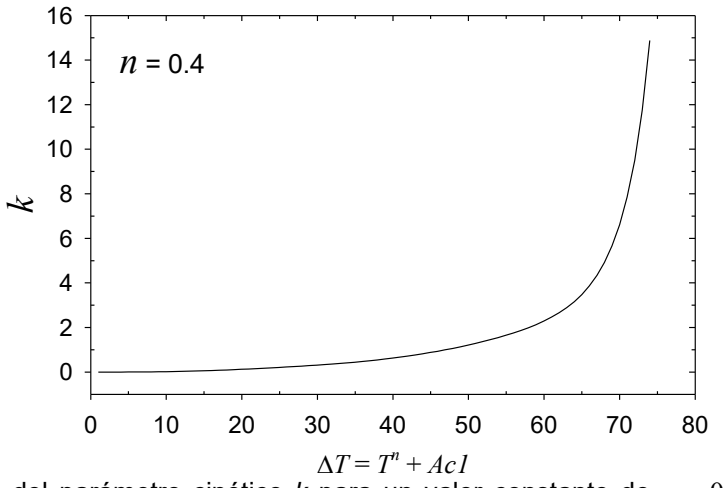


Fig. 2: Comportamiento del parámetro cinético *k* para un valor constante de $n = 0.4$ para un acero AISI 1045 bajo condiciones de calentamiento continuo.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Como se mencionó anteriormente, la evolución de la deformación por expansión térmica depende principalmente del cambio de temperatura y el CETLI como se describe en la ecuación (2). Al analizar el comportamiento del CETLI se puede asumir un comportamiento lineal antes del inicio y después del fin de la transformación de fase, sin embargo, durante la transformación se inhibe este comportamiento. El CETLI está asociado al proceso de transformación a través de la fracción en volumen y la regla de mezcla de las fases durante las distintas etapas de contracción,

Para la etapa de contracción de ① a ② mostrada en la Fig. 1, el CETLI se calcula a partir de:

$$\alpha' = \left[\alpha'_{\alpha+P} * \left(1 - N \left(\frac{df_\gamma}{dT} \right)_{f_\gamma=0}^{f_\gamma=0.5} \right) \right] + \left[\alpha'_m * \left(N \left(\frac{df_\gamma}{dT} \right)_{f_\gamma=0}^{f_\gamma=0.5} \right) \right], \quad (5)$$

y para la etapa de ② a ③ como:

$$\alpha' = \left[\alpha'_m * \left(N \left(\frac{df_\gamma}{dT} \right)_{f_\gamma=0.5}^{f_\gamma=1} \right) \right] + \left[\alpha'_\gamma * \left(1 - N \left(\frac{df_\gamma}{dT} \right)_{f_\gamma=0.5}^{f_\gamma=1} \right) \right], \quad (6)$$

donde, $\alpha'_{\alpha+P}$, α'_m, α'_γ, son los valores del CETLI de la mezcla de fases entre ferrita y perlita, de mezcla y de la austenita, respectivamente; N representa un valor normalizado de la derivada de la fracción en volumen de la austenita formada con respecto a la temperatura.

SISTEMA EXPERIMENTAL

El modelo térmico y de deformación por dilatación fue validado para un acero AISI 304 que no presenta transformación de fase mediante la comparación del perfil y la dilatación térmica experimental con la simulada (Herrejón-Escutia et al., 2017). Los experimentos se llevaron a cabo en un dispositivo de calentamiento directo por efecto Joule, mostrado en la Fig. 3.

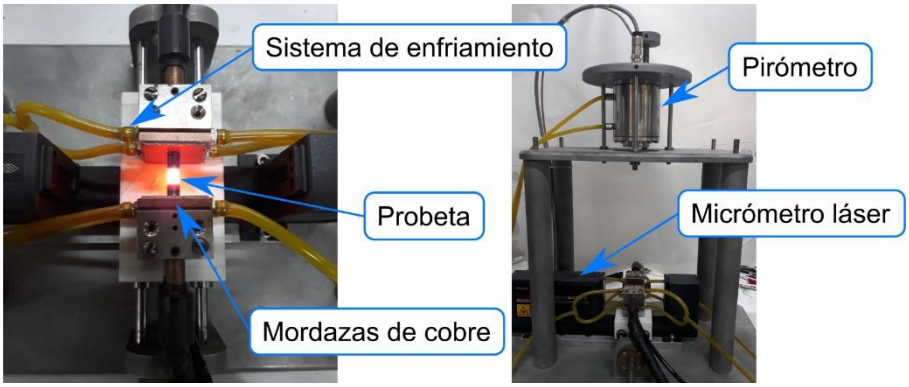


Fig. 3: Dispositivo de calentamiento directo por efecto Joule para una probeta dilatométrica cilíndrica hueca.

En la Fig. 3 se muestra el dispositivo experimental de calentamiento por efecto Joule, donde se observa que la corriente eléctrica se suministra a la probeta por medio de las mordazas de cobre con una fuente de potencia de corriente directa de 2.25 kW. Las mordazas de cobre se mantienen a una temperatura de 40 °C por medio de un flujo controlado de agua. La temperatura de la probeta es medida por medio de un pirómetro infrarrojo con una cámara de video integrada para alinear el punto de medición (*spot*) sobre la superficie de la probeta. Asimismo, el dispositivo mide la dilatación térmica de la probeta por medio de un micrómetro láser, que cuenta con una resolución de 0.00002 a 0.1 mm (0.02-100 µm). La corriente eléctrica suministrada a la probeta es medida con un sensor de gancho colocado en los cables conductores. Los equipos y sensores utilizados en el dispositivo fueron controlados por un sistema embebido de adquisición de datos CompactRio Ni cRIO 9075.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo JMAK descrito por la ecuación (3) fue verificado mediante pruebas experimentales de dilatometría para un Acero AISI 1045. La verificación se realizó utilizando los parámetros cinéticos k y n mostrados en la

ISBN 978-607-8242-11-5

Fig. 2. En la Fig. 4 se muestran la transformación de fase de $\alpha + P \rightarrow \gamma$ en función del tiempo de transformación a una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1} para un acero AISI 1045. En esta figura, la línea solida representa la fracción en volumen simulada por la ecuación (3) y los puntos la fracción en volumen experimental. Es claro observar que los valores de la fracción en volumen experimental y simulada concuerdan satisfactoriamente, indicando que la transformación de $\alpha + P \rightarrow \gamma$ puede predecirse con excelente precisión a partir de los parámetros cinéticos de la Fig. 2 y la ecuación (3).

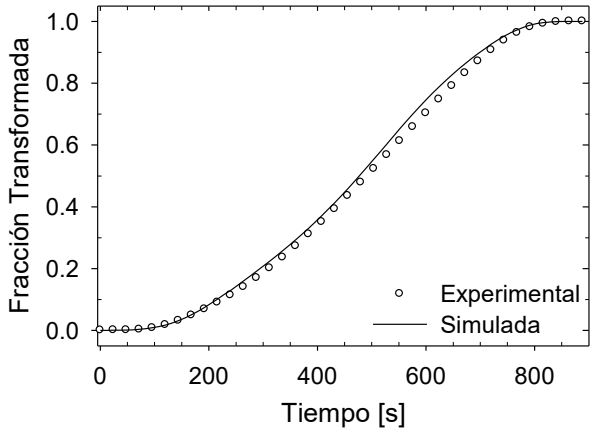


Fig. 4: Fracción en volumen de austenita en función del tiempo de transformación a una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1} para un acero AISI 1045.

La verificación del CETLI simulado fue realizada a partir de las mismas pruebas de dilatometría utilizadas para determinar la fracción en volumen transformada de la Fig. 4. En la Fig. 5, se muestra el CETLI durante la transformación de fase de $\alpha + P \rightarrow \gamma$ en función de la temperatura a una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1} para un acero AISI 1045. En esta figura la línea solida es el CETLI simulado a partir de las ecuaciones (5) y (6), y los puntos indican el valor del CETLI experimental. Se puede apreciar que los valores del CETLI se ajustan satisfactoriamente en la etapa de inicio, intermedia y final de la transformación, con un ligero desvió en las etapas restantes, sin embargo, se puede considerar como una buena aproximación de los valores experimentales, demostrando que el CETLI puede predecirse con buena exactitud mediante las ecuaciones (5) y (6).

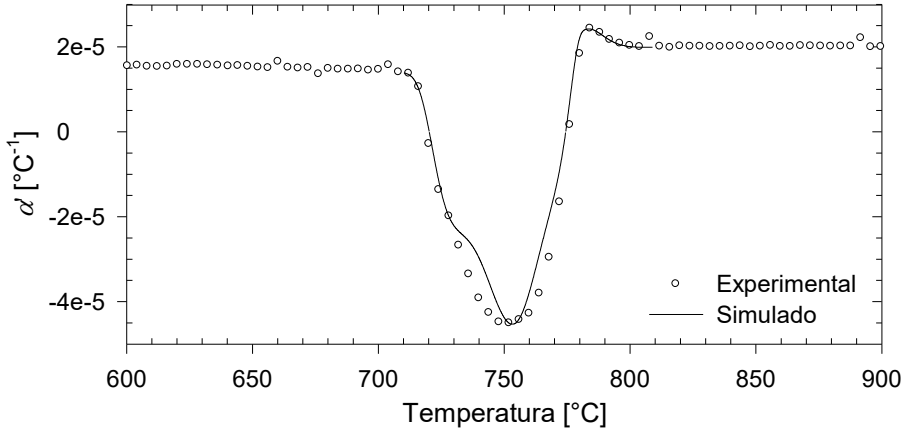


Fig. 5: Coeficiente de expansión térmica lineal instantáneo CETLI en función de la temperatura a una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1} para un acero AISI 1045.

El modelo térmico propuesto a partir de la ecuación (1) fue validado experimentalmente mediante pruebas realizadas en el dispositivo de calentamiento directo por efecto Joule, mostrado en la Fig. 3. Para el caso del acero AISI 1045 que presenta transformación de fase, el modelo térmico fue alimentado con propiedades termofísicas reportadas en la literatura (Kai et al., 2016), para una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1}. En la Fig. 6 se muestra la historia térmica de la probeta dilatométrica; la línea sólida muestra los valores simulados a partir de la ecuación (1) mientras que los puntos representan los valores experimentales. De esta figura, se nota que ambos valores prácticamente se sobreponen para un mismo valor de tiempo, esto valida el modelo térmico propuesto por la ecuación (1).

 ISBN 978-607-8242-11-5

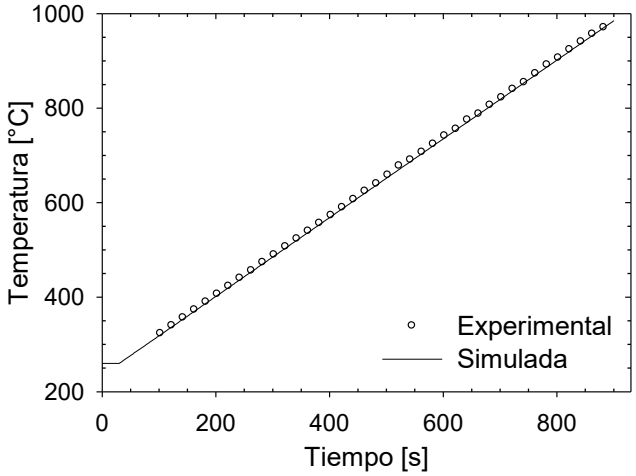


Fig. 6: Historia térmica a una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1} para un acero AISI 1045.

Finalmente, para simular la evolución termo-estructural del calentamiento de una probeta dilatométrica por efecto Joule, se acopló el modelo térmico, ecuación (1), con la deformación por dilatación térmica, ecuación (3), mediante la ecuación de Avrami y el CETLI simulado, ecuaciones (5) y (6). En la Fig. 7 se muestra la comparación entre la evolución termo-estructural experimental y simulada para un acero AISI 1045, con una microestructura inicial de ferrita más perlita bajo condiciones de calentamiento continuo, para una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1}. En esta figura, la línea solida representa la evolución termo-estructural simulada y los puntos son la evolución experimental obtenida del dispositivo mostrado en la Fig. 3. De la Fig. 7, se aprecia claramente que los valores de deformación concuerdan satisfactoriamente, manteniendo las mismas pendientes de la deformación térmica, las cuales se asocian con los coeficientes de expansión térmica lineal de las fases. Asimismo, en la primera parte de las curvas se nota una relación lineal con la temperatura, esto se debe a que la microestructura inicial del acero permanece sin cambios hasta que ocurre la transformación de fase aproximadamente a los 710 °C, a esta temperatura inicia la disolución de cementita presente en la perlita y la transformación de ferrita a austenita, provocando que la deformación por dilatación de la probeta no siga el mismo comportamiento y se contraiga debido al reacomodo atómico de la microestructura. Al incrementar la temperatura se alcanza una máxima contracción a una temperatura cercana a los 784 °C, cuando termina la transformación de fase. A partir de este punto se recupera el comportamiento lineal con la temperatura debido a la presencia de una sola fase (austenita).

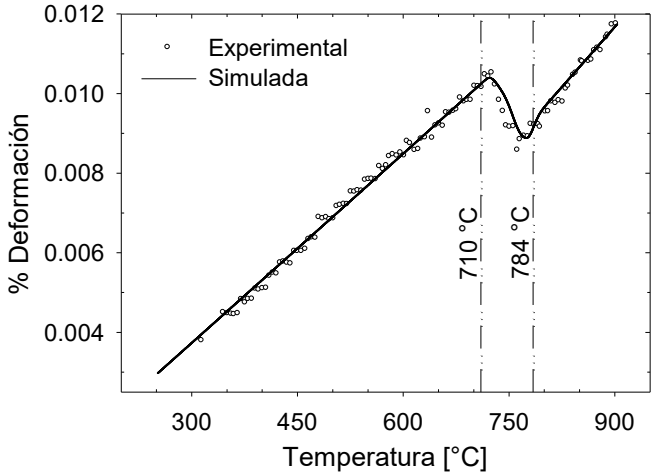


Fig. 7: Evolución termo-estructural del calentamiento de una probeta dilatométrica por efecto Joule a una rapidez de calentamiento de 0.833 °C s^{-1} para un acero AISI 1045.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se mostró que es posible desarrollar un modelo matemático para simular la evolución termo-estructural del calentamiento de una probeta dilatométrica por efecto Joule, a partir de un balance de energía y simulando la fracción en volumen formada de austenita por el modelo JMAK bajo condiciones de calentamiento continuo. La historia térmica y la evolución termo-estructural fueron validadas satisfactoriamente para un acero AISI 1045. La simulación de la fracción transformada y el CETLI permitieron predecir de manera correcta la contracción en volumen de la probeta dilatométrica

 ISBN 978-607-8242-11-5

durante la transformación, concordando con los valores experimentales obtenidos con el dispositivo experimental.

AGRADECIMIENTOS

Herrejón-Escutia M. agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) por la beca (N° 267206) recibida para sus estudios de doctorado. Los autores también agradecen al CONACyT por el Proyecto de Ciencia Básica No. 256843 apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación.

REFERENCIAS

Christian, J.W., *"Chapter 1, General Introduction, The Theory of Transformations in Metals and Alloys",* Oxford, Pergamon, 1-22, (2002)

Dieter, G.E., "*Mechanical Metallurgy",* McGraw-Hill, New York (1986)

Kai, G., W. Zhou, Q. Xun-peng y Z. Sheng-Xiao, *"Numerical analysis of 3D spot continual induction hardening on curved surface of AISI 1045 steel"*, J. Cent. South Univ., 23, 1152-1162, (2016)

Garcia de Andres, C., E.G. Caballero, C. Capdevila y L.F. Alvares, "*Application of dilatometric analysis to the study of solid-solid phase transformations in steels",* Mater. Charact., 48(1), 101-111, (2002)

Gere, J.M. y B.J. Goodno, "*Mechanics of Materials",* Cengage Learning, Toronto (2013)

Holman, J.P., "*Heat transfer",* McGraw-Hill, 39-42, (1989)

Malek, A. "*Applications of Nonstandard Finite Difference Methods to Nonlinear Heat Transfer Problems",* Belmiloudi, A. (Ed.), Heat Transfer-Mathematical Modelling. Numerical Methods and Information Technology. InTech, p. 185-208, (2011)

Herrejón-Escutia, M., G. Solorio-Díaz, H.J. Vergara-Hernández, E. López-Martínez, G.M. Chávez-Campos, O. Vázquez-Gómez, "*Electric-Thermo-Mechanical Analysis of Joule Heating in Dilatometric Specimens"*, J. Mech. Eng., (Artículo aceptado, en proceso de publicación), (2017)

Martímez, J.M., "*La Dilatometría, el Diseño y Simulación de Tratamientos Térmicos"*, Tratamientos Térmicos: La Revista de los Profesionales de los Tratamientos Térmicos, 131, 21-27, (2012)

Avrami, M., "*Kinetics of phase change. i general theory",* J. Chem. Phys., 7(12), 1103–1112 (1939)

Avrami, M., "*Kinetics of phase change. ii transformation-time relations for random distribution of nuclei",* J. Chem. Phys., 8(2), 212–224 (1940)

Avrami, M., "*Granulation, phase change, and microstructure kinetics of phase change. iii",* J. Chem. Phys., 9(2), 177–184 (1941)

Poirier, G.H. y D.R. Geiger, "*Transport Phenomena in Materials Processing",* TSM Minerals Metals Materials, Pennsylvania (2009)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Simulación Numérica del Calentamiento de un Horno Tipo Empujador para Palanquillas Considerando Desplazamiento Continuo

Sixtos A. Arreola-Villa[1], Martín Herrejón-Escutia[1], Gildardo Solorio-Díaz[1], Héctor J. Vergara-Hernández[2], Edgar López-Martínez[3], Octavio Vázquez-Gómez[2,4,*]

[1]Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mujica s/n Cd. Universitaria, Morelia 58030, México.
[2]División de Estudios Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Lomas de Santiaguito, Morelia 58820, México.
[3]Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec Ciudad Universitaria s/n, Barrio Santa Cruz, 4a Sección Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca 70760, México.
[4]Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Av. Insurgentes 1582, Crédito Constructor, Ciudad de México 03940, México.
*Autor corresponsal: ovazquezgo@conacyt.mx

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados de la simulación numérica de un horno de recalentamiento tipo empujador con capacidad de producción de 120 toneladas/horas para palanquillas de acero de sección cuadrada, utilizando el paquete comercial de dinámica de fluidos computacional (CFD: Computational Fluid Dynamics) Fluent®. El modelo acopla las ecuaciones de transferencia de calor, dinámica de fluidos y la reacción química en estado estacionario. Para la simulación de la combustión se utilizó el modelo de transportes de especies *Eddy-dissipation*; para la dinámica de los gases de combustión se empleó el modelo *k-ε realizable*. La transferencia de calor se simuló considerando los mecanismos de conducción, convección y radiación. El modelo P-1 fue utilizado para simular la radiación que aportan los gases de combustión al calentamiento. También, se simuló el calentamiento y el deslizamiento de las palanquillas a velocidad contante en el interior del horno en estado no estacionario implementando el método paso a paso. Por otro lado, para simular la entrada de las palanquillas frías de forma periódica a cada instante, se utilizó una función definida por el usuario (UDF: User Define Function) empleando el perfil térmico calculado por el modelo. La validación del modelo se realizó mediante la comparación de las historias térmicas simuladas de las palanquillas con las historias térmicas medidas en planta, a través de las lecturas de sensores de temperatura al interior del horno.

Palabras clave: simulación numérica; dinámica de fluidos; transferencia de calor; gases de combustión; horno de recalentamiento; palanquilla de acero.

Numerical Simulation of Billet Heating in a Pusher Furnace Considering Continuous Displacement

ABSTRACT

The present work shows the results of the numerical simulation of a pusher type reheating furnace with a production capacity of 120 tons / hour for square section steel billets using the commercial software of Computational Fluid Dynamics (CFD) Fluent ®. The model couples the heat transfer equations, fluid dynamics, and the steady state chemical reaction. For the simulation of combustion, the transport model of Eddy-dissipation species was used; For the fluid dynamics in the combustion gases the k-ε realizable model was used. The heat transfer was simulated considering the conduction, convection and radiation mechanisms. The model P1 was used to simulate the radiation that the combustion gases contribute to the heating. Also, the heating and displacement of the billets at constant speed inside the oven in a non-stationary state was simulated by implementing the step by step method. On the other hand, to simulate the feed of the cold billets periodically at each moment, a function was defined by the user using the thermal profile calculated by the model. The validation of the model was done by comparing the simulated thermal histories of the billets with the thermal histories measured in plant, through the temperature sensor readings inside the furnace.

Keywords: numerical simulation; fluids dynamics; heat transfer; gases combustion; reheating furnace; steel billet.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En la industria siderúrgica los hornos de combustión son utilizados para recalentar acero en forma de palanquillas, a temperaturas mayores a 1050°C (Mayr et al., 2017), promoviendo las condiciones mecánicas en el material para el laminado en caliente, este proceso de conformado alcanza grandes deformaciones plásticas evitando la recristalización dinámica además de que es un proceso continuo y periódico, donde las palanquillas son desplazadas a través del horno de dos formas: 1) utilizando actuadores hidráulicos que empujan la carga de palanquillas en un sentido, provocando que se deslicen a través de rieles refrigerados cubiertos con materiales refractarios, los hornos que tienen esta configuración son conocidos como hornos de recalentamiento tipo empujador y 2) mediante un sistema complejo, donde las palanquillas se desplazan junto con la estructura que las sostiene, denominados hornos de vigas caminantes. Por otro lado, el ciclo térmico de calentamiento es muy parecido, independientemente del tipo de horno, donde los gases de combustión aportan más del 90% de la transferencia de calor por el mecanismo de radiación (Kim y Huh, 2000; Kim y Huh, 2010; Kim, 2007), de igual forma la carga y descarga del horno ocurre de forma periódica, donde las palanquillas que entran producen un sumidero de temperatura ya que requieren energía para ser calentadas desde temperatura ambiente hasta la temperatura de trabajo del horno. Distintos autores han justificado el estudio de los hornos de recalentamiento desde diferentes enfoques como el: ambiental, energético, económico y desde el punto de vista del proceso donde el recalentamiento es considerado como el obstáculo en la producción de acero (Kim y Huh, 2000; Kim, 2007; Hsieh et al., 2010).

La gran cantidad de fenómenos de transporte presentes en el proceso de recalentamiento de palanquillas por combustión, imposibilita cualquier tipo de solución analítica, debido a esto los métodos y modelos numéricos de simulación son la principal herramienta de estudio, por lo que muchos investigadores han abordado el tema utilizando diferentes consideraciones, clasificándose en dos grupos principales. El primer grupo propone dividir el horno en diferentes zonas, asumiendo que la temperatura de los gases es uniforme en cada una, utilizando mediciones experimentales (Han et al., 2008), coeficientes de absorción constantes (Kim, 2007), o empleando el modelo de Hottel y Sarofin (Hottel y Sarofim, 1967). Los coeficientes de trasferencia de calor por convección han sido estimados de forma experimental (Jang et al., 2008) o calculados a través de correlaciones empíricas (Harish y Dutta, 2005), y en ciertos casos ignorados en la simulación (Morgano et al., 2015). Por otro lado, la transferencia de calor en las palanquillas está gobernada por la conducción de calor, la cual ha sido simulada utilizando los métodos de volumen y diferencias finitas en 2D o 3D (Han et al., 2008; Kim, 2007; Jang et al., 2008). Asimismo, ha sido calculada a través de las fronteras térmicas en las paredes (Morgano et al., 2015). La transferencia de calor por radiación ha sido simulada utilizando el método de zonas (Emandi, 2014) o el método Montecarlo (Jaklic et al., 2005), otros autores han calculado la radiación con el método de volumen finito y el modelo de ordenada discreta (Hsieh et al., 2010). En el segundo grupo, la evolución del campo térmico al interior del horno fue calculada con las ecuaciones de dinámica de fluidos, reacción química y radiación de forma acoplada mientras que la conducción en las palanquillas se ha simulado de la misma forma que el primer grupo (Kim y Huh, 2000; Kim y Huh, 2010; Han et al., 2010).

Uno de los principales problemas al efectuar la simulación del horno de recalentamiento es la radiación al interior, siendo la emisividad del acero la propiedad termofísica más crítica (Jang et al., 2008), en algunos casos ha sido considerada constante, sin tomar en cuenta su dependencia con la temperatura.

En el proceso de recalentamiento las palanquillas se mueven al interior del horno de forma periódica, en muchos de los modelos reportados el movimiento ha sido ignorado (Morgano et al., 2015), y en otros trabajos se ha modelado transportando el perfil térmico de cada palanquilla a la palanquilla vecina siguiente (Han y Chang, 2012), en dirección a la puerta de descarga del horno, con un periodo igual al movimiento de la palanquilla, asumiendo que el movimiento de la palanquilla es instantáneo y no provoca disturbios sobre la dinámica de fluido. Esto se ha realizado mediante funciones definidas por el usuario (UDF: User Defined Function) para exportar, importar y asignar el campo térmico en los diferentes volúmenes de control que representan a las palanquillas, sin embargo, su metodología y función no es objeto de publicación (Han et al., 2010; Han y Chang, 2012). Otros modelos se enfocan en algunos tópicos selectos del proceso, como la influencia que se presenta en los perfiles térmicos de las palanquillas cuando se consideran espacios vacíos entre ellas, por otro lado, se han presentado casos de estudio que simulan la formación de óxido en el acero (Kim, 2013).

En el presente trabajo se simula de forma acoplada los fenómenos de transporte presentes en el recalentamiento de palanquillas, solucionando las ecuaciones de conservación de forma acoplada y considerando como medio participante la radiación de los gases productos de la combustión, utilizando el modelo de Hottel-Sarofim (Hottel y Sarofim, 1967), que calcula los coeficientes de absorción en el medio participante como una función de las presiones parciales de cada especie reactiva o producto de combustión mientras que para los fenómenos asociados a la turbulencia se utiliza el modelo *k-ε realizable* (Shit et al., 1995). Por otro lado, la transferencia de calor por radiación se simula con el modelo P1 (Modest, 1993), el

 ISBN 978-607-8242-11-5

cual agrega una ecuación de conservación para el cálculo de la intensidad de radiación, termino agregado en la ecuación de energía como fuente de calor. Para la combustión de los gases se usa el modelo *Eddy dissipation* propuesto por Magnussen (Magnussen, 1981), basado en la mezcla turbulenta de los flujos reactivos. Por otro lado, el desplazamiento continuo se simula utilizando funciones definidas por el usuario, basados en la exportación, importación y asignación de los campos térmicos, de forma similar al publicado por Han (Han et al., 2010; Han y Chang, 2012), También, se define una UDF para simular el sumidero de temperatura que provoca la entrada periódica de las palanquillas frías, asignando a la palanquilla un perfil de temperatura transitorio medido en simulaciones previas (Ansys, 2016).

MODELO NUMÉRICO

Las ecuaciones gobernantes se resolvieron de forma acoplada, considerando la interacción entre la reacción química, la radiación y la turbulencia. El modelo numérico consta de la ecuación de continuidad, cantidad de movimiento, turbulencia, energía, transporte de especies y el modelo P1.

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\right) = 0, \tag{1}$$

Ecuación de momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u_i\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right), \tag{2}$$

El campo de flujo turbulento en estado estacionario en 3D para el horno de recalentamiento se resolvió con el modelo turbulento de Shit *et. al.* (*κ-ε realizable*) (Shit et al., 1995). Este modelo se deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes y satisface ciertas restricciones matemáticas sobre los esfuerzos de Reynolds que permiten simular de manera eficiente algunos problemas que impliquen vórtices y capas limites sujetas a fuertes gradientes de presión, separación y recirculación.

Ecuaciones de turbulencia para el modelo κ-ε realizable

Para κ

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho k\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k, \tag{3}$$

Para ε

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\varepsilon\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\varepsilon u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\upsilon\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b + S_\varepsilon, \tag{4}$$

Ecuación de energía

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho E\right) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[u_i\left(\rho E + p\right)\right] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_{i-1}^{N} h_i J_{i,j} + u_i \mu_{eff}\left[\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) - \frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right]\right) + S_{chem}, \tag{5}$$

donde las ecuaciones de energía y entalpias se calculan con las siguientes expresiones:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}, \tag{6}$$

$$h = \sum_{i=1}^{N} Y_i h_i, \tag{7}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

$$h_i = \int_{T_{ref}}^{T} C_{p,i} dt \,, \tag{8}$$

Donde T_{ref} es la temperatura del medio ambiente (298.15 K), S_{chem} es un térmico asociado con el calor generado por la reacción química por unidad de tiempo y S_{rad} es el flux de calor por radiación en unidad de tiempo (Ansys, 2015).

Ecuación de transporte de especies

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho Y_i\right) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{\upsilon} Y_i\right) = -\nabla \cdot \vec{J_i} + R_i + S_i \,, \tag{9}$$

Como se señaló, la reacción química se simulo con el modelo de *Eddy-dissipation* basado en el trabajo de Magnussen (Magnussen, 1981). Este modelo es ampliamente utilizado en la simulación de quemadores de velocidad rápida donde la reacción química es controlada por la mezcla turbulenta de los flujos de combustible y aire, en la ecuación (9) S_i es el término referido a la creación de especies por las fases dispersas.

La expresión para la generación de especies *i* de la reacción *r* está dada por las siguientes ecuaciones:

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left(\frac{Y_R}{\nu'_{R,r} M_{w,R}} \right), \tag{10}$$

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum p\, Y_p}{\sum_j^N \nu'_{j,r} M_{w,j}} \,, \tag{11}$$

Finalmente, la transferencia de masa en un flujo turbulento se expresa por la siguiente ecuación:

$$\vec{J_l} = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{Ct}} \right) \nabla Y_i \,, \tag{12}$$

Modelo de radiación

Para los modelos de radiación por combustión de gases es apropiado despreciar la dispersión según los resultados reportados por Baukal, Gershtein y Li (Baukal et al., 2001), con esta simplificación la ecuación de transferencia por radiación se expresa como:

$$\frac{dI\left(\vec{r},\vec{s}\right)}{ds} + aI\left(\vec{r},\vec{s}\right) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \,, \tag{13}$$

Varios modelos de radiación son susceptibles de ser utilizados en la simulación de los hornos de recalentamiento, Habibi y Merci (Habini et al., 2007), compararon la respuesta térmica al utilizar el modelo P1 frente al modelo de ordenadas discretas (DO). Como parte de sus resultados, concluyeron que no existen grandes diferencias en la predicción del campo de temperatura en algunas variables del proceso. Por lo tanto, se optó por emplear el modelo P1 tiene un costo computacional más bajo que el modelo DO.

El modelo P1 consiste en expandir la intensidad de radiación en series ortogonales de funciones armónicas esféricas (Modest, 1993). El método de armónicos esféricos provee una aproximación de alto orden al transformar la ecuación de radiación en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. El resultado final del tratamiento matemático se traduce en la siguiente expresión, que al aplicarle el operador divergente puede representar el término fuente de radiación en la ecuación de energía:

$$q = -\frac{4\sigma}{3\left(a + \sigma_s\right)} \nabla \theta_R^4 \,, \tag{14}$$

Los gases presentes en la combustión dentro de los hornos de recalentamiento emiten y absorben radiación, es por eso que se utilizó el modelo propuesto por Hottel y Sarofin (Hottel y Sarofim, 1967), denominado el

 ISBN 978-607-8242-11-5

modelo de pesos ponderados de gases grises WSGGM (WSGGM: Weighted Sum of Gray Gases Model), el cual se utiliza para calcular la absorción o emisión de radiación, asumiendo que la emisividad total sobre una distancia puede ser representada por la siguiente expresión:

$$\in = \sum_{i=1}^{I} a_{\in,i}(T)\left(1 - e^{-k_i ps}\right), \tag{15}$$

Donde $a_{\in,i}$ es un factor de emisividad, k_i es el coeficiente de absorción, p es la presión parcial para cada especie y s es la longitud de la ruta. El término $a_{\in,i}$ se calculó con expresiones en función de la temperatura y el coeficiente de absorción se tomó de la base de datos del programa Fluent® versión 15.

Otras propiedades de los gases de combustión son calculadas utilizando el modelo de mezcla (Ansys, 2015). Las propiedades termofísicas necesarias para simular el recalentamiento de una palanquilla en un problema no estacionario son: la densidad, la conductividad térmica, el calor específico y la emisividad, el valor de las tres últimas propiedades dependen de la temperatura, lo cual se tomó en cuenta en la simulación a través de la interfaz del programa y las funciones definidas por el usuario, utilizando valores reportados en la literatura (Kim, 2013; Torres y Cólas, 2000; Liu et al., 2013). Por otro lado, como se mencionó, el transporte de la palanquilla se realizó de forma numérica, empleando una UDF, considerando que en el interior del horno existen 94 zonas sólidas asociadas a las palanquillas, para simular el movimiento se trasladó el perfil térmico de la zona al volumen vecino de forma periódica, manejando archivos de datos tipo puntero de escritura y lectura, con la asignación especial de identificación para cada zona que ofrece el paquete de computo de dinámica de fluidos Fluent® versión 15.

El horno de recalentamiento simulado se dividió en dos zonas: 1) la zona de calentamiento; donde se presenta el mayor intercambio energético debido a que los gases de combustión están en contacto por arriba y abajo de las palanquillas, las cuales se deslizan sobre rieles refrigerados y 2) la zona de compensación donde disminuye el gradiente de temperatura entre las palanquillas. A partir de la Fig. 1, se puede observar la posición de los quemadores, así como las dimensiones del horno 17.2 x 14.7 m, cabe resaltar que al interior del horno caben 94 palanquillas de 0.16 x 0.16 x 12.7 m. La discretización del modelo resultante genera alrededor de dos millones de celdas en combinación entre mallas estructuradas y tetraédricas. Para la combustión de los gases se utilizó un paso de reacción, asumiendo que el gas natural presenta más del 95% de metano en contenido molar, por lo tanto, se consideró como un gas inflamable único.

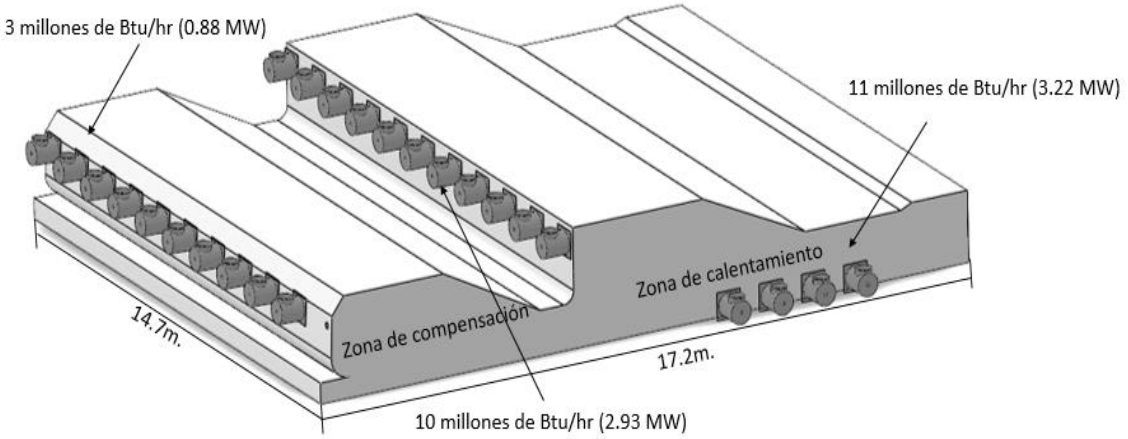


Fig. 1: Esquema del horno de recalentamiento tipo empujador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los resultados numéricos de la simulación descrita anteriormente, se presenta el campo térmico al interior del horno en la Fig. 2, donde se observa que las temperaturas más altas se generan en la zona de descarga de los quemadores. Por otro lado, en la zona de calentamiento, los gases de combustión de todos los quemadores se agrupan en dos corrientes principales: 1) la corriente de gases a alta temperatura, la cual se encuentra en contacto con la carga de palanquillas y se dirige a la zona de la chimenea y 2) la corriente de gases que de forma similar presenta una trayectoria hacia la carga metálica, sin embargo, posteriormente se dirige a las paredes del horno. En la zona de compensación se observa un flujo de gases a alta temperatura concentrado en el centro del horno, dejando zonas de baja temperatura hacia las paredes del horno.

ISBN 978-607-8242-11-5

Asimismo, se puede mencionar que la solución de las ecuaciones de transporte de forma acoplada, permite calcular los campos de temperatura y las trayectorias de los fluidos, sin embargo, en los procesos de combustión, la radiación aporta más del 90% del flujo de calor (Kim y Huh, 2000; Kim y Huh, 2010; Kim, 2007), por tal motivo la dinámica de fluidos no tiene una contribución significativa sobre el calentamiento de las palanquillas, el flujo de calor por radiación al interior tienden a tener muy poca variación en la extensión del horno.

La temperatura simulada en las paredes del horno se sitúa desde 1273 a 1479 K, valores comparativos con las mediciones en planta. Además, la potencia nominal instalada en los 32 quemadores del horno suma 244 millones de Btu hr^{-1}, que es un número comparable con la suma del calor generado en la simulación por la reacción química que es de 232 millones de Btu hr^{-1}, una diferencia menor al 5%. La pérdida de calor por conducción en las paredes del horno es cercana al 6%, este valor se aproxima a los datos reportados en la literatura (Morgano et al., 2015), considerando una conductividad térmica del material refractario de 3.5 W m^{-1} K^{-1} y asumiendo un espesor de pared de 0.5 m con una temperatura de 350 K. Cabe señalar, que además de la energía calorífica aportada por la combustión, el aire de entrada está recalentado a 633 K a través de un sistema de recirculación que emplea los gases de combustión mediante un recuperador de calor.

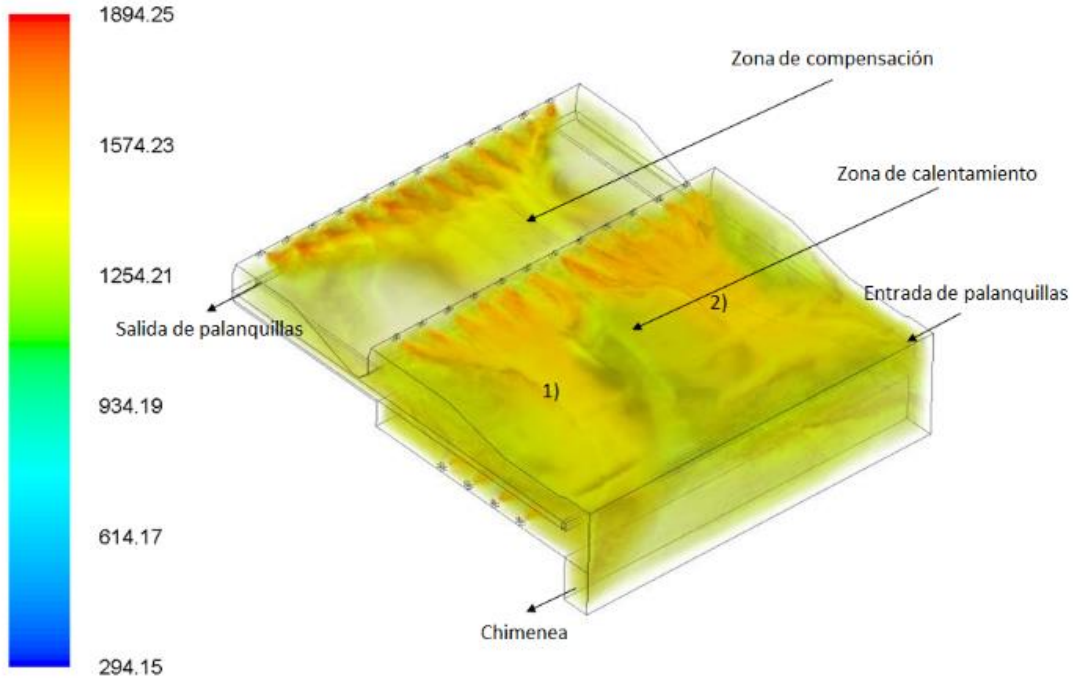


Fig. 2: Contornos de temperatura en las zonas de calentamiento y compensación del horno de recalentamiento, la temperatura se reporta en K.

En la Fig. 3, se muestra la dinámica de fluidos mediante vectores de velocidad en un plano correspondiente a la zona inferior de calentamiento y coincidente con la altura geométrica de los quemadores. Como se mencionó, la transferencia de calor en el interior del horno está gobernada por el mecanismo de radiación, generada por la combustión de los gases, asimismo, la dinámica de fluidos favorece la homogenización de los contornos de temperatura debido que manipulan la posición de las flamas emisoras de energía por radiación. Por otro lado, se ha reportado que aproximadamente el 10% del flujo de calor en un horno de recalentamiento es aportado por el mecanismo de convección (Kim y Huh, 2000; Kim y Huh, 2010; Kim, 2007), por eso es importante, bajo el punto de vista energético, aprovechar al máximo dicho potencial, incrementando el tiempo de residencia de los gases de combustión a alta temperatura en el interior del horno y forzando el contacto con la carga de palanquillas.

Asimismo, de la Fig. 3 se observan cuatro vórtices principales producto de la dinámica de fluidos, dichos vórtices generan una homogenización del flujo de calor por radiación incidente al igual de las temperaturas al interior del horno. Además, cuando la mezcla de las especies ocurre en régimen turbulento los fenómenos de combustión se favorece, aumentando la eficiencia de las reacciones de combustión.

ISBN 978-607-8242-11-5

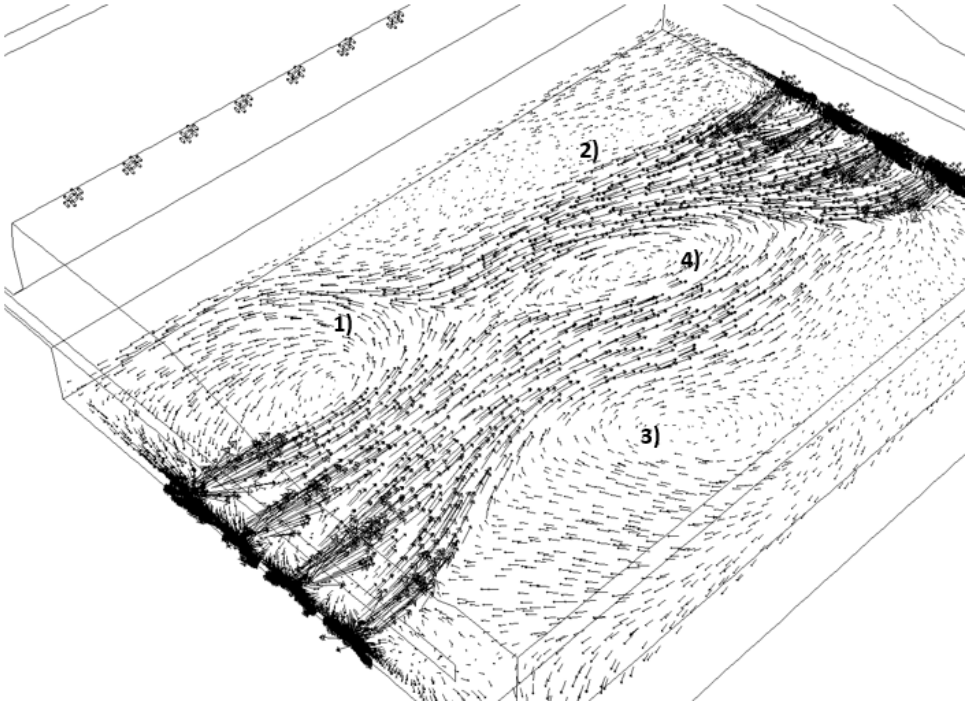


Fig. 3: Vectores de velocidad en la zona de calentamiento inferior coincidente con altura geométrica de los quemadores.

A continuación, en la Fig. 4 se muestra la historia térmica de la palanquilla móvil cuando se traslada en el interior horno a una velocidad de producción de 120 toneladas por hora y un tiempo de residencia de 7200 segundos. De la figura se indican los valores de temperatura máxima, mínima y promedio calculadas en el volumen de la palanquilla móvil que se desplaza de forma virtual importando, exportando y asignando el perfil térmico de la palanquilla móvil utilizando la una función definida por el usuario. Por otro lado, la diferencia máxima de temperatura en el volumen de la palanquilla móvil durante el calentamiento es cercana a los 200 K, al principio y antes de los 500 segundos, asimismo, la diferencia de temperatura disminuye hasta 12 K, posterior a los 3000 segundos de calentamiento. El efecto de la alimentación de carga sobre el sumidero de temperatura, se simula considerando que se introduce una palanquilla fría cada 76 segundos de forma periódica durante el tiempo de residencia, esto resulta en una entrada de 94 palanquillas a 300 K, lo que provoca una disminución de la temperatura en la zona de entrada.

Asimismo, de la Fig. 4 se puede infiere de forma indirecta que la zona de calentamiento es donde se presenta el mayor intercambio de energía, haciendo que la temperatura se incremente con una mayor rapidez de calentamiento. En esta zona también se concentra el 85% del potencial calorífico generado por la combustión de los gases mientras que en la zona de compensación la diferencia entre las temperaturas se minimiza por arriba de los 4000 segundos, alcanzando un estado prácticamente estacionario.

Finalmente, se puede señalar como una aplicación del modelo, el diseño de tratamientos térmicos antes de algún proceso de conformado en caliente; por ejemplo, durante el recalentamiento de palanquillas de aceros microaleados se requiere de un tiempo de permanencia como el que se presenta en la Fig. 4, antes de la zona de compensación, para lograr la homogenización de la microestructura y el tamaño de grano óptimo con la finalidad de obtener un producto terminado con las propiedades mecánicas y características físicas deseadas.

ISBN 978-607-8242-11-5

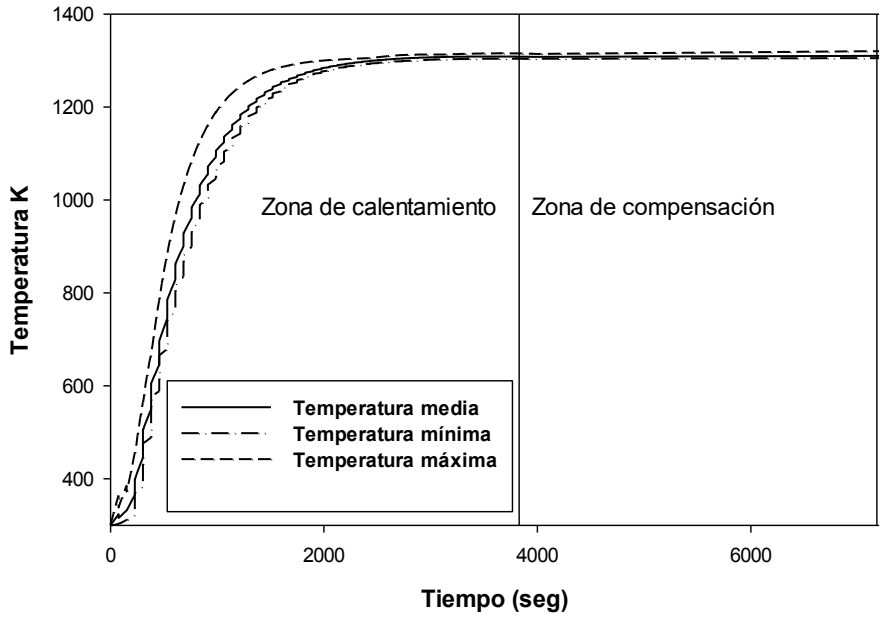


Fig: 4. Historia térmica de la palanquilla móvil durante su desplazamiento en el interior del horno de recalentamiento.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos por el modelo de simulación, es posible determinar que la radiación generada por la combustión de los gases a alta temperatura, es el principal mecanismo de transferencia de calor mientras que la convección, no menos importante, contribuye con una cantidad significativa del 10% del calor generado, justificando la predicción del campo de velocidades del fluido, con el fin de maximizar el tiempo de residencia, inducir el contacto con las palanquillas y asegurar la salida de los productos de combustión por la chimenea del horno. También, es importante señalar que la dinámica de las especies proporciona la posición y tamaño de la fuente de radiación.

Asimismo, se estimó que las pérdidas de calor por conducción en las paredes son aproximadamente del 6% del calor generado, valor comparable con otras publicaciones. Además, el potencial calorífico generado por la reacción química de combustión fue de 232 millones de Btu hr^{-1}, cercano a los 244 millones de Btu hr^{-1} calculados por la sumatoria de las potencias nominales en los quemadores.

Por otro lado, el intercambio de calor entre las palanquillas móviles y el medio se desarrolla principalmente en la zona de calentamiento donde se concentra el mayor número de quemadores de alta potencia. La diferencia de temperatura máxima en el volumen de la palanquilla móvil es de aproximadamente 200 K a los 500 segundos, sin embargo, después de los 4000 segundos la diferencia se vuelve mínima, alcanzando una temperatura final simulada de 1323 K valor que coincide con algunas lecturas tomadas en planta, inmediatamente a la salida del horno de recalentamiento.

Finalmente, se puede mencionar que la simulación del transporte de palanquillas por el método paso a paso, predice el perfil térmico final de forma adecuada, sin embargo, durante el proceso de calentamiento, las diferencias de temperaturas deberían ser más notorias, principalmente en los primeros segundos de calentamiento, considerando que la temperatura más baja se encuentra en el centro de la palanquilla mientras que la temperatura más alta se presenta en la superficie de contacto con los gases de combustión.

REFERENCIAS

Ansys, Inc., "Ansys Fluent Theory Guide" (2015).

Ansys, Inc., "Ansys Fluent Customization Manual" (2016).

Baukal, C. E., V.Y. Gershtein y X. Li, "Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion", CRC PRESS Florida (2000).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Harish, J. y P. Dutta, "Heat transfer analysis of pursher type reheat", Ironmak. Steelmak., 32, 151-158 (2005).

Emandi, A., A. Saboonchi, M. Taheri y S. Hassanpour, "Heating characteristics of billet in a walking hearth type reheating furnace", Appl. Therm. Eng., 63, 396-405 (2014).

Habini, A., B. Merci y G. Heynderickx, "Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnances", Comput. Chem. Eng., 31, 1389-1406 (2007).

Han, S.H. y D. Chang, "Optimum residence time analysis for a walking beam type reheating furnace", Int. J. Heat Mass Tran., 55, 4079-4087 (2012).

Han, S. H., D. Chang y C.Y. Kim, "A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace", Int. J. Heat Mass Tran., 53, 3855-3861 (2010).

Han, S.H., S.W. Baek y M.Y. Kim, "Transient radiative heating characteristics of slabs in a walking beam type", Int. J. Heat Mass Tran., 52, 1005-1011 (2008).

Hottel, H.C. y A.F. Sarofim, "Radiative transfer", McGraw-Hill (1967).

Hsieh, C.T., M.J. Huang, S.T. Lee. y C.H. Wang, "Numerical modeling of a walking- beam type slab reheating furnace", Numer. Heat Tr. A-Appl., 57, 1-17 (2010).

Jaklic, A., T. Kolenko y B. Zupancic, "The influence of the space between the billets on the productivity of a continuous walking-beam furnace", Appl. Therm. Eng., 25, 783-795 (2005).

Jang, J.H., D.E. Lee, C. Kim y M.Y. Kim, "Prediction of furnace heat transfer and its influence on the steel slab heating and skid mark formation in a reheating furnace", ISIJ Int., 48, 1325-1330 (2008).

Kim, J.G. y K.Y. Huh, "Prediction of transient slab temperature distribution in the re-heating furnace of a walking-beam type for rolling of steel slabs", ISIJ Int., 40, 1115-1123 (2000).

Kim, J.G. y K.Y. Huh, "Three-dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace in hot strip mills", Numer. Heat Transfer, 38, 589-609 (2010).

Kim, M.Y., "A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace", Int. J. Heat Mass Tran., 50, 3740-3748 (2007).

Kim, M.Y., "Effect of scale on slab heat transfer in a walking beam type reheating furnace", Int. J. Mech., Aerospace, Ind., Mech. Manuf. Eng., 7, 1337-1341 (2013).

Liu, Y.F., Z.L. Hu, D.H. Shi y K. Yu, "Experimental Investigation of emissivity of steel", Int. J. Thermophys., 34, 496-506 (2013).

Magnussen, B.F., "On structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow". Nineteenth AIAA Meeting, Missouri USA, (1981).

Mayr, B., R. Prieler, M. Demuth, L. Moderer y C. Hochenauer, "CFD analysis of a pusher type reheating furnace and the billet heating characteristic", Appl. Therm. Eng., 115, 986-994 (2017).

Modest, M.F., "Radiative Heat Transfer", McGraw-Hill, Pennsylvania (1993).

Morgano, T., P.J. Coelho y P. Talukdar, "Assessment of uniform temperature assumption in zoning on the numerical simulation of walking beam reheating furnace", Appl. Therm. Eng., 76, 496-508 (2015).

Shit, T.H., W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang y J. Zhu, "A new k-e Eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation". Nasa Technical Memorandum, (1994).

Torres, M. y R. Cólas, "A model for heat conduction through the oxide layer of steel during hot rolling", J. Mater. Process. Tech., 105, 258-263 (2000).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de Bifurcación a través de la Plataforma de ASPEN PLUS®: Hidrolisis de Óxido de Propileno

J. Carlos Cárdenas Guerra[1] y J. Carlos Cárdenas Rivera[2]
(1) Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, Universidad de Guanajuato, Loma del Bosque No. 103, León, Guanajuato, 37150, México
(2) Departamento de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico y A. García Cubas s/n, Celaya, Guanajuato, 38010, México
e-mail: carlos.cardenas@ugto.mx

Resumen

En este trabajo, se propone analizar y simular un reactor en estado estacionario (Figura 1) para la producción de propilenglicol ($C_3H_8O_2$) a partir de la hidrólisis de óxido de propileno (C_3H_6O, OP). En la operación del reactor se utiliza H_2SO_4, como catalizador homogéneo, que va disuelto junto con el exceso de agua (H_2O) con una concentración de 0.1% en peso. El metanol se ingresa en la mezcla con el fin de mejorar la solubilidad entre el OP y H_2O. La reacción es: $C_3H_6O + H_2O \rightarrow C_3H_8O_2$.

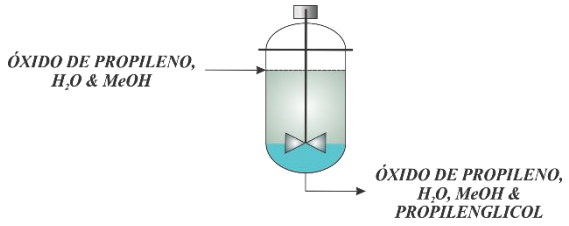


Figura 1. Reactor de tanque agitado continuo para la producción de propilenglicol.

Las cinéticas son tales que la reacción toma lugar en una velocidad razonable cerca de la temperatura de ambiente. No obstante, para un reactor adiabático, la elevación de temperatura es un parámetro de riesgo importante; por ello, debemos identificar que OP a 68°F tiene un calor de reacción exotérmico de -36400 BTU/lbmol. Para tener un mayor control de la temperatura, la presión de operación se puede establecer en 3 bar para llevar a cabo esta reacción en fase líquida; además, para prevenir la evaporización se agrega un exceso de agua. Consideramos el uso de un reactor existente, el cual opera adiabáticamente a 3 bar, con un volumen de líquido de 1.1356 m^3. La corriente de reactivos se alimenta al reactor a 23.9°C con las siguientes velocidades de flujo: *i)* óxido de propileno: 18.712 kmol/h, *ii)* agua (a ser determinada, dentro del rango de 160 a 500 kmol/h), *iii)* metanol: 32.730 kmol/h. El sistema reactivo forma una mezcla no ideal, la cual es modelada con el modelo termodinámico de Wilson. Todos los parámetros de interacción binaria para el modelo de Wilson están incorporados en la base de datos de ASPEN PLUS®. La expresión cinética sigue un modelo de ley de potencia de segundo orden en la concentración de OP (Vadapalli y Seader, 2001).
Tomando en cuenta que la finalidad es determinar condiciones de operación en la existencia de multiplicidad de estados estacionarios, el procedimiento de exploración propuesto por Cárdenas Guerra (2012) fue aplicado. Asimismo, la herramienta denominada *análisis de sensibilidad* de ASPEN PLUS® fue empleada de manera que los resultados actuales sean usados como estimados iniciales en la próxima solución de estado estacionario. Una región de multiplicidad se ubica entre los valores de 379-448.5 kmol/h. Los estados estacionarios de alta conversión para OP son localizados a valores de flujo de alimentación de agua (FAA) más pequeños que 379 kmol/h, esto es, fuera de la región de multiplicidad; por lo tanto, una baja conversión es obtenida si el flujo de agua se incrementa. Además, para un FAA de 400 kmol/h obtenemos dos valores diferentes en la conversión de OP correspondientes a una conversión 86.80% en la ramificación superior y una conversión baja de 4.30% en la ramificación inferior del diagrama de bifurcación.
Tomando la temperatura del *efluente* como una variable de salida en la existencia de múltiples estados estacionarios, se construye un diagrama de bifurcación donde se muestra la influencia de FAA como parámetro de bifurcación.

Referencias

Vadapalli, A. y J.D. Seader; A Generalized Framework for Computing Bifurcation Diagrams using Process Simulation Programs, *Computers & Chemical Engineering*, 25, 445-464 (2001).

Cárdenas Guerra, José Carlos; Diseño Conceptual y Análisis de las Condiciones de Operación de un Proceso de Destilación Reactiva para la Hidrodesulfuración Profunda de Diesel, *Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa* (2012).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de Datos en Sistemas de Información Geográfica para Zonas de Riesgo en la Ciudad de México

Abraham Espinosa Ramírez, Mariko Nakano, Gabriel Sánchez Pérez, Antonio Arista Jalife.
Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, Av. Santa Anna 1000, Coyoacán, 04430
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Quinto Semestre, Ciudad de México
E-mail: abraham_er@icloud.com

Resumen

De acuerdo con el informe de Índice de Paz México 2017 los actos de delincuencia consumada dentro de la Ciudad de México ha elevado la percepción de inseguridad a los ciudadanos, por lo que se desarrolla una aplicación en Android basada en dispositivos móviles que permitirá crear indicadores de delitos dentro de un mapa cartográfico en donde el usuario podrá identificar, asimilar, colaborar y evitar si así lo deseé con este proyecto que hoy en día la sociedad demanda para tener presente los lugares más delictivos y evadirlos.

Teniendo como resultado modelos de mapas con incidentes georreferenciados usando un Sistema de Información Geográfico (SIG) como herramienta principal y el uso de posicionamiento móvil con el propósito de contribuir al estudio y monitoreo de la delincuencia para detectar problemas en forma temprana y servir como base para la toma de decisiones a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos mexicanos.

Palabras clave: SIG, Mapeo del crimen, Sistema de Información Geográfica, Delincuencia en CDMX

Data analysis in Geographic Information Systems for danger zones in Mexico City

Abstract

The present document treats the analysis of the criminal acts committed within the Mexico City, based on the Geographical Information Systems (GIS). The results of this application developed for mobiles devices provide the analysis of crime indicators projected into cartographic map, which allows users to identify, assimilate and collaborate, in order to avoid being implicated in a possible crime, considering that the information about some conflictive zones helps users to evade these zones to reduce the criminal rate.

The results make a thematic map where geo-referenced incidents are projected into the map using GIS and the use of Global Positioning System (GPS) where the principal purpose of this work is contribute to the study and monitoring of the crimes committed in the Mexico City in order to detect the problems in it is early stage and provide bases to make an adequate decision to helps to improve life quality of the Mexican citizens.

Keywords: GIS, Crime, Geographic Information System, Danger zones in Mexico City, Mapping of Crime

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Actualmente en la Ciudad de México de acuerdo con el informe de Índice de Paz México 2017 como se muestra en la figura 1 (https://indicedepazmexico.org/), México se ubica dentro de los 10 países con los mayores costos por contención de violencia a nivel Latinoamérica; la falta de confianza en la policía, así como en las instituciones judiciales, ha elevado la percepción de inseguridad y, en algunos casos, los ciudadanos que son víctimas de estas razones no presentan reporte alguno ante las autoridades. Las tasas delictivas en México son altas, la más común es el robo o asalto al transeúnte, cifras que hasta en la actualidad continúan en crecimiento y desafortunadamente no se tienen mapeados estos actos delictivos para poder crear soluciones preventivas y proactivas ante la ciudadanía.

Un reto importante para México es reducir los niveles de impunidad. En promedio, son castigados apenas 9% de los delitos que se cometen. La impunidad es un problema generalizado en muchos estados y en las instituciones policiales y judiciales sabiendo que los policías de tránsito y municipales se perciben como las autoridades menos confiables y las más corruptas, subrayando los esfuerzos requeridos en el área del gobierno local.



Fig. 1: Grafica de paz en México de 2003 al 2016

En este artículo, se presenta el sistema de nombre “GeoSecurityMX” donde es la aplicación móvil con desarrollo en la plataforma de Android Studio Versión 2.3 que tiene el fin de crear una cronología de eventos georefenciados. Desde el punto de vista sobre los datos en donde se consume el acto delictivo serán recolectados para evaluar, determinar, analizar y mostrar al usuario de la aplicación los espacios públicos más seguros permitiéndolos a conocer a través de un mapa los reportes de otros usuarios en donde detallan los incidentes delictivos cometidos cercanos a su posición actual.

Por lo que el término mapeo de análisis de crimen se utiliza para describir este proceso en donde el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite analizar la delincuencia no es sólo el acto de colocar incidentes en un mapa, sino poder evadirlos en un futuro cercano; Por consiguiente, se considera el "análisis del crimen" como: “El proceso de utilizar un sistema de información geográfica en combinación con técnicas de análisis del crimen para centrarse en el contexto espacial de las actividades penales y otras actividades de aplicación de la ley”. Boba, R (2001)

Creemos que las ciudades deben ser más seguras y por eso el propósito de este desarrollo es inicialmente capturando los detalles de la ubicación en tiempo real a través de una referencia geográfica del sitio donde se presenta la situación del delito, posteriormente la misma ciudadanía podrá contribuir a la captura de datos con el fin de tener una base de datos de acuerdo a las situaciones presentadas para evitar las zonas con mayor delito y finalmente obtener como resultado el mapa cartográfico en donde permite evaluar la importancia de la delincuencia en torno a un viaje más seguro en el enfoque de un traslado al destino próximo.

El resto de este artículo está organizado en la siguiente manera: en la sección “Estrategia de Desarrollo”: se mencionará las fases de recolección de datos, almacenamiento y uso de los mismos para ser analizados y

ISBN 978-607-8242-11-5

usados para determinar acciones preventivas; en la sección “Sistema propuesto”: se describe el proceso de captura, clasificación y modificación de los datos obtenidos a través de la aplicación desarrollada; en la sección “Resultados”: se muestra la interpretación y visualización de los datos dentro de un mapa temático; en la sección “Conclusiones”: presenta las conclusiones generales y posibles trabajos futuros.

ESTRATEGIA DE DESARROLLO

Los aportes que incluirá este artículo requieren de una estrategia de desarrollo a seguir que sea capaz de tratar de manera efectiva los datos recolectados; y estos constan de 7 etapas: la primera etapa es la recolección de datos, donde está enfocada al reporte a dar de alta, es decir; al incidente que queremos dar de registrar en el sistema, para esto los datos a recolectar se sub-divide en: Datos del Incidente: Estos pueden clasificarse en: homicidio, y asalto, este último incluye: asalto a coche, asalto con cuchillo y asalto con pistola y en Datos del usuario: Estos son: usuario, correo electrónico, descripción del incidente, Latitud y Longitud. La segunda etapa es la validación de datos, donde consiste en identificar si la geolocalización corresponde con el marcador colocado en el mapa, es decir; la geolocalización del dispositivo móvil no deberá exceder los límites de la delegación Iztacalco del reporte a dar de alta o de lo contrario este incidente no será georreferenciado al emitir el reporte. La tercera etapa es La manipulación de datos, donde incluirá la información de los incidentes almacenada en un archivo por formato CSV del formatos estándar en donde al alojarse en el servidor se aplicará la clasificación de los delitos reportados, mismos que sean interpretados por un SIG posteriormente. La cuarta etapa es la generación de tablas, esta etapa conlleva a la creación de tablas, estadísticas y puntos de control asignados a una variable, es decir, de los datos del archivo CSV serán convertidos a tablas por límites de separación entre puntos y comas para definir cada columna y línea en donde posteriormente estos se indexarán aun mapa acorde a la información obtenida creando un histórico de eventos. La quinta etapa es la transformación de datos a un cartograma que conlleva a indexar los datos en un mapa, en otras palabras, estos datos al descargarse podrán importarse de manera gráfica visualizándose como puntos de eventos en nuestro software de SIG referenciando las coordenadas geométricas dentro de la delegación Iztacalco en donde posteriormente se podrán visualizar los detalles que describen a cada incidente en específico en determinada región. La sexta etapa es el modelado de datos siendo la penúltima etapa puesto que una vez los datos almacenados en nuestro SIG podemos crear modelos de proximidad de un evento a otro así como delimitar zonas por colonias, cuadrantes de la policía federal de la ciudad de México o simplemente en mostrar solo una clasificación de delito y con ellos crear consultas en donde podremos visualizar un incidente en una colonia, en un cuadrante y en una clasificación en especifica según el usuario final lo desee. La séptima y última etapa es el incidente georreferenciado en donde finalmente al usuario de la aplicación “GeoSecurityMX” podrá visualizar el mapa final en donde otros usuarios que hacen uso de la misma aplicación podrán observar los incidentes reportados dentro de la delegación Iztacalco y así contribuir a reducir la tasa de crímenes.

SISTEMA PROPUESTO

Las aplicaciones móviles es la manera de utilizar los recursos de un dispositivo portable con el fin de obtener un resultado más óptimo en cuanto a los beneficios que este provee como lo son, el uso del GPS y el internet móvil. Conocemos ya las tecnologías implicadas tales como las redes inalámbricas y los métodos de posicionamiento. Es el momento de ver cómo el software SIG se adapta a estas circunstancias y cuáles son las características de la siguiente aplicación desarrollada bajo el nombre de “GeoSecurityMX”.

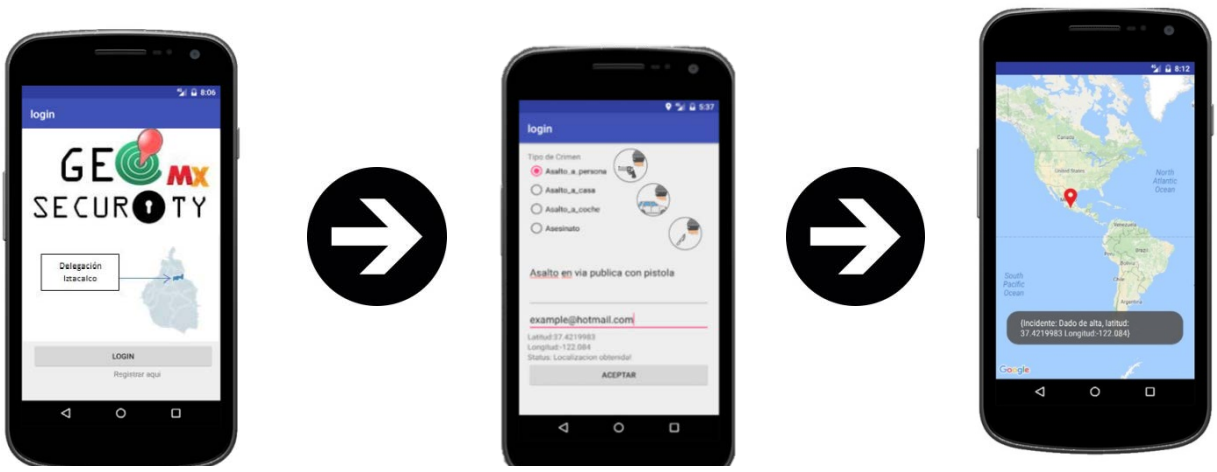


Fig. 2: GeoSecurityMX APP inicio

ISBN 978-607-8242-11-5

Luego de ingresar a la aplicación descargada como usuario registrado aparecerá la siguiente pantalla como lo muestra la figura 2. Al instante el usuario podrá elegir el tipo de crimen a reportar de hechos delictivos como: asalto a persona, asalto a vehículo, asalto a casa, asalto a coche o asesinato; indicando lo qué sucedió y la fecha y hora exacta del suceso; de manera automática la aplicación recaba la ubicación del dispositivo, con el fin de que obtener la ubicación donde se genera el reporte y posteriormente en la pantalla siguiente de su teléfono móvil la App permitirá colocar el marcador en un mapa el incidente a reportar.

Posterior a ingresar los datos solicitados y colocado el marcador en el mapa los datos son enviados al servidor en donde serán analizados, clasificados, georreferenciados e indexados a nuestra base de datos de acuerdo a los alcances especificados en el inicio de este artículo.

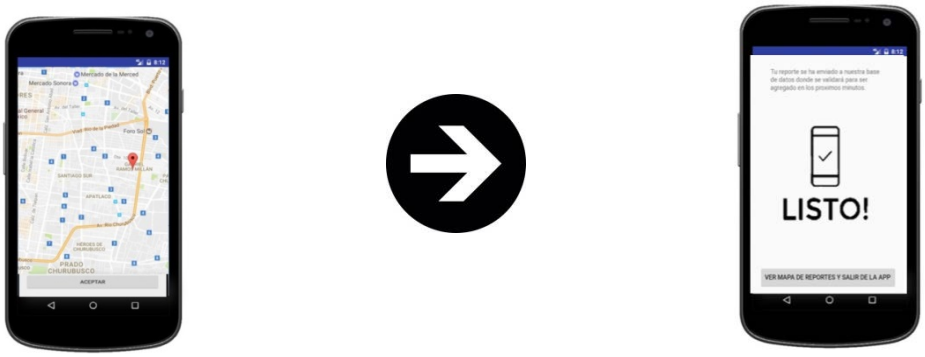


Fig. 3: GeoSecurityMX APP. Geolocalización.

En esta fase de reporte de incidentes la aplicación no recopila datos personales y la denuncia no se almacena en el dispositivo. También es posible compartir el mapa de delitos de la Delegación Iztacalco sus redes sociales Facebook y Twitter para que otros usuarios aun no registrados puedan enterarse.

Tanto como la aplicación “Waze” como “GeoSecurityMX” son aplicaciones de crowdsourcing, es decir que se nutren de información de la propia comunidad y la App procesa la información estadística que generan los usuarios, lo que les permite conocer cómo, cuándo y dónde ocurren hechos delictivos en la Delegación Iztacalco, “GeoSecurityMX” es un GPS social de alerta comunitaria, que ayuda a combatir la delincuencia para proteger y evitar situaciones peligrosas, donde los usuarios suman fuerzas para denunciar delitos y recibir alertas en tiempo real.

RESULTADOS

La Fig. 4 muestra el mapa de reportes o conocido mejor como incidentes georreferenciados en donde por medio de un mapa cartográfico podemos ver de manera gráfica los delitos reportados por los usuarios de la aplicación “GeoSecurityMX”.
Dentro del mismo mapa de delitos, es posible desplazarse dentro del mapa y acercar para poder ver a manera de detalle las diferentes capas que se pueden activar en el mapa como lo son: Delegaciones CDMX, Delitos Iztacalco, Cuadrantes Policiacos Iztacalco y Colonias Iztacalco. Además es posible visualizar las diferentes capas con las que cuenta el mapa estas pueden ser activadas al mismo tiempo según así se desee.



Fig. 4: Mapa de delitos

ISBN 978-607-8242-11-5

Al darle un clic a algún punto en específico se desplegará una breve descripción de los detalles del reporte seleccionado, es decir, la ubicación en donde se cometió el delito, el tipo de crimen reportado, la fecha y hora en la que sucedió el incidente; A través de esta aplicación móvil podemos seguir descubriendo al ser seleccionado un polígono de color con un clic en particular nos muestra a detalle el número de cuadrante, la zona, el sector en el que se encuentra y otros detalles dentro de la delegación Iztacalco; Destacamos la importancia que este mapa permite la integración de 2 o más capas para una mejor consulta.

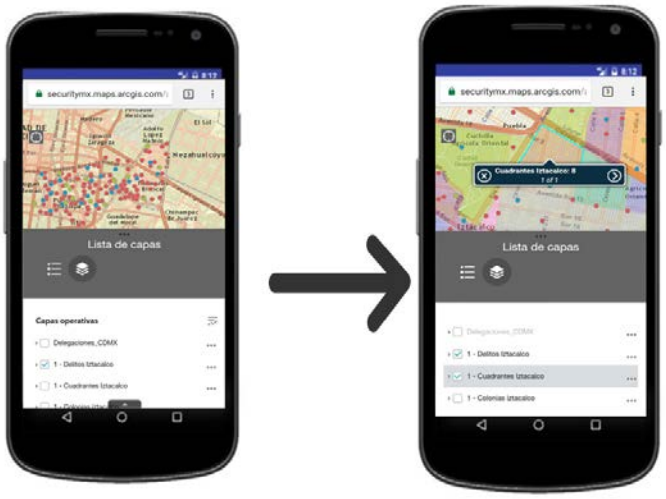


Fig. 5: Mapa de delitos

Cabe señalar que la información utilizada en este tipo de colonias georreferenciadas se representa mediante polígonos, en cambio de los delitos son representados por una sucesión de puntos con coordenadas. La forma en cómo se realiza la georreferenciación de los delitos dentro de este SIG es considerando el sistema de coordenadas WGS 1984; De esta manera se realiza la ubicación espacial de los delitos en distintas posiciones a lo largo de su trayectoria. Cada una de las posiciones en la tabla de atributos, posee información adicional como, fecha, hora, tipo y descripción.

Los diferentes resultados que ofrece el SIG permiten construir representaciones simplificadas de la ubicación de delitos que ayudan a facilitar el estudio de estos datos. Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos a través de los datos recolectados con el fin de crear capas para que finalmente sean mostradas de manera sencilla para el usuario final de la aplicación.

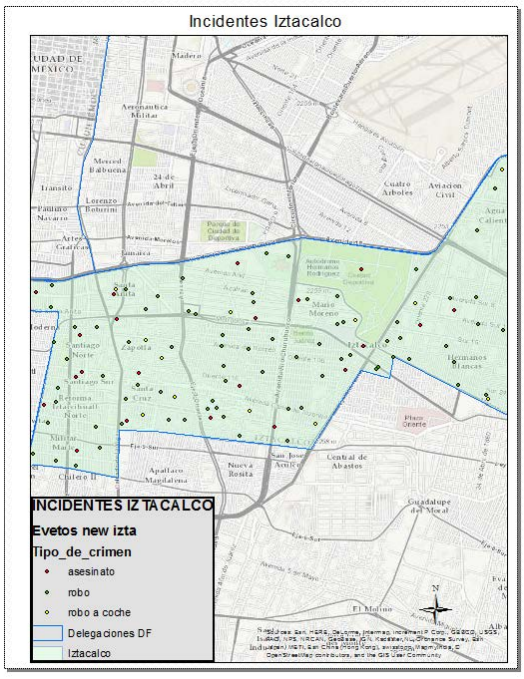


Fig. 6: Delitos Delegación Iztacalco.

En la fig.6 se muestra una vista general del resultado de los delitos de la zona Iztacalco. Tomando como base la cartografía, se logra visualizar la ubicación de los reportes (representados por puntos) y los límites delegacionales de manera simultánea y ordenada. Los sondeos realizados para la zona en estudio “Iztacalco” fueron realizados con distintas técnicas, es por ello que en la imagen aparecen los resultados de distintos colores acorde a la selección deseada

ISBN 978-607-8242-11-5

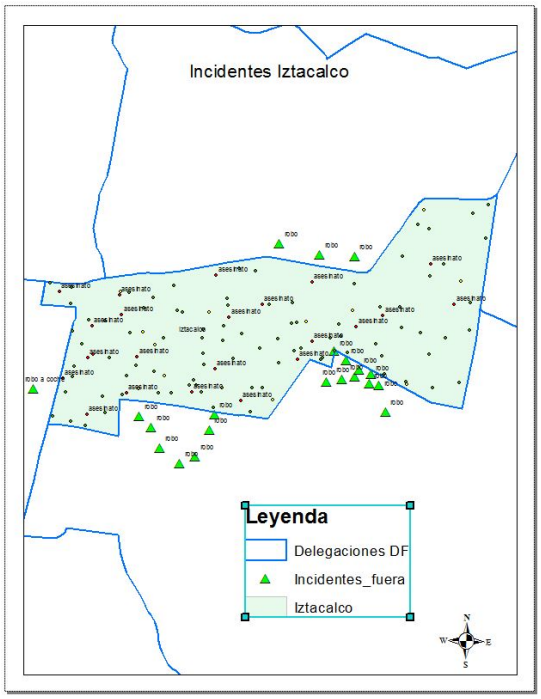


Fig. 7: Incidentes fuera de la Delegación Iztacalco.

La fig. 7 Muestra el resultado mapeado en que la aplicación obtiene la ubicación de manera automática en donde se está generando el reporte (ubicación del dispositivo) y la ubicación donde se coloca el marcador en el mapa, esto con el fin de evaluar los datos obtenidos en nuestro servidor y discernir si las ubicaciones reportadas se encuentran dentro de los límites de la delegación Iztacalco y de esta manera ser mapeado el delito. Lo que se realiza es una previa geolocalización de las ubicaciones obtenidas de manera manual para validar la información, posterior a ello son indexadas en el mapa de delitos y este finalmente es actualizado para ser mostrado a los usuarios de la aplicación.

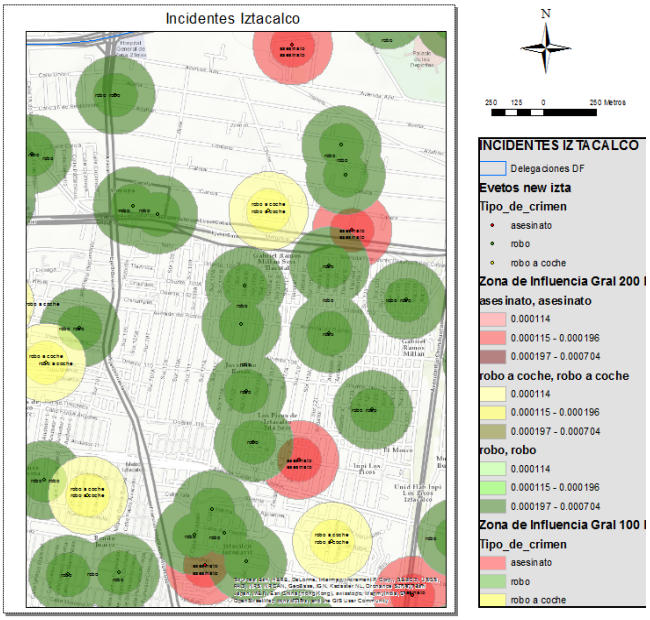


Fig. 8 Zona de influencia 100mts y 200mts

La fig. 8 Muestra el resultado de la zona de influencia en la que los delitos pueden influir en una zona aproximada a 100 y 200 metros dependiendo el nivel de crimen en el que están clasificados, como lo es el color rojo: asesinatos, color amarillo: robo a coche y color verde: robo. Una entidad importante de la herramienta Zona de influencia es el parámetro Método que determina cómo se construyen las zonas de influencia. Hay dos métodos básicos para construir zonas de influencia: euclidiano y geodésicas; Las de zonas de influencia euclidianas miden la distancia en un plano Cartesiano bidimensional, donde la línea recta o las distancias euclidianas se calculan entre dos puntos en una superficie plana (el plano Cartesiano). Y Las zonas de influencia geodésicas son las que representan la forma real de la Tierra. Las distancias se calculan entre dos puntos de una superficie curva en vez de entre dos puntos de una superficie plana (el plano Cartesiano). Víctor Olaya, (2014)

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, considero que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta relativamente joven, que en poco tiempo ha demostrado ser de gran apoyo principalmente en el manejo de información, en donde el presente trabajo pretende mostrar las ventajas de usar SIG en el uso de Tecnologías de la Información; Sin embargo, aún no se han explotado en la totalidad en la Ciudad de México como un recurso valioso, por ello es que se enfoca en dar a conocer los usos, aplicaciones y potencialidades, de estos sistemas, ya que son una herramienta que puede ofrecer grandes ventajas, sin embargo se ha demostrado que es posible implementar el sistema propuesto en este trabajo en donde finalmente se incorporan algunas medidas preventivas que sirven como soluciones tempranas gracias a la capacidad de los SIG en donde el manejo de los datos georreferenciados de una región pueden estimar la calidad de vida de un individuo.

ISBN 978-607-8242-11-5

A pesar del desarrollo realizado, han quedado algunas tareas que quedan abiertas para futuros desarrollos. El trabajo presentado se ha realizado partiendo de la base que los delitos consumados dentro de la Delegación Iztacalco. Así y por lo tanto se es posible extenderse en todas las Delegaciones de la Ciudad de México o bien dentro de la República Mexicana.

Finalmente el trabajo realizado podría adaptarse a las necesidades y en colaboración con la Secretaria de Seguridad Publica al poder tener una respuesta más rápida del sector policiaco.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional, Esime-Culhuacán en donde el Dr.Gabriel Sánchez Pérez gracias a su apoyo y a la Dra. Mariko Nakano gracias a su confianza incondicional al ser mi consejera de estudios de mi tesis de grado. A sí mismo agradezco al M. Antonio Arista quien a través de su conocimiento ha apoyado y enriquecido enormemente el desarrollo de la aplicación móvil construida en este artículo; Finalmente le agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que gracias al apoyo económico de la beca otorgada por el lapso de 2 años eh podido consolidar mi proyecto.

REFERENCIAS

F. J. Moldes, *"Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica",* Ed. Ra-Ma. (1995)

Boba, R. *"Introductory Guide to Crime Analysis and Mapping,"* Police Foundation (2001)

Víctor Olaya, *"Sistemas de Información Geográfica",* (2014)

Roger Tomlinson, *"Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Manager",* Ed, 4th, (2011)

Yutaka Harada, Takahito Shimada, *"Examining the impact of the precision of address geocoding on estimated density of crime locations"*, Computers & Geosciences (2005)

Kayoko Yamamoto, *"Development and Operation of Social Media GIS for Disaster Risk Management in Japan"*, University of Electro-Communications, (2015)

Anthony A. Braga, *"The Effects of Hot Spots Policing on Crime",* (2003)

María Isabel Andrade, *"Los Sistemas de Información Geográfica, Una Nueva Metodología"* (2008)

MURAYAMA Yuji, *"Development of GIS Studies in Japan"*, Division of Spatial Information Science, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, (2013)

Índice de Paz de México, *https://indicedepazmexico.org/*

Crimen por tu rumbo CDMX, *https://hoyodecrimen.com/*

Cuadrantes policiacos SSP CDMX, *http://www.ssp.df.gob.mx/cuadrante.html*

SIG Japón, sitio web, *http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/gis/gis/webguide/index-cat-issue/*

 ISBN 978-607-8242-11-5

Predicción de Propiedades Termodinámicas Asistida por Computadora

J. Carlos Cárdenas Guerra[1], Susana Figueroa Gerstenmaier[2], Salvador Hernández Castro[2] y Héctor Hernández Escoto[2]

(1) Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, Universidad de Guanajuato, Loma del Bosque No. 103, León, Guanajuato, 37150, México

(2) Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México

e-mail: carlos.cardenas@ugto.mx

Resumen

En el presente trabajo se emplean dos métodos predictivos a través de contribución de grupos (CG) reportados por: i) Joback y Reid (1987) donde la propiedad de un compuesto es estimada como la suma de la CG de primer orden que ocurren en la estructura molecular y ii) Constantinou y Gani (1994), el cual formula la estimación a dos niveles: el nivel básico utiliza la CG de primer orden, mientras que el segundo nivel usa una serie de grupos de segundo orden teniendo a los grupos de primer orden como bloques de construcción (Constantinou y col., 1995), lo que hace posible la distinción de isómeros. Las propiedades críticas (como presión, temperatura y volumen) y factor acéntrico de los componentes puros (reactivos y productos) involucrados en la producción de biodiesel mediante esterificación, son analizadas como caso de estudio; para ello, es necesario hacer uso de la plataforma computacional ICAS (Integrated Computer Aided System, perteneciente al CAPEC de la Universidad Técnica de Dinamarca).

Las propiedades de cada componente (ácido graso y éster de metilo) fueron evaluados mediante los dos métodos predictivos anteriormente mencionados. La estimación de propiedades mostradas en la Tabla 1, corresponden a las propiedades básicas para llevar a cabo el diseño de la unidad de reacción en la generación de biodiesel. Es conveniente señalar que existen otras propiedades, las cuales por cuestiones de espacio, no fueron reportadas.

Tabla 1: Propiedades físicas y termodinámicas del oleato de metilo.

Nombre		**Número de carbonos y doble ligadura**		**Fórmula semidesarrollada**	
Oleato de metilo (Metil éster de ácido *cis*-9-octadecenoico)		18:1		$CH_3(CH_2)_{14}CH_2COOCH_3$	
Propiedad Estimada	**Parámetros**	**Constantinou y Gani (1994)**	**Joback y Reid (1987)**		**Unidades**
		ICAS	ICAS	ASPEN PLUS	
Peso molecular	PM	296.49	296.49	296.49	g/mol
Temperatura crítica	T_c	738.21	866.94	764	°K
Presión crítica	P_c	10.89	11.22	12.80	bar
Volumen crítico	V_c	1108.13	1105.50	1060	cm^3/mol
Factor acéntrico	ω	0.953	0.886	1.049	-
Temperatura de ebullición	T_b	598.78	696.50	617	°K
Energía estándar de Gibbs de formación a 298°K	ΔG_f°	-120.77	-121.05	-117	kJ/mol
Entalpía estándar de formación a 298°K	ΔH_f°	-637.35	-635.55	-626	kJ/mol
Factor de compresibilidad crítico	Z_c	0.197	0.172	0.214	-
Entalpía de vaporización a T_b	ΔH_{vb}	55.84	65.25	63.62	kJ/mol
Volumen molar de líquido a T_b	V_{lb}	442.16	441.06	489.08	cm^3/mol

El manejo del ICAS es práctico y permitió estimar al mismo tiempo un mayor número de propiedades con diversos métodos predictivos. Es importante tener en cuenta que conforme aumenta el número de átomos de carbono y de insaturaciones, las propiedades reportadas en la literatura escasean. Gübitz y col. (1999) reportaron un porcentaje aproximado de la composición de ácidos grasos en el aceite de *Jatropha curcas* como sigue: 0-0.1% de ácido mirístico, 14.1-15.3% de ácido palmítico, 3.7-9.8% de ácido esteárico, 0-0.3% de ácido araquídico, 0-0.2% de ácido behénico, 0-1.3% de ácido palmitoleico, 34.3-45.8% de ácido oleico, 29-44.2% de ácido linoleico y 0-0.3% de ácido linoleico. De aquí que en este trabajo se presenta las propiedades físicas y termodinámicas del compuesto en mayor cantidad, esto es, el ácido oleico.

Referencias

Constantinou, L., Gani, R. y J.P. O´Connell; *Estimation of the Acentric Factor and the Liquid Molar Volume at 298 K using a New Group Contribution Method*, Fluid Phase Equilibria, 103, 11-22 (1995).

Constantinou, L. y R. Gani; *New Group Contribution Method for Estimating Properties of Pure Compounds*, AIChE Journal, 40, 1697-1710 (1994).

Gübitz, G.M., Mittelbach, M. y M. Trabi; *Exploitation of the Tropical Oil Seed Plant Jatropha Curcas L*, Bioresource Technology, 67, 73-82 (1999).

Joback, K.G. y R.C. Reid; *Estimation of Pure-Component Properties from Group-Contributions*, Chemical Engineering Communications, 57, 233-243 (1987).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Simulación en 2D de la Hidrodinámica de una Columna de Lechos Fluidizados con Variación en el Ángulo de Inclinación

Fernando A. López Mata a; J. Javier Valencia López ; Christopher Heard
(1) Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería, División de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México
(2) Departamento de Procesos y Tecnología, División de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México
(3) Departamento de Teoría y Procesos de Diseño, División de Ciencias de la Comunicación y Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México
E-mail: ib.lomf@gmail.com, jvalencia@correo.cua.uam.mx

Resumen

El objetivo del presente trabajo es el planteamiento de un modelo matemático y su solución numérica en un software comercial de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), ANSYS FLUENT v 16.2, para la determinación de la hidrodinámica de una columna de lecho fluidizado considerando diferentes ángulos de inclinación. Se analiza la fracción volumétrica de los sólidos en el interior de la columna y caídas de presión con la finalidad de obtener las condiciones óptimas para lograr una fluidización del lecho sobre toda la columna. Se simularon cuatro casos de estudio de los cuales los dos primeros están basados en un prototipo experimental, con la finalidad de comparar la expansión del lecho a lo largo de la columna.

2D Simulation of Hydrodynamics of a Column of Fluidized Beds with Variation inclined Angle

Abstract

The objective of the present work is the approach of a mathematical model and its numerical solution in commercial software of Computational Fluid Dynamics (CFD), ANSYS FLUENT v 16.2, for the determination of the hydrodynamics of a fluidized bed column considering different angles of inclination. The volumetric fraction of the solids inside the column and pressure drops are analyzed in order to obtain optimum conditions to achieve fluidization of the bed over the entire column. Four case studies were simulated, of which the first two are based on an experimental prototype, in order to compare the expansion of the bed along the column.

Keywords: mathematical model, Compuational Fluid Dynamics, fluidized bed colum

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La fluidización es un proceso por el cual una corriente ascendente de fluido (líquido, gas o ambos) se utiliza para suspender partículas sólidas (Mc Cabe & Smith, 2002). El flujo de fluidos a través de lechos de partículas sólidas es un proceso que cuenta con un gran número de aplicaciones dentro de la ingeniería, la primera de importancia a nivel industrial tiene lugar en el año de 1940, con los procesos de craqueo catalítico y desde entonces se ha empleado en muchas otras áreas en el sector ingenieril e industrial (Barreira, 2007), tales como: Filtración, Síntesis de reacciones, Intercambiadores de calor de lecho fluidizado, Lixiviación, Extracción de solventes, etc.

A lo largo de la historia la fluidización ha incluido los esfuerzos de múltiples investigadores, de tal forma que son muchos los estudios que se han publicado sobre el tema, sin embargo, la obtención de resultados satisfactorios no ha sido una tarea fácil, en algunos casos ha resultado complicado establecer teorías y correlaciones uniformes, además de que muchos estudios se han realizado en instalaciones a pequeña escala y no siempre es posible extrapolar de forma experimental el comportamiento a gran escala, para solventar esta dificultad en lo últimos años se han empleado modelos matemáticos y su simulación numérica, para de esta forma describir los procesos de fluidización y tener herramientas de optimización y escalamiento de este proceso (Barreira, 2007). Para predecir el movimiento de un sistema fluido-partículas demanda resolver simultáneamente las ecuaciones de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento (momentum) para cada fase (discreta y continua) (Patiño, et al., 2010).

Las fluidizaciones en sistemas inclinados son poco conocidas y han recibido poca atención de investigación a pesar de que realmente en la práctica muchos sistemas de este tipo no están orientados verticalmente. De hecho, el sistema vertical puede considerarse como un caso particular de fluidización en el que la fuerza de flotación y la fuerza gravitatoria son directamente opuestas. Aunque con el ángulo de inclinación en las columnas se ha comprobado que se pueden lograr diferentes grados de mezcla, esto es pertinente en los procesos de fluidización industrial tales como el craqueo catalítico o lixiviación, que a menudo se requieren el uso de tuberías anguladas (O´Dea, et al., 1990).

METODOLOGÍA

Se plantea el problema en función de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento que constituyen la base de estudio del fenómeno hidrodinámico donde se describen las variaciones de velocidad, fracción volumétrica del sólido y del fluido con respecto al tiempo y posición en el sistema (Cornelissena, et al., 2007). Se utiliza un modelo de Euler-Euler para resolver el flujo de la fase continua y dispersa. Ambas fases se modelan por un conjunto separado de ecuaciones de Navier-Stokes.

El modelo matemático que describe el comportamiento de la hidrodinámica de lechos fluidizados se toma como el que proponen (Cornelissena, et al., 2007). Los valores de operación del simulador se consideran a partir de los resultados publicados por (Davarnejad, et al., 2014).

El problema planteado se resuelve tomando en cuenta una geometría en 2D que representa a una columna de diámetro de 0.05 m, altura de la columna de 1.4 m más una altura de lecho de 0.05 m (ver Fig. 1), la cual contiene agua como fase continua y partículas de acero o plomo como fase dispersa según sea el caso.

Se simulan cuatro casos de estudio con la finalidad de comparar el comportamiento hidrodinámico de una columna de lechos fluidizados con diferente tipo de partículas.

Las simulaciones se realizan con diferentes flujos de entrada al sistema según las características de las partículas (4, 7, 10, 15, 18 y 30 Gal/min), condiciones de no deslizamiento para las paredes de la columna y presión de salida como condiciones de frontera. Se construye una malla cuadrangular de 60 x 550 (base x altura) con 61771 nodos a resolver. Se considera un criterio de convergencia de 1×10^{-3} y un paso del tiempo de 5×10^{-3} durante un tiempo de simulación de 10 s (Davarnejad, et al., 2014).

En el primer caso de estudio se toman como partículas sólidas de fase dispersa un material de acero al carbono con un diámetro de partícula (dp) de 3.21 mm, con una densidad (ρ) de 6900 Kg/m^3 tomando como flujos de entrada 4, 7, 10, 15 y 18 gal/min.

En el segundo caso de estudio se toman como partículas sólidas de la fase dispersa un material de plomo con un diámetro de partícula (dp) de 2.49 mm, con una densidad (ρ) de 12370 Kg/m^3 tomando como flujos de entrada 4, 7, 10, 15 y 18 gal/min

ISBN 978-607-8242-11-5

En el tercer caso de estudio se toman como partículas sólidas de fase dispersa un material de acero al carbono con un diámetro de partícula (dp) de 3.21 mm, con una densidad (ρ) de 6900 Kg/m^3, tomando como Flujo de entrada de 15 Gal/min.

En el cuarto caso de estudio se toman como partículas sólidas de la fase dispersa un material de plomo con un diámetro de partícula (dp) de 2.49 mm, con una densidad (ρ) de 12370 Kg/m^3. Tomando como Flujo de entrada de 30 Gal/min.

Para todos los casos de estudio se consideran las propiedades constantes durante el proceso

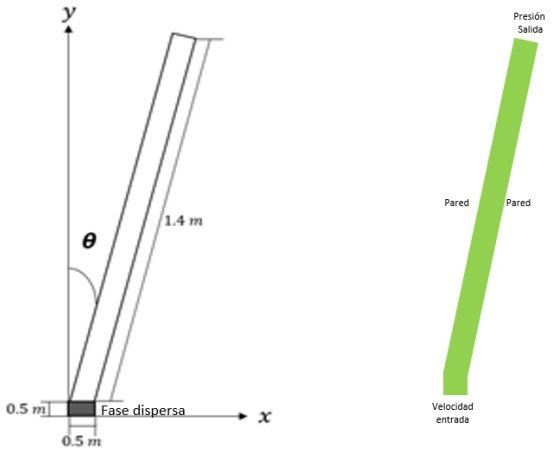


Fig. 1: Geometría y modelo en 2D con condiciones de frontera, malla cuadrangular con 61771 nodos

El Modelo

A continuación se presentan las ecuaciones que describen el comportamiento hidrodinámico de una columna de lechos fluidizados, descrito por (Cornelissena, et al., 2007).

Ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q\right)=0 \tag{1}$$

Ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_l \rho_l \vec{v}_l\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_l \rho_l \vec{v}_l^{\,2}\right)=-\alpha_l \nabla p+\nabla\cdot\overline{\overline{\tau}}_l+\alpha_l p_l \vec{g}+K_{sl}\left(\vec{v}_s-\vec{v}_l\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s^{\,2}\right)=-\alpha_s \nabla p+\nabla p_s+\nabla\cdot\overline{\overline{\tau}}_s+\alpha_s p_s \vec{g}+K_{ls}\left(\vec{v}_l-\vec{v}_s\right) \tag{3}$$

$$\overline{\overline{\tau}}_q=\alpha_q \mu_q\left(\nabla\cdot\vec{v}_q+\nabla\cdot\vec{v}_q^{\,T}\right)+\alpha_q\left(\lambda_q-\frac{2}{3}\mu_q\right)\nabla\cdot\vec{v}_q\,\overline{\overline{I}} \tag{4}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Donde:

Símbolo	Descripción
Letras Alfabéticas	
p	Presión
K	Coeficiente de Intercambio de Fase
t	Tiempo
g	Gravedad
v	Velocidad
Letras griegas	
α	Fracción Volumétrica
ρ	Densidad
$\overline{\overline{\tau}}$	Tensor de Esfuerzos
μ	Viscosidad
$\overline{\overline{I}}$	Tensor de Esfuerzos (Adimensional)
Subíndices	
l	Fase Líquida
s	Fase Sólida
q	Según sea el caso de la Fase sólida o Fase Líquida

Resultados

En la Fig. 2 se observa el comportamiento de la fluidización de manera experimental para el primer caso de estudio. En cada una de las imágenes presentadas se muestra el comportamiento a distintos flujos de operación del sistema (4, 7, 10, 15 y 18 gal/min), así como las etapas que se presentan en el comportamiento de una columna de lecho fluidizado descrito por (Kunni & Levenspiel, 1993).

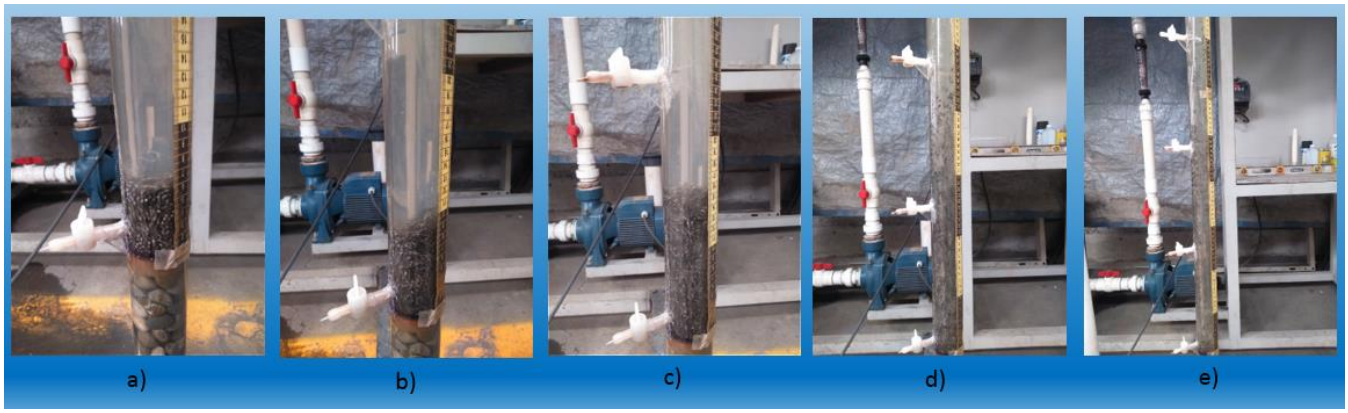


Fig. 2: Modelo experimental; particulas sólidas de material de acero al carbono con un dp = 3.21 mm, ρ = 6900 Kg/m^3 . Este estudio describe el comportamiento de la fluidización a diferentes flujos de entrada al sistema: a) 4 gal/min, b) 7 gal/min, c) 10 gal/min, d) 15 gal/min y e) 18 gal/min.

En la Fig. 3 se muestra la simulación de la evolución de la fracción volumétrica de los sólidos, con la que se puede describir la distribución de las partículas a lo largo de la columna para el primer caso de estudio. En cada una de las imágenes presentadas en la figura se muestra el comportamiento a distintos flujos de operación del sistema (4, 7, 10, 15 y 18 gal/min)

ISBN 978-607-8242-11-5

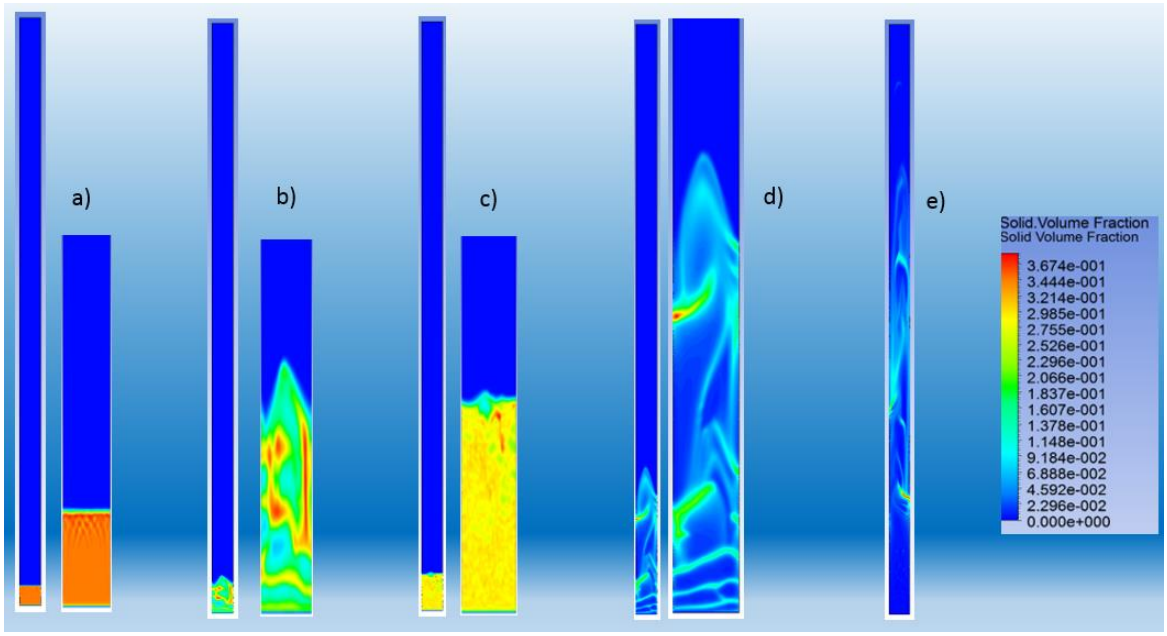


Fig. 3: Simulación: partículas sólidas de material de acero al carbono con un dp = 3.21 mm, (ρ) = 6900 Kg/m^3. Este estudio describe el comportamiento de la fluidización a diferentes flujos de entrada al sistema: a) 4 gal/min, b) 7 gal/min, c) 10 gal/min, d) 15 gal/min y e) 18 gal/min.

Comparando los modelos de las Figuras 2 y 3 se puede observar que en ambos casos se muestra el mismo comportamiento de la fase dispersa en la columna, con lo que se podría validar el modelo matemático y simulación para la distribución de la fase dispersa. Para un flujo de 4 gal/min las partículas se encuentran en una etapa estacionaria, mientras se va incrementando el flujo las partículas comienzan a dispersarse a lo largo de la columna. En la Figura 2 e) y Figura 3 e) se puede observar que las partículas están completamente fluidizadas y que a flujos mayores de 18 gal/min se tiene un sistema con arrastre de partículas donde ya no es considerado como un lecho fluidizado.

En la Fig. 4 se observa el comportamiento de la fluidización de manera experimental para el segundo caso de estudio. En cada una de las imágenes presentadas, se muestra el comportamiento a distintos flujos de operación del sistema (4, 7, 10, 15 y 18 gal/min), así como las etapas que se presentan en el comportamiento de una columna de lecho fluidizado descrito por (Kunni & Levenspiel, 1993).

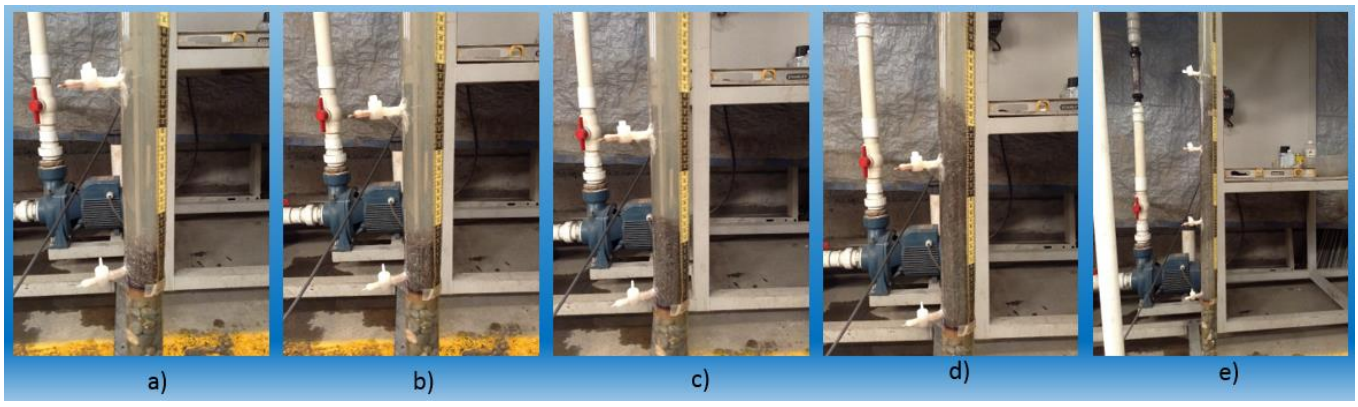


Fig. 4 Figura 1 Modelo experimental; partículas sólidas de material de Plomo con un dp = 2.49 mm, (ρ) = 12370 Kg/m^3. Este estudio describe el comportamiento de la fluidización a diferentes flujos de entrada al sistema: a) 4 gal/min, b) 7 gal/min, c) 10 gal/min, d) 15 gal/min y e) 18 gal/min.

En la Fig. 5 se muestra la simulación de la evolución de la fracción volumétrica de los sólidos, con la que se puede describir la distribución de las partículas a lo largo de la columna para el segundo caso de estudio. En cada una de las imágenes presentadas se muestra el comportamiento a distintos flujos de operación del sistema (4, 7, 10, 15, 18 gal/min).

ISBN 978-607-8242-11-5

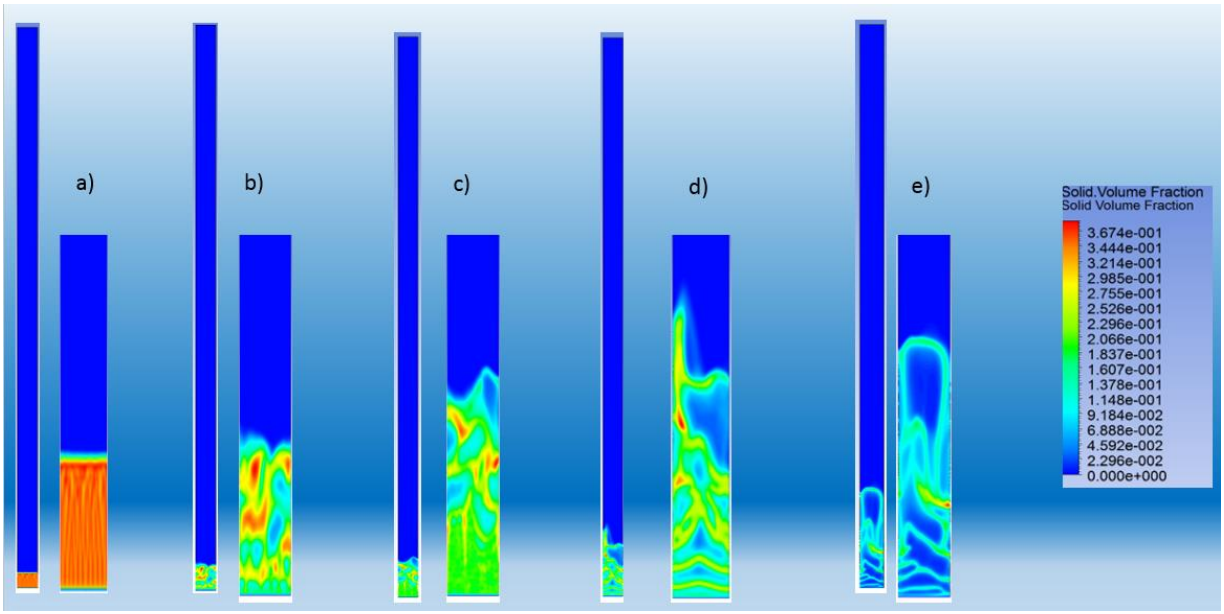


Fig. 5 Simulación; partículas sólidas de material de plomo con un dp = 2.49 mm, (ρ) = 12370 Kg/m^3. Este estudio describe el comportamiento de la fluidización a diferentes flujos de entrada al sistema: a) 4 gal/min, b) 7 gal/min, c) 10 gal/min, d) 15 gal/min y e) 18 gal/min.

Comparando los modelos de las Figuras 4 y 5 se puede observar que en ambos casos se muestra el mismo comportamiento de la fase dispersa en la columna, con lo cual el modelo matemático puede describir y predecir la hidrodinámica de una columna de lechos fluidizados, así mismo se puede observar la evolución de la distribución de la fase dispersa a lo largo de la columna. En la Figura 4 e) y Figura 5 e) se puede observar que las partículas no están completamente fluidizadas como ocurre en la Figura 3 e) ya que en este caso la densidad de las partículas es mayor y a un flujo de 18 gal/min aún no se tiene un sistema con arrastre de partículas.

Al comparar los modelos hidrodinámicos de los dos casos de estudio, se pueden mostrar similitudes en la evolución de la fase dispersa a lo largo de la columna mostrando las etapas que se presentan en el comportamiento de una columna de lecho fluidizado descrito por (Kunni & Levenspiel, 1993). Para ambos casos se puede observar que se tiene una etapa de: Lecho fijo. Altura lecho constante, flujo se filtra entre partículas (ver Figuras 2, 3, 4, 5, inciso a), Lecho prefluidizado. Vibración partículas, velocidad mínima fluidización (ver Figuras 2, 3, 4, 5, inciso b). Lecho fluidización particulada. Expansión suave entre las partículas (ver Figuras 2, 3, 4, 5, inciso c). Lecho fluidización aregativa. Fluido circula sobre toda la columna (ver Figuras 2, 3, 4, 5, inciso d)).

Por otro lado, aunque los dos modelos describen la hidrodinámica de la columna, las alturas de las distribuciones de las etapas anteriormente descritas no son las mismas, ya que las partículas analizadas tienen una densidad y un diámetro de partícula diferente. Para el segundo caso de estudio se tienen partículas con una densidad de casi el doble de unidades del otro caso, por lo que las alturas de las distribuciones de la fase dispersa a lo largo de la columna son menores.

En la Figura 6 se muestra la distribución de la velocidad, para los dos casos de estudio, a lo largo de la columna operando el sistema con un flujo de 18 gal/min. En la cual se puede observar que para la columna que contiene partículas de acero al carbón (Ver Figura 6a)) la fase dispersa se encuentra totalmente fluidizada. Por otro lado, la columna que tiene partículas de Plomo (ver Figura 6 b)) la fase dispersa se encuentra en la etapa de la expansión del lecho. Para poder obtener una fase dispersa totalmente fluidizada es necesario agregar más flujo de entrada al sistema.

ISBN 978-607-8242-11-5

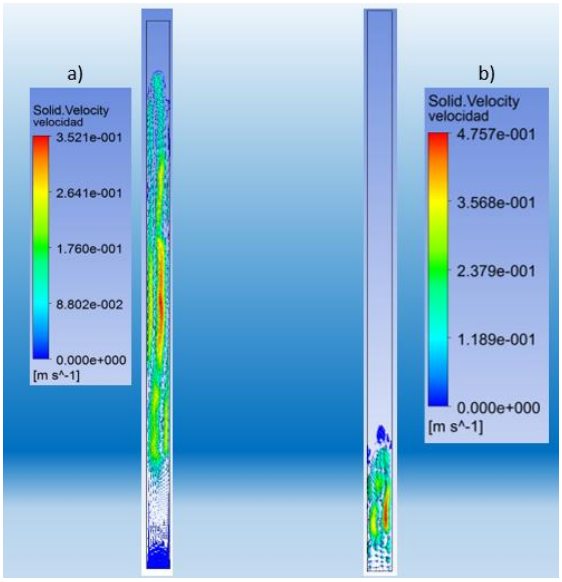


Fig. 6 Distribución de velocidades en la columna de lecho fluidizados: a) Sistema con partículas de acero al carbón; b) sistema con partículas de plomo

Partiendo de los resultados obtenidos con las simulaciones de los dos primeros casos de estudio se simularon los sistemas dos sistemas restantes, los cuales contienen un grado de inclinación en la columna.

Para el tercer caso de estudio. En la Fig. 7 se muestra la evolución de la fracción volumétrica de los sólidos resuelto en un tiempo de 20 segundos en función del ángulo de inclinación de la columna, el resultado de la solución numérica del problema planteado, en la Figura 7 a) se observa que las partículas están distribuidas a los largo de la toda la columna considerando un lecho totalmente fluidizado, sin embargo en la Figura 7 c) se observa que la distribución de las partículas a lo largo de la columna tienden a desplazarse sobre la pared inferior. Con una disminución en el grado de inclinación, en la Figura 7 b) las partículas tienden a ascender de manera más uniforme asemejándose a una columna en posición vertical.

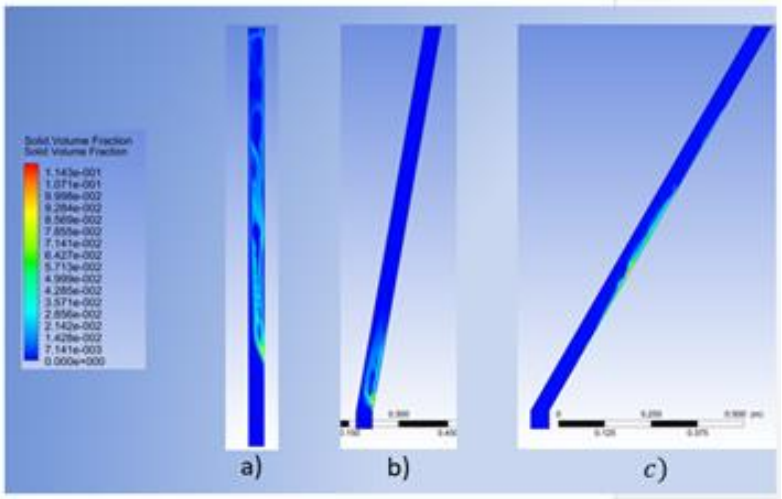


Fig. 7 Tercer Caso de estudio. Flujo de entrada de 15 Gal/min. Evolución de la fracción volumétrica de solidos con ángulo de inclinación a) 0°s, b) 10°, c) 40°

Para el segundo caso de estudio, en la Fig. 8 se muestra la evolución de la fracción volumétrica de los sólidos resuelto en un tiempo de 20 segundos en función del ángulo de inclinación de la columna el resultado de la solución numérica del problema planteado con un flujo de entrada de 30 Gal/min, ya que en simulaciones anteriores se comprobó que se requería más velocidad de entrada debido a la densidad de las partículas, en la Figura 8 a) se observa que las partículas están distribuidas a los largo de la toda la columna considerando un lecho totalmente fluidizado, sin embargo en la Figura 8 c) se observa que la distribución de las partículas a lo largo de la columna tienden a desplazarse sobre la pared inferior. Con una disminución en el grado de inclinación, en la Figura 8 b) las partículas tienden a ascender de manera más uniforme asemejándose a una columna en posición vertical.

ISBN 978-607-8242-11-5

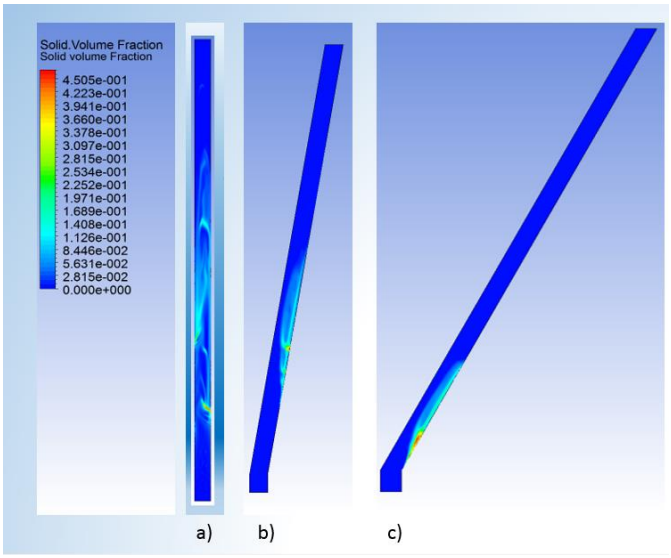


Fig. 8 Cuarto Caso de estudio. Flujo de entrada de 30 Gal/min. Evolución de la fracción volumétrica de solidos con ángulo de inclinación a) 0°s, b) 10°, c) 40°

En la Fig. 9 se muestra la distribución de la velocidad, para los dos casos de estudio, a lo largo de la columna operando el sistema con un flujo de 15 gal/min y 30 gal/min (Ver Figura 9a) y Figura 9b)) respectivamente. En las cuales se puede observar que para ambos casos la fase dispersa se encuentra totalmente fluidizada, aunque con diferentes grados de distribución de las partículas, debido a la diferencia de diámetros y densidades de cada partícula.
Asi mismo se puede observar en la Fig. 4 que las partículas sólidas exhiben un material con movimiento circulante dentro de la columna. Así mismo podría implicarse que la circulación de las partículas sólidas tiene lugar debido a la mezcla de efectos de todas las fuerzas que actúan sobre las partículas sólidas

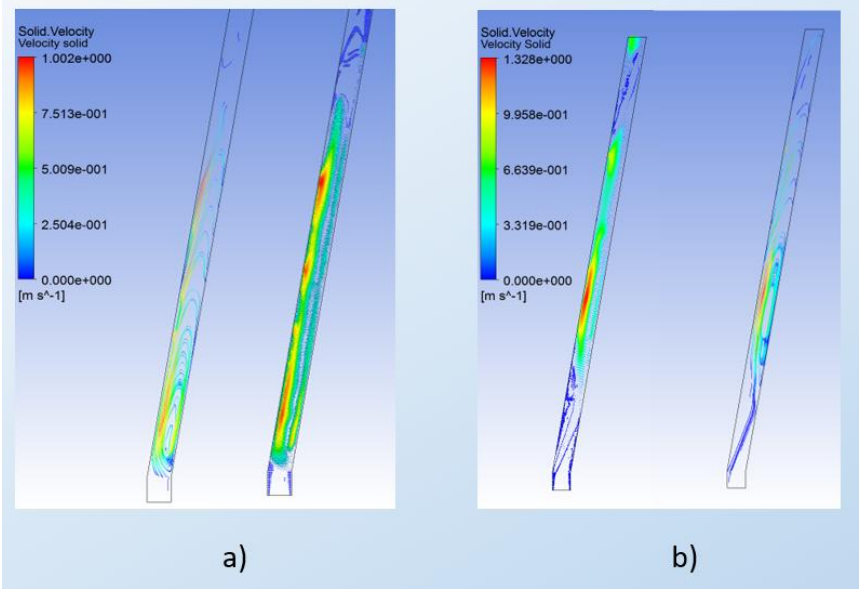


Fig. 9 Velocidad de la fase dispersa en las columnas con un ángulo de inclinación de 10°. a) Primer caso de estudio flujo de entrada de 15 Gal/min, b) Segundo caso de estudio flujo de entrada de 30 Gal/min

En la Fig. 10 se puede observar la distribución de velocidad de la fase dispersa en líneas de corriente, con la finalidad estudiar la hidrodinámica que se tiene en la columna según sea la variación del ángulo de inclinación de la columna. En la Figura 10 a) se puede observar que la distribución de las partículas es más uniforme a lo largo de la columna asemejándose a una columna totalmente vertical, sin embargo en la Figura 10 b) se puede observar que la distribución de la fase dispersa no es uniforme a lo largo de la columna. Por lo que se puede comprobar que al disminuir el ángulo de inclinación no es posible obtener una fluidización adecuada. Como se mencionó anteriormente la circulación de las partículas sólidas tiene lugar debido a la mezcla de efectos de todas las fuerzas que actúan sobre cada una de partículas sólidas y se podría confirmar que el ángulo de inclinación propicia diferentes grados de mezcla de un sistema con partículas sólidas en un lecho fluidizado inclinado.

ISBN 978-607-8242-11-5

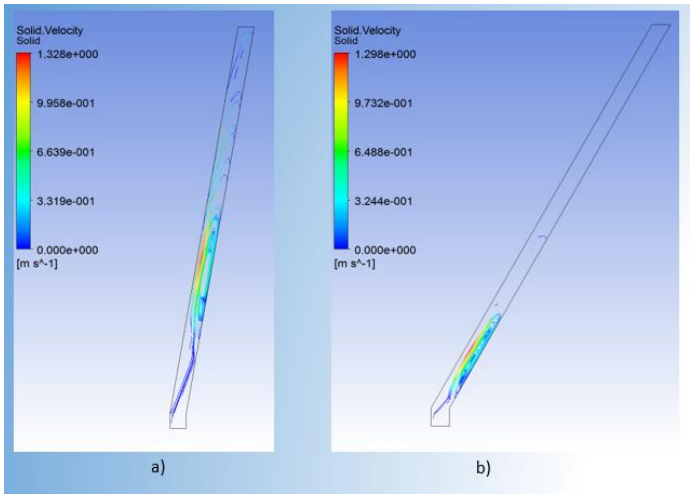


Fig. 10 Velocidad de la Fase dispersa del Segundo caso de estudio, partículas de plomo con diferente ángulo de inclinación: a) 10° y b) 40°

Conclusiones

Se cuenta con un modelo en 2D que describe la hidrodinámica de una columna de lechos fluidizados, con dicho modelo es posible cambiar el tipo de partícula, altura de la fase dispersa. Para que con la resolución del modelo sea posible obtener las mejores condiciones de operación de la columna experimental con la que se cuenta.

En un sistema de fluidización es importante conocer las propiedades de la fase continua y de la fase dispersa, ya que para estás tienen un gran impacto en la hidrodinámica del sistema que se quiera analizar. En este trabajó se demostró la importancia que se tiene en la densidad y tamaño de las partículas que se deseen analizar para lograr una fluidización.

Por otro lado con el grado de inclinación se pudo observar que la fluidización se produce parcialmente a lo largo de la sección transversal de la columna debido a la asimetría flujo del líquido, ya que el lecho de partículas ejercen mayor resistencia al flujo, lo que resulta en un menor flujo local. Las partículas con una mayor densidad ejercen mayor resistencia al flujo ocasionando un menor flujo de entrada local. Respecto a los criterios de inicio de la fluidización, la velocidad de fluidización en la dirección naturalmente vertical debe ser igual a la velocidad de fluidización mínima, donde la que la fuerza de arrastre ejerciendo sobre las partículas sólidas está en un equilibrio con las fuerzas de gravedad y flotabilidad. Con este criterio, es comprensible que para columnas con un ángulo de inclinación sólo algunas porciones del lecho de partículas son en las que la velocidad vertical del líquido es igual o superior a la velocidad mínima de fluidización considerando ambos componentes de la velocidad de partícula.

Por último se comprobó que al variar ángulo de inclinación de la columna el efecto de circulación de la fase dispersa es diferente un estudio se podría emplearse para determinar las grado de mezcla de partículas sólidas dentro de una columna de lecho fluidizado.

ISBN 978-607-8242-11-5

Referencias

Barreira, V. M. *Estudio Hidrodinámico de un lecho fluidizado,* Madrid: Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos (2007).

Cornelissena, J. T., Taghipoura F., Escudiéa R., Naoko E., Greacea J., *CFD modeling of a liquid-solid fluidized bed*. Chemical Engineering Science*,* pp. 6334-6348 (2007)

Davarnejad, R., Eshghipor, R., Abdi, J. & Dehkordi, F. B.. *CFD modeling of a Binary Liquid-Solid Fluidized bed*. Middle-East Journal of Scientific Research*,* 19(10), pp. 1272-1279. (2014)

Kunni, D. & Levenspiel, O.. *Fluidization Engineering.* Second ed. s.l.:Butterworth-Heinemann, (1993)

Mc Cabe & Smith, J. C., *Operaciones unitarias en Ingeniería Química.* México: Mc Graw Hill. (2002)

O´Dea, D. P., Chong, Y. O. & Rudolph, V. T*he effect of inclination on fluidized beds*. *Powder Technology,* Volumen 63, pp. 169-178 (1990)

Patiño, G., Rocha, J. A. & Flores, L. *Flujo de gas y partículas en un lecho fluidizado empleando dinámica de fluidos computacional*. *Aplicación al craqueo catalítico*. Tecnología, Ciencia, Educación*,* 25(1), pp. 44-52. (2010)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Simulación de una fermentación a distintos tiempos de cultivo en un biorreactor tipo tanque agitado

Valaur Ekbalam Márquez-Baños [1], Jorge Ramírez-Muñoz [2], José Javier Valencia-López [3]
(1) Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México, MÉXICO.
(2) Departamento de Energía, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, MÉXICO.
(3) Departamento de Procesos y Tecnología, División de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga 4871, Cuajimalpa de Morelos, Santa Fe, 05348, Ciudad de México, MÉXICO. e-mail: jvalencia@correo.cua.uam.mx

Resumen

En los últimos años, la caracterización hidrodinámica de los biorreactores se ha mejorado debido a los avances en la tecnología del mezclado, buscando siempre una mayor homogeneidad. El uso de técnicas computacionales de modelado ha ayudado a mejorar la compresión de los fenómenos ocurridos durante los procesos de fermentación. En este trabajo se presenta un análisis CFD del cultivo de *Beauveria bassiana* a determinados tiempos de fermentación, obteniéndose diferencias significativas en los patrones de flujo a cada tiempo, debido al comportamiento reológico dependiente de la concentración de biomasa. Se han calculado el consumo de potencia y coeficiente de transferencia de oxígeno para cada tiempo de fermentación.

Simulation of a fermentation at different culture times in a stirred tank type bioreactor

Abstract
In recent years, the hydrodynamic characterization of bioreactors has been improved due to advances in mixing technology, always seeking greater homogeneity. The use of computational modeling techniques has helped to improve the compression of the phenomena that occurred during fermentation processes. In this work, a CFD analysis of *Beauveria bassiana* culture is presented at certain fermentation times, obtaining significant differences in the flow patterns at each time, due to the rheological behavior dependent on the concentration of biomass. The power consumption and oxygen transfer coefficient have been calculated for each fermentation time.

Keywords: CFD, bioreactor, *Beauveria bassiana, simulation.*

INTRODUCCIÓN

Beauveria bassiana es un hongo ascomiceto mitospórico que crece de forma natural en los suelos de todo el mundo. Su poder entomopatógeno le hace capaz de parasitar a insectos de diferentes especies, causando la conocida enfermedad blanca de la muscardina (Wraight et al., 2000). Por ello en la actualidad, *Beauveria bassiana* se emplea con éxito en la lucha biológica contra diferentes plagas: mosca blanca, trips y pulgones principalmente, y en menor grado otras plagas como picudos, piojos y otros insectos y su cultivo en fermentación sumergida a nivel es gran interés (SENASICA, 1999).

El estudio hidrodinámico de sistemas de fermentación basado en casos reales, en los cuales sea considerado el comportamiento reológico del cultivo es vital importancia ya que de esta manera posible realizar una mejor evaluación del proceso mezclado, la presencia de cavernas y medición de la tasa de corte, en base a lo cual es posible proponer cambios en el sistema con la finalidad de optimizar estos parámetros (Xia et al., 2009). En el caso especial de los sistemas biológicos el problema no reside solo en que el fluido presenta un comportamiento no newtoniano, si no en que este presenta un reología cambiante durante el tiempo de fermentación, estos cambios son causados por la variación de una o más de las propiedades del caldo como puede ser la concentración y morfología de las células, incluyendo su tamaño, forma, flexibilidad/deformabilidad y masa, la presión osmótica del fluido en que se suspenden, la concentración de sustratos productos poliméricos y la tasa de corte por mencionar algunos (Doran y Francisco, 1995).

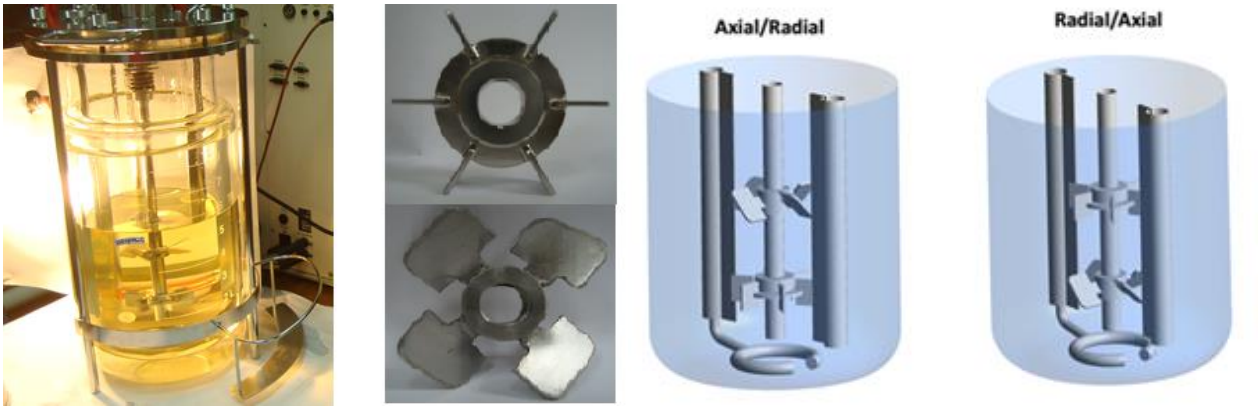
 ISBN 978-607-8242-11-5

Como todo hongo filamentoso al crecer en un biorrector tipo tanque agitado, el caldo de cultivo tiende a presentar importantes cambios en sus propiedades reológicas, modificando constantemente las condiciones hidrodinámicas del sistema. Una mala mezcla puede tener un impacto negativo provocando una baja en la calidad del producto, en biorreactores y los reactores multifásicos suele causar bajas tasas de transferencia de masa (Ranade, 2002). Los flujos turbulentos se utilizan a menudo para lograr altas tasas de mezcla, pero hay muchos casos en los que trabajar en el régimen laminar es inevitable (Lamberto et al., 2001).

Existen pocos datos sobre el flujo y la mezcla en los biorreactores tipo tanque agitado en el régimen laminar, sin embargo la representación de estos fenómenos a través del planteamiento de modelos computacionales, permite predecir de forma adecuada lo ocurrido en los sistemas de agitación para biorreactores, por ello el objetivo del presente trabajo es determinar la influencia del cambio en el comportamiento reológico del cultivo de *Beauveria bassiana* sobre el patrón de flujo y su relación con la productividad en un biorreactor tipo tanque agitado con 2 combinaciones de impulsores.

METODOLOGÍA

El sistema en cuestión, es un biorreactor a escala-laboratorio de 6 L de volumen de trabajo, marca B.Braun Biostat B 10L BioReactor. El sistema de mezclado del biorreactor consiste de 2 baffles, agitado mecánicamente mediante pares de impulsores Radial (6 hojas, di=6.8 cm) y/o Axial (4 hojas 45°, di=6.8cm), con combinaciones entre ellos. Los agitadores son colocados a una distancia entre agitador inferior y superior de 64 mm (L=d), según lo reportado en la literatura, como relación óptima (Oniscu et al., 2001). El sistema experimental y su digitalización CAD se presenta en Figura 1.



a) *b)*

Figura 1.- Sistema de fermentación de *Beauveria bassiana*: a) Experimental, b) Digitalización CAD.

Este sistema fue utilizado un trabajo experimental previo, realizado por Núñez-Ramírez et al. (2012), en cual se analizó el efecto del comportamiento reológico de la fermentación de un hongo sobre el mezclado de dicho proceso. Se ha tomado los valores de la reología del caldo de cultivo al inicio de la fermentación (0 h) y al punto en el que la biomasa fue máxima (72 h), los cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros reológicos del caldo de fermentación de *B. bassiana* (Núñez-Ramírez et al., 2012).

Configuración	**Axial/Radial**		**Radial/Axial**	
Tiempo	0 h	72 h	0 h	72 h
***K* (Pa·s^n)**	0.0174	6.667	0.0174	10.630
***n* (-)**	0.4858	0.0304	0.4858	0.0132

El modelo computacional se realizó en Ansys Fluent 16.2 y se resolvió un modelo de flujo bifásico Euler-Euler incorporando el modelo de turbulencia κ-ε (Xia et al., 2009), a través de un malleo poliédrico fino en las zonas de los impulsores y el difusor y hexaedros en el resto del tanque, con un total de 1207719 elementos. Se realizaron estudios bajo régimen transitorio empleando una metodología MRF (Multiple Reference Frame, por sus siglas en inglés) para una velocidad agitación de 300 rpm. Como método de solución se definió el uso de

ISBN 978-607-8242-11-5

un método acoplado con discretizaciones de segundo orden, obteniéndose buenos resultados con una tolerancia relativa de 10^{-6}.

El k_La fue calculado mediante la teoría de la penetración de Higbie y la potencia consumida a través del torque ejercido por el fluido sobre las paredes del eje y los impulsores (Fayolle et al., 2007).

RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra una comparación del perfil de velocidad a 300 rpm en la configuración Axial/Radial a tiempo 0, correspondiente a la viscosidad al inicio de la fermentación y a las 72 de cultivo en las configuraciones Axial/Radial y Radial/Axial, punto en donde esta alcanza su valor máximo. En esta imagen se puede apreciar que debido a la extrema elevación en la viscosidad y cambio en el comportamiento reológico el sistema tanto el patrón de flujo como la magnitud de la velocidad en el seno del fluido se ven afectados.

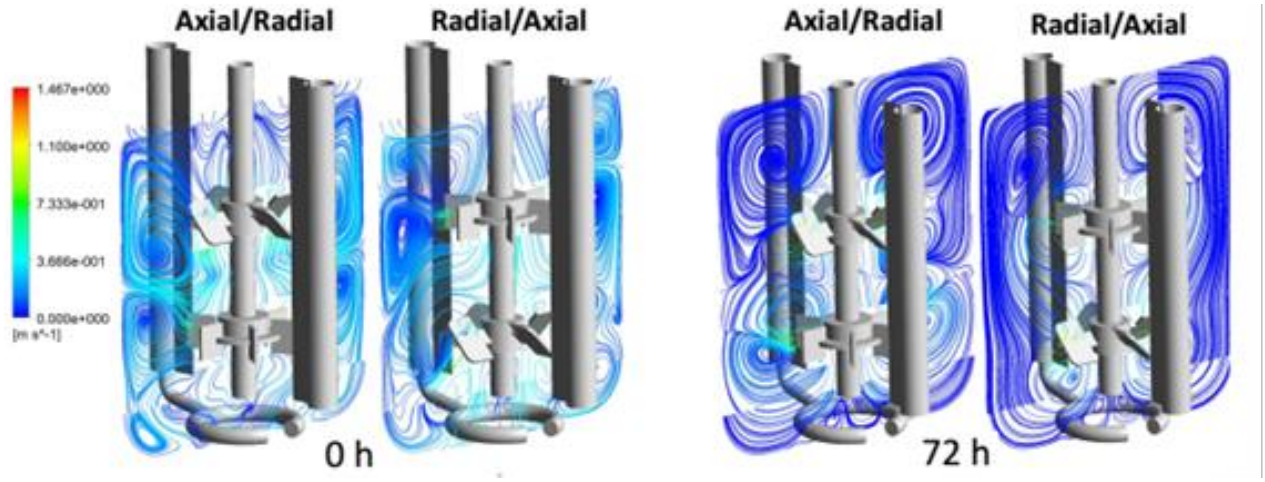


Figura 2. Líneas de corriente en los biorreactores analizados.

Estas imágenes muestran que cambio el comportamiento reológico del medio, debido al incremento en la concentración de la biomasa en el reactor, provoca que la hidrodinámica desarrollada se modifique significativamente, obteniéndose al final de la proceso de fermentación un medio con una alta viscosidad y un comportamiento al flujo extremamente adelgazante, lo cual genera zonas de flujo estancando y poca recirculación, provocando un mezclado ineficiente bajo la presencia de una alta densidad celular. Esto sugiere que el uso de impulsores de proximidad para el mezclado de casos fermentación en los cuales la viscosidad aumenta significativamente, no puede ser considerado como una única opción de diseño (Chhabra y Richardson, 1999).

En el caso de la configuración Radial/Axial, se aprecia un flujo más extenso en la zona inferior del tanque. En ambas configuraciones se distingue una región de alto mezclado en la zona central del tanque, esto provoca una caverna común en sistemas de fermentación con un comportamiento de adelgazamiento al corte. La forma de este perfil de flujo se encuentra relacionada con el cambio en la viscosidad dependiente de la velocidad de corte, al reducirse la viscosidad en las inmediaciones de los impulsores provoca que lo toroides de flujo se absorban unos a otros, sin embargo, fuera zona de alto corte la viscosidad aumenta generando una caída en la velocidad cada vez mayor. Esto puede se puede ver en el la Figura 3 para las configuraciones estudiadas durante la producción de *B. bassiana*.

ISBN 978-607-8242-11-5

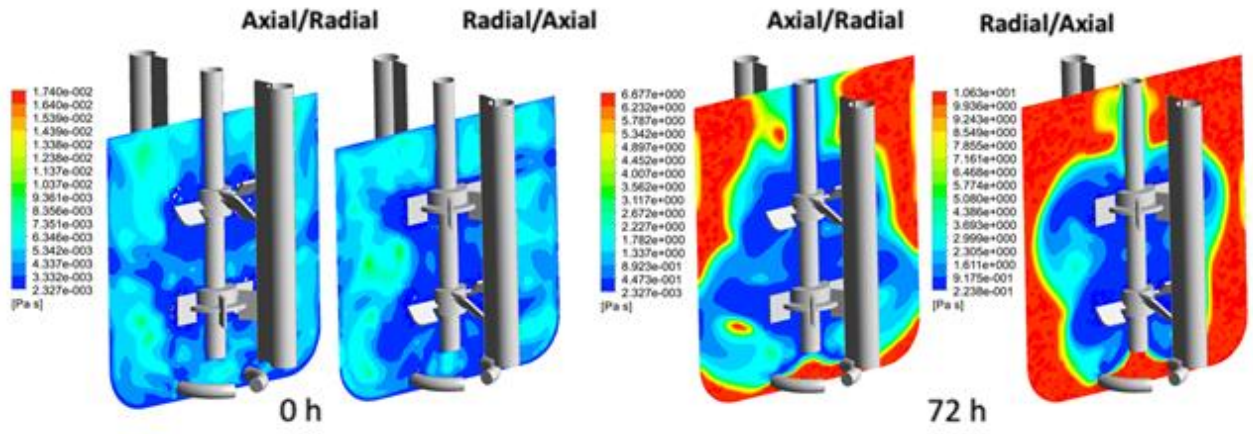


Figura 3.- Perfil de viscosidad (Pa·s) para el caldo de fermentación de *Beauveria bassiana* a 300 rpm en la configuración.

En la Figura 4, se presentan los perfiles de fracción volumétrica de la fase gas, en donde se distingue una mejor distribución de gas en la configuración Radial/Axial a las 72 h, notándose una mayor área en color rojo, que indica una fracción de burbujas superior al 50%, lo que ocasiona una mayor transferencia de oxígeno en el sistema.

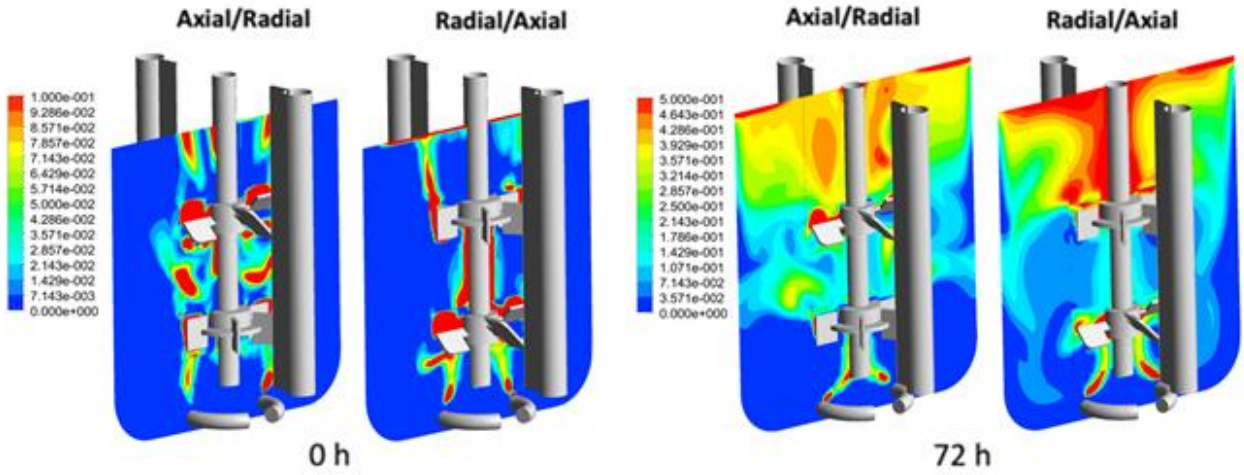


Figura 4. Perfil de fracción volumétrica de la fase gas en los biorreactores analizados.

Esto se resume en la Tabla 2 donde se presentan los valores estimados del k_La y la potencia (P). Como se puede observar la configuración Radial/Axial presenta los valores de k_La más elevados con un consumo de potencia menor en comparación a la otra configuración.

Tabla 2. Valores de P y k_La calculados a distintos tiempos de fermentación.

Configuración	**Axial/Radial**		**Radial/Axial**	
tiempo	0 h	72 h	0 h	72 h
k_La (h^{-1})	5.999	4.377	6.142	5.055
P (W)	0.841	1.148	0.862	1.072

Estas mejoras se vieron reflejadas en el sistema experimental con la configuración Radial/Axial como un incremento de la productividad de biomasa del 20%, presentando una mayor concentración de biomasa a lo largo de la fermentación, tal como se muestra en la Figura 5.

ISBN 978-607-8242-11-5

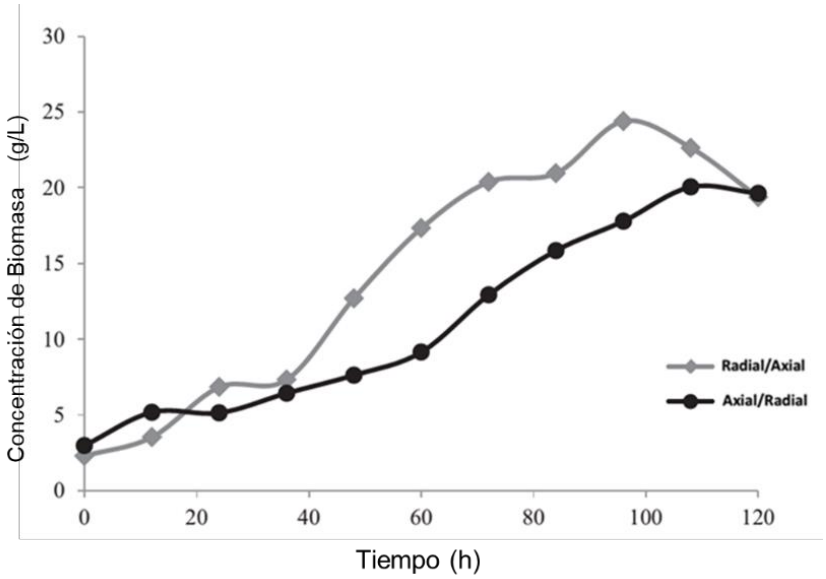


Figura 5. Cinéticas de crecimiento de *B. bassiana* en los biorreactores con la configuración Radial/Axial y Axial/Radial (Núñez-Ramírez et al., 2012).

Este incremento en la productividad también puede ser atribuido a que la configuración Radial/Axial produjo una mayor comunicación entre las zonas de recirculación lo cual mejora considerablemente la hidrodinámica del sistema de mezclado en el caso de fluidos no newtonianos. Este efecto también es evidente en el caso del caldo fermentación de *Beauveria bassiana*, en el cual no solo promueve esta comunicación, sino que además el patrón de flujo también evita la sedimentación de sólidos en la parte inferior del tanque, para casos como este fue posible identificar una caverna, donde se limitaba el movimiento, fuera de esta era prácticamente nulo. Esto se debe al uso de los impulsores de proximidad, que al inicio de la fermentación son suficientes, sin embargo, pasadas 72 horas, no logran mezclar adecuadamente a causa de la elevación en la viscosidad del medio.

CONCLUSIONES

La combinación de impulsores que resultó más apropiada para mantener una adecuada transferencia de oxígeno es mediante un impulsor radial en la parte superior y un axial en la parte inferior de la flecha. Esta configuración logra disminuir las zonas de recirculación recursiva y formación de zonas segregadas en el reactor, mejorando la transferencia de masa.

REFERENCIAS

Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (1999). *Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications*: Butterworth-Heinemann.

Doran, P. M., & Francisco, J. (1995). *Bioprocess engineering principles. Principios de ingeniería de los bioprocesos*.

Fayolle, Y., Cockx, A., Gillot, S., Roustan, M., & Héduit, A. (2007). Oxygen transfer prediction in aeration tanks using CFD. *Chemical Engineering Science, 62*(24), 7163-7171. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2007.08.082

Lamberto, D. J., Alvarez, M. M., & Muzzio, F. J. (2001). Computational analysis of regular and chaotic mixing in a stirred tank reactor. *Chemical Engineering Science, 56*(16), 4887-4899. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00407-3

Núñez-Ramírez, D. M., Valencia-López, J. J., Calderas, F., Solís-Soto, A., López-Miranda, J., Medrano-Roldán, H., & Medina-Torres, L. (2012). Mixing Analysis for a Fermentation Broth of the Fungus Beauveria bassiana under Different Hydrodynamic Conditions in a Bioreactor. *Chemical Engineering & Technology, 35*(11), 1954-1961. doi: 10.1002/ceat.201200130

Oniscu, C., Galaction, A.-I., Cascaval, D., & Ungureanu, F. (2001). Modelling of Mixing in Stirred Bioreactors 1. Mixing Time for Non-Aerated Simulated Broths. *ROMANIAN BIOTECHNOLOGICAL LETTERS, 6*, 119-130.

Ranade, V. V. (2002). Reactor engineering and flow modeling. In V. R. Vivek (Ed.), *Process Systems Engineering* (Vol. Volume 5, pp. 3-31): Academic Press.

 ISBN 978-607-8242-11-5

SENASICA. (1999). Uso de Beauveria bassiana como insecticida microbial. *Ficha tecnica CB-03*.

Wraight, S. P., Carruthers, R. I., Jaronski, S. T., Bradley, C. A., Garza, C. J., & Galaini-Wraight, S. (2000). Evaluation of the Entomopathogenic Fungi Beauveria bassiana and Paecilomyces fumosoroseus for Microbial Control of the Silverleaf Whitefly, Bemisia argentifolii. *Biological Control, 17*(3), 203-217. doi: http://dx.doi.org/10.1006/bcon.1999.0799

Xia, J.-Y., Wang, Y.-H., Zhang, S.-L., Chen, N., Yin, P., Zhuang, Y.-P., & Chu, J. (2009). Fluid dynamics investigation of variant impeller combinations by simulation and fermentation experiment. *Biochemical Engineering Journal, 43*(3), 252-260. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.010

 ISBN 978-607-8242-11-5

Composición al equilibrio en la producción de H_2 por reformado de etanol y vapor de agua

J.L.Contreras[1,*], C. Tapia Medina.[1], A. Figueroa[1], G. Fuentes[2], L. Nuño-Licona[1], B. Zeifert[3] , J. Salmones[3], B. Quintana-Díaz[1]
(1) Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, CBI-Energía, Av. Sn. Pablo 180, Col. Reynosa, C.P. 02200, México D.F., México.
(2) Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa,CBI- Depto. de IPH, A.P.55-534, 09340,México, D.F.
(3) Instituto Politécnico Nacional, ESIQIE, Unidad Prof. ALM, México, D. F., 07738, México
E-mail: jlcl@correo.azc.uam.mx *Tel: 5591911047.

Resumen

Con el fin de comparar la composición al equilibrio de los productos de reacción en el reformado de etanol con vapor de agua para producir H_2 a diversas temperaturas, se compararon varios catalizadores,de Co/hidrotalcita-WOx. Se llevó a cabo el cálculo de la composición al equilibrio de los productos de reacción. Se calcularon las constantes de equilibrio termodinámico en función de la temperatura a presión de 1 atm. Los productos de reacción principales fueron: H_2, CH_3CHO, CO_2, CH_4 y CH_2=CH_2. Para este tipo de catalizadores la producción de etileno, acetaldehído y el dietil-éter disminuyeron fuertemente a 500°C.
En los catalizadores estudiados se encontró la presencia de CH_3CHO sugiriendo que la superficie catalítica actuó como un catalizador de deshidrogenación. El H_2 ha sido el producto principal con varias reacciones contribuyendo a su producción al aumentar la temperatura. Debido a que no se encontró CO se supone que si se produce pero reacciona con H_2O para producir CO_2 y más H_2. La comparación de las composiciones al equilibrio calculadas para H_2, C_2H_5OH, CO_2 y H_2O de los catalizadores de Co-hidrotalcita muestra que los preparados con 0.5 y 1% de W mostraron mayor conversión y selectividad a H_2.

Palabras clave: Hidrógeno, Reformado de etanol, Equilibrio, Termodinámico, Catalizadores.

Composition at equilibrium in the production of H_2 by ethanol steam reforming

In order to compare the composition at equilibrium of the reaction products in the ethanol steam reforming to produce H_2 at various temperatures, various catalysts of Ni-hydrotalcite, Ni/Al_2O_3, Co / hydrotalcite, were evaluated. Also, the calculation of the equilibrium composition of the reaction products was carried out. The constants of thermodynamic equilibrium were calculated as a function of the temperature at 1 atm. The main reaction products were: H_2, CH_3CHO, CO_2, CH_4 y CH_2=CH_2. For this type of catalysts the production of ethylene, acetaldehyde and diethyl ether strongly decreased to 500 ° C.
In the catalysts studied the presence of CH_3CHO was found and it was suggesting that the catalytic surface acted as a dehydrogenation catalyst. H_2 has been the main product with several reactions contributing to its production with increasing temperature. Due to no CO was found it is assumed that if it occurs but reacts with H_2O to produce CO_2 and more H_2. We suggest that this reaction is approaching to the equilibrium. The comparison of the equilibrium compositions calculated for H_2, C_2H_5OH, CO_2 and H_2O of the Co-hydrotalcite-WOx catalysts shows that the preparations with 0.5 and 1% W showed higher conversion and selectivity to H_2.

Keywords: Hydrogen, Ethanol reforming, Equilibrium, Thermodynamics, Catalysts.

ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La reacción de reformado con vapor de etanol es fuertemente endotérmica y produce H_2 y CO_2 si el etanol reacciona con agua de la mejor manera. Sin embargo, otros productos indeseables tales como CO y CH_4 también se forman en general durante la reacción (Aupretre et al., 2005). Se producen otras reacciones tales como deshidrogenación de etanol a CH3CHO, deshidratación a CH_2CH_2, descomposición a CO y CH_4 o CO_2, H_2, CH_3CHO, CO_2 y CH_2=CH_2 son productos intermedios que podrían formarse durante la reacción a temperaturas relativamente bajas antes de la formación de H_2 y CO_2 y finalmente la formación de coque sobre la superficie del catalizador.

Para esta reacción, algunos autores [García y Laborde, 1991; Vasudeva et al.,1996] han demostrado que un aumento de la temperatura conduce a un aumento de la concentración de H_2 y CO y una disminución de CH_4 en el equilibrio (Fishtik et al., 2000). Examinaron el equilibrio termodinámico de este sistema y sugirieron temperaturas de operación superiores a 650 K, presión atmosférica y una relación molar de vapor/etanol de 10 en la alimentación para maximizar la producción de H_2, minimizar la formación de CO y CH_4 y evitar la deposición de coque sobre el catalizador. Otros autores (Aupretre et al., 20051) también han realizado un análisis termodinámico del sistema y han demostrado que un incremento en la presión total provoca una disminución de H_2 y CO mientras que la composición de CH_4 en el equilibrio aumenta.

En una aplicación a pilas de combustible, el análisis termodinámico del sistema etanol-agua sugirió que una elevada relación agua-a-etanol en la alimentación redujo el rendimiento de productos indeseables como CO, CH_4 y carbono (Freni et al., 1996).

Ya existen algunos estudios de la composición química en el equilibrio termodinámico para esta reacción (García y Laborde, 1991; Vasudeva et al.,1996; Mas et al., 2006). El objetivo de este trabajo es investigar hasta qué punto la aproximación al equilibrio para el vapor de etanol se está reformando utilizando datos de los catalizadores de Co/Hydrotalcita-WOx previamente estudiados en nuestro laboratorio (Contreras et al., 2010).

La composición en equilibrio se calculó mediante la minimización de la energía libre de Gibbs y el método estequiométrico. Presentamos argumentos para distinguir los compuestos intermedios y finales de la reacción y también determinar el mejor catalizador en términos de conversión y producción de H_2.

Por medio de la diferencia entre los valores de fracción molar calculados menos la media aritmética de la fracción molar experimental del producto o reactivo (Δyi), es posible distinguir cuán cerca están los reactivos (valores negativos Δyi) y productos finales (valores positivos Δyi). También por medio de los valores Δyi para H_2 y la conversión, es posible distinguir que catalizador podría ser más activo.

METODOLOGIA

Evaluación Catalítica

Se evaluaron varios catalizadores de Co/Hydrotalcita-WOx previamente preparados en nuestro laboratorio [(Contreras et al., 2010). El reformado con vapor de etanol catalítico se realizó en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable en forma de U (diámetro interno de 7 mm). Se cargó el catalizador (1 g, malla 100 US) para cada uno de los ensayos de reacción. La alimentación de los reaccionantes comprendía una mezcla gaseosa de etanol (Aldrich), agua como vapor y N_2 (pureza 99,99%, Infra-Air) se suministró mediante una válvula micrométrica de aguja (1 ml/s). Se suministró una mezcla constante H_2O y CH_3CH_2OH (relación molar de 4: 1) en una corriente de N_2 en flujo de gas utilizando dos saturadores de vidrio y esta mezcla se vaporizó y se mantuvo a 100ºC y 1,5 atm antes de introducirse en el micro reactor.

Debido a que los catalizadores se redujeron en flujo de H_2, sólo la temperatura del catalizador se elevó a 450ºC en flujo de N_2 durante 30 min para activar el catalizador y luego el flujo de reactivos comenzó a esta temperatura. El catalizador se mantuvo a esa temperatura durante 30 minutos con el fin de tener tres análisis.

El análisis de los reactivos y de todos los productos de reacción se llevó a cabo en línea por cromatografía de gases. La muestra se dividió en dos porciones que luego se analizaron en un cromatógrafo diferente con el fin de obtener una cuantificación exacta y completa de los productos de reacción. Una de las porciones se usó para analizar H_2, CO, CO_2 y CH_4, usando una columna de gel de sílice 12 grado 60/80 (18'x 1/8 ") con un detector de conductividad térmica (aparato Gow-Mac 550). La segunda porción se utilizó para analizar CH_3CHO,CH_2=CH, CH_3CH_2OH,CH_3COCH_3 y CH_2O con una columna capilar (VF-1ms, 15m x 0,25 mm) en un cromatógrafo Varian CP-3380 con un detector de ionización de llama (FID). Se obtuvieron los factores de respuesta para todos los productos y se calibró el sistema con las normas apropiadas antes de cada prueba catalítica. Las fracciones molares (yi) de cada componente se determinaron a partir del análisis por cromatografía de gases.

Inicialmente, los factores cromatográficos se determinaron construyendo los gráficos de masa del compuesto frente al área correspondiente de cada señal cromatográfica. Luego para cada análisis por TCD o FID, los moles de cada producto se calcularon multiplicando el factor cromatográfico por el área de cada producto. La selectividad de cada producto se calculó dividiendo los moles de producto entre las sumas de

 ISBN 978-607-8242-11-5

los moles de todos los productos. La selectividad se calculó dividiendo los moles de cada producto por la suma de los moles de los productos. La conversión se calculó como la diferencia de los moles iniciales de etanol alimentados menos los moles de etanol a la salida del reactor, divididos por los moles de etanol alimentados.

Tabla 1.Composición y área específica de los catalizadores de Co/hidrotalcita-WOx

Catalysts	Ni (wt%)	Pt (wt%)	Co (wt%)	W (wt%)	Area Espec. (m^2/g)
HTC	0	0	1	0	258
HTC0.5W	0	0	1	0.5	202
HTC1W	0	0	1	1	173
HTC2W	0	0	1	2	187
HTC3W	0	0	1	3	181

Cálculos de equilibrio químico

Con el fin de comparar nuestros resultados experimentales con la composición de equilibrio químico, se consideró la siguiente información: (i) qué compuesto aparece y que no aparece en nuestras condiciones de reacción y especialmente lo que sucede con el CO, (ii) hasta qué punto están las composiciones del producto de reacción con la predicción al equilibrio. Se utilizó la estequiometria y métodos de minimización de la energía libre Gibbs para saber cuál fue el mejor catalizador.

Las reacciones que se consideraron fueron:

$CH_3CH_2OH + 3H_2O \rightarrow 2\ CO_2 + 6H_2$ (1)
$CH_3CH_2OH \rightarrow CH_3CHO + H_2$ (2)
$CH_3CHO \rightarrow CH_4 + CO$ (3)
$CH_3CHO + H_2O \rightarrow CH_4 + CO_2 + H_2$ (4)
$CH_3CH_2OH \rightarrow CH_2CH_2 + H_2O$ (5)
$CH_2CH_2 + H_2O \rightarrow CH_4 + CO + H_2$ (6)
$CH_2CH_2 + 2H_2O \rightarrow CH_4 + CO_2 + 2H_2$ (7)
$CH_3CH_2OH \rightarrow CH_4 + CO + H_2$ (8)
$CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CO_2 + CH_4 + 2\ H_2$ (9)
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ (10)
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (WGS reaction) (11)

La constante de equilibrio para cada reacción fue calculada por medio de la ecuación que la relaciona con el cambio de energía libre de Gibbs. Así mismo encontramos la variación de la constante de equilibrio por medio de la ecuación de Van´t Hoff que expresa esta relación en forma diferencial.

$$d(\ln Ki)/dT = \Delta H^\circ / R\,T^2 \quad (12)$$

Cada constante de equilibrio fue expresada de acuerdo al listado de reacciones previas como sigue:

$$K_1 = \frac{[y_{CO2}]^2\,[y_{H2}]^6}{[y_{OH}]\,[y_{H2O}]^3}\,P^{\Delta n} \quad (13)$$

$$K_2 = \frac{[y_A]\,[y_{H2}]}{[y_{OH}]}\,P^{\Delta n} \quad (14)$$

$$K_3 = \frac{[y_{CO}]\,[y_M]}{[y_A]}\,P^{\Delta n} \quad (15)$$

$$K_4 = \frac{[y_{CO2}]\,[y_{H2}]\,[y_M]}{[y_A]\,[y_{H2O}]}\,P^{\Delta n} \quad (16)$$

$$K_5 = \frac{[y_{Et}]\,[y_{H2O}]}{}\,P^{\Delta n} \quad (17)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

$$K_6 = \frac{[y_{OH}]}{[y_{CO}]\,[y_{H2}]\,[y_M]}\,P^{\Delta n} \quad (18)$$

$$K_7 = \frac{[y_{CO2}]\,[y_{H2}]^2\,[y_M]}{[y_{Et}]\,[y_{H2O}]^2}\,P^{\Delta n} \quad (19)$$

$$K_8 = \frac{[y_{CO}]\,[y_{H2}]\,[y_M]}{[y_{OH}]}\,P^{\Delta n} \quad (20)$$

$$K_9 = \frac{[y_{CO2}]\,[y_{H2}]^2\,[y_M]}{[y_{OH}]\,[y_{H2O}]}\,P^{\Delta n} \quad (21)$$

$$K_{10} = \frac{[y_{CO}]\,[y_{H2}]^3}{[y_M]\,[y_{H2O}]}\,P^{\Delta n} \quad (22)$$

$$K_{11} = \frac{[y_{CO2}]\,[y_{H2}]}{[y_{CO}]\,[y_{H2O}]}\,P^{\Delta n} \quad (23)$$

Donde $\Delta n = \Sigma$(Coeficientes estequiométricos productos)- Σ(Coeficientes estequiométricos reactivos)
P = Presión total de la reacción (atm).
y_A = Fracción molar de acetaldehide
y_{Et} = Fracción molar de $CH_2{=}CH_2$
y_M = Fracción molar de CH_4.
y_{CO} = Fracción molar de CO

De acuerdo con Mas et al., (2006), sólo se necesitan las dos últimas reacciones (reacciones (10) y (11)) porque en el equilibrio, todo el etanol se convierte o la conversión para la reacción (9) es $x_9 \approx 1$ a temperaturas tan bajas como 500K(227°C). El equilibrio estequiométrico para cada compuesto y sus conversiones x_9, x_{10} y x_{11} requieren una base de cálculo. Esta base es para el etanol alimentado: $N_{EtOH} = 1$ mol.

A partir de la reacción (9) a 450 ° C, $x_9 \approx 1$ y $N_{CH4} \approx (N_{EtOH}{}^\circ)\, x_9 \approx 1$ mol, $N_{CO2} \approx 1$ mol y $N_{H2} \approx 2$ mol porque una mol de etanol fue convertida. Entonces la composición molar después de la desaparición del 1 mol de etanol es: CH_4: CO: H_2 = 1: 1: 2 y esta es la composición inicial para las siguientes reacciones (10) y (11):

$N_{CH4} = (N_{EtOH}{}^\circ)x_9 - (N_{EtOH}{}^\circ)x_{10} = 1 - x_{10}$, = moles of CH_4
$N_{CO} = (N_{EtOH}{}^\circ)x_{10} - (N_{EtOH}{}^\circ)x_{11} = x_{10} - x_{11}$, = moles of CO
$N_{H2} = (N_{EtOH}{}^\circ)2\, x_9 + (N_{EtOH}{}^\circ)\, 3x_{10} + (N_{EtOH}{}^\circ)x_{11} = 2 + 3x_{10} + x_{11}$, = moles of H_2
$N_{CO2} = (N_{EtOH}{}^\circ)\, x_9 + (N_{EtOH}{}^\circ)x_{11} = 1 + x_{11}$, = moles of CO_2
$N_{H2O} = r - (N_{EtOH}{}^\circ)x_9 - (N_{EtOH}{}^\circ)x_{10} - (N_{EtOH}{}^\circ)\, x_{11} = 4 - 1 - x_{10} - x_{11}$ = moles of H_2O
$N_{N2} = 2.22$ moles of N_2 = 2.22 = moles of N_2

Como $N_{EtOH}{}^\circ = 1$ mole, entonces:

$N_T = r + 3 + 2x_{10} + 2.22 = 4 + 3 + 2x_{10} + 2.22 = 7 + 2x_{10} + 2.22$ = Total moles

Donde r = 4 mole de H_2O/mole de etanol
y la fracción molar es $y_i = N_i / N_T$
Como ya vimos, las constantes de equilibrio en función de las fracciones molares son:

$$k_{10} = [[y_{CO2}]\,[y_{H2}]\,/\,[y_{CO}]\,[y_{H2O}]](P)^\circ \quad (24)$$

$$k_{11} = [[y_{CO}]\,[y_{H2}]^3 / [y_{CH4}]\,[y_{H2O}]](P)^2 \quad (25)$$

P = Presión total de la reacción (atm).
y_{CH4} = fracción molar de CH_4.
y_{CO} = fracción molar de CO.
y_{CO2} = fracción molar de CO_2.
y_{H2} = fracción molar de H_2.
y_{H2O} = fracción molar de H_2O

ISBN 978-607-8242-11-5

Se utilizó la rutina Solver de Excel (Microsoft) para el cálculo de fracciones molares de H_2O, H_2, CH_4, CO_2 y CO.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las constantes de equilibrio en función de la temperatura fueron calculadas (Figura 1]. La reacción (1) se hace relevante a temperaturas cercanas a 473 K (200 ° C) cuando lnKi es cercana a cero. Esta reacción aumenta a medida que aumenta la temperatura, similar a las reacciones (5) y (9). La reacción (2) no es significativa hasta aproximadamente 600 K (327ºC).

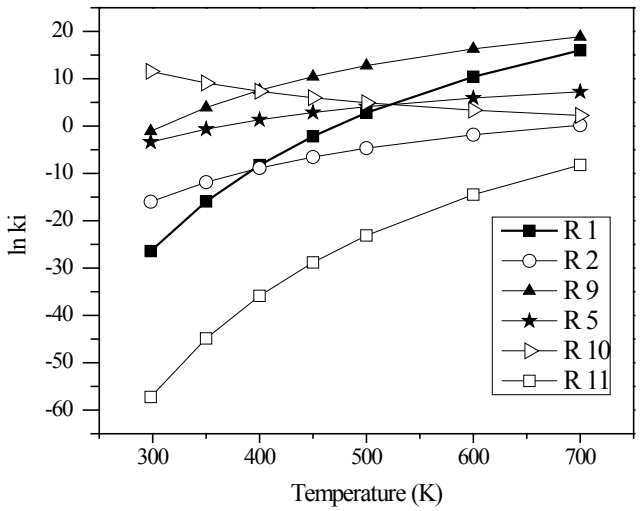


Figura 1. Constantes de equilibrio en función de la temperatura de reacción para las reacciones (1), (2), (5), (9), (10 y 11) implicadas en el reformado con vapor de etanol.

Las reacciones (1), (9) y (5) aumentan con la temperatura mostrando valores positivos de lnKi (Ki> 1) y también sus productos: (H_2, CO_2, C_2H_4, CH_4, H_2O y CH_3CHO) corresponden a los productos observados experimentalmente a 450 ° C como se puede ver en la Figura 2.
La reacción de cambio de gas de agua (WGS) disminuye con la temperatura (reacción 10) y el reformado con vapor de CH_4 mostró valores muy bajos de K (reacción 11). A partir de la Figura 1, la reacción WGS es termodinámicamente más favorecida que el reformado con vapor de CH_4.

Para examinar el equilibrio químico de este sistema, se deben tener en cuenta seis compuestos: los cuatro compuestos finales: H_2, CO_2, CH_4, y CO y los dos reactivos: CH_3CH_2OH y H_2O. Estos seis compuestos tienen tres especies atómicas: H, C y O; Por lo tanto, debe elegirse un sistema de tres reacciones. Estas reacciones son: reacción (8) o (9), reacciones (10) y (11). La reacción (9) es más probable que la reacción (8) porque en nuestro caso la relación de alimentación agua/etanol fue 4, que es mayor que el valor estequiométrico.
Si se elige la reacción (9) a 450°C, prácticamente todo el etanol alimentado (N_{EtOH}°) se transforma en productos de reacción (Figura 1) y luego aproximadamente, un mol de etanol producirá un mol de CH_4, un mol de CO_2 y dos moles de H_2. Este mol de CH_4 producido más otro mol de H_2O producirá un mol de CO y tres moles de H_2 de acuerdo con la reacción (10). Entonces un mol de CO más un mol de H_2O producirá un mol de CO_2 y un mol de H_2, esta es la reacción de WGS o la reacción (11).

ISBN 978-607-8242-11-5

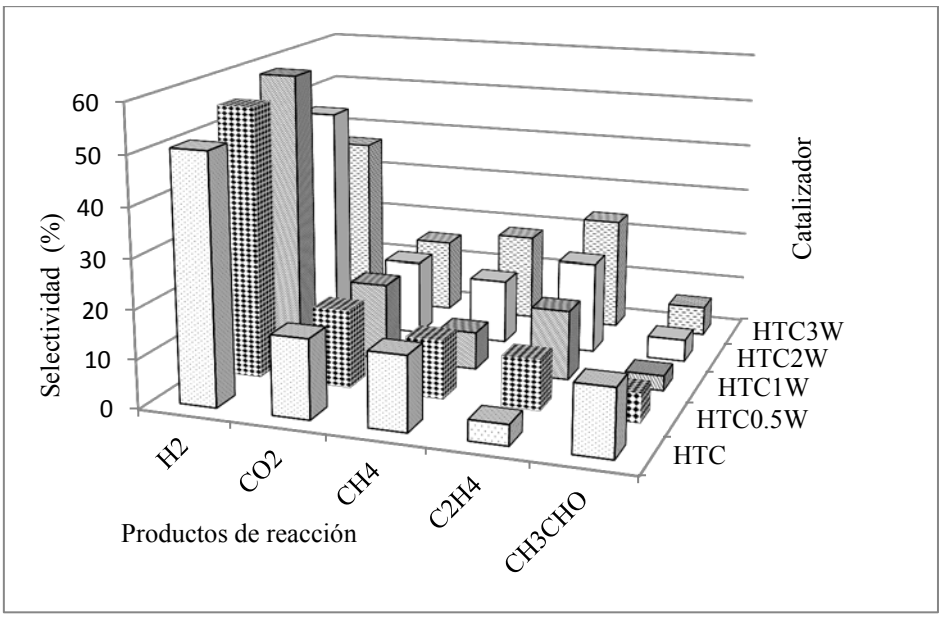


Figura 2. Selectividad catalítica de los catalizadores Co / Hydrotalcite-WOx en el reformado con vapor de etanol a 450 ° C usando una relación molar H_2O / CH_3CH_2OH de 4: 1.

Las fracciones molares calculadas en función de la temperatura usando el método estequiométrico y las constantes de equilibrio ki se muestran en la Figura 3. La rutina Solver de Excel (Microsoft) se usó para el cálculo de fracciones molares de H_2O, H_2, CH_4, CO_2 y CO Estas fracciones molares cambiaron de una manera similar a las fracciones molares calculadas por el programa de la NASA (Figura 4).

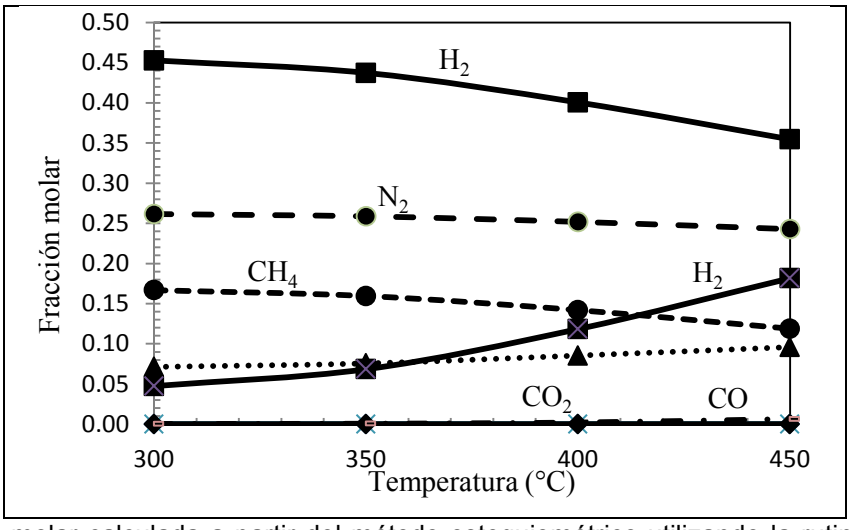


Figura 3. Fracción molar calculada a partir del método estequiométrico utilizando la rutina Solver de Excel para una relación molar agua / etanol de 4 y presión de 0,80 bar.

Con el fin de comparar los diferentes métodos de cálculo de la composición de equilibrio para el reformado con vapor de etanol a 450 ° C y una relación agua / etanol de 4, la Tabla 2 muestra que las fracciones molares de C_2H_5OH, CH_2CH_2, CH_3CHO son muy pequeños, y la fracción de CO es inferior a 0,01.
Todos los métodos fueron consistentes con el cálculo de cantidades significativas de H_2, CO_2, CH_4 y H_2O, y se observaron pequeñas diferencias en la evaluación de las fracciones molares H_2, CO_2 y H_2O. El cálculo de Vasudeva et al.,(1996) se hizo a 527 ° C y esa es la razón por la que se diferencia de todos los demás cálculos.
El cálculo de fracciones molares en función de la temperatura (Figuras 4 y 6) confirma el comportamiento descrito anteriormente sobre las reacciones. Como se ha observado anteriormente, la producción de H_2 comienza a temperaturas cercanas a 200°C. Todos los cálculos muestran que en equilibrio, la fracción molar de CO es inferior a 0,009 y las fracciones molares de CH_2CH_2 y CH_3CHO son menores que 0,1.

ISBN 978-607-8242-11-5

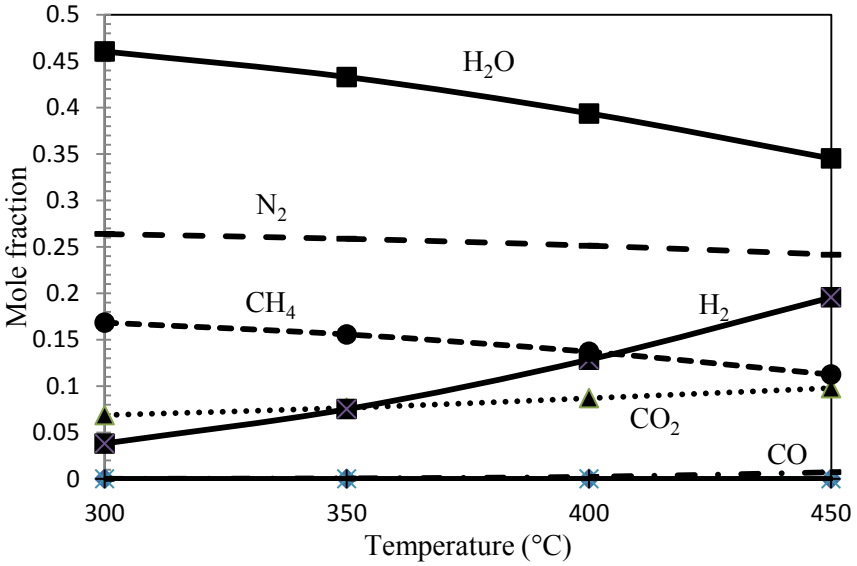


Figura 4 - Fracción molar calculadas a partir del programa de equilibrio químico de la NASA-GLENN CEA2 (Gordon y McBride, 1996) para una relación molar agua / etanol de 4 y presión de 0,8 bar.

Tabla 2. Comparación de las fracciones molares de equilibrio de varios autores para el reformado con vapor de etanol a 450ºC usando una relación molar agua / etanol de 4 y presión de 1 atm.

Author:	NASA [25] program	García y Laborde [2][a]	Vasudeva et al. [3][b]	Li [24][c]	This work and Mas et al.[15] [d]
CH_3CH_2OH	1.6×10^{-13}	5.8×10^{-9}	1.3×10^{-5}	0	0
H_2O	0.455	0.52[a]	0.375	0.47	0.41
CO_2	0.129	0.105[a]	0.138	0.13	0.19
CH_2CH_2	1.7×10^{-9}	0	1.3×10^{-5}	0	0
CH_4	0.148	0.16	0.097	0.22	0.19
CH_3CHO	1.6×10^{-11}	0	1.3×10^{-5}	0	0
CO	0.009	0.005	0.027	0.005	0.01
H_2	0.258	0.21	0.361	0.19	0.20

[a] Estos valores se calcularon utilizando la información de este artículo.
[b] Estos valores fueron interpolados a partir de la información del artículo a 527 ° C
[c] Valores a 500 ° C usando una relación agua / etanol de 3 y 5 bar de presión.
[d] Valores calculados de acuerdo con Mas et al. [15] utilizando el método estequiométrico..

De acuerdo con Li et al.,(2008), un hito en el cálculo del equilibrio químico ha sido el desarrollo del equilibrio químico efectuado en la NASA y sus aplicaciones [32]. Con este desarrollo se ha podido rastrear especies en un sistema reactivo gaseoso y se ha utilizado en diversas aplicaciones como cohetes, choques y detonaciones. Para predecir composiciones de equilibrio, se ha recurrido a la minimización de la energía libre de Gibbs también se ha incorporado en varios softwares de ingeniería modernos, tales como:Pro / II y Aspen Hysys (Pro/II 8.0, (2006); Hysys 4.0, (2004).
El cálculo del equilibrio químico en las reacciones de gas permite tener una idea de qué productos son los más probables si se conocen las constantes de equilibrio de las reacciones implicadas. Además por cálculo termodinámico, es posible calcular la conversión del equilibrio cuando la temperatura cambia. Este cálculo predice la temperatura de funcionamiento del sistema de reacción para obtener la mejor conversión.
Por estas razones, tomaremos el cálculo de las fracciones molares de equilibrio hechas por nosotros y por el programa de la NASA como una referencia para determinar las diferencias con las fracciones molares experimentales de los catalizadores a 450 ° C (Tabla 3).

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 3. Comparación entre fracciones molares experimentales y calculadas de los productos de reacción usando el programa NASA (Gordon y McBride, 1996) y la velocidad de reacción para los catalizadores Co /Hydrotalcite-WOx a 450°C.

Catalizador	HTC	HTC0.5W	HTC1W	HTC2W	HTC3W	NASA program	Δyi [a]
C_2H_5OH	0.047	0.047	0.043	0.049	0.055	1.6×10^{-13}	-0.048
C_2H_4	0.016	0.039	0.056	0.071	0.084	1.7×10^{-9}	-0.053
CH_3CHO	0.052	0.022	0.012	0.017	0.022	1.6×10^{-11}	-0.025
H_2	0.193	0.211	0.229	0.177	0.132	0.258	0.069
CO_2	0.062	0.061	0.062	0.059	0.055	0.129	0.069
CH_4	0.058	0.045	0.030	0.050	0.065	0.148	0.098
Conversion (%)	80	81	82	80	75	99.999	20.2[b]
Vel.Reacción[c]	0.050	0.051	0.052	0.050	0.047	----	----

[a] Diferencia entre las fracciones molares calculadas por el programa de la NASA menos la media aritmética de las fracciones experimentales.
[b] Diferencia entre la conversión calculada de la NASA menos la conversión media aritmética.
[c] Tasa de reacción expresada como [moles de etanol convertido / s g-atm Co].

La diferencia entre las fracciones molares calculadas por el programa de la NASA menos la media aritmética de las fracciones experimentales (Δyi) mostró valores positivos para los productos y valores negativos para los reactivos y los precursores: CH_3CHO y C_2H_4. Los valores negativos para C_2H_5OH y H_2O significan que los reactivos no se consumen completamente. El catalizador HTC1W (con 1% de W) mostró la mejor conversión y selectividad a H_2. Una razón para explicar nuestros resultados podría estar relacionada con la pequeña cantidad de W. Bajas concentraciones de W, permiten que una gran parte del Co catalice las reacciones de ruptura C-C de etanol, simultáneamente con una buena estabilización térmica de la estructura de la hidrotalcita proporcionada por átomos de W ligados a la estructura (Contreras, et al.,2010).

CONCLUSIONES

En este trabajo se investigó qué tan cerca o lejos se encuentra la composición en equilibrio de la experimental, para la reacción de reformado con vapor de etanol aplicado al desempeño de catalizadores de Co/Hydrotalcita-WOx.

Por medio de los valores de Δyi, fue fácil distinguir los compuestos intermedios y finales en el mecanismo de reacción, y también es fácil distinguir cuán cerca del equilibrio están los reactivos (valores negativos) y finales (valores positivos). También por medio de los valores de Δyi para H_2 y la conversión, es posible distinguir qué catalizador es el más selectivo.

La predicción de la concentración de CO mediante cálculos termodinámicos fue muy útil para explicar la ausencia de CO en estas condiciones experimentales. Las fracciones molares de H_2, CO_2, CH_3CHO, CH_2CH_2, CH_4, H_2O y CO, se calcularon mediante un balance de masa estequiométrico utilizando la constante de equilibrio. La tendencia de estas fracciones molares fue similar a las calculadas por la minimización de la energía libre de Gibbs.

La comparación de las composiciones al equilibrio calculadas para H_2,C_2H_5OH, CO_2 y H_2O de los catalizadores de Co-hidrotalcita muestra que los preparados con 0.5 y 1% de W mostraron mayor conversión y selectividad a H_2.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco por el apoyo financiero, también a la UAM-Iztapalapa, y al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo académico.

REFERENCIAS

Aupretre F, Descorme C, Duprez D, Casanave D, Uzio D. Ethanol steam reforming over $Mg_xNi_{1-x}Al_2O_3$ spinel oxide-supported Rh catalysts. J. Catal, 233: 464-477, (2005).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Contreras JL, Ortiz MA, GA. Fuentes GA, Luna R., Salmones J, Zeifert B, Nuño L, and Vázquez A., Tungsten effect over Co-hydrotalcite catalysts to produce hydrogen from bio-ethanol, J. New Mat. Electrochem. Systems;13, 253-259(Contreras 2010).

Freni S, Maggio G, Cavallaro S. Ethanol steam reforming in a molten carbonate fuel cell: a thermodynamic approach. J. Power Sources; 62: 67-73(1996).

Fishtik I, Alexander A, Datta R, Geana D. A thermodynamic analysis of hydrogen production by steam reforming of ethanol via response reactions. Int. J. Hydrogen Energy; 25: 31-45(2000).

García EY, Laborde MA. Hydrogen production by the steam reforming of ethanol: thermodynamic analysis. Int. J. Hydrogen Energy; 16(5): 307-312(1991)

Gordon S, McBride J.J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications, Technical Report NASA RP-1311, Part II, National Aeronautics and Space Administration, (1996).

Hysys 4.0 User Guide; Aspen Technology, Inc.: Burlington, MA, (2004).

Li, M. Equilibrium calculation of gaseous reactive systems with simultaneous species adsorption, Ind.Eng.Chem.Res.;47,9263-9271, (2008)

Mas V, Kipreos R, Amadeo N, Laborde M. Thermodynamic analysis of ethanol/water system with the stoichiometric method. Int J Hydrogen Energy; 31:21–28(2006).

Pro/II 8.0 User Guide; Invensys Systems, Inc.: London, (2006).

Vasudeva K, Mitra N, Umasankar P, Dhingra SC. Steam reforming of ethanol for hydrogen production: thermodynamic analysis. Int. J. Hydrogen Energy 21(1): 13-18(1996).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de la movilidad vehicular en el departamento de La Guajira usando Simulación. Caso: Riohacha y Maicao.

Marlin A. Aarón G[1,2] Armando Gómez, JeanCarlos Meyer, Cesar Gómez y Rafael Avila [2,]
(1) Fac. De Ingeniería, Programa de Ingeniería de Sistemas, Univ. De La Guajira, Riohacha_La Guajira
(2) estudiantes Programa de Ingeniería de Sistemas, Univ. De La Guajira, Riohacha_La Guajira
e-mail: maaron@uniguajira.edu.co

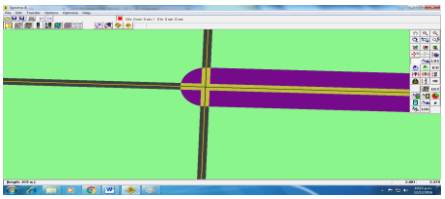
El departamento de La Guajira que está en crecimiento presenta dificultades para movilizarse personas y vehículos y se consideró necesario implementar un proceso de Simulación en puntos estratégicos de Riohacha y Maicao. Se utilizó la simulación como proceso y resultado para analizar los aspectos que están afectando y agudizando el problema de movilidad y de daño al medio ambiente. Lo que se ha encontrado es que el sistema de circulación y transporte urbano en la capital de La Guajira en los últimos años ha presentado un incremento considerable. En la actualidad es difícil transportarse de un lugar a otro con rapidez. Las causas pueden deberse al crecimiento poblacional, el desarrollo comercial de la misma, generación de trancones en algunos puntos que pueden considerarse como vías arteriales de comunicación en la ciudad, la presencia de huecos en las vías, accidentes por falta de señalización, descuido o imprudencia de transeúntes, falta de sensibilización de las personas al cruzar una calle, por imprudencias de los conductores y/o por los ciudadanos que no respetan las normas de tránsito, también por el afán de llegar rápido o como pueda a cualquier sitio, arriesgando la vida de todos quienes hacen uso del sistema de transporte urbano, público o particular, en todas sus formas o medios. Este estudio se refirió a los últimos aspectos, dejando de lado el crecimiento poblacional y el desarrollo comercial y realizó una simulación a dos ciudades, Riohacha, distrito capital y Maicao, ciudad comercial y en ellas se seleccionaron dos puntos y por Simulación se encontró que estos puntos lideran un alto índice de accidentes diarios, hay abstención de las aseguradoras de ofrecer pólizas a los conductores de vehículos pequeños, es mínima la regulación de tránsito, poco conocimiento de las normas por parte de conductores y transeúntes, acumulación excesiva de vehículos en las aceras de calles de alto tráfico y una planificación urbana y de medios de control que poco favorece la movilidad. Para el proceso se seleccionaron puntos críticos de la ciudad, así como horas pico, se realizaron procesos de observación y descripción sistemáticos durante 4 meses, en hora y fechas, se identificaron y describieron las variables que impactaban los puntos seleccionados, así como evidencias de ellas, que se registraron en un modelo descriptivo. Se diseñaron Bases de Datos para este registro y luego se procedió a simular el proceso, usando software de alto desempeño como Synchro, Vissim y Arenas. Para alguno de los casos se realizó un proceso de optimización para aportar en la solución de la problemática. Alguna de las propuestas invitan a las ciudades a generar una mejor planificación urbana, Implementación de semáforos inteligentes que regulen el tránsito de acuerdo al flujo vehicular, mayor vigilancia por parte de los agentes reguladores de tránsito, para evitar o reducir las infracciones y educar a los peatones, para que utilicen su inteligencia vial. Tabla 1. Registro de Información e imágenes del Proceso de Simulación

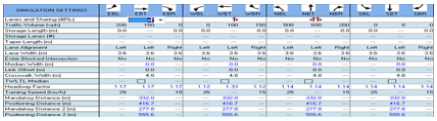
Registro de información usando tablas en el proceso de observación

CANT DE VEHICULOS
Prom.motos: 5794
Prom. de moto- car: 3871
Prom. C.pequeños: 5333
Prom.carros pesados: 1104

Cant: moto	Cant: moto Car	Cant: carro pequeño	Cant: carro pesado	Tiempo llegada	Tiempo salida	Tiempo demora en el sistema
7	6	2	0	11:00	11:03	3m
14	8	4	2	11:10	11:20	10m
5	9	8	0	11:25	11:27	2m
9	6	7	0	11:29	11:35	6m
8	3	4	0	11:35	11:40	5m
5	5	9	0	11:40	11:47	7m
5	7	6	3	11:49	11:53	4m
11	9	7	0	11:54	12:00	6m
PROMEDIO TIEMPO						5m

Imágenes del trazado vehicular usando Synchro





Referencias

Arieta, H. (2016). *Flujo Vehicular. El tránsito vehicular (también llamado tráfico vehicular*. Academia.edu. Retrieved 4 March 2016, from https://www.academia.edu/8263843/Flujo_Vehicular._El_tránsito_vehicular_también_llamado_tráfico_vehicular

Cal y Mayor Reyes Spíndola , R., & Cárdenas Grisales, J. (2007). *Ingeniería de tránsito*. México: Alfaomega.Castro, J. (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Datos.bancomundial.org. (2016). Emisiones de CO2 (kt) | Datos | Mapa.[online] Available at:http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT/countries?display=map [Accessed 6 Jun. 2016].
Design a Roundabout in Vissim. (2016). [PDF]http://www.dot.ga.gov/PartnerSmart/DesignSoftware/TrafficSoftware/Roundabouts%20in%20VISSIM.pdf.
ElComercio.com. 6 *Medidas para mejorar el Tránsito*. Retrieved from.http://www.panchonet.net/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=2381
Federación Colombiana de Municipios: *INSTRAM y Administración Municipal de Riohacha-La Guajira socializaron cartilla pedagógica para la movilidad segura*. (2016). Www2.fcm.org.co. Retrieved 4 April 2016, from https://www2.fcm.org.co/index.php?id=89&no_cache=1&tx_ttnews%5Bcat%5D=33&tx_ttnews%5Bpointer%5D=0&tx_ttnews%5Btt_news%5D=13420&tx_ttnews%5BbackPid%5D=120&cHash=bcd085d6d9b787f24b13e9789f330cf0
Getting Started with Vissim. (2016). [PDF] http://www.dot.ga.gov/PartnerSmart/DesignSoftware/TrafficSoftware/Getting%20Started%20VISSIM.pdf.
Hoogendoorn, S., & Bovy, P. (2001). *State-of- the-art of vehicular traffic flow modelling. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers,* Part I:Journal Of Systems And Control Engineering, 215(4), 283-303.http://dx.doi.org/10.1177/095965180121500402
https://sites.google.com/site/1285educacionartisticamusica/home[Accessed 5 Jun. 2016].
Instram.gov.co (2016) Retrieved 2 April 2016, from http://www.instram.gov.co/
Izquierdo, L., Galán Ordax, J., Santos, J., & Del Olmo Martínez, R. (2008). *La ausencia de cultura ciudadana contribuye a la congestión vehicular*. El Espectador. Retrieved 8 March 2016, from http://www.elespectador.com/noticias/bogota/ausencia-de- cultura-ciudadana-contribuye- congestion-veh-articulo-496668
Nieto Castillo, L., Roque Morales, J., Sánchez Pacheco, H., & Valdés. *Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas*. Empiria. Revista De Metodología De Ciencias Sociales, 0(16), 85. http://dx.doi.org/10.5944/.16.2008.1391
Hernández, G. (2016). *Sistema Móvil de Información Vial* – SMIV.Smiv.trabajoterminal.org. Retrieved 4 April 2016, from http://smiv.trabajoterminal.org/documento/documento_tt2.html
OMM. (2008). *Movilidad en Bogota una Verdadera Pesadilla*. Retrieved From. http://www.ciclobr.com/movilidad.html
Organismos de Transito Colombia. (2016). Conducircolombia.com. Retrieved 4 April 2016, from http://conducircolombia.com/listadoorganismos.htm
Ralph Gakenheimer. (1998). *Los Problemas de Movilidad en el Mundo de Desarrollo.* Scielo. Retrieved from http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71611998007 200002.
Rodriguez, D;. Ardila, G. (2002). *Concurrencia en sistemas multiagente: implementación de un simulador de tráfico urbano* Sites.google.com. (2016). 1285 - Contaminación Acústica. [online]
Sokolowski, J. A., & Banks, C. M. (2009). *Principles of modeling and simulation: A multidisciplinary approach.*
Hoboken, N.J.: John Wiley. *Temas de ingeniería y gestión de tránsito*. (2014). Chile: RIL editors Retrieved from http://www.ebrary.com
Universidad Politecnica de Catalunya *Transport Simulation Systems.* Departamento de Estadística e Investigación de Operaciones..http://www.tss-bcn.com/micro_its.pdf

 ISBN 978-607-8242-11-5

Probabilidade de Erro Humano e Fatores que Modelam o Desempenho de Operadores em Centros de Controle de Sistemas Elétricos

C. C. B. Camargo[1], J. Coelho*[1], E. A. C. Aranha Neto[2], E. L. Martins[1], R. C. G. Teive[1], J. P. Parreira[3], G. M. Coelho[1] e A. L. R. Rese[1]
(1) SEEnergia, Florianópolis/Santa Catarina-Brasil
(2) Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Florianópolis/Santa Catarina-Brasil
(3) CPFL Power Group, Campinas/São Paulo-Brasil
*E-mail: jorge.coelho@seenergia.com.br

Resumo

Este artigo apresenta uma breve introdução ao controle de qualidade total, análise de risco e uma aplicação de fatores que afetam o desempenho de operadores de sistemas de energia elétrica, bem como alguns métodos para calcular a probabilidade de erro humano que se baseiam nesses fatores. Além dos problemas pessoais que os operadores podem ter no seu dia a dia, os centros de controle podem ser lugares amigáveis que influenciam positivamente as tarefas, ou estressantes, que podem prejudicar o tempo do operador para tomar uma decisão sobre uma ação. Portanto, é muito importante reconhecer, como medir e onde aplicar esses fatores. Assim, o artigo fornece uma explicação desses fatores e como eles são usados em alguns modelos de cálculo de probabilidade de erro humano restrito aos centros de controle de operação. No artigo, foram aplicados três critérios de avaliação para avaliar e medir a probabilidade de erro humano: 1. Tempo de resposta (o tempo médio de resposta é definido como o tempo correspondente a uma probabilidade de 50% de que uma ação foi executada de acordo com condições operacionais normais); 2. Confiabilidade cognitiva humana (HCR): Probabilidade de não resposta de um operador em executar uma tarefa no tempo disponível; 3. Metodologia do Índice de Probabilidade de Sucesso: um método utilizado no campo da Avaliação da Confiabilidade Humana (HRA), com o objetivo de avaliar a probabilidade de um erro humano ocorrer durante a conclusão de uma tarefa específica. Baseia-se na aplicação dos fatores que modelam o desempenho sobre a tarefa que está sendo executada.

Palavras-chave: Operador, Centro de Operação de Sistemas Elétricos, Fatores de Desempenho, Erro Humano

Performance Shaping Factors and Human Error Probability in Power Systems Control Centers

Abstract

This paper presents a brief introduction to total quality control and tools, risk analysis and an application of factors that affect the performance of electric power systems operators (Performance Shaping Factors), as well as some methods for calculating the human error probability that are based on these factors. In addition to the personal problems that operators may have in their daily basis, operating control centers can be friendly places that influence positively the tasks, or stressors places, that can harm the operator time to make a decision on an action. Therefore, it is very important to recognize, how to measure and where to apply these factors. Thus, the paper provides an explanation of these factors and how they are used in some calculation models of human error probability restricted to operation control centers. In the paper, we applied three evaluation criteria to evaluate and measure human error probability: 1. Response Time (Median response time is defined as the time corresponding to a probability of 50% that an action was executed according to normal operational conditions); 2. Human Cognitive Reliability (HCR): Nonresponse Probability of an operator to execute a task on the available time; 3. Success Likelihood Index Methodology: A method used in the field of Human Reliability Assessment (HRA), for the purposes of evaluating the probability of a human error occurring throughout the completion of a specific task. It is based on the application of the PSFs about the task being executed.

Keywords: Operator, Electric Power Systems Control Centers, Performance Shaping Factors, Human Error

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos constituem-se num dos sistemas mais complexos inventados pelo homem. Compreendem centenas de equipamentos interligados entre si e estendendo-se por enormes territórios e mesmo continentes. Estes sistemas devem ser planejados, mantidos e operados por pessoas altamente qualificadas e continuadamente treinadas. Os operadores dos Sistemas de Transmissão e Distribuição de energia elétrica, especialmente durante contingências na rede, tem uma carga de trabalho acentuada, com alta demanda cognitiva e estresse (Cohen et. al., 1983), o que aumenta a probabilidade do erro humano (Kumamoto; Henley, 1996).

Mesmo em situações diárias tais como em chaveamentos para restaurar o suprimento de energia ou mesmo em serviços de manutenção programada, existe um risco de erros e chaveamentos inadequados (Aranha Neto et al., 2016; Vieira, M.F.Q. et al, 2015; Netto, A.V.S. et al, 2014;). Deste modo, é importante que a concessionária esteja atenta à capacidade e eficiência dos seus operadores e de verificar se os chaveamentos estão sendo executados em conformidade com as práticas recomendadas.

Para alcançar estes objetivos, a concessionária deve possuir procedimentos, metodologias e índices que permitam a avaliação periódica do desempenho dos seus operadores. Para avaliar este desempenho, critérios podem ser estabelecidos de acordo com as cinco dimensões da filosofia da Qualidade Total (Teive et al., 2016): Qualidade Intrínseca (Qualidade do Produto); Custos; Fornecimento (Qualidade do Serviço); Moral (Aspectos Pessoais) e Segurança (Conformidade). Adicionalmente, o sucesso da operação passa pela quantificação da Confiabilidade Humana, envolvendo modelos matemáticos que calculam a Probabilidade do Erro Humano (Kumamoto; Henley, 1996).

QUALIDADE TOTAL APLICADA EM CENTROS DE CONTROLE

O Controle da Qualidade Total (CQT) é um modelo de melhoria da gestão desenvolvido no Japão, após a Segunda Guerra Mundial, permitindo que a partir da década de 70, as empresas japonesas conseguissem conquistar o mercado internacional com produtos de alta qualidade e de baixo custo, atraindo a atenção mundial para esse modelo de gestão.

Nas empresas de energia elétrica, o objetivo mais importante deste modelo é garantir a qualidade do produto e do serviço para o seu cliente, sendo diretamente aplicado nos Centros de Operação de Energia Elétrica (COS), pois a sociedade moderna, altamente dependente da energia elétrica, requer a cooperação e a interação entre fabricantes de equipamentos, concessionárias e centros de pesquisa, de forma a construir, operar e manter sistemas elétricos que atendam às necessidades dos usuários. Para realizar o treinamento de operadores em Centros de Operação de Sistemas de Transmissão e Distribuição as empresas geralmente fazem uso de simuladores. Porém, nem sempre avaliam as métricas para saber se o treinamento é eficaz ou não. Nesse sentido, abre-se espaço para o desenvolvimento inovador na aplicação de métricas para análise da performance destes operadores.

Deste modo, com base na experiência e capacidade de análise de uma equipe de especialistas foi feita uma adequação das cinco dimensões gerais da filosofia do CQT: Qualidade Intrínseca, Custos, Qualidade do Atendimento, Moral e Qualidade da Segurança, para serem aplicadas no problema de avaliação de desempenho de operadores. Os dezesseis critérios estão agrupados nas cinco dimensões da qualidade total, conforme apresentado na Figura 1, tomando como base a árvore de critérios proposta por Teive et al. (2016). A apuração do nível de estresse e os erros humanos tem impacto na medição da competência profissional do operador e na pontuação na dimensão do Aspectos Pessoais na avaliação global do operador.

ISBN 978-607-8242-11-5

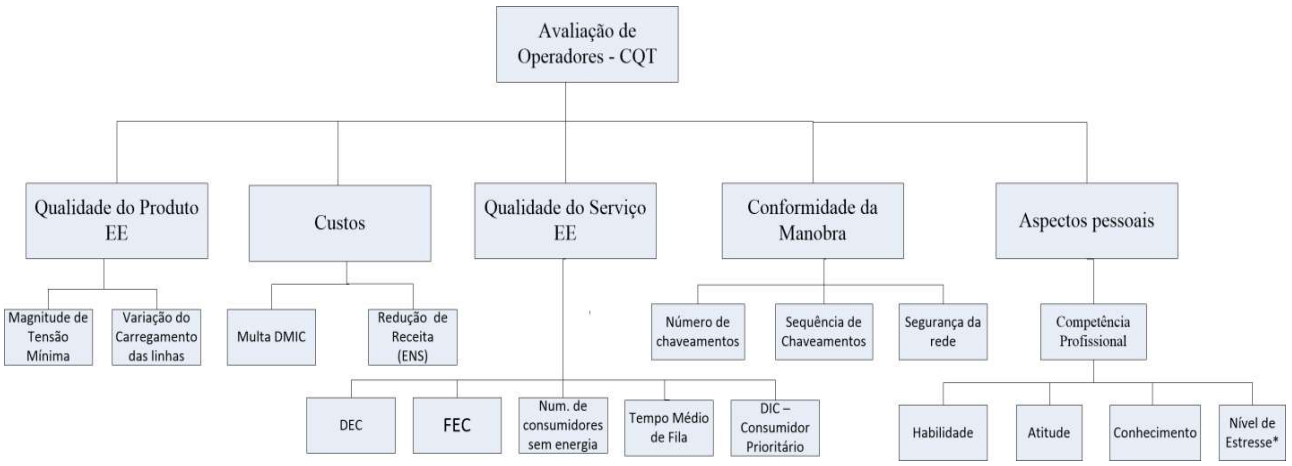


Fig. 1: Árvore de Critérios Aplicada na Avaliação de Operadores em Centro de Operação

CONFIABILIDADE E ERRO HUMANO

A confiabilidade humana tem por objetivo determinar a probabilidade de ocorrência do erro humano num ambiente de trabalho, independente das ferramentas utilizadas e durante determinado período de tempo (Muniz Serrano, 2009). A confiabilidade humana é afetada por inúmeros fatores, que são conhecidos como os *Performance Shaping Factors*, PSF, ou fatores que modelam o desempenho (Boring, R.L. et al, 2007).

.

Consistem num aspecto das características individuais humanas, ambiente, organização ou tarefa, que especificamente contribui para aumentar ou diminuir o desempenho de uma pessoa, um operador de um centro de controle, em nosso caso, e assim aumentar ou diminuir a probabilidade de um erro humano durante situações normais e em casos de emergência.

Numa avaliação quantitativa da Confiabilidade estes fatores são usados para identificar os itens que contribuem para o desempenho de uma pessoa. Normalmente os seguintes fatores são utilizados na análise de um sistema no ponto de vista da Confiabilidade (Blackman et al., 2008):

- Treinamento e Experiência: Refere-se à experiência e treinamento do operador envolvido na tarefa designada. Aqui se incluem os anos de experiência da pessoa ou da equipe e quando a pessoa ou a equipe foi treinada no tipo de tarefa, o tempo que se passou desde o último treinamento e o sistema envolvido na tarefa e ainda o cenário considerado.
- Procedimentos e Controles Administrativos: Refere-se à existência e uso formal de procedimentos operativos e controles administrativos para as tarefas em consideração.
- Ergonomia e Interação Homem-Máquina: Incluem os equipamentos, displays e controles, layout, qualidade e quantidade de informações disponíveis nos instrumentos e a interação do operador/equipe com os equipamentos para realizar a tarefa designada. Aspectos da Interação Homem-Máquina, como a acessibilidade e operacionalidade estão aqui incluídos. Também se considera a adequação, ou não, de um software computacional.
- Disponibilidade de Tempo: Refere-se ao intervalo de tempo que um operador ou equipe tem para diagnosticar e agir para corrigir uma situação anormal. Uma perda de tempo pode afetar a habilidade do operador para pensar de maneira clara e considerar alternativas.
- Complexidade: Refere-se ao grau de dificuldade para realizar uma tarefa num dado cenário. A complexidade considera tanto a tarefa como o ambiente onde ela deve ser realizada. Quanto mais difícil for a tarefa a ser realizada, maior é a chance para o erro humano.
- Carga de Trabalho, Estresse e Fatores Estressantes: Pode incluir estresse mental, excessiva carga de trabalho, pressão de tempo ou estresse físico, como o causado por barulho, calor ou por dificuldade ambiental. Fatores físicos, psicológicos e sociais são aceitos como agentes estressores e capazes de induzir alterações comportamentais e fisiológicas significativas nas pessoas.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Para avaliar o grau em que um indivíduo aprecia as suas situações de vida como estressantes, ele deve interagir ativamente com o meio ambiente, analisando os acontecimentos como potencialmente ameaçadores ou desafiadores à luz dos seus recursos disponíveis para lidar com eles.

A busca de uma medida para o cálculo objetivo do estresse baseia-se nos fundamentos da Psicometria, que se apoia na teoria da medida e que é empregada nas ciências sociais para validar, por métodos quantitativos, respostas efetuadas por indivíduos a itens selecionados. O método quantitativo tem, como principal característica e vantagem, o fato de representar o conhecimento da natureza com maior precisão do que a utilização da linguagem comum para descrever a observação dos fenômenos naturais (Pasquali, 2009).

O uso de respostas a testes para avaliação objetiva de nível de estresse em indivíduos, é estruturado de forma a minimizar erros e como tal deve possuir requisitos de confiabilidade e validade. A validade de um teste refere-se à característica que ele possui de medir aquilo que realmente quer medir, ou seja, a validade existiria num teste quando ele mede realmente aquilo que pretendemos medir e a confiabilidade do teste refere-se a constância dos resultados obtidos em diferentes ocasiões. Por outras palavras, a confiabilidade está centrada no grau de repetição e na consistência de medidas empíricas. Assim, outros investigadores usando o teste chegarão aos mesmos resultados que obtivermos.

Neste sentido, o indivíduo sente-se estressado quando as exigências impostas pelo meio ambiente excedem os recursos que ele dispõe para lidar com estas exigências. Cohen et al.,1983 apresentam questionários de múltipla escolha para determinar o nível de estresse em relação ao dia a dia e às condições de trabalho. Estes questionários foram aplicados em duas equipes de profissionais que trabalham em um centro de operação de uma empresa do sudeste do Brasil e usados no estudo de caso que será apresentado.

- Ambiente: Inclui as condições de trabalho e fatores ambientais como barulho, calor e a vibração.
- Adaptação ao Trabalho: Refere-se a se o indivíduo que vai realizar determinada tarefa é fisicamente e mentalmente adaptado para realizá-la num tempo requerido. Podem afetar esta adaptação itens como fadiga, doença, uso de drogas (legais ou ilegais), Confiança excessiva, problemas pessoais e distrações.
- Processos de Trabalho: Compreendem os aspectos considerados para realizar o trabalho, incluindo a dinâmica do grupo, pessoal disponível, impactos interorganizacionais, cultura de segurança, planejamento do trabalho, comunicação, suporte gerencial e políticas da empresa.

Os fatores que modelam o desempenho são usados no modelo HCR (*Human Cognitive Reliability*) para o cálculo da probabilidade do erro humano, associados aos fatores comportamento baseado na Habilidade, comportamento baseado nas Regras e comportamento baseado no Conhecimento, conforme será exposto a seguir.

CÁLCULO DA PROBABILIDADE DO ERRO HUMANO

Diversos métodos têm sido usados para o cálculo da probabilidade do erro humano e que levam em consideração os fatores mencionados, PSFs. Apresentam-se, a seguir, três destes métodos (Kumamoto; Henley, 1996; Martins, 2016).

TEMPO DE RESPOSTA

A mediana no tempo de resposta é definida como o tempo correspondente a probabilidade de 50% de que uma determinada ação foi executada dentro das condições normais de operação. A mediana no tempo de execução de uma tarefa pode ser calculada por meio da fórmula:

$$T_{1/2} = (1 + K_1)(1 + K_2)(1 + K_3)\boldsymbol{T_{1/2}} \quad (1)$$

onde, K_1, K_2 e K_3 são os coeficientes para os PSFs considerados e $\boldsymbol{T_{1/2}}$ é o tempo referência para a ação.

A fórmula supracitada calcula o desvio da mediana de uma determinada ação (mediana calculada baseada em um histórico ou baseada na opinião de operadores mais experientes). A partir desta equação, é possível saber qual é o tempo mediano mais próximo da ação a ser executada pelo operador. As variáveis *K1*, *K2* e *K3*, são definidas a partir dos PFS escolhidos na tarefa a ser realizada. *K1* compreende o comportamento que não depende diretamente da complexidade da tarefa, mas sim do nível de treinamento e do grau de prática na execução da tarefa. *K2* assume que as ações são governadas por um conjunto de regras a serem seguidas

 ISBN 978-607-8242-11-5

durante a ação frente ao painel de controle da planta. Caso as Regras não sejam bem assimiladas e praticadas, a pessoa deve checar cada regra a ser seguida, o que aumenta o tempo de resposta e a probabilidade de erro. Finalmente, *K3* incorpora o nível de estresse no momento da operação, seja influenciado pelas ações de emergenciais no trabalho, seja por sua vida pessoal. Numa atividade não rotineira, se o operador não possuir um conhecimento detalhado do estado da Subestação/Rede Elétrica, não consegue fazer o diagnóstico da situação (Kumamoto e Henley, 1996).

PROBABILIDADE DE NÃO-RESPOSTA

A probabilidade de não-resposta de um operador é dada pela fórmula abaixo, baseada em modelos da HCR (*Human Cognitive Reliability*), segundo Kumamoto e Henley (1996):

$$Pr(t) = exp - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}\right) - B\right]}{A} \right\}^{C} \quad (2)$$

onde:
t é o tempo disponível para executar a tarefa (ou série de tarefas);
$T_{1/2}$ é o tempo mediano calculado para completar a tarefa de acordo com Equação (1);
A, B, C são os coeficientes de correlação associados com o tipo de processo mental, ex: Habilidade, Regra, Conhecimento (Tabela 1).

Tabela 1: Valores Típicos dos Coeficientes A, B e C.

Processo Mental	A	B	C
Habilidade	0,407	0,7	1,2

Assim, a janela de tempo *t* é estimada a partir da análise da sequência de eventos. O modelo da HCR assume que o tempo mediano é afetado pela ação dos PSFs e que a probabilidade segue uma distribuição de WEIBULL a três parâmetros.

SLIM

O SLIM, ou *Sucess Likelihood Index Methodology*, é um método utilizado para quantificar o erro humano baseado em diversos PSFs (*Performance Shaping Factors*) relevantes à tarefa que se deseja obter a informação. Para um dado SLI (*Sucess Likelihood Index*), a probabilidade do erro humano (HEP - *Human Error Probability*) para uma tarefa é estimada de acordo com a fórmula abaixo:

$$\log(HEP) = a \times SLI + b \quad (3)$$

onde *a* e *b* são duas constantes determinadas de duas ou mais tarefas para qual o valor do HEP é conhecido. Se não houver dados disponíveis, as constantes devem ser estimadas por *experts*.

O *expert* deve também selecionar uma classificação (Ri) de 0 a 1 para cada PSF *i*. Cada classificação de PSF tem um valor ideal igual a 1 para quando a performance humana for julgada como ótima. O SLI é calculado então, de acordo com a fórmula abaixo.

$$SLI = \sum W_i R_i \quad (4)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a aplicação a ser apresentada são desenvolvidas as avaliações relacionadas aos itens Tempo de Resposta e Probabilidade de Não-resposta, dado que ainda não se tem dados suficientes para aplicação da metodologia SLIM.

Neste sentido têm-se os seguintes valores internacionais K_1, K_2 e K_3 para cálculo do Tempo de Resposta e da Probabilidade de Não-Resposta, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes internacionais K_1, K_2 e K_3 para cálculo do Tempo de Resposta e da Probabilidade de Não-Resposta.

PSFs		*Coef.*	*Critério*
Experiência do Operador		**K_1**	
1	Alta	-0,22	Mais de 5 anos de experiência
2	Média	0	Mais de 6 meses de experiência
3	Baixa	0,44	Menos de 6 meses de experiência

PSFs		*Coef.*	*Critério*
Nível de Estresse		**K_2**	
1	Emergencial	0,44	Situação de alto estresse
2	Alta carga de trabalho / Potencial emergência	0,28	Muita carga de trabalho com resolução de um acidente em andamento
3	Condição ótima (normal)	0	Situação normal, operadores com pouca carga de trabalho fazendo poucos ajustes
4	Baixo	-0,28	Transiente inesperado, sem precursores

PSFs		*Coef.*	*Critério*
Interface Operador/Planta		**K_3**	
1	Excelente	-0,22	Auxílios ao operadores estão disponíveis para ajuda em situações de acidentes
2	Muito Boa	0	Display com formato amigável e informações integradas
3	Boa	0,44	Display com formato amigável e sem informações integradas
4	Baixa	0,78	Display sem formato amigável e sem informações integradas
5	Muito baixa	0,92	Monitores não estão visíveis ao operador

Deste modo todas as análises do Tempo de Resposta e da Probabilidade de Não-Resposta do operador frente a uma situação do dia a dia de trabalho dependem de seu tempo de experiência, de seu nível de estresse no momento de executar sua ação e do tipo de interface (qualidade do console) do Centro de Operação.

SIMULAÇÔES

O Tempo de Resposta a cada evento (em segundos) e a Probabilidade de Erro dependem destas 3 variáveis: Experiência do Operador (alta, média e baixa), do Nível de Estresse relacionado com a situação do trabalho (emergencial, alta carga de trabalho, condição normal e sem estresse) e da Qualidade da Interface Homem/painel do COS (excelente, muito boa, boa, baixa e muito baixa), conforma as tabelas abaixo.

Exemplo para aplicação do Tempo de Resposta:

Imagine que o tempo mediano para executar o desligamento do sistema da planta seja $\boldsymbol{T_{1/2}}$ = 2,5s, incluindo 1,0s para detecção do problema e 1,5s para diagnóstico. Assumindo que o operador tenha uma experiência Alta ($K_1 = -0{,}22$), esteja em uma situação de normal de trabalho/estresse ($\mathrm{K}_2 = 0{,}0$) e com uma interface operador-planta muito boa ($\mathrm{K}_3 = 0{,}00$); o tempo mediano de resposta para a execução desta tarefa é então:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$T_{1/2} = (1 - 0{,}22)(1 + 0{,}0)(1 + 0{,}00)(2{,}5) = \ 1{,}95\text{s}$$

Exemplo para estimativa da Probabilidade de Não-Resposta do operador:

Continuando do exemplo anterior, supor uma falha na planta. Suponha que a equipe está a postos para completar o desligamento em até 6,5s se o desligamento automático não funcionar. Lembrando que, conforme Tabela 1, Habilidade (A = 0,407, B = 0,7, C = 1,2) e que T(1/2)=(1-0,22) (2,5) = 1,95s.

Do modelo da Probabilidade de Não-Resposta (HCR), e usando as constantes da 1:

$$\Pr\{6{,}5\} \ = \ \exp\left\{-\left[\frac{\left(\frac{6{,}5}{1{,}95}\right) \ - \ 0{,}7}{0{,}407}\right]\right\}^{1{,}2} \ = \ 0{,}0001$$

Ou seja, em condições quase ideais, a probabilidade de não resposta é muito pequena.

ANÁLISE DA EXPERIÊNCIA DO OPERADOR

A análise a seguir relaciona o tempo de resposta do operador frente a uma situação do dia a dia, dependendo de seu nível de estresse, de seu tempo de experiência e do tipo de interface (qualidade do console). Estes valores foram obtidos aplicando-se a Equação 1 a todas as combinações possíveis das Tabela 2, como, por exemplo, caso 1 se refere a Nível de Estresse Baixo e Interface do Operador Excelente, caso 2 se refere a Nível de Estresse Baixo e Interface do Operador Muito Boa e assim por diante.

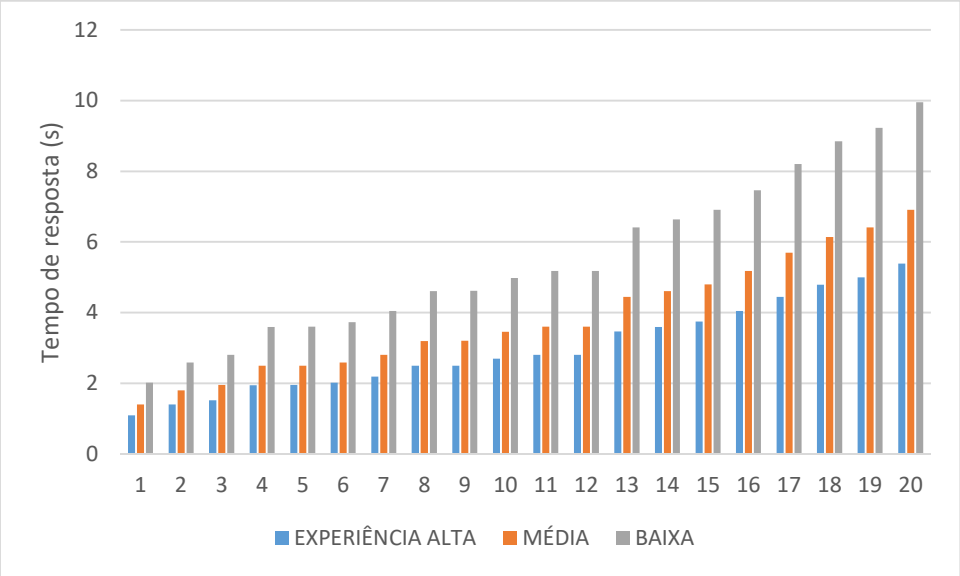
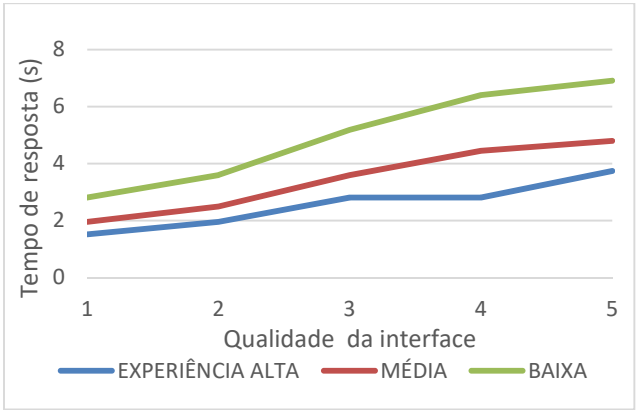


Fig. 2: Tempos de resposta relacionado com o tempo de experiência do operador.

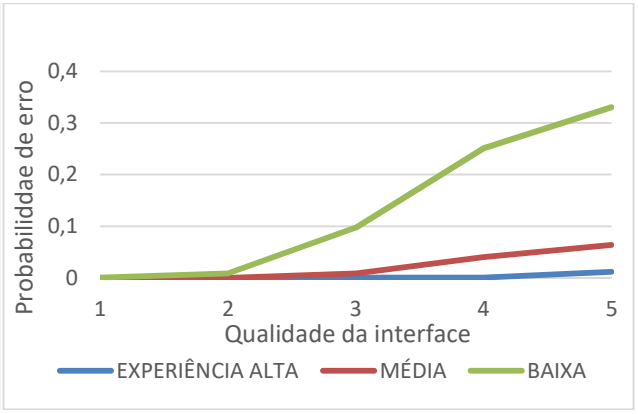
Para todos os casos analisados, o tempo de resposta varia de modo inversamente proporcional ao tempo de experiência do operador, ou seja, quanto maior a experiência, menor o tempo de resposta. Em alguns casos, a relação é de 1 para 2, indicando que o operador com baixa experiência tem um tempo de resposta igual ao dobro daquele com alta experiência.

ISBN 978-607-8242-11-5

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DA INTERFACE DA SALA DE OPERAÇÃO EM DIA DE CONDIÇÃO NORMAL DE ESTRESSE



(3a)

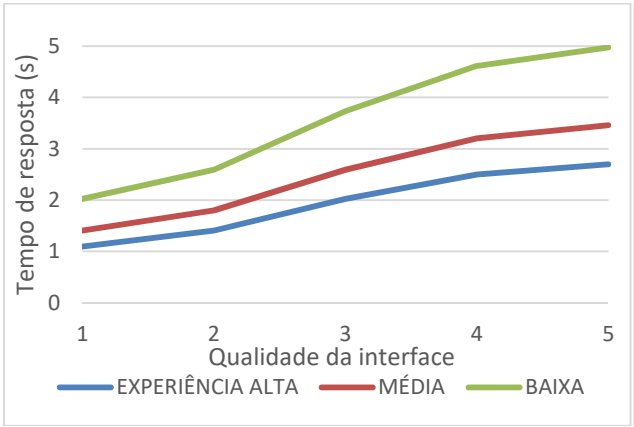


(3b)

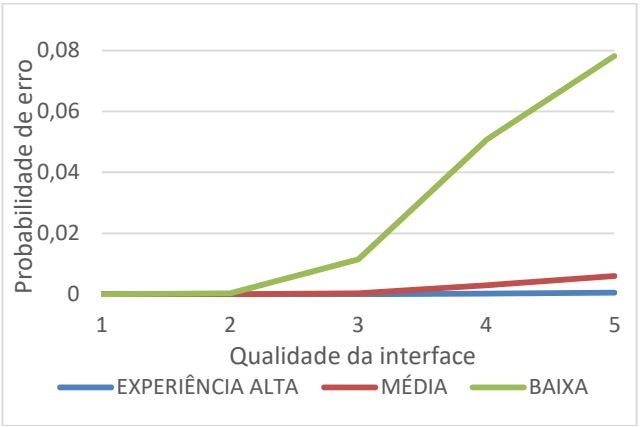
Fig. 3: Influência do Nível de Estresse (Condição Normal) no Tempo de resposta (3a) e na Probabilidade de Não-resposta (3b) variando a Qualidade da Interface (K_3) para cada Tempo de experiência do operador (K_1).

Em condição normal de estresse, até o terceiro nível de qualidade da interface, o tempo de resposta é aproximadamente linear, com pouca diferença entre operadores com alta e média experiência. Na questão da probabilidade do erro, com estresse normal, até o nível 3 da interface, praticamente não existe diferença entre operadores com alta ou média experiência. No caso de operadores com baixa experiência, no entanto, já a partir do nível 2 de interface, a probabilidade de erro cresce de maneira acentuada, alcançando um valor de 0,25 para o nível 4, ou seja um erro a cada quatro intervenções.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DA INTERFACE DA SALA DE OPERAÇÃO EM CONDIÇÕES DE BAIXO ESTRESSE



(4a)



(4b)

Fig. 4: Influência do Nível de Estresse (Condição de Estresse Baixo) no Tempo de resposta (4a) e na Probabilidade de Não-resposta (4b) variando a Qualidade da Interface (K_3) para cada Tempo de experiência do operador (K_1).

Em condições de baixo estresse, o tempo de resposta de operadores com alta e média experiência varia pouco com a qualidade da interface, seguindo um padrão linear. Já com o operador de baixa experiência, o tempo de resposta cresce de forma acentuada já a partir do nível 2 da qualidade da interface. Em relação à probabilidade do erro, a partir do nível 2 da qualidade da interface, para operadores com baixa experiência, a probabilidade de erro cresce de maneira acentuada, saindo de 1% (nível 3 de qualidade da interface) para 5% (nível 4 de qualidade da interface). Para operadores com alta e média experiência, até o nível 4 a qualidade da interface não influencia.

ISBN 978-607-8242-11-5

SIMULAÇÃO DO CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE ERRO HUMANO EM UM COS

Com a finalidade de se estimar a probabilidade do erro humano em um centro de Operação de Energia Elétrica no Sudeste do Brasil onde trabalham 58 operadores, obtém-se as seguintes informações sobre a Experiência do Operador: Alta (41%), Média (52%) e Baixa (7%). Na sequência, em entrevistas, os operadores classificaram a Interface Operador/Planta do seguinte modo: Excelente (8,3%), Muito Boa (41,7%), Boa/Regular (41,7%), Baixa (8,3%) e Muito baixa (0,0%).

Após obterem-se estas estatísticas, podem-se calcular valores médios para K1 e K3, pois a Equação 1 é linear em relação a estas constantes, obtendo-se os seguintes valores, condicionados às condições de cada nível de estresse:

Tabela 3: Tempo de resposta estimado aplicado em 58 operadores de um COS com valores médios de K_1 (-0,0607) e K_3 (0,23).

Nível de estresse	Tempo de Resposta com $\boldsymbol{T_{1/2}}$ = 2,5 s
Emergencial	4,16
Alta carga de trabalho	3,70
Condição normal	2,89
Baixo	2,08

Normalmente no COS as ações de um operador treinado é imediata (até 1 s, por exemplo), porém na sequência existirão outras ações a mais do operador que podem incluir até simulações na tela de comando (abre/fecha disjuntores, seccionadoras, etc...). Deste modo o tempo de referência para a ação ($T_{1/2}$) deve incluir o tempo para detecção do problema mais um tempo para diagnóstico. O tempo calculado da resposta do operador da Tabela 3 inclui os demais fatores: o tempo de experiência do operador, a qualidade da interface homem/planta e o nível de estresse.

CONCLUSÕES

O artigo procurou mostrar a influência de determinados fatores na probabilidade de erro humano e tempo de resposta de operadores de um centro de controle de sistemas elétricos de potência. Baseando-se em modelos da HCR (Human Cognitive Reliability) foram utilizados os fatores Habilidades, Regras e Conhecimento e as simulações foram efetuadas, envolvendo os Performance Shaping Factors: Treinamento e experiência, Ergonomia e Interação Homem-máquina e Nível de estresse.

Assim, considerando operadores com alta, média e baixa experiência, com a qualidade da interface variando de 1 (ótima) a 5 (pior) e considerando carga normal de estresse, dados oriundos de 58 operadores de uma concessionária de energia elétrica do sudeste brasileiro foram empregados e resultaram nos gráficos apresentados no texto. Nestes gráficos pode se observar que o tempo de resposta dos operadores é inversamente proporcional ao tempo de experiência, ou seja, quando maior a experiência, menor o tempo de resposta do operador numa determinada ação. Também pode-se observar que a qualidade da interface pouco influencia para operadores com alta ou média experiência, embora para operadores com baixa experiência influencia e muito, podendo crescer o tempo de resposta e a probabilidade de erro de modo acentuado já a partir do nível 2 da interface.

Estes fatos permitem concluir que mantendo níveis adequados de trabalho (menor estresse) e propiciando treinamentos que aumentem a experiência e o conhecimento dos operadores, poderão ser obtidos tempos de respostas mais imediatos e menores probabilidades de erro humano em suas atividades.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao grupo CPFL Energia e ao programa de P&D da ANEEL pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

 ISBN 978-607-8242-11-5

REFERÊNCIAS

Aranha Neto, E.A.C. et al. "*Multicriteria Approach for Performance Evaluation of Distribution Systems Operator*". IEEE T&D Conference – Latin America. Morelia. México. Sep. (2016).

Blackman, H., Gertman, D., Boring, R., "*Human Error Quantification Using Performance Shaping Factors in the SPAR-H Method*". 52nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomic Society (2008).

Boring, R.L. et al. "*The Measure of Human Error: Direct and Indirect Performance Shaping Factors*". 8th IEEE Conference on Human Factors and Power Plants, Monterey (2007).

Cohen, S. et. al. "*A Global Measure of Perceived Stress*". Journal of Health and Social Behavior, vol. 24, Dec. (1983).

Embrey, D.E. et al. "*SLIM-MAUD: An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgment*". USNRC, NUREG/CR-3518 (1984).

Kumamoto, H., Henley, E.J. *"Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists"*. Nova York: IEEE Press, (1996).

Martins, E.L. "*Estudo sobre Fatores de Desempenho e Probabilidade de Erro Humano em Centros de Operações de Sistemas de Potência*". Trabalho de Conclusão de Curso, UFSC, 2016.

Muniz Serrano, E.J. "*Classificação e Quantificação da Fiabilidade Humana na Relação Homem Máquina*". Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal (2009).

Netto, A.V.S. et al. "*Ferramenta para Avaliação do Treinamento de Operadores de Subestação em Simulador*". SBSE 2014 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Foz do Iguaçu. Abril. (2014).

Pasquali, L., "*Psicometria*", Revista de Enfermagem da USP, vol.43, pp.992-999 (2009).

Teive, R.C.G. et al. "*Sistema Especialista para Avaliação de Manobras de Operadores de Redes de Distribuição*", SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, Brasil, Maio (2016).

Teive, R.C.G. et al. "*Intelligent System for Automatic Performance Evaluation of Distribution System Operators*". ISAP - Intelligent System Applications to Power Systems, San Antonio, Texas, USA (2017).

Vieira, M.F.Q. et al. "*Composição de cenários de treinamento de operadores do sistema elétrico baseados no estudo de relatórios de ocorrências*". XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu. Outubro (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análise Multi Critérios Aplicada à Avaliação de Desempenho de Operadores de Sistemas de Transmissão

Jorge Coelho[1], Ivan L. Bianchini[1], Raimundo C. G. Teive[1], Fabiano F. Andrade[1], Fernando L. R. Mussoi[2], Alex L. R. Rese[1], Fredner L. Cardoso[3] e João Paulo Parreira[3]
(1) SEEnergia, Florianópolis/Santa Catarina-Brasil
(2) Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Florianópolis/Santa Catarina-Brasil
(3) CPFL Power Group, Campinas/São Paulo-Brasil
E-mail: jorge.coelho@seenergia.com.br

Resumo
Este trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação das ações executadas pelos operadores de sistemas de transmissão, frente a uma ocorrência de contingência no sistema, considerando manobras na rede. Os operadores são responsáveis por decisões complexas e fundamentais nos centros de operação, buscando um funcionamento adequado do sistema de potência. Eles devem ser capazes de desenvolver suas atividades com habilidade e acuracidade. Para isto, é essencial que suas ações sejam constantemente monitoradas e avaliadas com rigor, permitindo assim que os operadores possam analisar seus desempenhos e tenham a habilidade de prever as consequências de suas decisões. Este trabalho apresenta não somente uma explicação das características de operação dos sistemas elétricos de potência, mas uma metodologia de avaliação de desempenho das ações realizadas pelo operador, de forma que os pontos negativos possam ser minimizados e os pontos positivos sejam destacados. Os critérios de avaliação do desempenho do operador são definidos de acordo com as cinco dimensões da filosofia do Controle de Qualidade Total: Qualidade intrínseca (Produto), Custos, Distribuição (Serviço), Moral (Aspectos Pessoais) e Segurança (Conformidade). Os critérios adotados foram adaptados para este problema, baseado na experiência de um grupo de especialistas em sistemas elétricos de potência. Os critérios são divididos em diversos subcritérios para permitir a avaliação do desempenho do operador. Cada subcritério é avaliado por um descritor associado a uma métrica específica que indica o impacto causado por um procedimento não conforme executado pelo operador. Os pesos dos critérios foram determinados pelo método dos pesos ROC *(Rank-Order Centroid)*, o qual é baseado na informação implícita obtida da preferência ordinal dos critérios. Esta metodologia foi aplicada para um sistema real, com tensões entre 34,5 kV e 138 kV. Os resultados obtidos teêm demonstrado a viabilidade da metodologia proposta, principalmente no que se refere à modelagem da avaliação do desempenho de operadores de sistemas de transmissão.

Palavras-chave: Centro de Operação de Sistemas Elétricos, Desempenho de Operador, Análise Multicritério

Multiple attribute Decision Making applied to Performance Evaluation of Transmission System Operators

Abstract
This work presents a metholodogy for the evaluation of actions taken by power system operators facing an ocurrence in the system where there is management of operational switches. The operators are responsible for complex and crucial decisions in the system operation centers, for the adequate functioning of the electrical system. They should be able to develop their activities skillfully and accurately. For this, it is essential that their actions be monitored and evaluated constantly with rigor, allowing operators themselves to analyze their behavior and have the ability to foresee the consequences of their decisions. Thus, this work brings both an explanation of the electric power system operating characteristics and a performance assessment methodology of operator´actions, so that their negative actions can be minimized and positive points highlighted. The evaluation criteria are defined according to the five general dimensions of the Total Quality Control (TQC) philosophy, to assess the operator´s performance: Intrinsice Quality (Product), Costs, Delivery (Service), Morale (Personal Aspects) and Safety (Conformity). The adopted criteria were adapted to this problem, based on the expertise of a group of experts in electrical power systems. The criteria are divided into several sub-criteria to allow the evaluation of operator performance. Each sub-criterion is evaluated by a descriptor and a specific metric that indicates the impact caused by the non-conforming procedures of the operator. The criteria weights were determined by the Rank-Order Centroid – ROC method, which is based on information implicit in the criteria ordinal preference. The methodology was applied to a real power system, with voltages between 34.5 kV and 138 kV. The results have demonstrated the feasibility of the proposed methodology, mainly concerning the modeling of the performance evaluation of transmission network operators.

Keywords: Electric Power Systems Control Centers, Operator Performance, Muti Criteria Analisys

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUÇÃO

Com a rápida expansão e o aumento contínuo da complexidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), ao mesmo tempo em que se enfrenta um aumento de competição e mudanças no ambiente de regulação do setor elétrico, há a necessidade de evolução dos Centros de Operação do Sistema (COS). Neste contexto de mudanças, o papel de monitorar e controlar o Sistema Elétrico de Potência torna-se crítico e cada vez mais dependente do desempenho dos operadores do sistema em tempo real (LEITE; OLIVEIRA J. R; OLIVEIRA J. G, 2007).

Esta evolução tem conduzido a um aumento nos recursos de monitoramento disponíveis e, consequentemente, no aumento do volume de informações que o operador deve observar em um curto espaço de tempo durante uma contingência no sistema. A maioria das perturbações de grande porte tem como origem eventos e situações operativas de difícil previsão, composta pela combinação de várias ocorrências simultâneas. Neste cenário, muitas vezes, quem determina a ação que deve ser executada naquele momento é o próprio operador. Neste ambiente, sob pressão e estresse, aumenta-se a probabilidade de erros humanos, com possibilidades de graves perdas econômicas, problemas de natureza elétrica e de segurança, para os usuários, para os equipamentos e para o próprio operador.

As empresas de transmissão e distribuição de energia elétrica, com o intuito de suavizar os efeitos das ocorrências no sistema, elaboram instruções pré-estabelecidas de manobras operativas para recompor o sistema elétrico. Estas instruções são compostas por uma sequência de passos que os operadores devem seguir, em uma determinada situação, para recompor todo o sistema de uma forma otimizada. Entretanto, após uma ocorrência de grande porte, ou até mesmo de um blecaute, as condições básicas previstas nestas instruções talvez não se encontrem presentes no momento. A configuração do sistema pode apresentar fatores adversos que podem aumentar a probabilidade de erros operacionais e causar o insucesso da tentativa de recomposição.

Na situação de uma condição imprevista, através da utilização dos sistemas de monitoramento e controle, o operador deve ter a capacidade de observar todas as variáveis e identificar, de forma rápida e precisa, as ações preventivas para garantir a estabilidade do sistema. Porém, dependendo da condição do sistema elétrico no momento, a importância de cada variável de controle depende da própria configuração imprevisível do sistema. Assim, muitas vezes, cabe ao operador avaliar a situação e elencar os principais pontos que devem ser primeiramente observados.

Com o objetivo de manter a confiabilidade e segurança do sistema elétrico, minimizando os erros dos operadores e aumentando a confiança dos mesmos na realização de seu trabalho, as companhias de energia buscam melhorar a qualificação de seus funcionários através da implantação de simuladores para treinamento e reciclagem periódica (OLIVEIRA et al., 2005). Porém pouco se fala na comparação do desempenho dos operadores antes e após o treinamento através de avaliação de suas ações na operação em tempo real.

Neste sentido necessita-se aplicar um método de avaliação do desempenho dos operadores, visando aperfeiçoar a gestão de dados e a observação da informação em tempo real, privilegiando informações de alto nível e particularizando-as ao contexto da condição operativa. Desta forma, pode-se verificar a eficiência e eficácia de cada ação dos operadores, desenvolvendo e aprimorando novos recursos de apoio à tomada de decisão e garantindo uma ação ágil e segura, criando métodos para evoluir a capacitação dos recursos humanos na operação de sistemas elétricos de potência.

REVISÃO DA LITERATURA

O tema avaliação do desempenho de operadores de Sistemas Elétricos de Potência, não é abordado de forma direta na literatura, pois o foco maior tem sido na avaliação de treinamentos de operadores, nos simuladores de operação e na automação dos sistemas de supervisão e controle.

Com relação ao treinamento, destacam-se os sistemas das empresas CHESF (LEITE; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2007) e Eletrobrás Furnas (RIBEIRO; ALVES, 2010). Os autores citam dois mecanismos de avaliação dos treinamentos, um teórico e outro prático. O mecanismo teórico é composto de aplicações de provas teóricas com atribuição de nota. Já a avaliação prática consiste na observação e análise, por um tutor, do operador em atividade.

Conforme mencionado por Leite, Oliveira e Oliveira (2007), a empresa Quality Training Systems (QTS), consultora atuante no setor elétrico internacional, ao oferecer treinamento no uso do simulador SAGE/Simulop, propôs os métodos de avaliação Formativa e Somativa, além do uso de cartões de acompanhamento para apoiar na análise e avaliação do operador pelo tutor do treinamento. São registrados nestes cartões as ações realizadas e as observações sobre o operador em treinamento. A abordagem utilizada pela QTS se apoia no uso de ferramentas de treinamento, a exemplo de simuladores, porém não prevê a adoção de ferramentas para auxiliar o tutor em sua avaliação final do operador.

Outro trabalho relacionado à avaliação é de Netto, Ferreira e Vieira (2012), que propõe um programa para treinamento e sugere como avaliar a tarefa e os riscos. No entanto, como nos demais casos, fica a critério do avaliador selecionar quais informações são mais relevantes à avaliação. Ele também sugere a elaboração de um documento pelo tutor, com um resumo das métricas que deseja avaliar durante o treinamento, tais como: importância da tarefa; dificuldade de desempenhá-la; dificuldade de aprendizado; frequência na qual é

 ISBN 978-607-8242-11-5

desempenhada; e o tempo gasto para realizá-la. Estas métricas possuem alguma relação com o conjunto que será tratado na metodologia apresentada neste trabalho.
A ferramenta desenvolvida por Netto, Ferreira e Vieira (2014), utiliza sistemas de tutores inteligentes para avaliação do conhecimento dos operadores durante a identificação de faltas e na restauração do sistema. Entretanto, esta ferramenta não avalia o desempenho do operador baseada na tarefa executada, mas em uma descrição textual fornecida pelo próprio operador sobre suas atividades e o que faria para identificar o problema proposto. A partir desta descrição elaborada pelo operador, o sistema tutor inteligente avalia a estratégia proposta, apontando as falhas no raciocínio e propondo novos cenários.
Por fim, há ferramentas de treinamento, como ASTRO (SILVA et al., 2009), que oferecem suporte à avaliação através de um analisador de desempenho, o qual apoia o instrutor do treinamento na análise e qualificação de uma simulação realizada. Esta ferramenta gera um *feedback* para o operador de modo que o mesmo realize uma auto-avaliação de seu desempenho para aprimorá-lo nas etapas seguintes do treinamento ou em sua rotina profissional. No entanto, este suporte é limitado, já que apresenta como resultado apenas as ações consideradas inválidas.
Contudo, em todas as ferramentas disponíveis na literatura, a análise, a qualificação do resultado do treinamento e a mensuração do desempenho são atribuições do tutor, para as quais não são oferecidos muitos recursos específicos para uma avaliação final.

ANÁLISE DE OCORRÊNCIAS NA SUBTRANSMISSÃO

O sistema elétrico é incessantemente monitorado e avaliado por um grande número de instituições, empresas, agentes e profissionais da área, que observam suas condições e avaliam quaisquer modificações em seu funcionamento. Toda ocorrência no sistema elétrico é registrada e, dependendo de seu impacto, é analisada mais detalhadamente. Porém, muitas vezes são observadas apenas as consequências da ocorrência para o sistema elétrico e pouco se fala na contribuição do operador, seja ela positiva ou negativa.
Diferentemente de avaliações realizadas durante o processo de treinamento, em simulações com cenários de sequência operacional já especificada, a análise constante da operação em tempo real pode trazer resultados relevantes, como qualificar o comportamento do operador diante de uma contingência.
Uma das importâncias de analisar a ação do operador frente a uma adversidade do sistema e avaliar seu desempenho é a criação de um banco de dados, considerando contingências passadas, a fim de obter um histórico de desempenho de toda a equipe de operação. Para isso, deve-se monitorar as ações de forma padronizada, de tal maneira que treinamentos de reciclagem não sejam ministrados de forma desnecessária, mas também não restem lacunas de conhecimento no momento de uma ação nas atividades de operação. É importante destacar que mesmo com a habilidade e capacitação adquiridas com os treinamentos necessários e com toda a documentação de apoio atualizada, o operador pode cometer erros devido ao estresse, fadiga, problemas particulares ou mesmo excesso de confiança, entre outros fatores de cunhopessoal.
Também podem ser constatados “vícios de operação” quando o operador está tão acostumado a realizar determinadas tarefas que acaba por descuidar de procedimentos normativos e de segurança. ,. Essa questão nem sempre é verificada por não apresentar falhas aparentes, mas é fundamental a padronização da operação a fim de eliminar possíveis fatores que acarretem erros.
Diante de uma ocorrência no sistema o operador deve tomar determinadas medidas, analisando as características dessa falha para proceder com as melhores práticas de operação. A maneira como o operador analisa as ocorrências está representada de forma simplificada na Figura 1.
A análise de ocorrência pode ser considerada a primeira ação que o operador deve tomar diante de uma perturbação no sistema elétrico. As perturbações geram distúrbios que podem provocar atuações de proteções, perdas de linhas de transmissão, danos em equipamentos, entre outros. Analisando a configuração momentânea em tempo real o operador deve verificar um ou mais pontos do sistema para identificar em qual componente a perturbação teve origem, com intuito de identificar a sua causa. As soluções envolvidas devem ser providas rapidamente, geralmente em questões de minutos, já que o sistema funciona em tempo real.
O sistema elétrico nem sempre possui disponível todos os seus componentes em um determinado momento, eventualmente há equipamentos em manutenção, fora de utilização por falha ou com impedimentos de manobras. Portanto, cabe ao operador avaliar a configuração da rede elétrica no momento da ocorrência e avaliar as possibilidades de manobras.
No momento da análise deve-se observar também que a causa pode estar em mais de um ponto do sistema, ou a causa da falha em um determinado ponto pode estar na outra extremidade, por descoordenação das proteções ou distúrbios simultâneos. De modo geral, as ocorrências têm origem em causas que podem ser classificadas como externas ou internas (PATRÃO; ALMEIDA; DELGADO, 2005).

 ISBN 978-607-8242-11-5

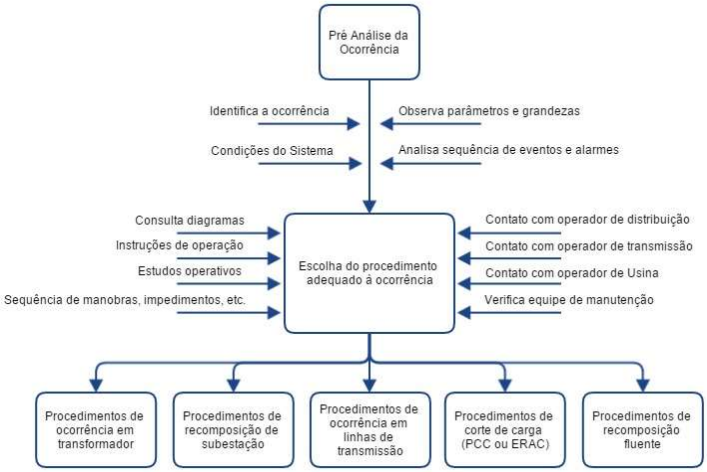


Figura 1 - Análise de ocorrência

Causas externas são classificadas como distúrbios oriundos de condições atmosféricas adversas, tais como, trovoadas e raios, como por interferência de árvores e animais com os condutores elétricos, falha de isoladores em consequência de poluição e sujeira, e também por situações acidentais, tais como colisão de veículos com postes ou ruptura de cabos subterrâneos durante trabalhos de construção civil. Ocorrências por causas externas, normalmente, são momentâneas e de rápido reestabelecimento, dependendo muitas vezes apenas da agilidade do operador em identificar a falha e atuar sobre o sistema.
Causas internas são consideradas como falhas no sistema por degradação do isolamento em linhas, rompimento de cabos, queima de transformadores entre outros elementos do sistema elétrico. Ocorrências por causas internas possuem características especificas, que dependem muito da configuração momentânea do sistema e do local da falha. Estas causas podem ser de fácil identificação, pela atuação de alarmes, por exemplo, mas que exigem certa destreza dos operadores para resolverem o problema.

METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DE OPERADORES

Nas seções seguintes serão elencados os critérios e definidas métricas para avaliação das ações dos operadores. Além de definir as métricas utilizadas e seus argumentos, serão apresentadas as formas de agregação e ponderação dos seus valores. Com isto é possível analisar, de forma numérica, os desvios operativos das ações dos operadores ,, visando sempre aprimorar seu desempenho.

MÉTODO MULTICRITÉRIO

A tarefa de operação do sistema elétrico em tempo real envolve uma grande quantidade de recursos de monitoramento e controle, consequentemente, um grande volume de informações que o operador deve observar em um curto espaço de tempo. Sendo que, muitas vezes, algumas informações podem ser mais relevantes que outras ou até mesmo conflitantes e sujeitas a inúmeras restrições.
Os objetivos dos operadores são norteados pela necessidade de executar uma série de procedimentos para que os indicadores de desempenho operacional e de qualidade da energia sejam atendidos. Entretanto, diante de um cenário conflitante, o operador deve tomar a decisão de satisfazer, ou não, determinados critérios e realizar ações preventivas e corretivas para garantir a continuidade e conformidade do fornecimento de energia elétrica.
Os métodos de análise multicritério permitem a estruturação do problema e são indicados para o esclarecimento, assimilação e quantificação dos diversos aspectos objetivos e subjetivos da tomada de decisão. Os procedimentos formais e sistemáticos da análise multicritério aumentam a credibilidade dos resultados da análise e favorecem o estabelecimento das alternativas consideradas como mais relevantes (MUSSOI; TEIVE, 2013).
Desde os anos 70, a comunidade científica tem proposto uma série de métodos multicritérios que consideram mais de um aspecto e, portanto, avaliam as ações segundo um conjunto de critérios. A premissa a ser adotada depende das características do problema ,e sua escolha influencia o processo de estruturação do modelo de análise e, possivelmente, a definição dos critérios a serem utilizados. A preocupação inicial na estruturação é a definição de quais critérios serão avaliados e como estes se relacionam com as alternativas em análise para cada caso e como será realizada a devida ponderação do problema.
Segundo Mussoi e Teive (2013), em função da abordagem e dos diferentes tipos de dados, os problemas multicritérios podem ser classificados, conforme descrito como: tomada de decisão multicritério (*Multiple Criteria Decision Making* - MCDM), também conhecida por tomada de decisão multiatributo (*Multiple Attribute Decision Making* - MADM), e tomada de decisão multiobjetivo (*Multiple Objective Decision Making* - MODM). Neste trabalho é utilizada a abordagem MCDM, pois é aplicada do ponto de vista da avaliação e, geralmente,

 ISBN 978-607-8242-11-5

é associada aos julgamentos das preferências entre um número limitado de alternativas já determinadas e descritas por seus critérios.
Cada critério é descrito por uma métrica que mede o desempenho das ações potenciais com relação a um determinado aspecto. Neste enfoque, deseja-se avaliar as ações dos operadores em comparação a uma operação considerada como adequada. Para definição dos critérios foram reunidas opiniões dos principais envolvidos no processo, os próprios operadores.

ÁRVORE DE CRITÉRIOS

Uma Árvore de Critérios é uma estrutura que, através da decomposição de critérios mais complexos em subcritérios de mais fácil mensuração, elabora uma hierarquia dos diversos níveis de critérios do problema em questão.
A construção de uma árvore de critérios inicia pela identificação dos objetivos da avaliação no topo da estrutura hierárquica, aos quais são associados os principais critérios no nível imediatamente inferior. Esses critérios são decompostos em subcritérios mais específicos e mais fáceis de serem analisados, definindo a hierarquia da estrutura da árvore. Os critérios do nível mais inferior permitem a mensuração do desempenho da análise por meio de descritores diretos ou indiretos. A hierarquia não deve conter laços, devendo existir apenas uma ligação de um critério inferior para um critério superior. Os critérios superiores na hierarquia podem agrupar um conjunto de subcritérios em uma mesma área de interesse (MUSSOI e TEIVE, 2013).
Na construção da Árvore de Decisão é importante destacar que cada critério proposto terá um descritor ou métrica, indicando o incremento ocasionado pela ação malsucedida do operador (COELHO et al., 2016), como pode ser observado na Figura 2.

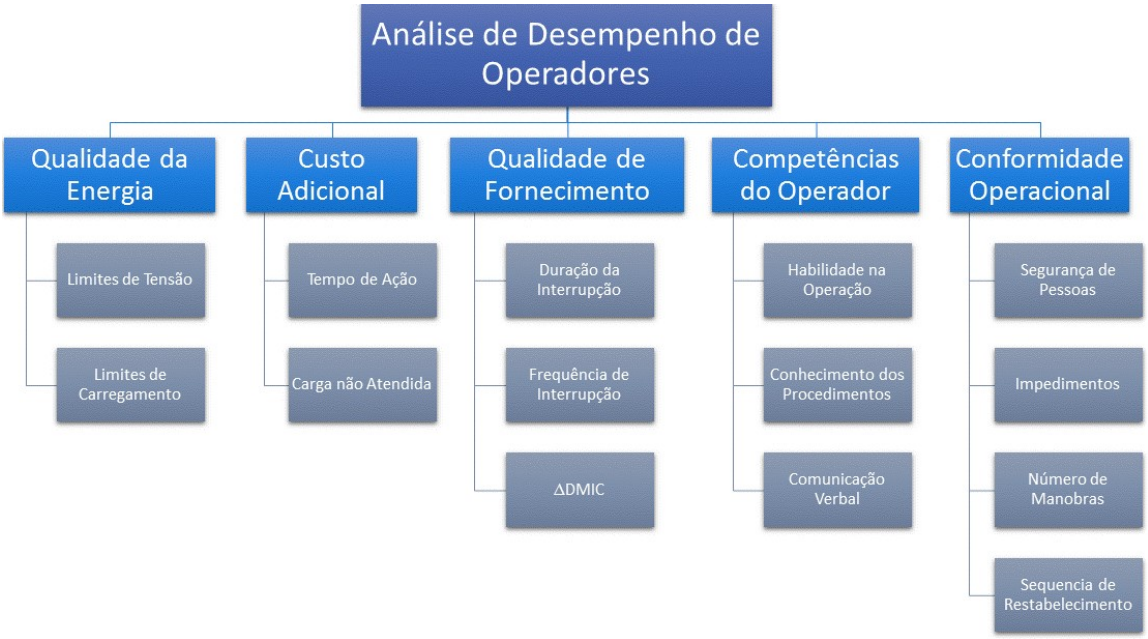


Figura 2 – Árvore de Critérios Proposta para Avaliação de Desempenho de Operadores

CRITÉRIOS

Para a metodologia de avaliação proposta, os critérios são divididos conforme a filosofia do Controle de Qualidade Total (CQT), considerando-se as cinco dimensões gerais: Qualidade Intrínseca, Custos, Entrega/Atendimento, Moral e Segurança. Estas cinco dimensões foram adaptadas ao tema deste trabalho e nomeadas respectivamente como: Qualidade da Energia, Custo Adicional, Qualidade de Fornecimento, Competências do Operador e Conformidade Operacional. Estes critérios são apresentados em uma Árvore de Critérios conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, justificados da seguinte maneira:

- **Qualidade da Energia**: é a qualidade do produto que as concessionarias oferecem aos seus consumidores, a própria energia elétrica. Neste caso, considera-se a tensão e o carregamento nas linhas.
- **Custo Adicional**: trata-se do custo adicional pelo não suprimento da energia fornecida que o operador pode trazer à concessionária por um erro operacional.
- **Qualidade de Fornecimento**: a qualidade de fornecimento de energia elétrica é apurada através dos indicadores de continuidade de fornecimento da ANEEL, sendo que este critério procura quantificar através de seus subcritérios a parcela de responsabilidade do operador na apuração dos indicadores DEC, FEC e DMIC.

ISBN 978-607-8242-11-5

- **Competências do Operador**: as competências dos operadores são baseadas em suas habilidades, conhecimentos e comunicação verbal. É um critério que analisa um caráter mais pessoal do operador em seu ambiente de trabalho.
- **Conformidade Operacional**: a conformidade operacional proporciona a segurança nas operações em tempo real e é um critério primordial quando se trata de ações que envolvam energia elétrica, principalmente em tensões elevadas. Este critério avalia a conformidade de manobras e a segurança nos procedimentos do operador, para os usuários, para os equipamentos, para o sistema e para o próprio operador.

PESOS ATRAVÉS DO MÉTODO ROC

Os pesos baseados no centroide (*Rank Order Centroid Weights*), conforme Barron e Barret (1996), são resultantes de uma análise sistemática da informação contida na preferência ordinal dos critérios através de um ranque. Os pesos ROC são calculados a partir dos vértices de um simplex S_n, definido por $w_1 \geq w_2 \geq w_3 \geq \cdots \geq w_n \geq 0$ e $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$, e pelos vértices: $e_1 = (1, 0, \ldots, 0)$, $e_2 = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \ldots, 0\right)$, $e_3 = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, \ldots, 0\right)$, ..., $e_n = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \ldots, \frac{1}{n}\right)$. Desta forma, sendo S_n o espaço provável dos pesos, se o conjunto de informações for completamente estabelecido pelo ranque de todos os critérios, então todos os pontos em S_n podem ser considerados igualmente prováveis, e a densidade dos pesos é uniforme. Os pesos são as médias das coordenadas correspondentes que definem o centroide. Como um simplex tem o centroide definido pelos seus vértices, primeiro encontram-se os vértices e depois se obtém suas médias. De forma geral, para o *i*-ésimo critério mais importante, o peso ROC é (MUSSOI; TEIVE, 2013):

$$\mathrm{wr}_{(i)} = \frac{1}{n}\sum_{j=i}^{n}\left(\frac{1}{\mathrm{j}}\right), i = 1, \ldots, n. \quad (1)$$

De acordo com simulações de Barron e Barret(1996), , tanto os pesos considerados verdadeiros como os pesos sintéticos gerados pelo método ROC conduzem à mesma solução em 75 a 87% dos casos. Embora envolva um processo matemático menos transparente, o método é adequado para uma análise multicritério, pois apresenta uma excelente relação entre facilidade de obtenção dos pesos e eficiência na análise dos resultados, onde a única informação requerida é o ranque dos critérios com seus respectivos pesos (MUSSOI; TEIVE, 2013).

A Figura 3 ilustra o simplex formado por apenas três critérios com as restrições $1 \geq w_1 \geq w_2 \geq w_3 \geq 0$ e $w_1 + w_2 + w_3 = 1$. Os valores viáveis para os pesos são restritos à pequena região triangular indicada na Figura 3.

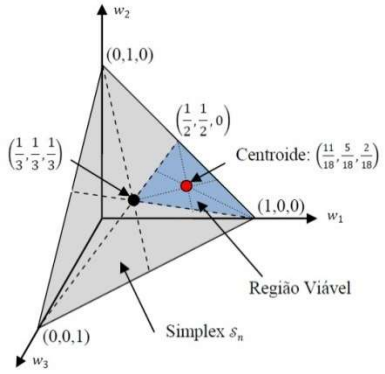


Figura 3 - Pesos ROC (MUSSOI e TEIVE, 2013)

ESTUDO DE CASO

Para e validar a metodologia proposta nesse trabalho apresenta-se uma avaliação do modelo de sistema com uma ocorrência real, onde o operador cometeu erros operacionais no processo de recomposição. Este modelo de caso real foi obtido por meio de entrevista com operadores de subtransmissão de sistemas elétricos de potência, onde o operador recriou o cenário e descreveu a sequência de ações operacionais realizadas. Os valores apresentados para o modelo são realísticos, mas não correspondem aos valores de medidas reais obtidos em sistemas supervisórios como SCADA, por exemplo, contudo são baseados em condições operacionais de um sistema real.

DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA

ISBN 978-607-8242-11-5

Fez-se uma simulação com dados de um sistema teste de subtransmissão baseado em Bianchini (2016), composto por subestações de subtransmissão e subestações de transmissão, não sendo representados os setores de distribuição com tensões de 34,5 kV e 13,8 kV. As subestações de subtransmissão são nomeadas como B, C, D, E, G, H e I. As subestações de transmissão são nomeadas como A e F e são consideradas como as fontes para o sistema, conforme a Figura 4. A limitação do sistema se dá a jusante das duas subestações transmissoras, sendo que não serão avaliadas as consequências das ações do operador a montante das mesmas. Com isso, não foram representadas as linhas e barras dos sistemas com tensões superiores a 138 kV, entretanto as subestações de transmissão não são consideradas como uma barra infinita. Observa-se que o sistema está em completo funcionamento, com todas as barras e linhas energizadas, suprindo plenamente a carga e todos os disjuntores do sistema estão operando fechados, representados pelos quadrados vermelhos com suas respectivas numerações acima. Consumidores conectados em alta tensão são representados por uma flecha nos desenhos. Os valores de tensões nas barras e os limites de carregamentos em todos os pontos do sistema estão dentro do permitido. Não há nenhuma intervenção sendo realizada no momento da ocorrência e nenhuma equipe encontra-se nas dependências das subestações.

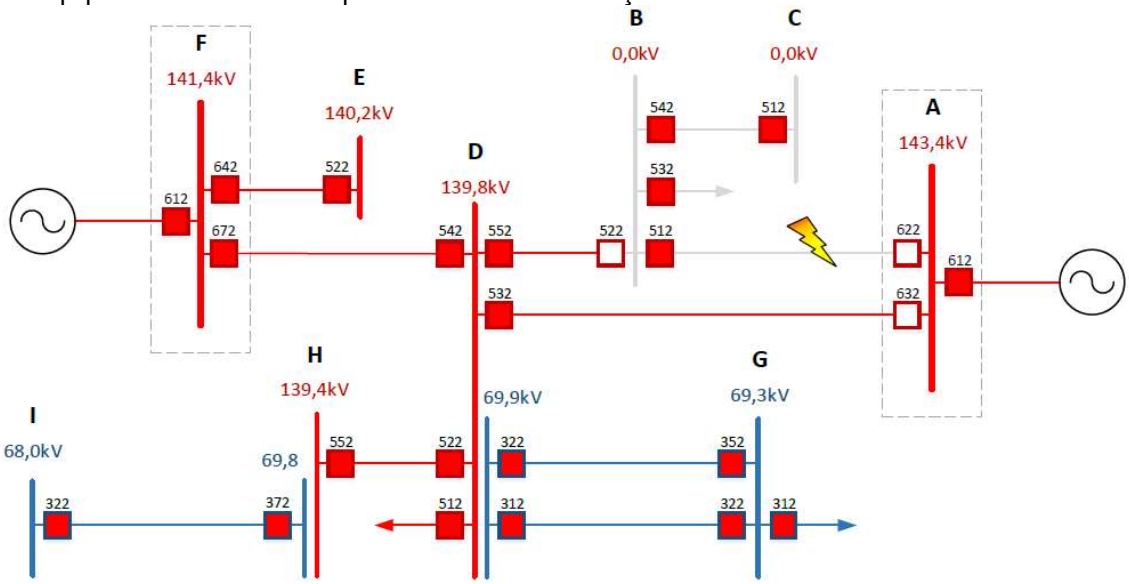


Fig. 4: Sistema proposto com ocorrência de descarga na LT A→B e não abertura do DJ 512

A ocorrência em análise teve como origem um evento relativamente comum em sistemas de subtransmissão no Brasil, onde descargas atmosféricas atingem as torres de transmissão ou os próprios condutores das linhas, sensibilizando e provocando a atuação do sistema de proteção. No sistema proposto a descarga atmosférica atingiu uma das torres do trecho da linha A→B, como pode ser observado na Figura 4, sensibilizando os relés de proteção dos disjuntores (DJ) de saída de linha 622 e 632 da subestação transmissora A. Na sequência destacam-se os seguintes fatos:

- A abertura do disjuntor 632 da saída da linha A→D pode ser explicada pelo fato das linhas A→B e A→D compartilharem a mesma torre atingida pela descarga atmosférica, desta forma a proteção desta linha também foi sensibilizada.
- O relé de proteção do disjuntor 512 da subestação B não foi sensibilizado pelo distúrbio por descoordenação de proteção, sendo que o disjuntor se manteve fechado.
- O relé de proteção da linha B→D atuou como retaguarda, abrindo o disjuntor 522 da subestação B.
- Com a abertura dos devidos disjuntores, as subestações B e C foram desenergizadas, conforme representado pelas linhas e barras na cor cinza da Figura 4, resultando na falta de suprimento de energia nesta área do sistema. A ocorrência afetou cerca de 178.598 consumidores, totalizando uma carga não suprida no valor de 32,6 MVA.

Por estar envolvido em uma ocorrência semelhante em outro ponto do sistema, o operador em questão não identificou de imediato a atuação das proteções e abertura dos disjuntores. Assim:

- O profissional responsável pela subestação transmissora entrou em contato com o centro de operação alertando o operador sobre a ocorrência, solicitando a abertura dos disjuntores 512 da subestação B e 532 da subestação D para efetuar o religamento das linhas sem tensão de retorno e com os disjuntores abertos, conforme procedimentos preestabelecidos, seguindo a sequência do fluxo de potência, energizando as linhas da fonte em direção à carga.
- Alertado pelo profissional da transmissora, o operador identificou rapidamente a ocorrência e iniciou sua tomada de ação. No entanto, indevidamente, por uma desatenção na execução da ação ou pela similaridade das nomenclaturas das subestações, bem como, pela proximidade dos comandos na tela

ISBN 978-607-8242-11-5

do sistema supervisório, o operador efetuou o comando de abertura do disjuntor 542 da subestação D, cometendo um erro operacional.

- Com a abertura indevida deste disjuntor o operador causou a desenergização das subestações D, G, H e I, causando a interrupção do fornecimento de energia de toda a parte inferior do sistema. Assim sendo, esta nova interrupção afetou cerca de mais 327.736 consumidores, acrescentando um valor de carga não suprida de 65,1 MVA.

Na sequência, por meio da atuação de uma grande sequência de alarmes das subestações afetadas, o operador identificou seu erro e relatou ao profissional da transmissora o que havia acontecido. Assim:

- O profissional da transmissora também identificou o erro pela interrupção no suprimento de carga da subestação transmissora F por meio da linha F→D.
- O operador solicitou à transmissora que aguardasse um momento para que efetuasse a recomposição da área afetada pela ação errada.
- Porém, não é permitido o religamento de todas as subestações afetadas em bloco, portanto o operador precisou abrir todos os disjuntores da barra da subestação D, dando sequência à recomposição desejada.
- Durante a recomposição da área afetada pela ação errada do operador, ao energizar a barra D com os disjuntores abertos, a tensão na barra se eleva, ultrapassando os limites operativos, como pode ser observado na Figura 5. Deste modo ocorreu a violação do limite de tensão de uma das barras do sistema proposto.
- O operador efetua a sequência de recomposição desta área corretamente, primeiro energizando o setor de 138 kV, em seguida a linha D→H, depois o consumidor ligado em alta tensão e por último o setor de 69 kV.

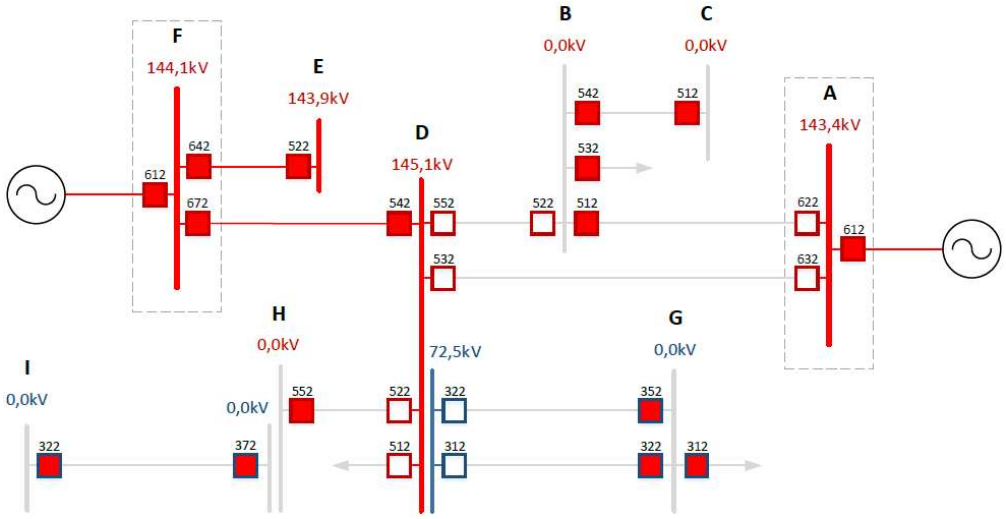


Fig. 5: Sistema proposto com ocorrência de descarga na LT A→B e não abertura do DJ 512

Somente após a recomposição da área afetada pelo seu erro e as tensões nas barras estabilizadas dentro de seus limites, o operador realiza as ações corretas que deveriam ter sido tomadas desde o início da primeira interrupção. O operador efetua o comando de abertura no disjuntor 512 da subestação B e autoriza o profissional da transmissora a efetuar o religamento das linhas, sendo que o disjuntor 532 da subestação D foi aberto durante o processo de recomposição da subestação D.

Com a energização das linhas, o operador prossegue com a recomposição das subestações B e C, que podem ser religadas em bloco, efetuando o comando de fechamento no disjuntor 512 da subestação B, suprindo a carga que não estava sendo atendida no início da ocorrência. Após o suprimento de toda a carga que não estava atendida, devido a fechamento do disjuntor 512 da subestação B, o sistema ainda não se encontra em condições de segurança de operação, pois o disjuntor 522 da subestação B e os disjuntores 532 e 552 da subestação D ainda estão operando abertos, não fechando o anel de ligação entre as subestações transmissoras (esta situação não está representada).

Por fim, o operador verifica que a diferença das tensões nas extremidades dos polos do disjuntor é inferior a 10%, efetuando o fechamento do anel com sucesso, retornando à configuração inicial do sistema.

AVALIAÇÃO DAS AÇÕES TOMADAS

Para a avaliação das ações do operador perante a ocorrência descrita anteriormente, utilizando a metodologia desenvolvida, primeiramente serão evidenciadas as ações que fazem parte dos critérios de avaliação, na ordem de importância dos critérios.

ISBN 978-607-8242-11-5

- **Segurança de pessoas**: não houve nenhuma condição de risco durante a ocorrência.
- **Impedimentos**: nenhuma ação impeditiva foi realizada pelo operador.
- **Carga não atendida (ΔCw)**: a carga não atendida no início da ocorrência é de 32,6 MVA, sendo que o erro do operador acrescentou 65,1 MVA no valor de carga não atendida, totalizando 97,7 MVA não supridos durante a ocorrência. (= 65,1/100)
- **Tempo de ação (Δt)**: o tempo total da ocorrência foi de 12 minutos, sendo que o operador demorou 6 minutos para identificar a ocorrência e efetuar a ação errada, 2,5 minutos para recompor a área afetada pelo seu erro e mais 3,5 minutos para recompor a área afetada no início da ocorrência após contato com a transmissora. Do tempo total da ocorrência serão expurgados 2 minutos referentes ao tempo de contato com o profissional da transmissora e dos comandos efetuados pelo profissional. (= 10/12).
- **Frequência de interrupção (ΔFEQ)**: a ocorrência totalizou 6 pontos com desligamentos, sendo que 2 no início da ocorrência e 4 por responsabilidade do operador. (= 4/6).
- **Duração da interrupção (ΔDEC)**: no início da ocorrência foram atingidos cerca de 178.598 consumidores, permanecendo 12 minutos sem energia. Após o erro do operador mais 327.736 consumidores foram atingidos, permanecendo 2,5 minutos sem energia. O número total de consumidores no sistema proposto é de 629.838. O ΔDEC é calculado conforme eq. (2):

$$\Delta\mathrm{DEC} = \frac{\sum_{i=1}^{k}\left[\left(\mathrm{Ca}(i)-\mathrm{Ca}(i-1)\right)*\vartheta\right]*t(i)}{\mathrm{C}_S * t(k)} \qquad (2)$$

Onde:
$\mathrm{Ca}(0)$ = Número total de consumidores atingidos no início da ocorrência;
$\mathrm{Ca}(i)$ = Número total de consumidores atingidos após tomada de ação;
C_s = Número total de consumidores na área de atuação do operador;
$\mathrm{t}(i)$ = Tempo, horas ou fração de horas, de duração da interrupção dos consumidores afetados;
$\mathrm{t}(k)$ = Tempo, horas ou fração de horas, de duração da interrupção;
i = Ação tomada;
ϑ = 1, se $\mathrm{Ca}(i) > \mathrm{Ca}(i-1)$ ou $\vartheta = 0$, se $\mathrm{Ca}(i) < \mathrm{Ca}(i-1)$;
k = Número total de tomadas de ação durante a ocorrência.

- **Número de manobras (ΔM)**: o número de manobras realizadas pelo operador foi muito superior ao desejado pelo fato da necessidade de recompor toda a área afetada pelo seu erro. O operador deveria ter efetuado 5 manobras e realizou 19. Neste caso, saturou em 1 (100%).
- **Limites de carregamento (ΔS)**: nenhum limite de carregamento foi ultrapassado durante a ocorrência
- **Sequência de restabelecimento (ΔR)**: considerando que após sua manobra errada o operador restabeleceu o sistema na sequência correta, apenas a própria manobra indevida estava fora da sequência desejada. (= 1/19).
- **Limites de tensão (ΔBV)**: durante a recomposição 1 barra teve seu limite de tensão violado, considerando um total de 7 barras no sistema. (= 1/7).
- **ΔDMIC ($\Delta\mathrm{DMIC}_{max}$):** o consumidor alimentado em AT da subestação B teve um novo valor para seu DMIC nesta ocorrência, passando de 10 minutos (10/60 horas) para 12 minutos (= 12/60 horas).

Com essas métricas , pode-se calcular o valor para cada critério, multiplicando pelos seus pesos ROC e chegando a um resultado da avaliação final, conforme apresentado na Tabela I.

Tabela I: Avaliação das Ações na Ocorrência

Critérios	Pesos ROC (wr*i*)	Valor calculado (C*i*)
Segurança de pessoas *	0,27453	0,00000
Impedimentos *	0,18363	0,00000
Carga não atendida (ΔCw)	0,13817	0,65100
Tempo de ação (Δt)	0,10787	0,83333
Frequência de interrupção (ΔFEQ)	0,08514	0,66667
Duração da interrupção (ΔDEC)	0,06696	0,35652
Número de manobras (ΔM)	0,05181	1,00000
Limites de tensão (ΔBV)	0,03882	0,14286
Sequência de restabelecimento (ΔR)	0,02746	0,05263
Limites de carregamento (ΔS) *	0,01736	0,00000
ΔDMIC (ΔDMICmax)	0,00826	0,20000
Av= ∑ wr*i* . C*i*	**1,0000**	**0,32093**
A*final* **= (1 - Av) . 100**	**67,907**	

*critério não afetado

ISBN 978-607-8242-11-5

Verifica-se na Tabela I que as ações do operador afetaram quase todos os critérios, apenas não gerando nenhuma situação de risco a pessoas, não cometendo nenhuma ação impeditiva e não tendo nenhum limite de carregamento ultrapassado. Seu tempo de ação foi significante, tanto pela demora em iniciar o atendimento da ocorrência como para restabelecer a área afetada pelo seu erro. Com isso, houve a contribuição nos indicadores de qualidade da empresa por responsabilidade do operador, pelos critérios de "Frequência de interrupção", "Duração da interrupção" e "ΔDMIC". Pode-se considerar que a pontuação é aceitável com o esperado, pois o erro do operador foi penalizado por meio de diversos critérios independentes.

CONCLUSÕES

A metodologia de avaliação do desempenho de operadores de subtransmissão apresentada envolve o tratamento de diversos critérios técnicos, teóricos, práticos e interpessoais. Assim, o objetivo de elencar critérios e suas justificativas para análise da decisão foi alcançado, permitindo que o desempenho dos operadores seja avaliado constantemente, buscando manter a qualidade do serviço e produto energia elétrica, aumentando a confiança dos profissionais na realização de seu trabalho.

A literatura especializada é insuficiente em oferecer uma abordagem que permita tratar o assunto da operação em tempo real, ou uma forma clara de integrar, em um modelo analítico, a avaliação da parcela que as ações do operador influenciam nos indicadores de desempenho da concessionária de energia.

Embora os pesos ROC necessitem apenas do julgamento da importância ordinal dos critérios, a determinação da ordem de importância é mais simples e segura para o avaliador. Essa questão é determinante em virtude do número considerável de critérios utilizado na metodologia.

Vale ressaltar que mesmo para tarefas relativamente complexas, o julgamento das ações dos operadores com a metodologia proposta reflete em uma avaliação satisfatória (67,9 %), sendo que as ações divergentes são penalizadas e a realização dos procedimentos corretos, de forma rápida e precisa, levam a uma boa pontuação. Entretanto, embora seja cobrado dos operadores agilidade na solução de problemas, é importante observar que outras considerações devem ser analisadas no momento da decisão e tomada de ação. Desta forma, de acordo com as decisões tomadas pelo operador, o tempo de ação pode não ser o mais representativo entre os valores apurados dos critérios de avaliação. Finalmente, ressalta-se a importância da contínua aplicação desses processos de avaliação dos operadores de modo a amadurecer a ordenação dos critérios, sua sensibilidade, e a correta percepção dos gestores sobre os níveis de desempenho obtidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao grupo CPFL Energia e ao programa de P&D da ANEEL.

REFERÊNCIAS

Barron, F. H.; Barret, B. E. "*Decision Quality Using Ranked Attribute Weights".* Management Science, vol. 42, nr. 11, p. 1515-1523, Nov., 1996.

Bianchini, I.L.*"Metodologia para Avaliação da Tomada de Decisão de Operadores de Subtransmissão de Sistemas Elétricos de Potência*"**.** Trabalho de Conclusão de Curso, UFSC, 2016.

Leite, C. R. R. Et al. "*O Uso de Simuladores no Treinamento de Operadores da Chesf como Ferramenta para Disseminação de Conhecimentos na Operação do Sistema Elétrico*", Reestruturação e Regulação do Setor de Energia Elétrica e Gás Natural, II Seminário Internacional, Rio de Janeiro, Set. 2007.

Mussoi, F. L. R.; Teive, R. C. T. (2013). "*A Multistage Value-Based Model for Prioritization of Distribution Projects Using a Multi-objective Genetic Algorithm*". Journal of Control, Automation and Electrical Systems. V. 24, n. 5, 2013.

Netto, A. V. S., Ferreira, F. V. M. and Vieira, M. de F. Q. "*Evaluation of Electric System Operator Training by the Task Implementation Supported on the Human Error Study*". Brazilian Congress on Automatics CBA 2012. Pb. 2012.

Netto, A. V. S., Ferreira, F. V. M., Vieira, M. F. Q., "*Ferramenta para Avaliação do Treinamento de Operadores de Subestação em Simulador*". Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu – PR, Abr. 2014.

Oliveira, J. J. R. et al. "*Treinamento e Certificação de Operadores no Sistema SAGE Empregando o Simulador EPRI/OTS", Grupo de Estudos de Operação de Sistemas Elétricos"*, XVIII SNPTEE, Curitiba-Paraná, Out 2005.

Patrão, C.; Almeida, Anibal T. de; Delgado, J. "*Manual de Qualidade de Energia Eléctrica (Power Quality Manual)*". Edp, [s.l.], p.1-113. Portuguese National Utility - EDP Distribuição. Dez. 2005.

Ribeiro, E. M. J., e Alves, A. S. "*Desenvolvimento de Método para Aperfeiçoamento de Operadores Otravés da Imersão em Ambiente de Simulação*". XI Encontro para debates de assuntos de operação, 2010.

Silva, V. N A.L. da, et al. "*Simuladores para Treinamento de Operadores de Sistemas e de Instalações do Setor Elétrico*". XIII ERIAC, Mai. 2009.

Vieira, M. F. Q. et al. "*Composition of Training Scenarios for Electric System Operators Based on the Study of Occurrence Reports*". XXII National Seminar on Electric Power Production and Transmission (in Portuguese). Foz do Iguaçu, 2015.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Condiciones Socioeconómicas de una Comunidad Indígena en el Departamento de La Guajira- Colombia. Una Oportunidad desde la Ingeniería Social.

Marlin A. Aarón[1], Patricia E. Choles[2], Rosalba Cuesta[3], Andrés D. Solano[4]
(1) Fac. de Ingenierías, Grupo I+D Motivar. Univ. De La Guajira, Riohacha, Km 5 Salida a Maicao.Colombia,
(2) Fac. de Educación. Grupo I+D Motivar. Univ. De La Guajira, Riohacha, Km 5 Salida a Maicao. Colombia,
(3) Fac. de Educación. Grupo I+D Motivar. Univ. De La Guajira, Riohacha, Km 5 Salida a Maicao. Colombia,
(4) Grupo I+D Motivar. Univ. De La Guajira, Riohacha, Km 5 Salida a Maicao. Colombia.
E-mail: maaron@uniguajira.edu.co; pcholes@uniguajira.edu.co; rcuestas@uniguajira.edu.co; andresolano@uniguajira.edu.co

Resumen

Se realiza un análisis de datos sobre las condiciones socioeconómicas de una comunidad indígena llamada Manzana, ubicada en el municipio de Manaure, departamento de La Guajira- Colombia, que está distante del área urbana. Trabajo adelantado por el grupo de investigación y desarrollo Motivar de la Universidad de La Guajira y apoyado por estudiantes de la asignatura de Modelos del Programa de Ingeniería de Sistemas en el año 2015. La metodología utilizada en esta investigación es de tipo cualicuantitativa, apoyada por la estadística para registrar datos, contar, seleccionar y categorizar aspectos que permiten comprender y explicar la realidad de esta comunidad. Lo cualitativo, se hace a partir de la observación directa y la modelación descriptiva y gráfica, permitió a los estudiantes contrastar si la realidad que percibían sus sentidos y los resultados estadísticos, eran iguales. Esto es, identificar en situ, si el modelo descriptivo, representado en números, era capaz de representar en su totalidad la realidad. Para la obtención de la información se utilizó como herramienta de trabajo una encuesta aplicada a 484 hogares de la comunidad, la cual fue seleccionada por ser de área de influencia de La Universidad de La Guajira. La caracterización de la comunidad indígena de Manzana, se convierte en una herramienta útil que ayuda a la comprensión de la comunidad como un sistema y donde se pueden apreciar algunos de los factores que la afectan para lograr su desarrollo. La ingeniería social (Jaramillo), entendida en este proceso académico, como la posibilidad que tiene el estudiante de ingeniería de visibilizar la realidad, no solo desde los datos numéricos, un espacio con coordenadas, registro y clasificación de información, sino la aproximación a ella, desde una mirada en contexto de lo que es, un espacio conceptualizado desde quien en su rol de ingeniero, se sensibiliza por lo que percibe a través de sus sentidos y científicamente construye una visión de la realidad, para aportarle desarrollo. Este trabajo permitió desarrollar en los estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas, habilidades para comprender la interacción entre problemas tecnológicos y sociales, la responsabilidad social y los procesos de transformación tecnológica.

Palabras Claves: Ingeniería Social, Caracterización, Comunidad Indígena Wayuu, condición socioeconómica.

Socioeconomic Conditions of an Indigenous Community in the Department of La Guajira - Colombia. An Opportunity from Social Engineering.

Abstract

An analysis of data on the socioeconomic conditions of an indigenous community called Manzana, located in the municipality of Manaure, department of La Guajira-Colombia, is carried out, which is distant from the urban area. Work carried out by the Motivar research and development group of the University of La Guajira and supported by students of the subject of Models of the Program of Systems Engineering in the year 2015. The methodology used in this research is of a qualitative nature, supported by the Statistics to record data, count, select and categorize aspects that allow understanding and explain the reality of this community. Qualitative, made from direct observation and descriptive and graphic modeling, allowed students to contrast whether the reality perceived by their senses and statistical results were the same. That is, to identify in situ, if the descriptive model, represented in numbers, was able to represent in its totality the reality. In order to obtain the information, a survey was applied to 484 households in the community, which was selected as an area of influence of the University of La Guajira. The characterization of the indigenous community of Manzana becomes a useful tool that helps the understanding of the community as a system and where you can appreciate some of the factors that affect it to achieve its development. Social engineering (Jaramillo),

 ISBN 978-607-8242-11-5

understood in this academic process, as the possibility that the engineering student has to visualize reality, not only from numerical data, a space with coordinates, registration and classification of information, but the approximation to it, From a look in context of what is, a space conceptualized from who in his role of engineer, is sensitized by what he perceives through his senses and scientifically builds a vision of reality, to bring development. This work allowed to develop in the students of the Systems Engineering program, skills to understand the interaction between technological and social problems, social responsibility and technological transformation processes.

Keywords: Social Engineering, Characterization, Wayuu Indigenous Community, socioeconomic status

INTRODUCCIÓN

La comunidad indígena Wayuu habita en la árida península de La Guajira al norte de Colombia y noroeste de Venezuela sobre el Caribe, a 180 m sobre el nivel del mar. (Ortiz, J., Miranda, J., Ortiz, L., Navarro, Y., & Mattar, S. (2015)). El DANE reportó en 2005 que 270.413 personas se reconocen como pertenecientes a la comunidad Wayuu, cifra que posiciona a esta comunidad indígena como la de mayor población en el país. El 49% de esta población son hombres (132.180) y el 51%, mujeres (138.233). En el departamento de La Guajira Colombiana está el Municipio de Manaure que tiene una extensión territorial de 1.643 kilómetros cuadrados Km2 y está compuesto por su casco urbano y nueve (9) corregimientos: Aremasain, El Pájaro, La Gloria, La Paz, Manzana, Mayapo, Musichi, San Antonio de Pancho y Shiruria. En el corregimiento de El Pájaro existen las mayores reservas de GAS probadas del país en los campos de Chuchupa I y II, Ballenas y Estación Riohacha. La explotación de gas en la Guajira está siendo llevada a cabo por la empresa de Chevron Petroleum Company, según el contrato de asociación Guajira “A”, celebrado con EcopetroL, en un área total de 81,974 Hectáreas. Esta caracterización que se presentará en este documento se realizó en una comunidad del Municipio de Manaure, dicha comunidad indígena se llama Manzana, la cual se encuentra ubicada aproximadamente a 20 minutos (en auto) de la ciudad de Riohacha, capital del Departamento de La Guajira.

Este trabajo se encuentra dentro del Proyecto de investigación, innovación y desarrollo, denominado “Incorporación de las tecnologías móviles para potenciar los estilos de aprendizajes en la comunidad educativa del área de influencia de la Universidad de La Guajira: caso específico: estudiantes indígenas Wayuu de 5to grado de la Comunidad de Manzana” el que se estructura por fases formativas, a partir de metodología cualitativa, desde la Investigación-acción-participación, (Ander-Egg, 2003) las que en su fase inicial identifican las condiciones en que se encuentran, y las necesidades básicas de las comunidades educativas indígenas de la etnia Wayuu.

El análisis se consolida a partir encuestas aplicadas a miembros de la comunidad indígena de Manzana. Se desarrolló durante 6 meses, realizado con expertos en estadística y apoyado con estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas, donde por medio de la Ingeniería Social, se logra el acercamiento de estudiantes a comunidades, con la intención de observar la complejidad de este tipo de comunidades, tal como lo expresa López (2015), quién establece un principio de la Ingeniería Social, donde explica que el ser humano no puede concebir la complejidad de los problemas, por ello necesita construir nuevas formas de intervenir en el mundo, desde la práctica y desde la ciencia. Así mismo, García (2012) afirma que la construcción de Cultura de Participación y la Ingeniería Social tienen una estrecha relación, que permite dar solución a problemas sociales. El objetivo de aproximar a los estudiantes dentro de una línea de investigación de Ingeniería Social, en el programa de Ingeniería de Sistemas, respondía a desarrollar trabajos orientados en el diseño y la gestión de productos y proyectos tecnológicos con una perspectiva contextual, transversal e interdisciplinaria. Con habilidades para comprender la interacción entre problemas tecnológicos y sociales, la responsabilidad social y los procesos de transformación tecnológica. Había un interés expreso en la enseñanza de la asignatura de Modelos, que los estudiantes hicieran un reconocimiento desde la ingeniería social, del conocimiento tácito y explicito (Aarón, Castañeda e Ibarra, 2014), lo que creían que pasaba en la Comunidad indígena, con lo que realmente pasaba en la comunidad indígena, percibido desde sus sentidos, y registrado a través de datos, pero también desde la modelación descriptiva y gráfica, usando diagramas, centrando la importancia en como la Ingeniería en estos escenarios, podría servir para aportar soluciones.

LA METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación es de tipo cualicuantitativa, apoyada por la estadística para lograr la aproximación a la comprensión y explicación de la realidad de esta comunidad. Lo cualitativo, permitió a los estudiantes, desde la observación directa y la modelación gráfica, contrastar si la realidad que percibían sus sentidos y los resultados estadísticos, eran iguales. Esto es, identificar en situ, si el modelo descriptivo, representado en números, era capaz de representar en su totalidad la realidad. Para la obtención de la información se utilizó como herramienta de trabajo una encuesta aplicada a 484 hogares, para una población total

 ISBN 978-607-8242-11-5

de 2.020 personas, en la Comunidad indígena de Manzana, Mayapo municipio de Manaure, departamento de la Guajira, Colombia, la cual fue seleccionada por ser de área de influencia de La Universidad de La Guajira.

Dicha encuesta fue estructurada en veinticuatro (24) preguntas subdivididas en secciones, a saber: características generales de la población y la identificación de estilos de aprendizaje de los niños de la comunidad que estaban en las escuelas, las que permitieron identificar y clasificar de manera clara la información. Fueron seleccionadas 16 preguntas del cuestionario diseñado por De la Parra Paz, Eric, "Herencia de vida para tus hijos", las que se usaron para determinar los estilos de aprendizajes de niños de la comunidad que estudian en la Institución Etnoeducativa Rural Laachon sede Manzana. Después de recolectada la información, se descargó al formato montado en el software SPSS, para su respectivo análisis. Los estudiantes participaban en la recolección de la información, entrevistando a los niños y percibiendo de manera directa la realidad que estaban registrando. En cada sesión de visitas a la Comunidad para realizar las entrevistas, los estudiantes diligenciaban un formato de observación, en el que las preguntas estaban centradas en lo que habían visto y percibido en cada sesión y lo que más les había impactado, así como la forma como ellos explicaban intuitivamente aquellas situaciones que habían observado y habían sido de impacto. Al final todos estos registros fueron consolidados y se realizó un modelo descriptivo de todo lo que los estudiantes habían observado, así como las explicaciones que ellos daban a los sucesos. Luego se contrató con los datos obtenidos estadísticamente y se hacían sesiones de análisis sobre ambos resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del instrumento diseñado suministra la información que nos permite identificar las características más relevantes de los habitantes del corregimiento de Manzana, perteneciente al Municipio de Manaure. En total se censaron 484 hogares, para una población total de 2.020 personas. Entre los resultados encontrados en esta investigación se pueden detallar:



Sexo del jefe (a) cabeza de hogar

Fig. 1: Características socioeconómicas Comunidad Indígena Manzana

El análisis de los resultados de la investigación, permite visualizar las características socioeconómicas de los pobladores de la comunidad de Manzana. Los resultados de la investigación muestran que: El 54% de los habitantes pertenecen al género Masculino y el 46% al género Femenino, como se muestra en la figura 1.
Con respecto a los servicios públicos domiciliarios, el Censo de 2005 realizado por el DANE provee información sobre el acceso al agua potable, la electricidad y los servicios de saneamiento. Del análisis de estas variables se desprende que existen fuertes desigualdades entre las áreas rurales y las urbanas. En particular, los hogares de las áreas urbanas muestran, en promedio, una alta cobertura (superior al 90%) en el acceso al agua potable, la electricidad y los servicios de saneamiento. En contrapartida, en las áreas rurales los hogares presentan un acceso limitado a estos servicios (40,2% de acceso al agua potable, 53,1% de acceso a los servicios de saneamiento y 72,8% de acceso a la electricidad).

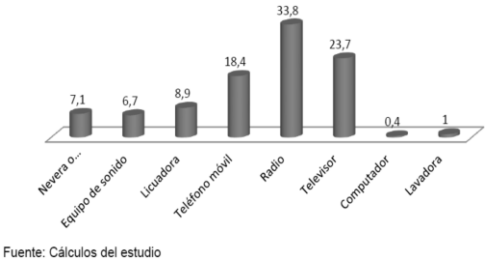


Fig. 2: Características socioeconómicas Comunidad Indígena Manzana Aparatos de uso doméstico

ISBN 978-607-8242-11-5

Con respecto a los Aparatos de uso doméstico utilizados en los hogares se puede ver en la tabla que: En promedio el 33,8% de los hogares utiliza radio, seguido por el televisor con un 23,7%, un 18,4% teléfono móvil, con un 8,9% licuadora; así mismo nevera o enfriador con un 7,1% y equipo de sonido en un 6.7% siendo estos aparatos con porcentajes más significativos, solo el 1,04% utiliza lavadora y computador.

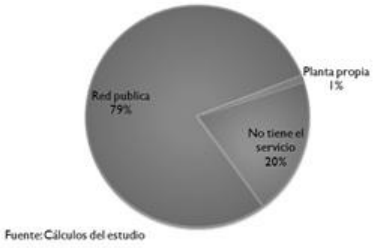


Fig. 3: Servicios públicos domiciliarios Comunidad Indígena Manzana

De manera similar, como se muestra en la figura 3, el servicio de alcantarillado es nulo; el 82% de la población no tiene servicio sanitario y el 18% tiene tubería conectada a pozos sépticos; esta situación es preocupante porque los habitantes tienen que hacer sus necesidades en cualquier parte, convirtiéndose en focos de infecciones para la comunidad. Así mismo, el servicio de aseo no existe, por tal motivo el 81% de los hogares queman la basura, un 2% la entierra y el resto (17%), la tiran en cualquier parte o en lotes baldíos; al quemar la basura se contamina el medio ambiente y al arrojarla a cualquier parte se convierten en contaminación visual y una amenaza para la misma población; sumado a lo anterior, el servicio de energía eléctrica es deficiente; el 79% de la población está conectado a red pública, el 20% no tiene servicio de energía y el 1% tiene red propia; el servicio de energía en términos generales presenta debilidades por el bajo voltaje y cortes permanentes, con conexiones que no cumplen las normas, lo cual representa un riesgo para la comunidad.

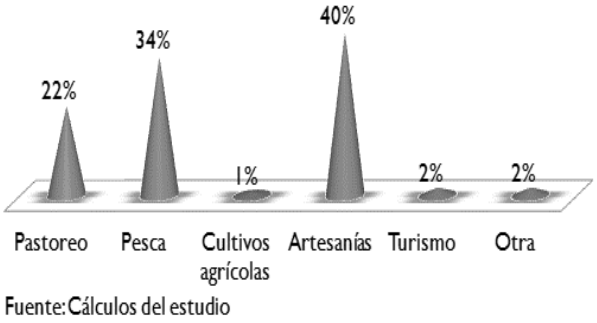
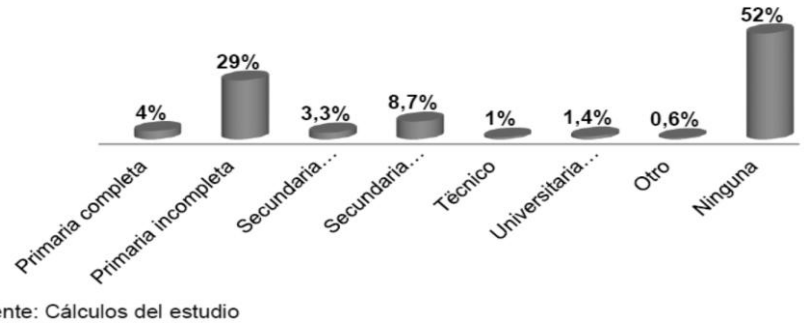


Fig. 4: Actividad económica Comunidad Indígena

En cuanto a la actividad económica principal que desarrolla la familia, se puede observar en la figura 4 que la artesanía representa el 40% de la actividad económica de la comunidad de Manzana, seguido por la pesca con un 34% y el pastoreo con un 22%, siendo estas las más representativas con un porcentaje acumulado del 96%; el 4% restante está entre turismo, cultivos agrícolas y otras.

ISBN 978-607-8242-11-5



Fuente: Cálculos del estudio

Fig. 5: Características socioeconómicas Comunidad Indígena Manzana Servicios públicos domiciliarios

El nivel educativo, tal como se muestra en la figura 5 es bajo. A través de la educación se identifica el grado de desarrollo de las comunidades, pueblos o naciones, de tal modo que se establecen diferencias entre los países desarrollados y los hoy de manera eufemística denominados emergentes, ello obedece al factor educación los cuales son totalmente diferentes en calidad y eficiencia y efectividad. De igual modo entre las comunidades de un mismo país, se presentan diferentes niveles de calidad y cobertura en la educación de su talento humano, a pesar de disponer de una misma legislación educativa, lo cual va a impactar de manera directa en el desarrollo de su economía, del sector productivo y de las condiciones sociales de sus habitantes. En lo relacionado con la educación, en los resultados de la investigación se encontró que el 41,5% de los habitantes de la comunidad de Manzana su nivel educativo es de primaria incompleta, seguido por el 31% que no ha realizado ningún estudio, un 12% secundaria completa, el 4,4% primaria completa y solo un 2% a terminado la secundaria, el 9% restante tiene otros estudios. Estos datos son preocupantes porque tener una comunidad con un 31% de analfabetismo donde el promedio nacional está en un 8%. Además, el 41,5% de la población tiene nivel educativo de primaria incompleta lo cual repercute en el desarrollo de la comunidad.

De acuerdo con la información analizada, la comunidad de Manzana enfrenta condiciones socioeconómicas sustancialmente desfavorables en relación con el resto de la población. Evidenciándose lo que históricamente han mostrado otros estudios como es la desigualdad de oportunidades y la discriminación de estos grupos minoritarios. Por lo tanto se hace necesario que los entes gubernamentales en su agenda prospectiva planeen implementar políticas compensatorias y de nivelación de la igualdad de oportunidades, y así poder tomar medidas específicas para luchar contra la discriminación.

Los estudiantes identificaron diferentes modelos gráficos con los que podían contrastar la realidad. La vivencia en la zona, generó posibilidades de contrastación de realidades y una mayor comprensión del concepto de modelos.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden indicar las siguientes conclusiones: 1) El resultado de la Investigación mostró que la comunidad de Manzana enfrenta condiciones socioeconómicas sustancialmente desfavorables en relación con el resto de la población. Evidenciándose lo que históricamente han mostrado otros estudios como es la desigualdad de oportunidades y la discriminación de estos grupos minoritarios. Por lo tanto, se hace necesario que los entes gubernamentales en su agenda prospectiva planeen implementar políticas compensatorias y de nivelación de la igualdad de oportunidades, y así poder tomar medidas específicas para luchar contra la desigualdad social. 2) La caracterización de la comunidad indígena de Manzana, se convirtió en una herramienta útil que ayuda a la comprensión de la comunidad como un sistema, donde se pueden apreciar factores que la afectan para lograr su desarrollo; el mal manejo sanitario deteriora sus condiciones ambientales, la carencia de agua por la condición desértica de la región unido a la ausencia de servicios públicos afecta su supervivencia, el alto analfabetismo y el bajo nivel educativo de la mayoría de los miembros de la comunidad, unido a las débiles actividades económicas, generan una situación que propicia inequidad y desigualdad social. 3) Los estudiantes participantes, observadores de la realidad, generaron puentes de comprensión sobre la importancia de contar con modelos descriptivos y gráficos que representen de manera exacta la realidad, sin perder detalle. 4) A los estudiantes les sirvió la aproximación a la realidad desde sus sentidos, para construir representaciones modélicas, pasando del conocimiento tácito al explicito, sobre una comunidad indígena en condiciones de marginalidad. 5) La ingeniería social en este trabajo permitió desarrollar en los estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas habilidades para

 ISBN 978-607-8242-11-5

comprender la interacción entre problemas tecnológicos y sociales, la responsabilidad social y los procesos de transformación tecnológica.

REFERENCIAS

Aaron, M, Castañeda O., Ibarra AR, the Management and Construction of Knowledge as an Innovation Strategy for Collaborative Learning Through the Use and Creation of Learning Communities and Networks. The International Journal of Knowledge Management (IJKM) ISSN 1548-0666; eISSN 1548-0658, Copyright ©2014 IGI Global (2014).

Aarón, M. A, Choles, P. E, & Solano, A., Representación del Proceso Formativo de una institución Etnoeducativa a través de la Técnica del Modelo Gráfico y Descriptivo usando Diagramas de influencia y de Forrester. Información tecnológica, 27(3), 81-92. Recuperado en 17 de junio de 2016, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642016000300008&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-07642016000300008 (2016).

Ander-Egg, E., Repensando la Investigación-Acción-Participativa. Grupo Editorial, 4ª edición, 29-42. Lumen Humanitas (2003).

DANE. [Internet]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. [Actualizado 13 Mar 2014; consultado 25 Mar 2016] Disponible en: http://www.dane.gov.co/censo/files/ManualTecnico.pdf

García, E., Introducción a la Cultura de Participación. Participación, Currículum y Educación Superior. México: Universidad del Centro de México y Grupo hacia una Ingeniería en Comunicación Social (2014).

Jaramillo, L. C. La ingeniería Social: Un desafío investigativo. Revista Universidad Eafit. No. 104. 81-91. (2012)

López, E. J. G., Estudiar y construir la Cultura de Participación desde la interdisciplinariedad y la Ingeniería Social en el marco del quehacer científico en México. Razón y palabra, (90), 6 (2015).

Ortiz, J., Miranda, J., Ortiz, L., Navarro, Y., & Mattar, S., Seroprevalencia de Rickettsia sp. en indígenas Wayuü de la Guajira y Kankuamos del Cesar, Colombia. Infectio, 19(1), 18-23 (2015)..

Méndez, C., Metodología. Diseño y desarrollo del proceso de investigación. Tercera edición Bogotá: McGraw-Hill (2001).

Modelo de la Programación Neurolingüística de Bandler y Grinder. Tomado de internet http://www.factorhuma.org/attachments_secure/article/8863/pnl_cast.pdf

Morín, E, Sánchez A. La ecología de la civilización técnica. De la noción de medio técnico a ecosistema social. Universitat de Valencia. (1981)

López N, Sandoval I. Métodos y Técnicas de investigación cualitativa y cuantitativa. Documento de Trabajo. Sistema de Universidad Virtual, 3-23. Universidad de Guadalajara. (2006)

Plan de Desarrollo Municipal, “Gobierno visionario y emprendedor Alcaldía de Manaure” 2012 – 2015. Recuperado de internet el 25 de febrero de 2015. http://manaure-laguajira.gov.co/apc-aa-files/353464653966303162613134356539 34/plan-de-desarrollo-2012-2015_2.pdf

Tamayo y Tamayo, M., El proceso de la investigación científica. México: Limusa (2005).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Control Óptimo en Resonancia Magnética Nuclear

Cutberto Romero-Meléndez[1], Leopoldo González-Santos[2]
(1)Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. México.
(2)Instituto de Neurobiología, Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, Qro.
E-mail: cutberto@correo.azc.uam.mx

Resumen

En este trabajo se aplican dos algoritmos iterativos, usados en Dinámica Cuántica Molecular, al Control Óptimo de Sistemas Cuánticos de dos niveles, específicamente, al problema de encontrar el control óptimo que corresponde al tiempo y al costo funcional mínimos para efectuar, de manera efectiva, un pulso de radiofrecuencia de un campo electromagnético externo aplicado a una muestra sometida a Resonancia Magnética Nuclear (RMN), con el fin de realizar una evolución unitaria del spin del estado ½ al estado -½. Se aplican algunas de las técnicas del Control Óptimo, como la controlabilidad sobre grupos de Lie y el Principio del Máximo de Pontryagin (PMP), para derivar los algoritmos de Krotov et al. y Rabitz et al. Se comparan las soluciones numéricas obtenidas con las soluciones analíticas existentes.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de la Teoría Geométrica de Control han estado utilizándose (Khaneja, 2002) en los últimos 15 años en importantes problemas de Resonancia Magnética Nuclear para controlar la dinámica de Sistemas Cuánticos. Uno de éstos problemas es la determinación del tiempo mínimo para efectuar la operación unitaria $X(t)$ de cambiar la orientación del spin ½ a la orientación -½. El problema fundamental aquí es el de calcular el correspondiente control óptimo. Controlar $X(t)$ se traduce en controlar la evolución del estado $|\psi(t)\rangle$ que caracteriza un sistema cuántico. Las transformaciones unitarias $X(t)$ se utilizan para dirigir la transferencia de coherencia en spines nucleares acoplados en experimentos de RMN. Estas transformaciones unitarias generan secuencias de pulsos de radio frecuencia que deberán ser lo más cortos posible, para que se minimicen los efectos de la relajación, que se traducen en des-coherencia. Esto lleva al problema *de minimizar el tiempo necesario para que se produzca una transformación unitaria en un sistema cuántico.* Desde el punto de vista de la teoría de Control la minimización en el tiempo de una secuencia de pulsos en RMN puede traducirse en el problema geométrico de la *minimización de longitudes de trayectorias (geodésicas) en espacios homogéneos.*
Consideremos el problema de controlar una partícula de spin ½ mediante un campo magnético cuya componente en el eje Z, B_z, no varía con el tiempo y cuya componente en el eje Y, $u_y(t)$, depende de t; la componente en el eje X del campo electromagnético es nula: $u_x(t) = 0$. Se trata de un Sistema Cuántico descrito por su función de onda $\vec{\psi}(t)$ cuya evolución está determinada por la ecuación de Schrödinger:

$$\frac{d}{dt}\vec{\psi}(t) = -iH\big(u(t)\big)\vec{\psi}(t) \tag{1}$$

donde $\vec{\psi} = (\psi_1, \psi_2)$: $[0,T] \to \mathbb{C}^2$, $T \in \mathbb{R}$, es el tiempo total que dura el control, el cual en este caso es $T = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$, el control u: $[0,T] \to \mathbb{C}^2$ es la intensidad del pulso laser externo y $H(t)$ es el Hamiltoniano representando la energía de interacción momento angular del spin. Considerando el campo electromagnético total sobre la muestra, el momento angular del spin $\vec{S} = (S_x, S_y, S_z)$ y la razón giromagnética del sistema, después de normalizar, tenemos:
El sistema está dado por:

$$\frac{d}{dt}\vec{\psi}(t) = \big(S_z + u_y S_y\big)\vec{\psi}(t)$$

$$\vec{\psi}(0) = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \tag{2}$$

Sujeto a la condición sobre el costo funcional, el cual determina el adecuado desempeño del algoritmo:

$$\min \longrightarrow J(u_y) = \left\langle \vec{\psi}^t\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) |O|\, \vec{\psi}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)\right\rangle + \int_0^T u_y^2(t)\, dt \tag{3}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

en donde O es la matriz observable que contiene la información del estado final $\vec{\psi}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix}$:

$$O = \vec{\psi}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)\vec{\psi}^t\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) \tag{4}$$

Usamos un estado adjunto (Multiplicador de Lagrange) $\lambda(t)$ para obtener:

$$\frac{d}{dt}\lambda(t) = \left(\tilde{S}_z + u_y(t)\tilde{S}_y + u_x(t)\tilde{S}_x\right)\lambda(\mathrm{t})$$

$$\lambda\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix} \tag{5}$$

EL MODELO

La evolución de los estados $|\psi(\mathrm{t})\rangle$ en el tiempo t se describe por un operador unitario $X(t)$ sobre espacio $\mathcal{H}$ de Hilbert. $X(t)$ es una transformación lineal biyectiva que preserva longitud y que está determinada por:

$$|\psi(\mathrm{t})\rangle = X(t)\ |\psi(0)\rangle \tag{5}$$

Así que es posible formular el problema dado por la ecuación (2) en el espacio de las matrices unitarias $X(t)$, que forman el Grupo de Lie SU(2). Dado que las matrices de Pauli, representando el momento angular del spin: S_x, S_y, S_z generan el álgebra de Lie $\mathfrak{su}(2)$ de las matrices 2x2 anti-Hermitianas de traza nula y forman un conjunto ortogonal, linealmente independiente, la existencia de un control óptimo está garantizada, D' Alessandro (2007). Como consecuencia de ello y de acuerdo con D' Alessandro (2001), existe una matriz $M = \begin{pmatrix} im_z & m_y + im_x \\ -m_y + im_x & -im_z \end{pmatrix} \in \mathfrak{su}(2)$, tal que, para un estado X, el control optimal deberá satisfacer :

$$u_y = -\langle M, X^t S_y X\rangle := -Tr\left(MX^t S_y X\right) \tag{6}$$

Definiendo dos controles "ficticios":

$$u_x := -\langle M, X^* S_x X\rangle, u_z := -\langle M, X^* S_z X\rangle \tag{7}$$

es posible obtener la siguiente ecuación diferencial correspondiente al Oscilador de Duffing:

$$\ddot{u}_y + \alpha u_y + {u_y}^3 = 0 \tag{8}$$

en donde la constante α esta dada por $\alpha = 2(2 - {u_y}^2(0))$. La ecuación (8) conduce a la solución optimal buscada:

$$u(t) = 0.481\ cn(2.49t - 1, 0.487) \tag{9}$$

en donde $cn(v,k)$ es la función elíptica de Jacobi tipo coseno, que depende del argumento v y del módulo elíptico $k \in (0,1)$.

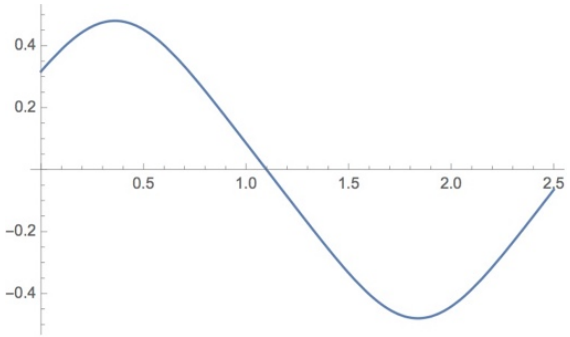


Fig.1: Solución analítica. Función Elíptica de Jacobi.
$u(t) = 0.481\ cn(2.49t - 1, 0.487)$.

ISBN 978-607-8242-11-5

Solución numérica. Algoritmos

Efectuamos la *realificación* del problema complejo (2), con lo cual aumentamos al doble la dimensión del problema, pero simplificamos su solución:

$$\vec{x}(\mathrm{t}) \coloneqq \begin{pmatrix} \mathrm{Re}(\psi_1) \\ \mathrm{Re}(\psi_2) \\ \mathrm{Im}(\psi_1) \\ \mathrm{Im}(\psi_2) \end{pmatrix}, \qquad \tilde{S}_y \coloneqq \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \qquad \tilde{S}_z \coloneqq \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{10}$$

$$\frac{d}{dt}\vec{x}(t) = \left(\tilde{S}_z + u_y(t)\tilde{S}_y + u_x(t)\tilde{S}_x\right)\vec{x}(\mathrm{t}),\ \vec{x}(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},\ \vec{x}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{11}$$

Algoritmo I, R*abitz. Fórmulas de Recursión*

En esta sección implementamos el algoritmo I de Rabitz et al. que utilizamos para encontrar de manera numérica el control óptimo correspondiente al tiempo mínimo de transferencia del spin del estado inicial al estado final, con un mínimo costo funcional. Tenemos las fórmulas de recursión siguientes:
Dados $k \in \mathbb{N}, k \geq 1$, para la función $\lambda^0(t)$ dada inicialmente:

$$\frac{d}{dt}\vec{x}^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} 0 & -u_y^{(k)}(t) & -1 & 0 \\ u_y^{(k)}(t) & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -u_y^{(k)}(t) \\ 0 & -1 & u_y^{(k)}(t) & 0 \end{pmatrix}\vec{x}^{(k)}(t)$$

$$\vec{x}^{(k)}(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$u_y^{(k)}(t) = -\lambda^{T(k-1)}(t)\tilde{S}_y\,\vec{x}^{(k)}(t) \tag{12}$$

$$\frac{d}{dt}\lambda^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} 0 & -v^{(k)}(t) & -1 & 0 \\ v^{(k)}(t) & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -v^{(k)}(t) \\ 0 & -1 & v^{(k)}(t) & 0 \end{pmatrix}\lambda^{(k)}(t)$$

$$\lambda^{(k)}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ x_4^{(k)}(\frac{\pi}{\sqrt{2}}) \end{pmatrix} \tag{13}$$

$$v^{(k)}(t) = -\lambda^{T(k)}(t)\tilde{S}_y\,\vec{x}^{(k)}(t) \tag{14}$$

El algoritmo I de Rabitz es el siguiente:

1. Elegir la función $\lambda^0(t)$.
2. Reemplazar $\lambda^0(t)$ en la ecuación (12).
3. Reemplazar $u_y^1(t)$ en la ecuación (11).
4. Integrar forward (11) para obtener $x^1(t)$ a partir del estado inicial $x^1(0)$.
5. Obtener $u_y^1(t)$ de (12).
6. Reemplazar $x^1(t)$ en la ecuación (14) para obtener $v^1(t)$ en términos de $\lambda^1(t)$.

 ISBN 978-607-8242-11-5

7. Reemplazar $\lambda^1(t)$ en la ecuación (13).
8. Integrar backwards (13) desde el estado final $x(T)$ para obtener $\lambda^1(t)$.
9. Obtener $v^1(t)$, reemplazando $\lambda^1(t)$ en (14).
10. $\{\lambda^{(k+1)}(t), v^{(k+1)}(t)\} \rightarrow \{\lambda^{(k)}(t), v^{(k)}(t)\}$
11. $\{u_y^{(k+1)}(t), x^{(k+1)}(t)\} \rightarrow \{u_y^{(k)}(t), x^{(k)}(t)\}$
12. Continuar el proceso hasta convergencia.

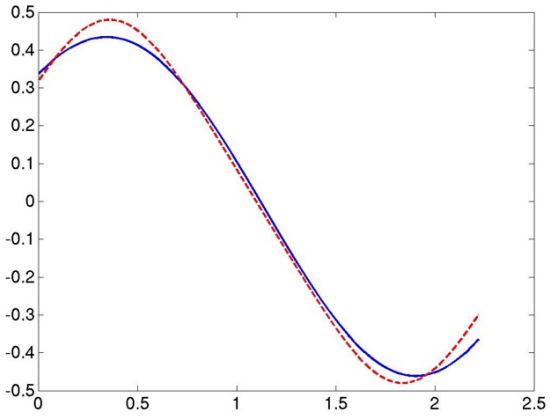


Fig.2: Solución numérica empleando el algoritmo I, línea azul.
Solución analítica, línea roja que es la más "alta" y la más "baja".

Algoritmo II, Krotov. *Fórmulas de Recursión*

De igual forma, implementamos el algoritmo II de Krotov et al. para calcular de manera numérica el control óptimo correspondiente al tiempo mínimo de transferencia del spin del estado inicial al estado final, con un mínimo costo funcional. Tenemos las fórmulas de recursión siguientes:
Dados $k \in \mathbb{N}, k \geq 1$, para la función $\lambda^0(t)$ dada inicialmente:

$$\frac{d}{dt}\vec{x}^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} 0 & -u_y^{(k)}(t) & -1 & 0 \\ u_y^{(k)}(t) & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -u_y^{(k)}(t) \\ 0 & -1 & u_y^{(k)}(t) & 0 \end{pmatrix} \vec{x}^{(k)}(t)$$

$$\vec{x}^{(k)}(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{15}$$

$$u_y^{(k)}(t) = -\lambda^{T(k-1)}(t)\tilde{S}_y\,\vec{x}^{(k)}(t) \tag{16}$$

$$\frac{d}{dt}\lambda^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} 0 & -u_y^{(k)}(t) & -1 & 0 \\ u_y^{(k)}(t) & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -u_y^{(k)}(t) \\ 0 & -1 & u_y^{(k)}(t) & 0 \end{pmatrix} \lambda^{(k)}(t)$$

$$\lambda^{(k)}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ x_4^{(k)}(\frac{\pi}{\sqrt{2}}) \end{pmatrix} \tag{17}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

El algoritmo II es el siguiente:

1. Elegir la función inicial $\lambda^0(t)$.
2. Reemplazar $\lambda^0(t)$ en la ecuación (15).
3. Reemplazar $u_y^1(t)$ en la ecuación (17).
4. Integrar forward (15) para obtener $x^1(t)$ a partir del estado inicial $x^1(0)$.
5. Obtener $u_y^1(t)$.
6. Reemplazar $x^1(t)$ y $u_y^1(t)$ en la ecuación (17).
7. Integrar backwards (17) desde el estado final $x(T)$ para obtener $\lambda^1(t)$.
8. $\{\lambda^{(k+1)}(t), v^{(k+1)}(t)\} \rightarrow \{\lambda^{(k)}(t), v^{(k)}(t)\}$
9. $\{u_y^{(k+1)}(t), x^{(k+1)}(t), \lambda^{(k+1)}(t)\} \rightarrow \{u_y^{(k)}(t), x^{(k)}(t), \lambda^{(k)}(t)\}$
10. Continuar el proceso hasta que converja.

Convergencia

Tenemos el siguiente resultado acerca de la convergencia monótona de los algoritmos:

Teorema. (Maday, 2003).
Los algoritmos convergen monótonamente:

$$J(u_y^{(k+1)}) \leq J(u_y^{(k)}), \qquad \forall\, k \in \mathbb{N} \tag{18}$$

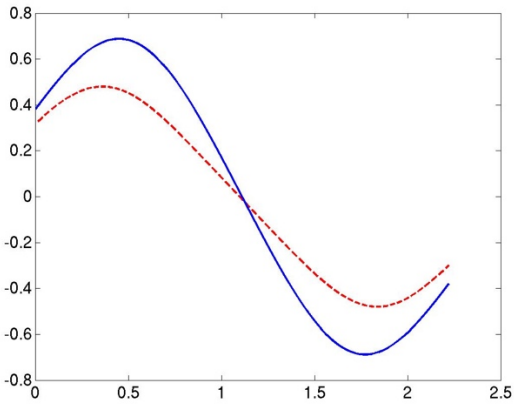


Fig.2: Solución numérica empleando el algoritmo II, línea azul. Solución analítica, línea roja que es la más "baja".

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para ambos algoritmos se realizaron diferentes elecciones de $\lambda^0(t)$, por ejemplo, para los vectores siguientes: $\lambda^{t^0}(t) = (t, 0,0,0)$, $\lambda^{t^0}(t) = (1, t^2, 10,10)$, $\lambda^{t^0}(t) = (10,10,10,10)$. En ambos casos la convergencia fue muy rápida, se obtuvo para $k = 15$. Se calculó además el costo: para el primer caso fue de $J = 0.569545$ y en el caso de Krotov, $J = 1.2992$, para $k = 100$. Es de destacarse el desempeño y la alta eficiencia del algoritmo I de Rabitz, el cual, como hemos mencionado, se ha aplicado al estudio de la Dinámica Cuántica Molecular, en el cual se busca maximizar el costo funcional, a diferencia de nuestro problema de Control Cuántico, en donde minimizamos dicho costo funcional. Dado que este costo del proceso es mínimo y que la convergencia del algoritmo se alcanza en pocas iteraciones, es importante adoptar el uso de algoritmos similares en los casos en los que no sea posible obtener una solución analítica del problema.

CONCLUSIONES

Hemos abordado el problema del tiempo óptimo para realizar una evolución del spin del estado ½ al estado -½ en un sistema cuántico de dos niveles, en el caso de existir un campo electromagnético externo (un control). Implementamos dos algoritmos convergentes monótonamente, el de Rabitz y el de Krotov, para

 ISBN 978-607-8242-11-5

calcular el control óptimo en este problema, y el costo funcional mínimo, utilizando un estado adjunto de acuerdo al Principio del Máximo de Pontryagin, (Pontryagin, 1962). Los resultados fueron comparados con la solución analítica correspondiente, Fig. 2 y Fig. 3. Concluimos que el algoritmo I de Rabitz es el más eficaz en este problema, pues su solución numérica es "muy cercana" a la solución analítica y el cálculo del costo mínimo fue aproximadamente igual al que se obtiene analíticamente. En el caso del algoritmo II de Krotov, la solución numérica no es "cercana" a la solución analítica. Estos resultados conminan a utilizar métodos aproximativos para resolver problemas similares en sistemas cuánticos de múltiples niveles. En los casos en los que se tenga más de un campo electromagnético externo es posible adaptar ambos algoritmos para tenerse uno que los unifique.

REFERENCIAS

D' Alessandro D. y M. Dahleh, "*Optimal Control of Two-Level Quantum Systems"*, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 46, no. 6, (2001).
D' Alessandro D., "*Introduction to Quantum Control and Dynamics"*, Ser. Applied Mathematics & Nonlinear Science. Chapman & Hall/CRC (2007).
N. Khaneja, S.J. Glaser, R. Brockett, "*Sub-Riemannian geometry and time optimal control of three spin systems: quantum gates and coherence transfer"*, Phys. Rev. A 65 (2002).
Maday, I. y G. Turinici, "*New formulations of monotonically convergent quantum control algorithms"*, Journal of Chemical Physics, vol. 118, no. 18 (2003).
Pontryagin, L., B. Boltyanskii, R. Gamkrelidze, E. Mishchenko, "*The mathematical theory of optimal processes"*, Wiley-Interscience, New York (1962).
Tannoudji, C., B. Diu, F. Laloe, "*Quantum Mechanics"*, V.1, Wiley-VCH (1978).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis Económico del Tiempo de Reemplazo en una Granja de Cerdos con Base en Simulación de Estado Transitorio

Marco Antonio Montufar Benítez[1,2,3] y David Fernando Muñoz[4]
(1) Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Toluca, Estado de México, C.P. 50110
(2) Departamento de Matemática, Universidad de Lleida, 73, Jaume II, 25001, España
(3) Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Estado de Hidalgo, C.P. 42184, México
(4) Departamento de Ingeniería Industrial y de Operaciones, Instituto Tecnológico Autónomo de México, Ciudad de México, C.P. 01080, México
Email: montufar@uaeh.edu.mx; davidm@itam.mx

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo y análisis de un modelo de simulación de evento discreto para estudiar el periodo de retorno de la inversión en una granja de cerdas dedicada a la producción de lechones. El modelo considera las etapas de apareamiento, gestación y lactación, típicas de este proceso. Los componentes aleatorios considerados en el modelo fueron el tamaño de la camada, el éxito en la fecundación, y los tiempos de permanencia en cada una de las etapas antes mencionadas. Los resultados experimentales obtenidos nos han permitido cuantificar el riesgo de poder alcanzar un determinado tiempo de retorno, bajo la política de imponer un número determinado de ciclos de permanencia en la granja para las cerdas.

Palabras clave: crianza de cerdos, reemplazo de cerdas, simulación estocástica, simulación transitoria

Economic Analysis of Replacement Time in a Sow Farm using Transient Simulation

Abstract

This article presents the development and analysis of a discrete-event simulation model to study the payback in a sow farm dedicated to the production of piglets. The model considers the stages of mating, gestation and lactation, which are typical in this process. Random components considered in the model were the litter size, the pregnant success, and the stay times in each of the aforementioned stages. Experimental results allowed us to quantify the risk of attaining a given payback time under the policy of imposing a given number of residence cycles in the farm for the sows.

Keywords: pig rearing, sows replacement, stochastic simulation, transient simulation

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Es común que los inversionistas estén preocupados por la rentabilidad, así como por la pronta recuperación del dinero invertido en un negocio. La ingeniería económica nos brinda una manera racional de medir la rentabilidad y la liquidez de las inversiones. Las medidas de desempeño para medir rentabilidad son, por ejemplo, el valor presente neto, la tasa interna de retorno y el valor anual; de la misma manera, el periodo de retorno simple y descontado son las formas tradicionalmente utilizadas para medir la liquidez (Sullivan et al., 2015).

El periodo de retorno de una inversión es la rapidez con la que se recupera el dinero, y ha sido definida como el número de periodos necesarios para que un ingreso anual iguale a la inversión inicial. Bajo esta simple definición se están suponiendo algunos aspectos que muchas veces no son bien entendidos. El primer aspecto es que el analista debe, de alguna manera, estimar los flujos de entrada y salida del negocio a través de la vida útil, para luego calcular el equivalente anual descontado. En muchos libros de texto ese valor se da como un dato, pero la pregunta que surge es: ¿cómo se calculó? Es probable que se piense que este ingreso anual será positivo a partir del primer periodo de análisis, y entonces el periodo de recuperación se calcule por una simple división entre la inversión inicial y el flujo positivo anual. Muchas de estas estimaciones promedio del flujo de efectivo están basadas en el comportamiento a largo plazo, por consiguiente, surge una nueva pregunta: ¿son válidas las estimaciones a largo plazo para ser representativas de un comportamiento de corto plazo?

La producción de lechones en granjas se ha estudiado considerando componentes estocásticos y utilizando modelos de simulación y procesos de decisión Markovianos, véase por ejemplo, Martel et al. (2008), Plá et al. (2009) y Rodríguez-Sánchez et al. (2012). Algunos de tales modelos se han enfocado a determinar el ciclo adecuado del reemplazo de las cerdas madre, mientras que otros en la determinación óptima de alguna variable de decisión, como por ejemplo, el momento del destete.

En este estudio se pretende medir el riesgo de alcanzar un determinado periodo de retorno, elemento importante en la toma de decisiones de un granjero, a través del estudio del sistema en estado transitorio. Para ello proponemos un modelo de simulación que considera las principales etapas del proceso productivo de las granjas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo presentado aquí está basado en el trabajo previo de Montufar et al. (2013), quienes consideran las etapas de fecundación, gestación y lactación como principales procesos (véase la Fig. 1), en dichos estudios se tuvo como objetivo determinar el ciclo óptimo de permanencia de las cerdas madre con el fin de lograr la máxima utilidad diaria. Dichos trabajos toman en cuenta el estado estable del sistema, ya que el interés se enfocó en la rentabilidad, más que en la liquidez del negocio. En esta investigación se ha modificado dicho modelo para estudiar el periodo de retorno en una granja de 120 cerdas madre. Un componente aleatorio (para una definición, ver por ejemplo, Muñoz y Villafuerte, 2015) importante en este modelo es la cantidad de lechones paridos y aptos para la venta, principal factor de ingresos en la empresa, la Fig. 2 muestra el diagrama de cajas para este componente con respecto al número de parto. Parecería obvio al observar esta gráfica que el número óptimo para conservar a una cerda seria de 4 o 5 partos, etapas en las cuales la prolificidad es más alta, sin embargo, la dinámica del sistema mismo hace que dicho número sea ocho, como se demuestra en Montufar et al. (2013); la razón es que reemplazarla en el ciclo 4 o 5, tendría el principal inconveniente de introducir en la granja una nueva cerda menos prolífica que una cerda en el ciclo ocho, y no se aprovecharía su capacidad para generar lechones todavía en los ciclos 6 a 8.

Nuestro modelo hace uso de la definición de periodo de retorno establecido en [1], el cual es el mínimo valor de que satisface la siguiente desigualdad.

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\sum_{k=1}^{j}(R_k - E_k)(P/F, i\%, k) - I \geq 0\,, \tag{1}$$

Donde R_k y E_k son los ingresos y egresos en el periodo k, respectivamente, $i\%$ es la MARR, e I es la inversión inicial realizada, generalmente al inicio del primer periodo.

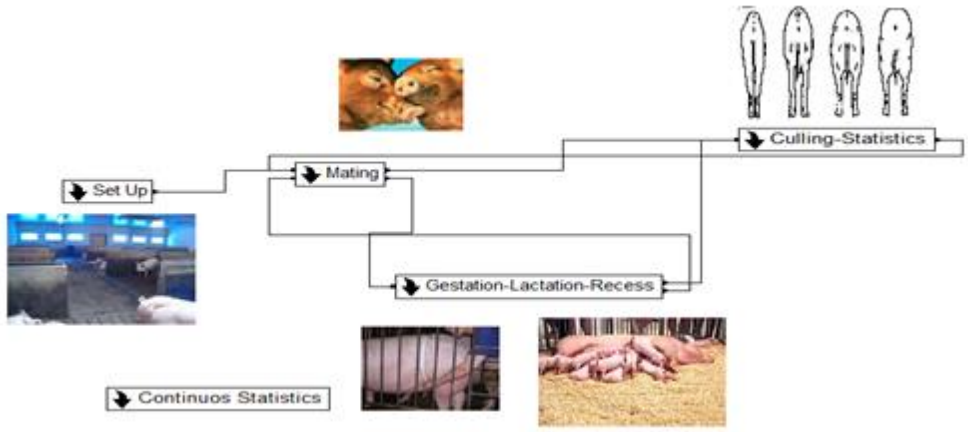


Fig. 1. Vista general del modelo de simulación.

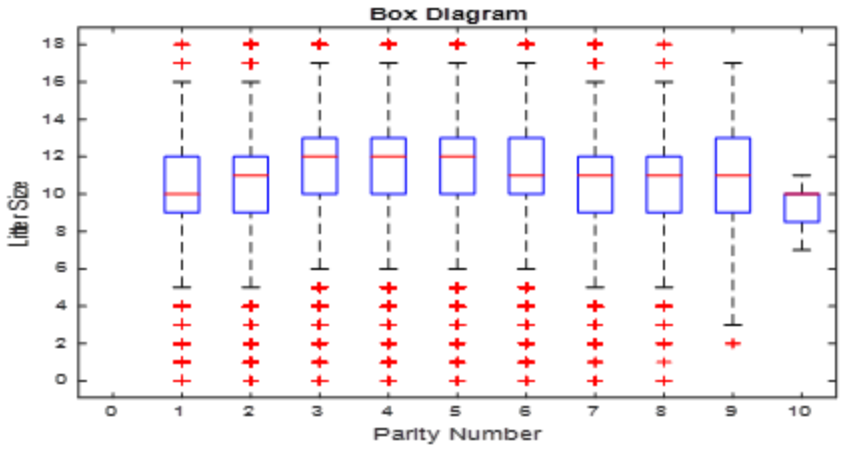


Fig. 2. Variabilidad del tamaño de camada.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Después de correr el modelo, bajo un número de réplicas suficientemente grande para asegurar un nivel de precisión adecuado (con un nivel de confianza del 95%), se observó la realización de una curva típica

ISBN 978-607-8242-11-5

representativa de la expresión (1), por ejemplo, para el caso de conservar a las cerdas nueve ciclos, una réplica mostró el comportamiento ilustrado en la Fig. 3, donde podemos observar el múltiple alcance del valor presente neto con el valor cero, motivo que nos llevó a considerar dos valores para el parámetro j en la expresión (1), el valor mínimo y máximo de j, alcanzado en los puntos de cruce en cada realización. La Fig. 4. muestra el nivel de riesgo para alcanzar un periodo de retorno entre 2 y 3 años.

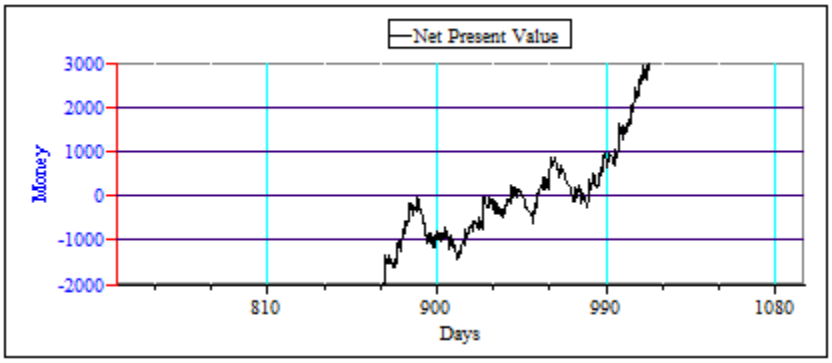


Fig. 3. Realización del VPN.

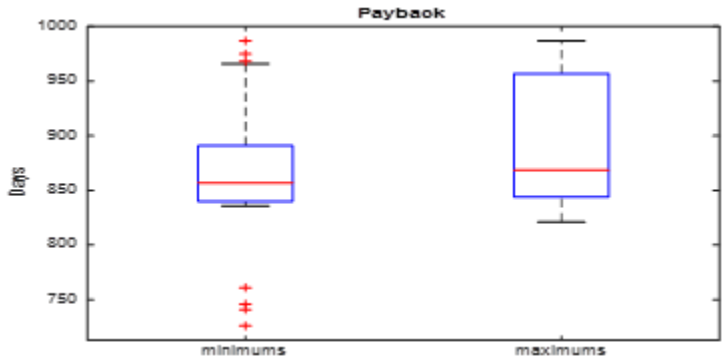


Fig. 4. Variabilidad del tiempo de retorno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Asociación Mexicana de Cultura A.C., por el apoyo proporcionado. Así también al CYTED por apoyar a la red temática BigDSS-Agro (P515RT0123).

REFERENCIAS

Martel G., B. Dedieu, y J. Y. Dourmad; *Simulation of sow herd dynamics with emphasis on performance and distribution of periodic task events*, Journal of Agricultural Science, 146(4), 365–380 (2008).

ISBN 978-607-8242-11-5

Montufar, M. A., L. M. Plá Aragonés, M. A. Serrato García, y D. B. Varela; *Análisis y Simulación de Políticas de Reemplazo en Granjas de Explotación Porcina*, Revista Investigación Operacional, 34(2), 128-139, (2013).

Muñoz, D. F., y D. Villafuerte, *Análisis de la entrada en simulación estocástica*, Información Tecnológica, 26(1), 13-22, 2015.

Plá, L. M., J. Faulín, y S. V. Rodríguez; *A linear programming formulation of a semi-Markov model to design pig facilities*, Journal of the Operational Research Society, 60(5), 619 –625 (2009).

Rodríguez-Sánchez, S. V., L. M. Plà-Aragonés, y V. M. Albornoz; *Modeling tactical planning decisions through a linear optimization model in sow farms*, Livestock Science, 143(2), 162–171 (2012).

Sullivan W. G., E. M. Wicks, y C. P. Koelling; *Engineering Economy* (16th edition), Pearson, New York, USA (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo matemático intrapartícula para determinar la cinética de absorción de hidrógeno en $LaNi_5$

Diego Gabriel Oliva, Mauren Fuentes Mora y Pío Antonio Aguirre
Instituto de Desarrollo y Diseño INGAR (CONICET-UTN) Avellaneda 3657 (3000) Santa Fe, Argentina
E-mail: doliva; mfuentes; paguir@santafe-conicet.gov.ar

Resumen

La absorción de hidrógeno en materiales formadores de hidruro (MFH) ha sido estudiada con el objetivo de desarrollar dispositivos de purificación y almacenamiento que incentiven el uso de este vector energético. En este trabajo se presenta un nuevo modelo intrapartícula que incluye la disolución superficial de hidrógeno, su descomposición en hidrógeno atómico y el transporte de masa difusivo a través de partículas de MFH, considerando geometría esférica. La disolución de hidrógeno involucra el cálculo de la presión de equilibrio entre el hidrógeno gaseoso y atómico en la superficie. Para ello se ha establecido un modelo de mezcla regular que permita reproducir en forma adecuada todas las etapas de la curva de equilibrio. Los parámetros cinéticos de mayor incertidumbre han sido estimados vía optimización a través de la solución de un problema no lineal, minimizando el error entre los valores experimentales y los predichos por el modelo. Se muestran los resultados obtenidos para $LaNi_5$, como MFH, a presiones que van desde 0.5 a 1.2 MPa, a una temperatura de 298 K. Se realiza un análisis basado en modelos para predecir el comportamiento de este material, para ser usado en una posible aplicación para purificar hidrógeno.

Palabras clave: cinética intrapartícula; absorción; difusión de hidrógeno; materiales formadores de hidruros

Mathematical model to determine intraparticle kinetics of hydrogen absorption on $LaNi_5$

Abstract

Hydrogen absorption in hydride-forming materials (HFM) has been studied with the aim of developing purification and storage devices that encourage the use of this energy vector. This work presents a new intra-particle model that includes superficial hydrogen dissolution, its decomposition into atomic hydrogen and diffusive mass transfer through HFM particles, considering spheric geometry. Hydrogen dissolution involves calculating equilibrium pressure between gas and atomic hydrogen on the surface. For that purpose, a regular mixture model has been settled to properly reproduce all stages of the equilibrium curve. Higher uncertainty kinetic parameters have been estimated through optimization by solving a non linear problem, minimizing the error between experimental values and those predicted by the model. Results obtained for LaNi5, as a HFM, are shown at pressures ranging from 0.5 to 1.2 Mpa at 298 K-temperature. An analysis based on models to predict this material behavior is carried out for a possible use applied in hydrogen purification.

Keywords: intraparticle kinetics; absorption; hydrogen diffusion; hydride-forming metals

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La absorción de hidrógeno en materiales formadores de hidruro (MFH) ha sido estudiada con el objetivo de desarrollar dispositivos de purificación y almacenamiento que incentiven el uso de este vector energético. (Sakintuna et al., 2007). Las aleaciones de La-Ni_{5-x}-Sn_x son los formadores de hidruros preferidos debido a su baja presión y adecuados estándares de reacción en condiciones ambientales (Blanco et al., 2014).

El estudio de la cinética de estos hidruros metálicos ha estado principalmente orientado a determinar los mecanismos de reacción para identificar etapas límites en la absorción y desorción del hidrógeno. En nuestro grupo se desarrolló un modelo para el proceso de purificación de hidrógeno, incluyendo etapas de absorción y desorción (Talagañis et al., 2011 y 2014). A raíz de que aún quedan muchos aspectos de la cinética del proceso por dilucidar, en este trabajo se ha prestado especial atención a la estimación de parámetros de un modelo de absorción que incluye la disolución superficial de hidrógeno molecular sobre el MFH, su descomposición en hidrógeno atómico, y posterior difusión a través de las partículas del sólido.

La disolución superficial está relacionada con la presión parcial de hidrógeno y la concentración de hidrógeno atómico en la superficie del MFH. La Termodinámica puede ser descripta a través de las curvas de presión composición y temperatura (PCT) (Gray et al, 1999). Aunque se ha experimentado con diversos MFH de la familia $LaNi_{5-x}Sn_x$, a diferentes presiones y temperaturas de trabajo, aquí se han seleccionado los resultados correspondientes a $LaNi_5$ a una temperatura de 300 K. Estos datos se usan para ajustar el modelo propuesto mediante la estimación de los parámetros de mayor incertidumbre; entre ellos, la velocidad específica de reacción y los coeficientes del modelo de mezcla regular usado para representar la curva PCT en su totalidad.

A continuación se describen las principales ecuaciones e hipótesis en las que se basa el modelo de absorción; se detallan algunos aspectos sobre la discretización usada para su resolución; y por último, se realiza un análisis de los resultados obtenidos. Para la resolución del modelo se utilizó el entorno de modelado GAMS (General Algebraic Modelling System, Brooke et al., 1988).

MODELO MATEMÁTICO

En general, para describir el modelo matemático se realizan las siguientes asunciones:
-Las partículas del MFH tienen geometría esférica con diámetro uniforme y constante.
-Sólo se consideran dos fases, la fase gas hidrógeno y la fase sólida MFH.
-El mecanismo de absorción consta de dos etapas, la primera: procesos de fisisorción más quimisorción, el hidrógeno gaseoso se disuelve sobre la superficie del MFH y se convierte en hidrógeno atómico. Esta etapa depende de las condiciones de equilibrio entre estas especies, la presión y temperatura del sistema. La segunda etapa corresponde a la difusión, el hidrógeno atómico difunde a través del MFH hasta el corazón de la partícula.
En la fisisorción, la presión de equilibrio de hidrógeno (P_{eq}) en la fase gas es modelada como una mezcla regular:

$$P_{eq} = \frac{C_{eq}}{H_{eq}} exp\left[a\left(1 - \frac{C_{eq}}{b}\right)^2\right] \quad (1)$$

Donde:

$$H_{eq} = H^0 \exp\left[-\frac{\Delta H_{abs}}{R_{gas}}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right] \quad (2)$$

siendo C_{eq} la concentración de hidrógeno atómico en la superficie de la partícula; a y b son parámetros; H_{eq} es la constante de Henry, H^0 es una constante a 298 K, y ΔH_{abs} es la entalpía de absorción. La fuerza impulsora del proceso de absorción es la diferencia que existe entre la presión de la fase gas y la equivalente a la condición de equilibrio.

La velocidad de reacción de la primera etapa se calcula como:

$$v = k\left(P - P_{eq}\right)4\pi r^2 \quad (3)$$

Donde:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$k = k^0 \exp\left(\frac{\Delta H_{ch}}{R_{gas}T}\right) \tag{4}$$

siendo *k* la velocidad específica de reacción que depende de la temperatura, *r* es el radio de la partícula, *P* la presión parcial de hidrógeno; k^0 la constante de velocidad, y ΔH_{ch} la diferencia entre la entalpía de fisisorción y la energía de activación (Martin et al., 1996).

Como se ha expresado, se ha asumido geometría esférica para la partícula de MFH. Se realiza una discretización del radio de la esfera de manera que puedan calcularse *i* volúmenes iguales (V_i). El dominio se representa en la Figura 1, donde r_i y r_{mi} son los radios regulares y promedio de cada volumen V_i, respectivamente.

$$rm_i = \left[\left(\frac{r_i^3}{2}\right) + \left(\frac{r_{i-1}^3}{2}\right)\right]^{1/3}, \ \forall i \tag{5}$$

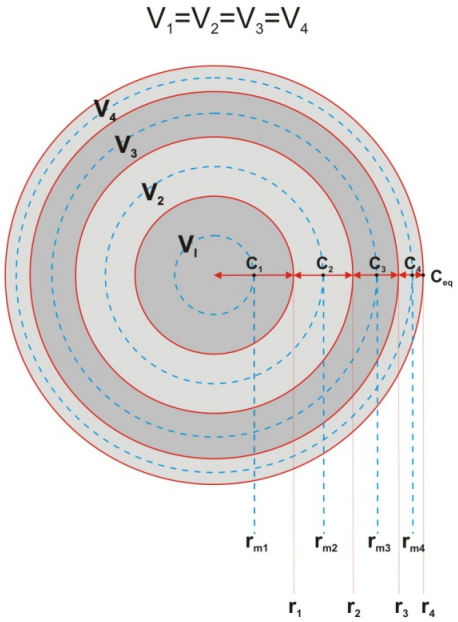


Fig. 1: Esquema de discretización del volumen de la partícula de MFH.

La ecuación discretizada del balance de masa se expresa como sigue:

$$\frac{V_i\left(C_{i,t+1} - C_{i,t}\right)}{\Delta t} = D\left[\alpha\left(\frac{C_{i+1,t} - C_{i,t}}{r_{m_{i+1}} + r_{m_i}} 4\pi r_i^2\right) - \beta\left(\frac{C_{i,t} - C_{i-1,t}}{r_{m_i} + r_{m_{i-1}}} 4\pi r_{i-1}^2\right) + \gamma\left(\frac{C_{eq_t} - C_{i,t}}{r_i + r_{m_i}} 4\pi r_i^2\right)\right];$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & if\ 1 \le i < i_f \\ 0, & if\ \ i = i_f \end{cases}; \ \beta \begin{cases} 1, & if\ 1 < i \le i_f \\ 0, & if\ i = 1 \end{cases}; \ \gamma \begin{cases} 1, & if\ i = i_f \\ 0, & if\ 1 \le i < i_f \end{cases} \tag{6}$$

$$r_{i-1} = 0, \qquad if\ i = 1$$

$$Condición\ de\ borde \qquad D\left(\frac{C_{eq_t} - C_{i,t}}{r_i - r_{m_i}} 4\pi r_i^2\right) = v, \qquad if\ i = i_f$$

Donde $C_{i,t}$ es la concentración de hidrógeno atómico en la fase sólida, Δt es la variación del tiempo y *D* el coeficiente de difusión del hidrógeno atómico en la fase sólida. Dependiendo de los coeficientes *α, β,* y *γ* (parámetros binarios), la Ec. (8) representa los procesos de reacción y difusión en diferentes zonas de la partícula de MFH. Notar que el volumen de capa V_i es el mismo para cada volumen *i* definido.

ISBN 978-607-8242-11-5

Los moles de hidrógeno gaseoso n_{H2} y la presión P del gas en el reactor se calculan como sigue:

$$n_{H_2} = P_{in}\left(\frac{V_{in}+V_r}{RT}\right) - \frac{N_p}{2}\int_{V_{i=1}}^{V_{i=f}} C_i \cdot dV_i \quad (7)$$

Siendo:

$$P = \frac{n_{H_2}RT}{(V_{in}+V_r)} \quad (8)$$

donde V_{in} y V_r son los volúmenes ocupados por el gas, T es la temperatura del sistema, N_p es el número de partículas y dV es el diferencial de volumen de la partícula.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso de estudio

El modelo fenomenológico descripto para este ejemplo, ha sido ajustado usando datos experimentales correspondientes a la absorción de hidrógeno en $LaNi_5$ a una temperatura de 298 K, a diferentes valores de presión (0.5 a 1.2 MPa). Para estos experimentos se usó un equipo volumétrico tipo Sieverts de 304L, con un volumen de reactor de 7×10^{-3} L. Los detalles del sistema experimental han sido previamente reportados en la literatura (Borzone et al., 2013).

Resultados: Estimación de Parámetros y Simulación

La Tabla 1 resume los valores de los parámetros del modelo, estimados vía optimización, minimizando el error entre los valores de presión experimentales y predichos por el modelo. Se ha asumido un diámetro de partícula de 10 μm.

La Figura 2 muestra la curva PCT obtenida para el ejemplo. Se incluyen resultados publicados por otros autores para valores de temperaturas cercanos (A: Murray et al., 1981; B: Boser, 1976; C: Luo et al., 1998). Desde el punto de vista numérico, algunos modelos publicados en trabajos previos sólo consideraban la región plana de la curva PCT, trayendo consigo errores en la aproximación y cálculo de la fuerza del proceso de absorción; es decir, la diferencia entre la presión parcial de hidrógeno y la presión de equilibrio del sistema MFH-H_2.

Tabla 1: Parámetros del modelo fenomenológico.

Parámetro, Unidad	*Valor*
a	2
b	0.071
H^0, mol cm^{-3} MPa^{-1}	0.26
K^0, mol MPa^{-1} cm^{-2} s^{-1}	6.85e-15
ΔH_{ch}, J mol^{-1}	51135.97
D, cm^2 s^{-1}	2.11e-9

La Figura 3 muestra los valores experimentales y predichos de la presión parcial de hidrógeno. Los resultados de la simulación corresponden a la solución del modelo usando un método integral. Como se puede observar, se obtiene una buena aproximación usando 4 volúmenes discretos definidos en el radio de partícula. Un mayor número de discretizaciones incrementa el costo computacional y no consigue mejoras significativas en el ajuste. Estos aspectos serán objeto de estudio en trabajos futuros sobre métodos para la resolución del modelo basado en esta aplicación.

ISBN 978-607-8242-11-5

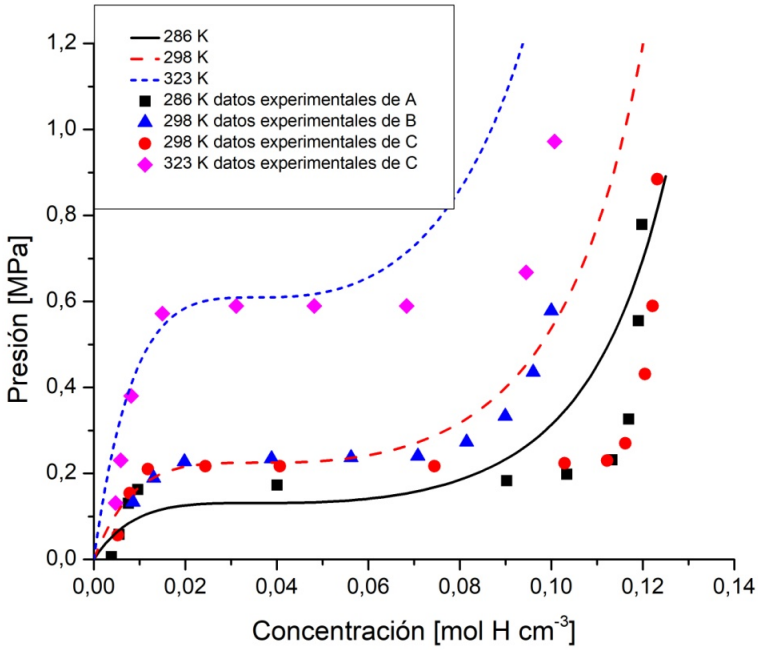


Fig. 2: Curvas PCT para el $LaNi_5$.

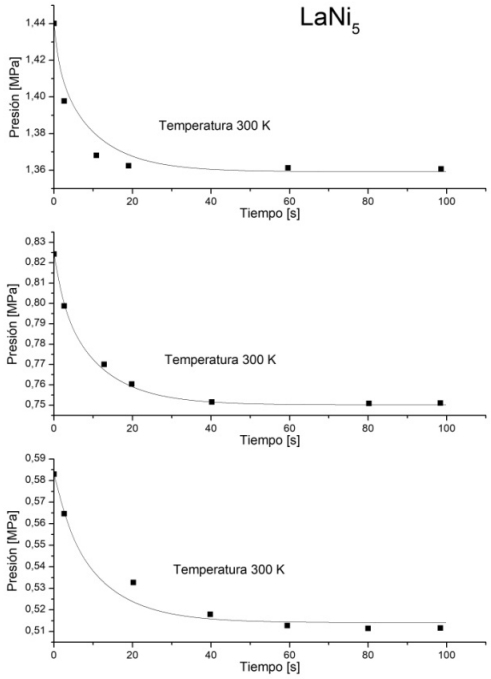


Fig. 3: Valores experimentales y predichos de presión para el sistema $LaNi_5$-H_2.

La Figura 4 representa los valores de concentración de hidrógeno atómico a través del radio de la partícula. Como se observa, la concentración de superficie final calculada es aproximadamente 0.12 mol H cm^{-3}.

ISBN 978-607-8242-11-5

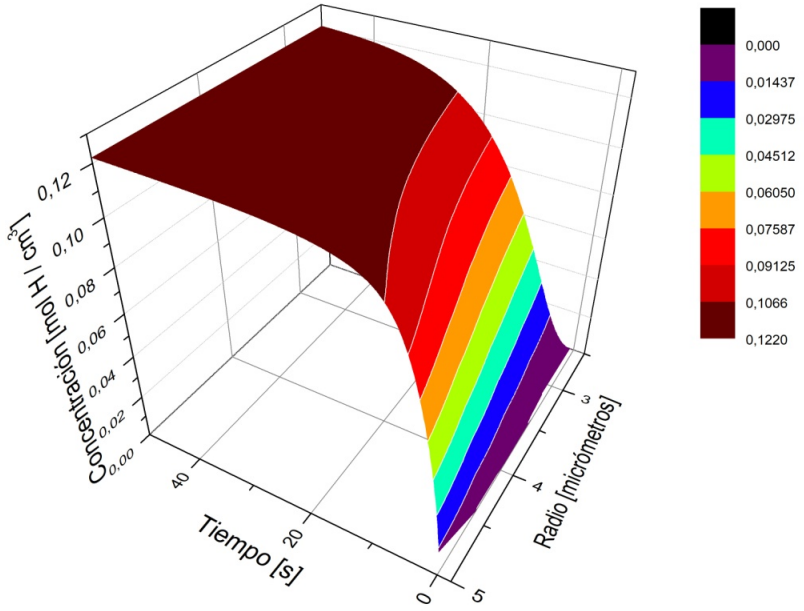


Fig. 4: Concentración de hidrógeno atómico (mol H cm^{-3}) a través del radio de la partícula.

Para un mismo coeficiente de difusión, a medida que el diámetro de la partícula incrementa, la variación de concentración en el radio de la partícula se hace más notable. Estos resultados no son aquí mostrados porque formarán parte de una posterior publicación sobre la sensitividad de los parámetros del modelo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un modelo regular de la curva PCT más difusión intrapartícula para la absorción de hidrógeno en materiales formadores de hidruros. El modelo de mezcla regular permite representar en su totalidad la curva PCT usada para el cálculo de la fuerza impulsora de la absorción de hidrógeno en MFH.
A través del ajuste del modelo se calcularon los parámetros de mayor incertidumbre, entre ellos: los parámetros de la curva PCT, la velocidad específica de reacción de adsorción y el coeficiente de difusividad.

El modelo y los parámetros estimados resultan de gran utilidad para evaluar tendencias y optimizar el proceso de absorción de hidrógeno en dispositivos basados en el uso de materiales formadores de hidruros, para su posible uso en sistemas de purificación y almacenamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el aporte financiero provisto por las siguientes instituciones para llevar a cabo esta investigación: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional del Litoral, Universidad Tecnológica Nacional, y Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) de Argentina.

REFERENCIAS

Blanco, M.V., Borzone, E.M., Baruj, A., Meyer, G.O., "*Hydrogen sorption kinetics of La–Ni–Sn storage alloys*", Int. J. Hydrog. Energy, 39, 5858–67 (2014).

Borzone, E.M., Baruj, A., Blanco, M.V., Meyer, G.O., "*Dynamic measurements of hydrogen reaction with $LaNi_{5-x}Sn_x$ alloys*", Int. J. Hydrog. Energy, 38, 7335–43 (2013).

Boser, O., "*Hydrogen sorption in $LaNi_5$*", J. Common Met., 46, 91–9 (1976).

Brooke, A., Kendrick, D.A., Meeraus A., Rosenthal, R.E., "*GAMS: A User's Guide*", Scientific Press (1988).

Gray, E.M., Blach, T.P., Buckley, C.E., "*Stability of the hydrogen absorption and desorption plateaux in $LaNi_5$–H: Part 5: H capacity*", J. Alloys Compd. 293–295:57–61 (1999).

ISBN 978-607-8242-11-5

Luo S., Clewley J.D., Flanagan T.B., Bowman Jr. R.C., Wade L.A., "*Further studies of the isotherms of $LaNi_{5-x}Sn_x$–H for x=0–0.5*", J. Alloys Compd., 267, 171–81 (1998).

Martin, M., Gommel, C., Borkhart, C., Fromm, E., "*Absorption and desorption kinetics of hydrogen storage alloys*", J. Alloys Compd., 238, 193–201 (1996).

Murray, J.J., Post, M.L., Taylor, J,B., "*The thermodynamics of the LaNi5-H2 system by differential heat flow calorimetry I: Techniques; the α + β two-phase region",* J. Common Met., 80, 201–9 (1981).

Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M., "*Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review*", Int. J. Hydrog. Energy, 32,1121–40 (2007).

Talagañis, B.A., Meyer, G.O., Aguirre, P.A., "*Modeling and simulation of absorption–desorption cyclic processes for hydrogen storage-compression using metal hydrides*", Int. J. Hydrog. Energy, 36, 13621–31.(2011).

Talagañis, B.A., Meyer, G.O., Oliva, D.G., Fuentes, M., Aguirre, P.A., "*Modeling and optimal design of cyclic processes for hydrogen purification using hydride-forming metals*", Int. J. Hydrog. Energy, 39,18997–9008 (2014).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Diseño de un Prototipo de Videojuego 3D de Razonamiento Abstracto para el Desarrollo de Habilidades Mentales

José A. Moncada[1] y Sandra P. Mateus[2]
(1) Estudiante de Ingeniería Informática, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Carrera 48 # 7-151 El Poblado, Medellín
(2) Doctora en Ingeniería-Sistemas, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Carrera 48 # 7-151 El Poblado, Medellín. Oficina P19-146
E-mail: jose_moncada82131@elpoli.edu.co; spmateus@elpoli.edu.co

Resumen

Este trabajo plantea el diseño de un prototipo de videojuego 3D, para fomentar el desarrollo de las habilidades mentales que pueden adquirirse mediante la interacción continua con éste tipo de plataformas. La metodología utilizada para el desarrollo del trabajo, fue la siguiente: Se realizó una caracterización de los proyectos en videojuegos de habilidad mental, así como del impacto que genera en diferentes ambientes; a partir de ésta, se diseñaron los modelos de los objetos 3D que hacen parte del entorno en el juego, con base en la integración de los controles brindados en el motor de videojuegos Unity; posteriormente se implementaron una serie de retos en áreas de razonamiento abstracto, incluyendo una técnica de Inteligencia Artificial basada en Redes Neuronales Artificiales, con el fin de dar una solución a los ejercicios propuestos en el juego y captar la atención del jugador; finalmente, se validan los resultados obtenidos de la interacción con el prototipo de videojuego respecto a las competencias adquiridas en el desarrollo a nivel mental del jugador.

Palabras clave: Videojuego, Habilidad mental, Razonamiento Abstracto, Inteligencia Artificial (IA), Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Prototype of 3D Video Game of Abstract Reasoning for the Development of Mental Skills

Abstract

This paper proposes the design of a prototype of video game 3D, to promote the development of the mental skills that can acquire by means of the constant interaction with this type of platforms. The methodology used for the development of the work, was the following one: a characterization of the projects was realized in video games of mental skill, as well as of the impact that it generates in different environments; pursuant to it, the designed 3D models objects that are part of the game environment, with base in the integration of the controls offered in the engine of video games Unity; later a series of challenges were implemented in areas of abstract reasoning, including a technology of Artificial Intelligence based on Artificial Neural Networks, in order to give a solution to the exercises proposed in the game and to catch the attention of the player; finally, there are validated the results obtained of the interaction with the prototype of video game with regard to the competitions acquired in the development to mental level of the player.

Keywords: Video game, Mental Abilities, Abstract Reasoning, 3D (Third Dimension), Artificial Intelligence (AI), Artificial Neural Network (ANN).

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Los videojuegos se consideran como plataformas integradas por contenidos y animaciones, con el fin de crear interacciones con varias personas de una manera digital (Steinberg et al., 2011). Teniendo en cuenta que algunos juegos, incluyen factores determinados desde la Inteligencia Artificial (IA), la cual se considera como una rama de las ciencias computacionales, que se encarga de la construcción de sistemas racionales con la capacidad de autoaprendizaje en la toma de decisiones, para la solución de problemas que son enfrentados en su mayoría por seres humanos (Ponce, 2010).

Por otra parte, el razonamiento abstracto es un proceso que permite a la persona deducir de una determinada situación, distintos aspectos y elementos que conllevan el abordaje de una conclusión lógica, a partir del análisis de cada componente (Fernández, 2011), basándose en principios conceptuales, que se articulan fácilmente en las materias que requieren un grado de capacidad lógica y deductiva, como lo son las áreas en ciencias básicas y aquellas orientadas a la programación de sistemas de información (Alexandron et al., 2014).

Algunas de las áreas a desarrollar en las competencias a nivel mental, a través de la interacción del prototipo de videojuego son: Habilidad Cognoscitiva, considerado como un aprendizaje continuo de realización de tareas de forma estratégica y optimizada (Finn et al, 2014). Capacidad Lógico Deductiva, que permite establecer técnicas de observación y atención para la solución de problemas (Nuria, 2001); y Cálculo Mental, como la agilidad para responder problemas matemáticos sin herramientas o instrumentos adicionales (Jiménez, 2001).

Castaño (2007) desarrolla una página web en donde incluye distintas modalidades de juegos como crucigramas, secuencias de figuras y números, ajedrez, dominó, laberintos, entre otros, que a través de herramientas elaboradas en Flash (Ver Figura 1), permite la estimulación de habilidades en áreas del razonamiento lógico y abstracto mediante la interacción con cada plataforma virtual que desee; cada una de éstas posee su respectivo manual y pasos básicos del juego.

Éste trabajo está basado principalmente en juegos y retos en 2D, lo cual implica un aspecto que puede influir en la desmotivación del jugador para seguir interactuando con éste tipo de plataformas, debido a que la tecnología 3D posee características en relación al aspecto de profundidad, que resultan creativos para el jugador, por el enfoque realista al que va dirigido en la mayoría de videojuegos que se producen, consolidándolo en un mercado amplio de aplicación y desarrollo (Baldeón, 2011).



Fig. 1: Juego desarrollado en Flash, Parking Perfection (Castaño, 2007)

Bustillo (2011) diseña una página web en donde incluye distintas actividades y ejercicios lúdicos con un enfoque académico, entre los cuáles se destacan el triángulo mágico, sudokus con imágenes, cálculos mentales, torres de hanoi, etc., (Ver Figura 2). Todos éstos ejercicios tienen un manual de uso, para que el estudiante pueda guiarse de una manera más sencilla, permitiéndole también obtener diferentes resultados que se podrán ir registrando en un perfil determinado en cada persona, con el fin de medir su progreso a medida que vaya resolviendo los ejercicios. De ésta manera, le da la posibilidad a cualquier estudiante, de desarrollar distintas habilidades y competencias a nivel cognoscitivo, a través de una variedad de juegos basados en razonamiento lógico y abstracto.

ISBN 978-607-8242-11-5



Fig. 2: Juegos Lúdicos en 2D, Razonamiento Lógico (Bustillo, 2011)

La anterior página web, está basada en juegos desarrollados en 2D, lo que implica un punto importante el cual se debe mejorar, para la captación y motivación en el estudiante, debido a que hoy en día, generalmente los videojuegos 3D poseen características en diseño que permiten un mayor impacto en procesos de formación de los jugadores que experimentan éste tipo de plataformas, a través de inmersión en el aprendizaje y atención continua (Zhang et al., 2010).

La compañía Entertainment Software Association en su estudio realizado (Entertainment Software Association, 2016) llevó a cabo un modelo de resultados estadísticos respecto a la tendencia en temas de los videojuegos actuales, teniendo en cuenta las preferencias de los jugadores en el mercado, tipos de juegos y los dispositivos que utilizan para éste mismo fin de entretenimiento. En los datos que fueron arrojados en el proyecto, se identificaron tres variables importantes: Puzzles, Acción y Estrategia, las cuales categorizan aspectos como diversión y motivación en el jugador frente al ambiente creado, fomentando espacios de socialización con personas que se encuentren en un entorno académico o profesional.

Tsung-Yen y Wei-Fan (2007), resaltan la importancia del crecimiento del aprendizaje y el proceso cognoscitivo que se desarrolla con las herramientas digitales y de multimedia CAI (Computer-Assisted Instruction), usando las tecnologías que están emergiendo para impulsar a los estudiantes a mejorar sus capacidades en distintas áreas académicas; una de las herramientas multimedia usadas para éste estudio fue el del juego “Fire Captain: Bay Area Inferno” (Ver Figura 3) que consiste en seguir instrucciones y cumplir distintas tareas asignadas, fomentando habilidades cognoscitivas a través de la solución de las preguntas que continuamente se presentan en el simulador.

Durante la aplicación del simulador establecido en el trabajo anterior, no se está considerando las herramientas y contenidos necesarios para llamar la atención de los jugadores, puesto que no se le permite interactuar libremente con ésta plataforma, desaprovechando así la oportunidad de una herramienta virtual y novedosa que puede contribuir al desarrollo del aprendizaje a nivel académico.



Fig. 3: Juego “Fire Captain: Bay Area Inferno” (Tsung-Yen y Wei-Fan, 2007)

DISEÑO DEL PROTOTIPO Y DE LA RED NEURONAL

Los retos que se plantearon para éste trabajo fueron los siguientes:

Perspectiva: Es un juego basado en la creación de entornos que representan ilusiones para el jugador, permitiéndole hacer uso de su razonamiento para descubrir nuevos caminos adoptando una óptica distinta en el personaje, en éste caso un Gato; la idea fundamental sobre la que se basa los mapas diseñados en el juego, es que el gato se desplace a través de los caminos indicados con las flechas de dirección o con un Click, recolectando a su paso la comida que se ha dispuesto aleatoriamente sobre el mapa (Ver Figura 4).

ISBN 978-607-8242-11-5

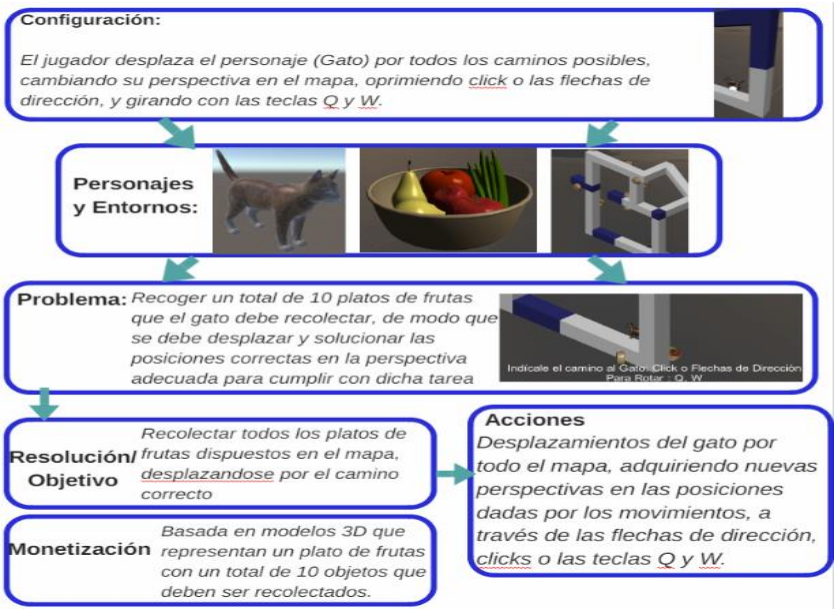


Fig. 4: Metodología de Diseño para el Juego Perspectiva

Laberinto: Es un juego clasificado como lógico, donde constituye competencias en áreas del razonamiento enfocado a las matemáticas y geometría, ya que el jugador, constantemente, se encuentra estableciendo posibles caminos para llegar a un punto de salida indicado en el mapa; a medida que esté se enfoca analizando los posibles caminos, se va desarrollando habilidades que le permiten construir imágenes mentales que representen una posible solución al problema, adicionando elementos donde el jugador podrá sumar puntos extras por cada tesoro ubicado en el laberinto e igualmente, si resuelve el mismo hasta llegar a la salida (Ver Figura 5).

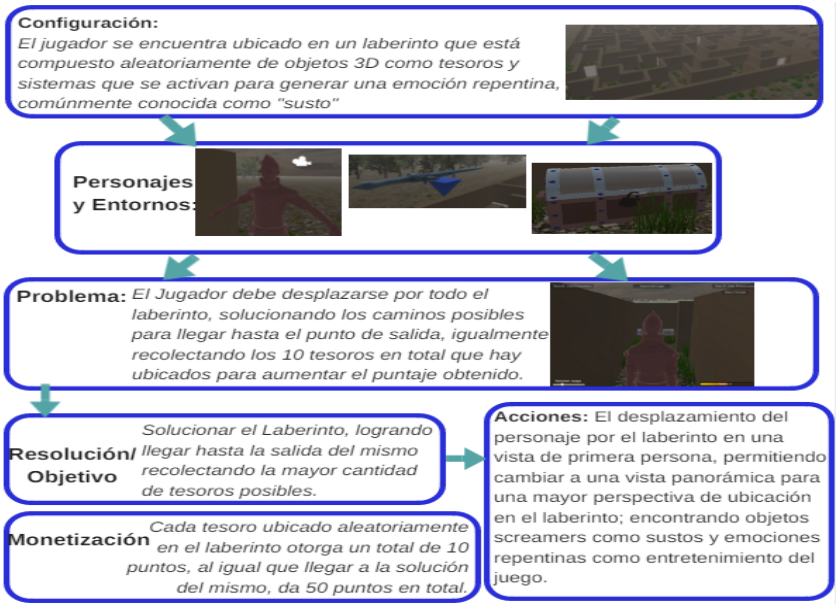


Fig. 5: Metodología de Diseño para el Juego Laberinto

Reloj Paradoja: Es un juego clasificado como lógico con aspectos de agilidad matemática, donde se pone a prueba habilidades en ésta área del razonamiento, a medida que se resuelve los acertijos presentados en el juego, compuesto por dos manecillas de color Blanco y Azul, las cuales indican los números que posteriormente se encuentran habilitados para activarse; dichas manecillas se desplazan de forma secuencial a través de cada uno de los números presentados en el acertijo, donde la manecilla de color blanco, se mueven en un sentido horario y la de color azul anti horario, dichos movimientos secuenciales se realiza una cantidad N de veces, indicado por el número respectivo que se activó (Ver Figura 6).

ISBN 978-607-8242-11-5

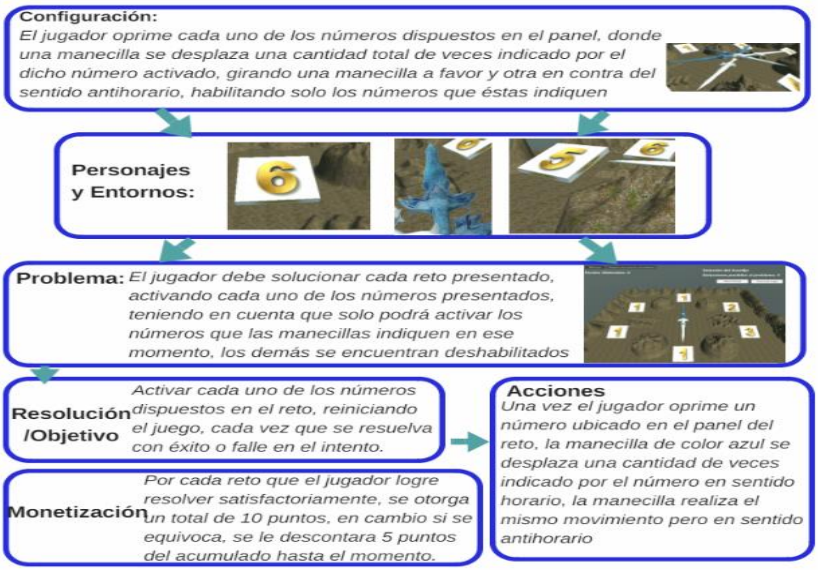


Fig. 6: Metodología de Diseño para el Juego de Reloj Paradoja

La aplicación de una RNA en éste trabajo, implica una unidad de procesamiento que va a permitir el aprendizaje continuo en el personaje de uno de los juegos, que en éste caso, se implementará en el Juego del Laberinto; teniendo en cuenta una arquitectura de Perceptron Multicapa (MLP), puesto que aprende un conocimiento basado en el entrenamiento supervisado constantemente en la selección de datos (entradas/salidas) como resultado de los cambios en el medio y del número de interconexiones o capas establecidas, en función de los objetivos (tesoros) que el personaje estima para realizar el recorrido a través del mapa, con el menor desplazamiento posible.

La configuración adoptada para el MLP que se va a aplicar en el juego, se compone de los siguientes parámetros en cada una de sus capas:

Capa de Entrada: Cada una de las distancias medidas en mahalobis (vectores 3D) que existe entre el personaje y su objetivo (Punto de Salida o Tesoros) y sus coordenadas respectivas a la posición actual.

Capa Oculta: Contiene cada uno de los pesos que se asignan como entrada a otra neurona, a través del procesamiento de los datos ingresados respecto a las distancias entre el personaje y el objetivo, teniendo en cuenta su posición.

Función de la Capa Oculta: Los procesos que las capas ocultas llevarán a cabo para las estimaciones de las distancias establecidas entre el personaje y los objetivos, estarán determinados por los siguientes parámetros como datos de entrada (Ver Tabla 1).

Capa Salida: Objetivo establecido que el personaje debe alcanzar en el mapa, según el procesamiento de pesos estimados por las distancias calculadas a los tesoros en el mapa y la ubicación actual del personaje, resultando en las coordenadas de los tesoros como objetivos fijados. .

Tabla 1: Parámetros Definidos para la Capa de Entrada.

Parámetro	Descripción	Dominio
DT1	Distancia a Tesoro 1	(Decimal) Vector3.Distance (gameObject.transform.position, destinos[1].transform.position)
DT2	Distancia a Tesoro 2	(Decimal) Vector3.Distance (gameObject.transform.position, destinos[2].transform.position)
DT3	Distancia a Tesoro 3	(Decimal) Vector3.Distance (gameObject.transform.position, destinos[3].transform.position)
. . .	. . .	. . .
DT10	Distancia a Tesoro 10	(Decimal) Vector3.Distance (gameObject.transform.position, destinos[10].transform.position)

ISBN 978-607-8242-11-5

UB	Ubicación en el Mapa	Coordenadas (X,Y,Z) en el Mapa del Laberinto

En la especificación de variables para los datos de entrada, se tuvieron en cuenta cada una de las distancias establecidas a los 10 objetivos o tesoros ubicados en el mapa (DT1, DT2,…, DT10), calculándose de manera vectorial, desde la ubicación actual del personaje en las posiciones X, Y y Z (UB) hasta las coordenadas del objetivo específico (1 - 10), donde también se encuentran en una posición (X, Y, Z) del laberinto; en total se realizaron 2650 datos de entrada bajo éste esquema para el entrenamiento de la RNA.

Para el entrenamiento de la RNA se empleó un 80% del total de los datos disponibles, reservando el 10% para realizar validaciones correspondientes y un restante del 10% para actividades de test, de ésta manera, se verifica que los datos entregados por la RNA son satisfactorios, realizando pruebas de validación cruzada que permita asegurar la cantidad apropiada de capas ocultas a través de un algoritmo estimando una predicción precisa del modelo establecido para el problema.

El entrenamiento de la RNA estará basado bajo el siguiente algoritmo:

Escoja el número de neuronas de la capa oculta.

Inicialice los pesos W.
Repita

Repita para cada uno de los datos X_i

Calcule la salida para la primera capa

$$G_j = f\left(\sum_{i=1}^{N} X_i W_{hji} + W_{hjB}\right)$$

Calcule la salida total

$$F_j = f\left(\sum_{i=1}^{K} G_i W_{oji} + W_{ojB}\right)$$

Fin.

Repita para cada uno de las salidas F_j *para todo j desde 1 hasta M*

Calcule el error como

$$\varepsilon_{oj} = (Y_j - F_j)[F_j(1 - F_j)]$$

Fin

Hasta condición de terminación

Fig. 7: Algoritmo de Entrenamiento de la RNA (Restrepo y González, 2013)

El tipo de entrenamiento de la RNA es de un aprendizaje supervisado, puesto que se deben ingresar todos los datos de entrada propuestos por las 13 variables establecidas, con el fin de componer todo el historial del personaje con los objetivos y distancias calculadas a cada tesoro ubicado en el mapa. Con esto se pretende que la RNA implementada, tenga el aprendizaje suficiente para identificar el objetivo que debe seguir, según la ubicación actual del personaje en el laberinto. Para éste trabajo se plantea un MLP basado en una Red 13-10-1 (13 neuronas de entrada, 10 ocultas y 1 de salida).

Los diseños que se han realizado en éste trabajo plantean una variedad de componentes en la cual el prototipo de videojuego ha incorporado la característica de una tecnología 3D, que, según la caracterización realizada, proporciona un enfoque distinto al entorno en el que el jugador se encuentra, al momento de enfrentar un reto de los que se han detallado anteriormente; igualmente los ambientes y modelos diseñados para cada uno de ellos permiten adoptar nuevas perspectivas y explorar las técnicas de solución basándose en el modelo RNA como una técnica de IA seleccionada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el desarrollo de éste trabajo, se establece una serie de pautas y actividades definidas para llevar a cabo la validación de los resultados que se ofrecen en el prototipo de videojuego 3D, donde cada juego incorpora una serie de retos en el cual se implementó diferentes pruebas basadas en tiempo y puntaje obtenidos, con el fin de analizar las áreas que se desarrollaron a nivel mental, teniendo en cuenta la interacción con la plataforma y las estadísticas arrojadas en la prueba, con una calificación detallada, que se puede visualizar de forma amplia en el Anexo 3 de éste trabajo, realizándose las pruebas construidas a 20 personas, caracterizando los tiempos para cada puntaje del juego seleccionado, con el fin de establecer un nivel específico en las competencias mentales, teniendo en cuenta la cantidad de tiempo invertido para completar el

ISBN 978-607-8242-11-5

reto, con el fin de establecer un criterio aproximado de los puntajes obtenidos a medida que el jugador interactúa con el prototipo.

Prueba Juego Perspectiva: En ésta prueba realizada, bajo el juego de perspectiva, se desarrollan competencias a nivel mental con un enfoque en las habilidades cognoscitivas del jugador, puesto que requiere del esfuerzo estratégico para desplazar el personaje hasta sus objetivos finales en el mapa, los cuales son representados como platos de comida, con un total de 10 platos ubicados aleatoriamente. Como se observa en la Figura anterior, el jugador podrá seleccionar entre 6 Niveles, donde los 5 primeros, son niveles de entrenamiento, permitiéndole conocer la dinámica del juego, observando y realizando movimientos y controles básicos del personaje, sin platos para recoger, es decir no se obtiene ningún puntaje. En el Nivel 6, se encuentra el reto, donde su objetivo final es recolectar los 10 platos de comida en el menor tiempo posible, con un límite de 10 minutos para resolverlo, donde al finalizar, se muestran los resultados obtenidos, evaluando la habilidad cognoscitiva de la siguiente manera (Ver Tabla 3).

Tabla 2: Calificación Prueba Reto Perspectiva

Total Comida	Tiempo (Minutos)	Nivel Habilidad Cognoscitiva
10	< 3	Excelente
10	>= 3 y <=5	Muy Bueno
10	>5 y < 10	Bueno
>=7 y < 10	10	Aceptable
>=5 y < 7	10	Regular
< 5	10	Insuficiente

Prueba Juego Laberinto: Para el reto del laberinto, la prueba realizada se enfoca en las áreas a nivel mental con competencias lógico-deductivas, debido a que el jugador debe observar y analizar con atención el mapa presentado para desplazar al personaje a través de los tesoros ubicados aleatoriamente.

El jugador debe desplazar el personaje a lo largo del laberinto, recolectando un total de 10 tesoros ubicados aleatoriamente, donde cada uno da un valor de 10 puntos, igualmente, resolver el laberinto, da un total de 50 puntos, para un tiempo límite de 30 minutos; posteriormente se visualizan los resultados obtenidos, evaluando la capacidad lógico-deductiva del jugador en las estrategias planteadas para la solución de éste reto (Ver Tabla 3).

Tabla 3: Calificación Prueba Reto Laberinto

Total Puntos	Tiempo (Minutos)	Nivel Capacidad Lógico-Deductiva
150	< 23	Excelente
>= 100 y < 150	< 23	Muy Bueno
>= 100 y < 150	>= 23 y <=30	Bueno
>= 50 y < 100	< 23	Aceptable
>= 50 y < 100	>= 23 y <=30	Regular
< 50	<= 30	Insuficiente

Prueba Juego Reloj Paradoja: La prueba realizada para el reto del Reloj Paradoja, desarrolla específicamente competencias orientadas al cálculo mental del jugador, ya que debe resolver estratégicamente cada uno de los desafíos presentados en el panel, acumulando 10 puntos por cada solución, y disminuyendo 5 por cada desafío errado en su procedimiento.

Cada uno de los desafíos debe plantearse de forma estratégica, con el fin de activar cada uno de los números del panel, en el orden adecuado para darle solución al desafío; cada uno de los desafíos puede tener 1 o varias soluciones posibles al problema, con un tiempo límite de 10 minutos para resolver la mayor cantidad de desafíos, visualizando los resultados obtenidos y su posterior evaluación en el cálculo mental implementado para éste reto (Ver Tabla 4).

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 4: Calificación Prueba Reto Reloj Paradoja

Total Puntos	Tiempo (Minutos)	Nivel Cálculo Mental
>= 40	< 5	Excelente
>= 40	>=5 y < 8	Muy Bueno
>= 40	>= 8	Bueno
>=20 y < 40	<= 7	Aceptable
>=20 y < 40	> 7	Regular
< 20	<= 10	Insuficiente

A través de la encuesta que se desarrolló con la interacción de cada uno de los Juegos y sus respectivos retos, se llevó a cabo las pruebas para la validación de los resultados obtenidos, con una muestra de 20 estudiantes, donde se observó los siguientes datos:

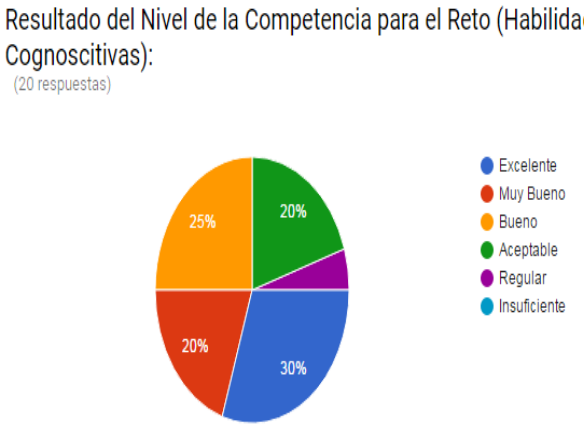


Fig.8: Resultados del Juego Perspectiva

En la gran mayoría de los estudiantes, se encontró una calificación, ubicada entre: Bien, Muy bien y Excelente de Habilidades Cognoscitivas, donde estos dos últimos niveles se obtuvo por parte del 50% de los encuestados, lo que demuestra un claro desempeño en la integración, organización y construcción de elementos que hacen parte de un problema, utilizando técnicas de solución básicas para resolver una situación específica, durante el tiempo que le sea necesario.

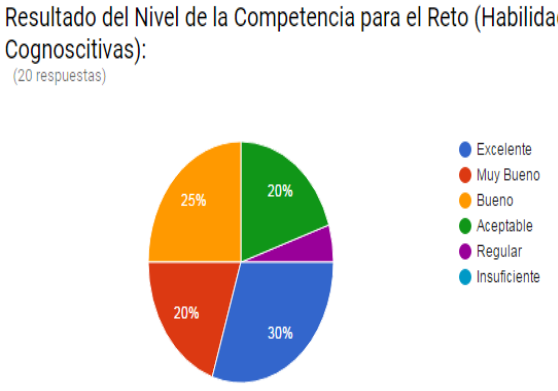


Fig. 9: Resultados del Juego Laberinto

En la encuesta realizada, media porción del total de estudiantes aproximadamente, se encuentran entre un nivel Bueno y Excelente de Capacidades Lógica-Deductivas, por lo que se desarrolla competencias suficientes en la atención y observación del problema, analizando la información para establecer un objetivo claro en el menor tiempo posible.

ISBN 978-607-8242-11-5

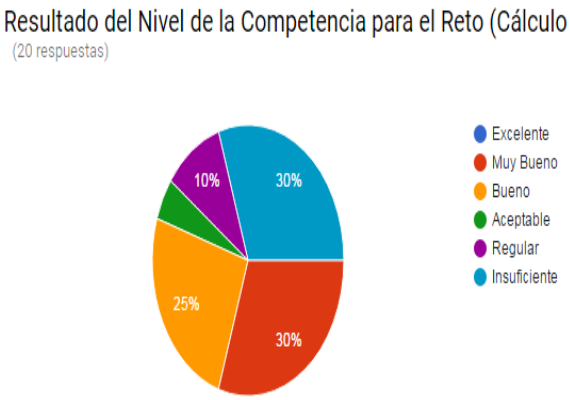


Fig. 10: Resultados del Juego Reloj Paradoja

A diferencia de los demás retos, donde los encuestados presentan avances en el fomento de las habilidades mentales, con un nivel entre Bueno y Excelente, es en éste juego se da una calificación de Insuficiente en Cálculo Mental, con un 30% de los encuestados, lo cual indica que en algunos estudiantes, es importante fundamentar bases sólidas en la realización de operaciones matemáticas, de forma ágil y sin necesidad de instrumentos o herramientas adicionales.

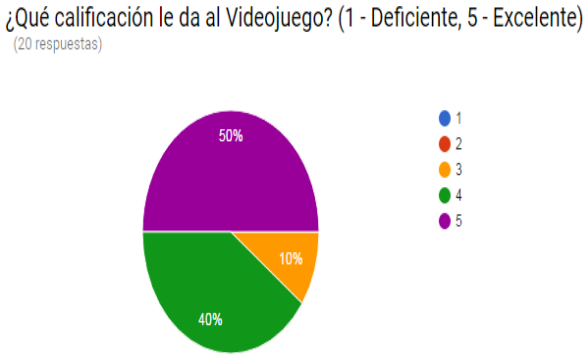


Fig. 11: Satisfacción del Prototipo de Videojuego

Finalmente se puede observar que, si bien se han obtenido Niveles entre Bueno y Excelente, donde la mayoría de estudiantes encuestados se encuentran calificados en unas competencias adecuadas para la solución de un problema específico; hay una mínima cantidad de estudiantes con niveles de competencia bajo, entre Aceptable e Insuficiente. De ésta manera se observa como la gran parte de los encuestados sintieron motivación en la interacción con una plataforma 3D con éste tipo de Juegos, como una herramienta que permite el aprendizaje continuo del estudiante enfocados al desarrollo de competencias a nivel mental, en ambientes tanto académicos como profesionales.

El diseño del prototipo de videojuego ha demostrado, cómo es posible la aplicación de herramientas de proyección en el aprendizaje de competencias a nivel mental, basadas en una plataforma virtual, apoyando áreas como: lógica-deductiva, cálculos mentales y pensamiento cognitivo; igualmente se presenta el prototipo, como una herramienta de soporte para asignaturas que requieren un grado de manejo apropiado en las tres áreas a nivel mental descritas anteriormente, implementándose en materias como programación, que permita una interacción inicial con ésta plataforma, y posteriormente analizar las fortalezas o debilidades presentadas en el estudiante, antes de iniciar el curso.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones: 1) La aplicación de una tecnología 3D en los retos de razonamiento propuestos en el videojuego, generaron un interés en el jugador para interactuar con la plataforma, al mismo tiempo que incentivaba al desarrollo competitivo en el puntaje obtenido de cada juego; 2) El diseño del prototipo de videojuego ha demostrado, cómo es posible la aplicación de herramientas de proyección en el aprendizaje de competencias a nivel mental, basadas en una plataforma virtual, apoyando áreas como: lógica-deductiva, cálculos mentales y pensamiento cognitivo; igualmente se presenta el prototipo, como una herramienta de soporte para asignaturas que requieren un grado de manejo apropiado en las tres áreas a nivel mental descritas anteriormente; 3) La implementación

ISBN 978-607-8242-11-5

de RNA como técnica de IA en el reto del laberinto, permitió adoptar otras perspectivas de solución por parte del jugador, ampliando sus propias técnicas de solución en el desplazamiento y recolección de los tesoros ubicados en el mapa; y 4) El factor de entretenimiento resultó clave para la aplicación de cada uno de los juegos en pro de incentivar la motivación necesaria del jugador para interactuar con la plataforma.

REFERENCIAS

Steinberg S., Riehl J., y DeMaria R, Play it Safe Presents: The Modern Parent's guide to Kids and Video Games: "*An essential guide for parents*", Information for today's Generation. (2011)

Ponce Cruz, P, "*Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería*", México DF, México: Alfaomega. (2010)

Fernández Muñoz, Á, "*Pruebas Psicotécnicas. En C. Inteligencia General, Razonamiento Abstracto*" (RA) (2011)

Alexandron G., Armoni M., Gordon M., y Harel D, *Scenario-Based Programming: Reducing the Cognitive Load, Fostering Abstract Thinking"*, Weizmann Institute of Science, Rehovot, 76100, Israel (2014)

Finn A., Kraft M., West M., Leonard J., Bish C., Martin R., Sheridan M., Gabrieli C., & Gabrieli J, "*Cognitive Skills, Student Achievement Tests, and Schools*", Massachusetts Institute of Technology, Harvard University (2014)

Nuria Parés, F. P, "*Mejora de las capacidades Lógico-Deductivas a través del Aprendizaje Cooperativo y de la Corresponsabilidad Profesorado-Alumnado*", Escola Universitària d'Enginyeria Técnico Industrial de Barcelona. España (2001)

Jiménez Ibáñez, J. J, "*Estratégias de Cálculo Mental*", IES Alhama de Corella. Navarra, España. (2001)

Castaño Piamba, O, "*Mentes en Blanco (?)*", Disponible en: http://www.mentesenblanco-razonamientoabstracto.com/ (2007)

Baldeón Medrano, J., Elías Arcelles, J., y Evaristo Chiyong, I, "*Desarrollo e investigación de videojuegos educativos y mundos virtuales 3D desde la formación universitaria y con un enfoque multidisciplinario*", Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú. (2011)

Bustillo Rendón, J, Razonamiento Lógico: "*Material didáctico y educativo*", Disponible en: http://ntic.educacion.es/w3/eos/MaterialesEducativos/mem2011/razonamiento_logico/actividades/rl.html (2011)

Zhang X., Yang B., y Li Y, "*Impact of 3D/VR Action Video Games on Players' Cognition, Problem Solving and Its Implications in Simulation Training*", Third International Conference, ICHL 2010, pp 439-452. Beijing, China (2010)

Entertainment Software Association, "*Essential Facts about the Computer and Video Game Industry*", Ipsos MediaCT for ESA (2016)

Tsung-Yen, C., y Wei-Fan, C, "*Digital Games for Cognitive Learning: A Pilot Study*", The Pennsylvania State University. USA (2007)

Restrepo M., y González Natalia, "*Entorno Virtual Inteligente para la detección de Problemas Visuales",* Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia (2013)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Sensado de Espectro Mediante la Correlación Espectral en Radio Cognitiva

Dr. Víctor Manuel Hinostroza Zubía[1] y Dr. Héctor Garcés Guzmán[2]
Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
Av. Del Charro #450 Norte C.P. 32310 Cd. Juárez, Chih. México. (656)688-4800 x 4672,
(1) vhinostr@uacj.mx ; (2) hgarces@uacj.mx

Resumen:
Los sistemas inalámbricos actuales se caracterizan por una política de asignación de espectro fijo. Sin embargo, una gran parte del espectro asignado se utiliza de forma esporádica y las variaciones geográficas en la utilización de los rangos del espectro ya asignados van desde 15% al 85%, con una alta varianza en el tiempo. El espectro limitado disponible y la ineficiencia en el uso del espectro obligan a buscar un nuevo paradigma de comunicación para explotar el espectro inalámbrico existente de forma oportunista. La comunicación por radio cognitiva ha surgido como un nuevo paradigma para hacer frente al problema de minimizar el uso ineficiente del espectro, surge principalmente debido a las rígidas reglas que permiten que sólo los usuarios autorizados tengan acceso exclusivo a ciertas bandas de frecuencia. Para ofrecer una flexibilidad a la utilización del espectro, se han empezado a estudiar tres diferentes estrategias para la utilización de radio cognitiva; uso con espectro libre detectado, sobre uso con usuario secundario y entretejido con ambos usuarios. Se presenta una opción para la detección de espectro que consiste en reducir el ancho de banda de una señal de amplio ancho de banda, haciendo uso de la correlación espectral de la señal.

Palabras clave: Sensado de espectro, Radio Cognitiva, Correlación, Detección de Energía.

Spectrum Sensing Through Spectral Correlation in Cognitive Radio

Abstract:
Current wireless systems are characterized by a fixed spectrum allocation policy. However, a large part of the assigned spectrum is used sporadically and in some geographical variations the use of the already assigned spectrum ranges from 15% to 85%, with a high variance over time. The limited spectrum available and the inefficiency in the use of the spectrum oblige to look for a new paradigm of communication to exploit the existing wireless spectrum opportunistically. Cognitive radio communication has emerged as a new paradigm to address the problem of minimizing the inefficient use of spectrum, arises mainly due to the rigid rules that allow only authorized users to have exclusive access to certain frequency bands. In order to offer flexibility to the use of the spectrum, we have begun to study three different strategies for the use of cognitive radio; Use with detected free spectrum, over use with secondary user and interweave with both users. We present an option for the detection of spectrum that consists of reducing the bandwidth of a signal of wide bandwidth, making use of the spectral correlation of the signal.

Keywords: Spectrum Sensing, Cognitive Radio, Correlation, Energy Detection.

ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Con la rápida expansión y el desarrollo de las aplicaciones y servicios con tecnología inalámbrica alrededor del mundo, una gran parte del espectro radioeléctrico ya ha sido asignado. Por otra parte, estudios extensos y campañas de medición por Koh - Marian han mostrado que la mayoría de las frecuencias asignadas están desocupadas la mayor parte del tiempo, resultando en una baja eficiencia en el uso del espectro. El Radio Cognitivo (CR) es una tecnología emergente que podría ofrecer una solución a este problema. El termino de radio cognitiva fue primero usado y descrito por J. Mitola III en 1999 en sus tesis doctoral. Como una extensión natural del concepto de Radio Definida por Software (SDR). Por lo tanto, una sistema de radio cognitiva basado en equipos SDR introduce el concepto de re-configuración, que es esencialmente un sistema inalámbrico suficientemente inteligente que está siempre al tanto del medio ambiente de operación y que puede utilizar técnicas constructivas. Además, puede aprender a adaptarse dinámicamente a los cambios derivados de la información que recibe. Permite a un equipo de CR operar, basado en técnicas oportunistas, en bandas con licencia sin interferir con el usuario primario (con licencia). Esto se conoce como el acceso al espectro dinámico e implica que el equipo del usuario secundario debe ser capaz de realizar la detección en tiempo real del espectro de radiofrecuencia e identificar las bandas de frecuencia disponibles.

La detección de espectro permitirá al usuario secundario explotar el espectro de radio disponible. Será responsabilidad del usuario secundario detectar eficazmente el espectro, aprovechar rápidamente las posibilidades de transmisión y desocupar inmediatamente el espectro si un usuario principal vuelve a ocupar la banda de frecuencia. Queda claro que el diseño del sensor de espectro es un componente crítico en la asignación del espectro de manera oportunista. A través del tiempo, diferentes métodos de detección de espectro se han propuesto y analizado, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. Algunos de los métodos de detección de espectro son: la detección de energía, detección de filtro adaptado, la detección basada en la transformada Wavelet y la detección con función cicloestacionaria demostrado por Yusek.
En este documento se discuten las características de la detección de energía por medio de la correlación espectral como un método de detección del espectro. El resto de este trabajo es estructurado como sigue. Sección II detalla la teoría detrás de análisis de señales con los métodos de detección de espectro basados en la correlación espectral. En la sección III los resultados obtenidos con base en el análisis con los métodos descritos anteriormente son presentados. Por último, en la Sección IV se extraen conclusiones y se presentan las direcciones futuras de estudio.

DETECCIÓN DE ESPECTRO BASADA EN CORRELACIÓN ESPECTRAL Y NIVEL DE ENERGÍA.

La idea detrás de las características del método de detección cicloestacionaria es explotar la periodicidad subyacente de señales moduladas utilizados en los sistemas de comunicación tales como portadoras sinusoidales, trenes de impulsos o las secuencias cíclicas mostrados por Gadner - Spooner. Para que una señal $x(t)$ sea considerada estacionaria en sentido amplio, es necesario que su media y su función de autocorrelación sean invariantes en el tiempo. La media $m_x(t)$ y la función de autocorrelación $r_x(t_1,t_2)$ se definen por las siguientes ecuaciones:

$$m_x(t) = E[x(t)] \quad (1)$$
$$r_x(t_1,t_2) = E[x(t_1)x^*(t_2)] \quad (2)$$

donde E [.] representa el operador de esperanza matemática. Para que una señal sea estacionaria en sentido amplio es necesario que la media sea constante y la función de autocorrelación sea una función de la diferencia de tiempos t_1-t_2.

$$m_x(t) = M_0 \quad (3)$$
$$r_x(t_1,t_2) = R_x(t_2 - t_1) \quad (4)$$

Si observamos $t_2 = t + \tau/2$ y $t_1 = t - \tau/2$, entonces el resultado se convierte en:

$$r_x(t_1,t_2) = R_x(\tau) \quad (5)$$

La densidad espectral de potencia se obtiene a través de la transformada de Fourier de la función de autocorrelación invariante en el tiempo:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau)\, e^{-j2\pi f t} d\tau \quad (6)$$

Para señales no estacionarias, no se cumple con las condiciones de que la función de autocorrelación y la media sean invariantes en el tiempo. Sin embargo, hay un comportamiento de variación en el tiempo que es persistente y regular: que es se tiene una variación periódica en el tiempo, que es exactamente lo que

ISBN 978-607-8242-11-5

caracteriza a una clase de señales no estacionarias conocidas como señales cicloestacionarias. En una señal cicloestacionaria, la función de autocorrelación puede ser expresada en términos de sus componentes de la serie de Fourier:

$$R_x(t,\tau) = \sum_\alpha R_x^\alpha(\tau) e^{j2\pi\alpha t} \quad (7)$$

donde el término α se le llama la frecuencia cíclica. Si la función de autocorrelación es periódica, la suma se lleva a cabo después que $\alpha = K/T_0$ para todos los valores de k enteros, donde T_0 es el periodo. El coeficiente de Fourier $R_x^\alpha(\tau)$ se le llama función de autocorrelación cíclica (CAF) y es igual a la función de autocorrelación convencional para α = 0. La autocorrelación cíclica función viene dada por el coeficiente de Fourier:

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_x(t,\tau) e^{j2\pi\alpha t} dt \quad (8)$$

La función de autocorrelación cíclica puede ser calculada de la señal *x(t)*:

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t+\tfrac{\tau}{2}) x^*(t-\tfrac{\tau}{2}) e^{j2\pi\alpha t} dt \quad (9)$$

La función de correlación espectral (SCF) se puede definir como la transformada de Fourier de la función de auntocorrelación cíclica:

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi\alpha t}\, dt \quad (10)$$

El SCF es de hecho una medida real de la correlación entre los componentes espectrales de *x(t).* Una ventaja importante de la SCF es su insensibilidad a ruido aditivo. Puesto que las componentes espectrales de ruido blanco no están correlacionadas, no contribuyen a la SCF resultante para cualquier valor de α. Este es el caso aun cuando la potencia de ruido es superior a la potencia de señal, donde la señal sería indetectable usando un detector de energía simple. Para derivar una versión normalizada de la SCF, la La función de coherencia espectral (SOF) se da como:

$$C_x^\alpha(f) = \frac{S_x^\alpha(f)}{\sqrt{S_x^0(f+\alpha/2) S_x^0(f-\frac{\alpha}{2})}} \quad (11)$$

La función de coherencia espectral es especialmente útil para la detección de la frecuencia cíclica, ya que el valor de coherencia es independiente de los niveles de potencia absolutos de las señales de la señal de datos *x(t)*, lo que simplifica la elección del umbral para la detección. De lo que se observa en los párrafos anteriores, se hace evidente que los métodos de detección basados en las características cicloestacionarias implican un aumento de la complejidad, lo que conduce a que la necesidad de una gran cantidad de recursos computacionales. Además, el tiempo necesario para realizar el proceso de detección es relativamente alto, lo que podría llegar a ser un inconveniente cuando se desea la operación en tiempo real.

El enfoque basado en detector de energía, también conocido como radiometría o periodograma, es la forma más común de detección de espectro debido a su baja complejidad computacional y de ejecución. Además, es más genérico ya que los receptores no necesitan ningún conocimiento sobre la señal de los usuarios primarios. La señal se detecta mediante la comparación de la salida del detector de energía con un umbral que depende de la base de ruido. Algunos de los desafíos de la detección basados en un detector de energía incluyen: la selección del umbral para la detección de los usuarios primarios, la incapacidad para diferenciar la interferencia de los usuarios primarios y el ruido, y el pobre rendimiento en bajos valores de relación señal a ruido (SNR) [48]. Por otra parte, los detectores de energía no funcionan de manera eficiente para la detección de señales de espectro expandido. Supongamos que la señal recibida tiene la siguiente forma simple

$$y(n) = s(n) + w(n) \quad (12)$$

donde *s(n)* es la señal a detectar, *w(n)* es la muestra de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) y *n* es el índice de muestra. Hay que tener en cuenta que *s(n) = 0* cuando no hay transmisión de usuario primario. La métrica de decisión para el detector de energía puede escribirse como

$$M = \sum_{n=0}^{N} |y(n)|^2 \quad (13)$$

 ISBN 978-607-8242-11-5

donde N es el tamaño del vector de observación. La decisión sobre la ocupación de una banda se puede obtener mediante la comparación de la métrica de decisión M con un umbral fijo λ_E. Esto es equivalente a distinguir entre las dos siguientes hipótesis:

$H_0 : \quad y(n) = w(n)$ (14)
$H_1 : \quad y(n) = s(n) + w(n)$ (15)

La utilidad del algoritmo de detección se puede resumir con dos probabilidades: probabilidad de detección PD y la probabilidad de falsa alarma PF. PD es la probabilidad de detectar una señal en la frecuencia considerada cuando realmente está presente. Por lo tanto, se desea una alta probabilidad de detección. Esto puede ser descrito como

$P_D = Pr(M>\lambda_E \mid H_1)$ (16)

PF es la probabilidad de que la prueba decidió incorrectamente que la frecuencia considerada está ocupada, cuando en realidad no lo está, y puede ser escrito como

$P_F = Pr(M>\lambda_E \mid H_0)$ (17)

PF debe mantenerse tan pequeño como sea posible a fin de evitar la subutilización de oportunidades de transmisión. El umbral de decisión λ_E puede ser seleccionado para encontrar un equilibrio óptimo entre PD y PF. Sin embargo, esto requiere el conocimiento del ruido y las potencias de las señales detectadas. La potencia de ruido puede ser estimada, pero la potencia de la señal es difícil de estimar, ya que cambia en función de las características de transmisión y la distancia entre el radio cognitiva y el usuario primario. En la práctica, el umbral se elige para obtener una cierta cantidad de falsas alarmas. Por lo tanto, el conocimiento de la varianza del ruido es suficiente para la selección de un umbral.

El ruido blanco puede ser modelado como una variable aleatoria gaussiana de media cero con varianza σ^2_w, es decir, $w(n)=N(0, \sigma^2_w)$. Para un análisis simplificado, vamos a modelar el término señal como una variable gaussiana de media cero, es decir, $s(n)= N(0, \sigma^2_s)$. El modelo de $s(n)$ es más complicado ya que el desvanecimiento también debe ser considerado. Debido a estos supuestos, la métrica de decisión (13) sigue la distribución chi-cuadrada con 2N grados de libertad χ^2_{2N} y por lo tanto, se puede modelar como

$$M = \begin{cases} \frac{\sigma_w^2}{2} x_{2N}^2 & H_0 \\ \frac{\sigma_w^2+\sigma_s^2}{2} x_{2N}^2 & H_1 \end{cases} \quad (18)$$

Para el detector de energía, las probabilidades PF y PD se pueden calcular por Digham

$$P_F = 1 - \Gamma\left(L_f L_T, \frac{\lambda_E}{\sigma_w^2}\right), \quad (19)$$

$$P_D = 1 - \Gamma\left(L_f L_t, \frac{\lambda_E}{\sigma_w^2 + \sigma_s^2}\right) \quad (20)$$

donde λ_E es el umbral de decisión, y $\Gamma(a, x)$ es la función gamma incompleta. Con el fin de comparar los resultados para diferentes valores de umbral, se pueden utilizar las curvas Características de Operación del Receptor ROC. Las curvas ROC nos permiten explorar la relación entre la sensibilidad (probabilidad de detección) y especificidad (tasa de falsas alarmas) de un método de detección para una variedad de diferentes umbrales, lo que permite la determinación de un umbral óptimo.

DETECCIÓN DE ESPECTRO BASADO EN LA CORRELACIÓN ESPECTRAL

En esta sección, se proporcionan algunos ejemplos numéricos para ilustrar la estrategia de detección de observación propuesta en el sistema de radio cognitiva. En particular, se tomaron mediciones prácticas tomadas de un proyecto anterior Salous y se analizaron esas mediciones desde el punto de vista de radio cognitivo. Específicamente con respecto a la utilización de la correlación o auto-correlación con fines de detección de espectro. Adicionalmente, se analizarán y explicarán los resultados obtenidos en el proceso de estimación de los archivos PPD (perfil de retardo de potencia) que contienen las señales transmitidas antes y después de realizar el proceso de detección. Se analizó un conjunto de archivos, donde se caracterizó un canal real y este análisis se aplicó a los respectivos detectores, La figura 1 muestra la gráfica de la PDP de la señal real transmitida en el que se observa la señal con múltiples trayectos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Como mencionó en la sección I, la función de correlación espectral SCF se puede obtener con la FFT de la auto-correlación de la señal recibida. Lo que se va a mostrar en esta sección es un estudio de la correlación espectral de un conjunto de mediciones que se tienen de anteriores proyectos [14]. Estas mediciones contienen una señal de amplio ancho de banda, 300 MHz, lo que se realizó con estas señales fue que se investigó el comportamiento de la SCF con diferentes anchos de banda. Por ejemplo; 300 MHz, 100 MHz, 60 MHZ, 30 MHz, etc., con el fin de determinar si al cambiar el ancho de banda las características de la SCF se mantenían o en caso contrario determinar si el ancho de banda reducido permitía mejores condiciones para la detección de espectro.

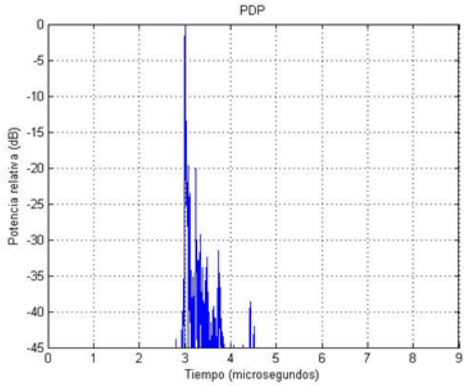
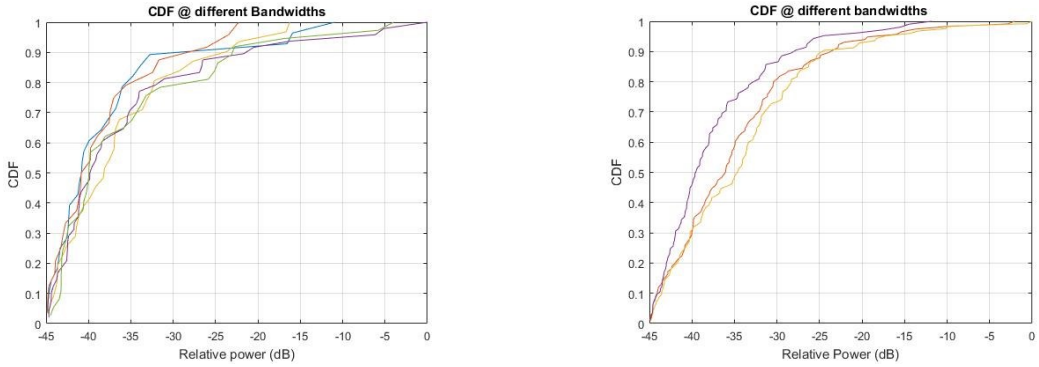


Figura 1. Perfil Potencia Retardo (PDP)

En la figura 1 se observa el efecto de trayectos múltiples en el PDP de la señal transmitida, el eje vertical corresponde a la potencia relativa y el eje horizontal corresponde al tiempo. Todos los archivos de PDP se compararon y se encontró que el comportamiento cae dentro de un cierto rango de valores. Al PDP se le aplica la FFT para obtener la correlación en frecuencia. En la figura 2, observamos la función de distribución de probabilidad acumulada de un conjunto de mediciones a un ancho de banda de 60 (figura 2ª) y 100 MHz (figura 2b). Con las CDF se puede realizar un análisis de probabilidad de detección y probabilidad de falsa alarma, que se realizará en futuros trabajos.



(a) (b)

Figura 2. Función de distribución de probabilidad acumulada de varios anchos de banda

La figura 3 muestra la SCF a diferentes anchos de banda; 300, 100, 50 y 30 MHz. Esta separación se logra dividiendo en secciones el PDP, es decir, obteniendo PDP parciales en cada una de las bandas mencionadas y luego aplicando la FFT a cada una de estas secciones. En la figura 3 se observa que aunque se reduzca el ancho de banda el perfil de la caída del coeficiente de correlación es relativamente constante, aunque en la primera sección se nota cierta periodicidad. Se puede seguir reduciendo el ancho de banda hasta cierto límite determinado por la cantidad de muestras para poder realizar la FFT.

El problema fundamental de sensado de espectro consiste en determinar si una banda de frecuencias está libre u ocupada. Haciendo uso de la SCF se puede determinar, con un valor específico de coeficiente de correlación, si una banda está ocupada o no. Por ejemplo, definir cuál es el ancho de banda a un coeficiente de 0.9 o 0.5. Definir un umbral y realizar la prueba de hipótesis mencionada en (18).
Como se específica arriba, el umbral puede ser dinámico dependiendo de las condiciones de propagación. Esta forma de calcular la correlación y el sensado tiene la ventaja adicional de poder acomodar el ancho de

 ISBN 978-607-8242-11-5

banda que sea más conveniente, dependiendo del ancho de banda que se quiere sensar y las condiciones de propagación existentes en el medio.

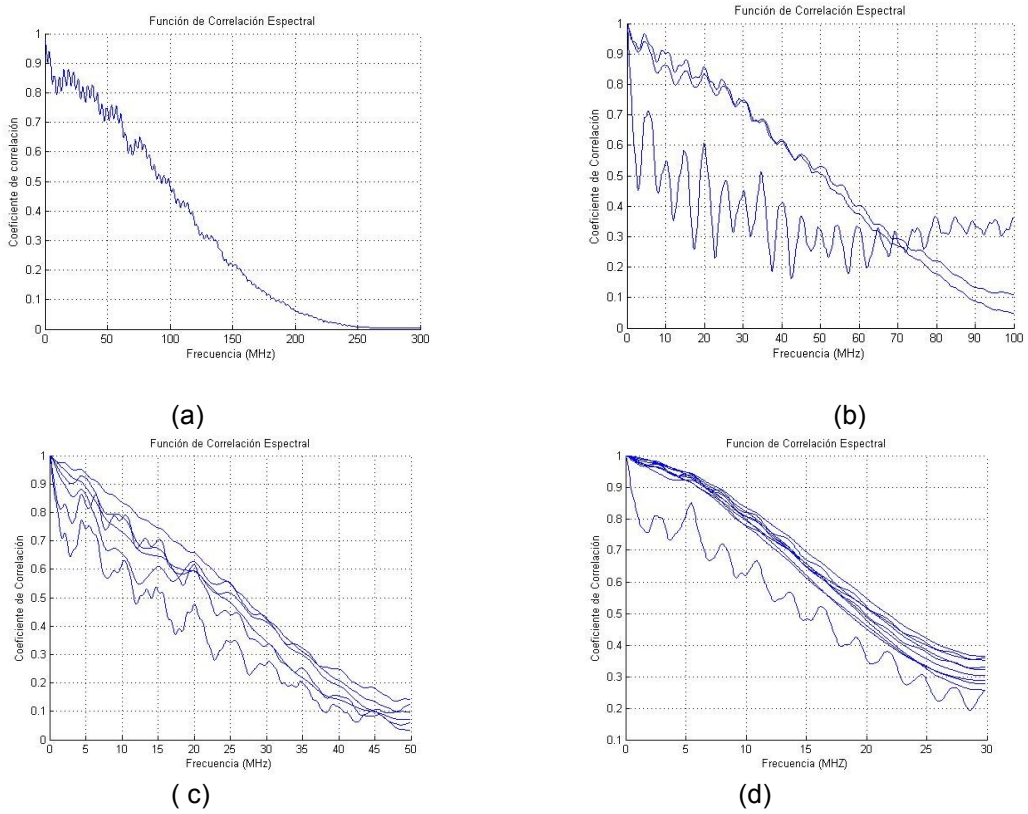


Figura 3. SCF a diferentes anchos de banda

CONCLUSIONES

La detección de espectro con fines oportunistas es una tarea que puede ayudar a resolver el problema actual de falta de espectro para aplicaciones inalámbricas. En este trabajo se revisaron sus fundamentos teóricos más importantes y una posible solución, la cual consiste en usar la correlación espectral para determinar si una banda de frecuencias está ocupada o no. Se mostraron graficas sobre correlación de frecuencia a diversos anchos de banda y como se puede usar esta correlación para determinar si una banda de frecuencias que está dentro de un amplio ancho de banda, está ocupada o no. En este trabajo todavía falta considerar más mediciones en diferentes ambientes de propagación. Falta considerar si hay interferencia o alteración en la correlación de una banda con respecto a las bandas adyacentes.

Referencias:

Akin A., Gursoy C. "*Performance Analysis of Cognitive Radio Systems with Imperfect Channel Sensing and Estimation*". IEEE transactions on Communications. Vol. 63, no. 5, páginas 1554-1566. Mayo 2015)

Gardner W. A. (julio 1986) The spectral correlation theory of cyclostationary timeseries. Signal Processing. 11(1), 13-36.

Digham F., Alouini M., Simon M. "*On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels*". IEEE transactions on Communications, Vol. 55 no. 1, páginas 21-24. Enero 2007

Gardner W. A. (abril 2009) Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals. IEEE Signal Processing Magazine. 8(2), 14-36

Marian C., Vladeanu C., Fratu O., Marghescu I., El Assad S. "*Spectral Occupancy Measurements in Rural and Urban Environments: Analysis and Comparison*". 9th Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2013, vol. 9, páginas 78-83. Junio 2013

Martian A., Tudor B., Fratu O, Marghescu I. "*Spectrum Sensing on Spectral Correlation for Cognitive Radio Systems*". 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronics Systems (VITAE). Mayo, 2014.

Mitola J., "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio". PhD Dissertation, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Suecia. 2000.

Lopez-Benitez M., Umbert A., Casadevall F. "*Evaluation of Spectrum Occpancy in Spain for Cognitive Radio Applications*". IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC 2009 spring), Barcelona. Abril 2009.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Islam M., Koh C. L., Oh S. W., Qing X., Lai Y. Y., Wang C. et al. "*Spectrum Survey in Singapore: Occupancy Measurements and Analyses*". 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008), Vol. 3, páginas 1–7. Mayo 2008
Salous S, Hinostroza V," *Bi-dynamic indoor measurements with high resolution sounder"*, 5th. International Symposium on wireless multimedia Communications, Honolulu Hawaii USA, October 2002.
Spooner C. M., Nicholls R. B. (2009). Spectrum Sensing based on Spectral Correlation. Cognitive Radio Technology, B. A. Fette, Ed., 2nd ed. Waltham, MA: Newnes. 593–634.
Wellens M., Riihijarvi J., Gordziel M., Mahonen P. "*Spatial Statistics of Spectrum Usage: From Measurements to Spectrum Models*". IEEE International Conference on Communications (ICC '09), Dresden, Germany. Junio 2009.
Yucek, T., & Arslam, H. "*A survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications*". IEEE Communications Surveys and Tutorials*,* Vol. *11 no.* 1, páginas 116-130. Marzo, 2009.

Víctor Hinostroza. Doctor de Filosofía (PhD) en el área de telecomunicaciones por el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester (UMIST) en Manchester Inglaterra en el 2002. Experiencia profesional de 10 años en la industria. Experiencia docente de 27 años, maestro en la UACJ desde enero de 1989. Sus intereses de investigación son: Estimación y caracterización del canal de comunicación con señales multi-portadora; y aplicaciones de redes vehiculares en ambientes distribuidos.

Héctor Garcés; Doctor en Filosofía (PhD) en el área de ingeniería computacional por The University of Texas at El Paso en 2007. Maestro en Ciencias en el área de la ingeniería eléctrica por The University of Texas at El Paso en 2002. Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional en 1981. Además es perito en telecomunicaciones con autorización vigente No. 401 por el IFT y profesor con perfil PROMEP. Experiencia académica de más de treinta años en instituciones como: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, el Department of Electrical and Computer Engineering de la UTEP, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, Instituto Politécnico Nacional (ESIME) y el Colegio de Bachilleres. Experiencia profesional de veinte años en la industria de las telecomunicaciones en: EDS de México S.A. de C.V., Mitel de México S.A. de C.V. y Teleindustria Ericsson S.A. de C.V.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Código para la generación de modulación SPWM, embebida en un microcontrolador Microchip, con tres fases de salida

Alfredo De la Barrera G.[1,2], Josué V. Cervantes B.[1], Armando Escobar B.[1], Omar Jiménez R.[2] Pedro Guevara L.[2]
(1) Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca, Carretera Ixtapaluca-Coatepec Km7, Ixtapaluca Estado de México. e-mail: alfredogz1@hotmail.com, josue_cb@gmail.com, aebenie@hotmail.com,
(2) Instituto Politécnico Nacional, Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México. e-mail: ojimenezr@ipn.mx pguevara@ipn.mx

Resumen

En la actualidad se han desarrollado dispositivos electrónicos de conmutación de potencia como los MOSFETS o IGBTs, que permiten el manejo de alta corriente y voltaje, con estos dispositivos y un sistema micro programable se puede reducir el tamaño de un variador de frecuencia de potencia para el manejo de motores de tres fases o para convertidores de CD a CA.
El presente trabajo está basado en el análisis de PWM sinusoidal (SPWM) utilizando Matlab para generar el código de conmutación digital. Donde se propone el código para la generación de las señales de control senoidales desfasadas 120° entre si y la señal triangular contra la que se comparan, dichas comparaciones generan señales TAp y TAn, que son las señales que manejan un medio puente de conmutación, siguiendo esta filosofía se proponen tres medios puentes y se generan las señales para ser manejadas, exportando los valores de estas variables como un segmento del programa para microcontrolador, adicionándole a este último una función de PWM normal, con la finalidad de tener control del valor eficaz de la salida de los medios puentes, sobre la señal de cada fase de SPWM. El código de programa aquí presentado se desarrolla con el compilador PIC-C, para un microcontrolador Microchip

Code for the generation of SPWM modulation, embedded in a Microchip microcontroller, with three phases of output

Abstract

This At present we have developed electronic switching devices power as MOSFETs or IGBTs, which allow handling high current and voltage, with these devices and micro programmable system can reduce the size of a variable frequency power for management of three-phase motors or converters CD CA.
This paper is based on analysis of sinusoidal PWM (SPWM) using Matlab to generate digital switching code. Where the code to generate sinusoidal signals 120 ° out of phase controlling each other and the triangular signal are compared against proposed, such comparisons TAp generate signals and such, which are the signals that drive a half bridge switching following this philosophy proposes three half bridges and signals are generated to be handled, exporting the values of these variables as a segment of the program for microcontroller PWM function, in order to have effective control value output means bridges, on each phase signal SPWM. The program code presented here is developed with the PIC-C compiler for Microchip microcontroller.

Keywords: Sinusoidal PWM, SPWM, Microcontroller, Matlab, RMS, frequency variation, speed variation

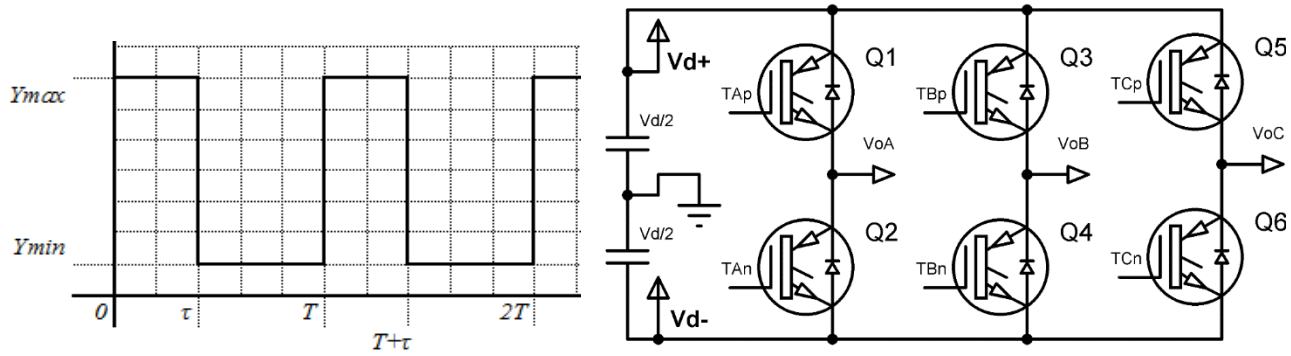
 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta el código en lenguaje C para la implementación de un modulador PWM Sinusoidal, que se analizó previamente, detallado en De la Barrera y Arellano (2015), con el que se puede variar la velocidad de motores de tres fases, donde se generaron las variables para las señales de conmutación TAp y TAn, que son las señales de control para un medio puente de conmutación de potencia; como se menciona en Daniel W. (2001) y en Muhamed H. Rashid (2004), en este trabajo además se implementa el control del índice de modulación de amplitud y frecuencia de un SPWM y por lo tanto el control del torque de la carga o del motor. Se implementa el código de SPWM para la generación de tres fases, desfasadas 120° entre sí.
Ya que en los resultados en De la Barrera y Arellano (2015), se menciona que los valores de las señales de conmutación son independientes de la frecuencia, entonces el microcontrolador solo tiene que sacar estos valores por un puerto a ciertos intervalos de tiempo para obtener la señal SPWM con una frecuencia deseada.
El tipo de PWM para el control de torque se trata en De la Barrera y del Muro (2012), es decir para el control de amplitud de la señal sinusoidal equivalente de salida del sistema de conmutación de potencia.

DESARROLLO

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, por sus siglas en inglés de Pulse-Width Modulation) de una señal o manejo de fuente de energía, es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (por ejemplo una señal senoidal o cuadrada), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga eléctrica. El valor promedio del voltaje o la corriente, medidos en la carga pueden ser controlados al cerrar y abrir el circuito de fuente de alimentación y la carga a una determinada velocidad de conmutación o frecuencia.
La ventaja principal de PWM es la baja perdida en los dispositivos de conmutación de potencia. Cuándo el circuito o dispositivo electrónico para interrumpir la fuente de voltaje está apagado, prácticamente no hay circulación de corriente y cuando esta encendido casi no existe voltaje entre sus terminales, como se muestra en la figura 1A. Siendo que la potencia es el producto del voltaje por la corriente, en ambos casos la perdida de potencia por conmutación es casi cero.
El termino ciclo de trabajo (*duty cycle),* describe la proporción del tiempo de encendido respecto al periodo de la señal, normalmente expresado en decimales o en porcentaje, siendo 100% completamente encendido y 0% completamente apagado.



A) B)

Fig. 1 A) Modulación de ancho de pulso, B) Etapa de potencia del SPWM

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho de pulso relativo de su parte positiva o tiempo alto, en relación con el período de la señal, expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T} \tag{1}$$

De donde $\tau = DT$ y en donde *D* es el ciclo de trabajo (*Duty cycle),* T es el tiempo en que la función se mantiene en estado alto o con circuito cerrado (ancho del pulso) y *T* es el período de la función.
La modulación de ancho de pulso usa un pulso rectangular el cual es modulado, es decir modificado su tiempo de encendido a una frecuencia constante, resultando en la variación del valor promedio de la forma de onda. Si se considera la forma de onda de la figura 1A, *f(t)* con un valor bajo o mínimo *Ymin,* un valor alto o máximo *Ymax* y un ciclo de trabajo D, el valor promedio de la forma de onda está dado por:

$$\bar{y} = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\,dt. \tag{2}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Como *f(t)* es una onda cuadrada, su valor es *Ymax* para *0<t<τ* y *Ymin* para *τ<t<T.* Entonces la expresión queda como:

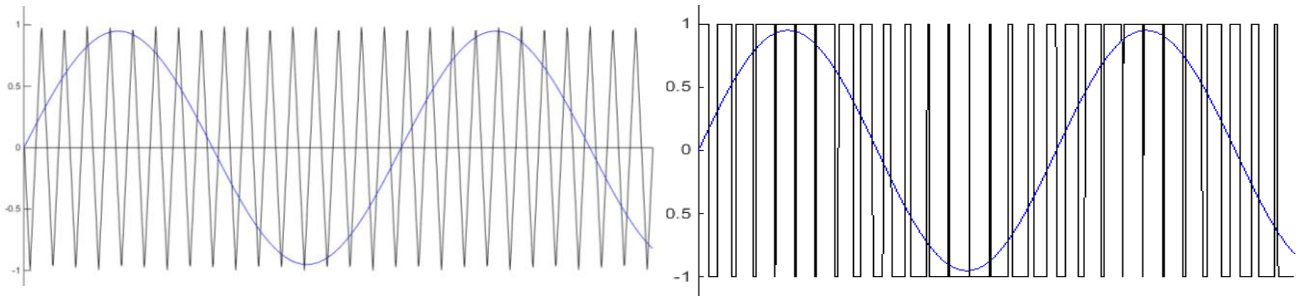
$$\begin{aligned}\bar{y} &= \frac{1}{T}\left(\int_0^{DT} y_{max}\,dt + \int_{DT}^{T} y_{min}\,dt\right) \\ &= \frac{D\cdot T\cdot y_{max} + T\,(1-D)\,y_{min}}{T} \\ &= D\cdot y_{max} + (1-D)\,y_{min}\end{aligned} \tag{3}$$

Con (3) se obtiene el valor promedio de la señal de la figura 1. En muchos casos, esta puede ser simplificada ya que generalmente *Ymin=0*, por lo que queda:

$$\bar{y} = D\cdot y_{max}. \tag{4}$$

De (4) se ve que el valor promedio de la señal es directamente proporcional al ciclo de trabajo D de la señal resultante del PWM de periodos múltiples.

Los tres medios puentes se muestran en la figura 1B, los cuales son la salida del inversor de CD a CA para el manejo de motores de tres fases, donde VoA, VoB y VoC son las señales de potencia de salida desfasadas 120° entre sí. Con las señales generadas con Matlab en [1], para la fase A con ángulos de 0° a 360°, se manejan las señales TAp y TAn; para la B de 120° a 480°, y para la fase C de 240° a 600°, se manejan las señales TCp y TCn, se manejan las señales TXp y TXn que encienden el transistor superior e inferior respectivamente en cada fase. Generando el código para cada una de estas señales se requieren tres variables, con los valores de los intervalos antes indicados ocupando cada una 360 localidades de memoria; con la finalidad de ocupar una variable de menor longitud de elementos de memoria, se genera una única señal senoidal de 0° a 600°, como se muestra en la figura 2A, la cual se compara con una señal triangular; en la figura 2B se muestra el resultado de la comparación de la señal senoidal sin desfasamiento con frecuencia de 60Hz, contra la señal triangular de frecuencia de 1050Hz, donde el índice de modulación de frecuencia mf es de 17.5; y el índice de modulación de amplitud ma es de 0.95.



A) B)

Fig. 2 A) Señal senoidal de control y triangular modulante de comparación. B) Señal senoidal de control y la resultante de conmutación SPWM.

Al comparar estas dos señales se obtiene la señal de SPWM, como la mostrada en la figura 2A, generando también las señales de manejo del medio puente TAp y TAn, las cuales se generan con la ayuda de Matlab; sus valores binarios obtenidos son almacenados en archivos de variables que fácilmente son exportados e incluidos en un programa en lenguaje C, para microcontrolador.
Se ha utilizado un microcontrolador Microchip PIC18F4550 de acuerdo con Microchip (2017), por sus características de 16kW de memoria de programa, así como porque se puede manejar una frecuencia de ejecución de instrucciones de 12MIPS, con lo que se obtiene un ciclo de máquina de 83ns, que al programar el RTCC, se puede obtener una interrupción a intervalos de 1μs. Se ha programado el microcontrolador en lenguaje C, con el compilador PIC-C, de acuerdo con Custom Computer Services (2017) y García Breijo (2008) por la facilidad y rapidez para obtener un programa ejecutable. El diagrama electrónico del circuito con microcontrolador que se ha utilizado es el que se muestra en la figura 3, donde los botones K1 y K2, incrementa y decrementan el valor del índice de modulación en amplitud ma, con lo que amplitud equivalente de la señal de salida varia también en amplitud, el potenciómetro RV1, varia la frecuencia de la señal de control de 30 a 240Hz, al variar el tiempo de interrupción del TMR0 o RTCC.

ISBN 978-607-8242-11-5

El programa para microcontrolador Microchip PIC18F4550, es el mostrado en el listado 1, donde la variable TAp, es la que se generó con ayuda de Matlab y que contiene el SPWM, de la cual solo se muestra un segmento, ya que la variable completa contiene 360 elementos que corresponden a cada incremento de 1° de la señal senoidal de control.

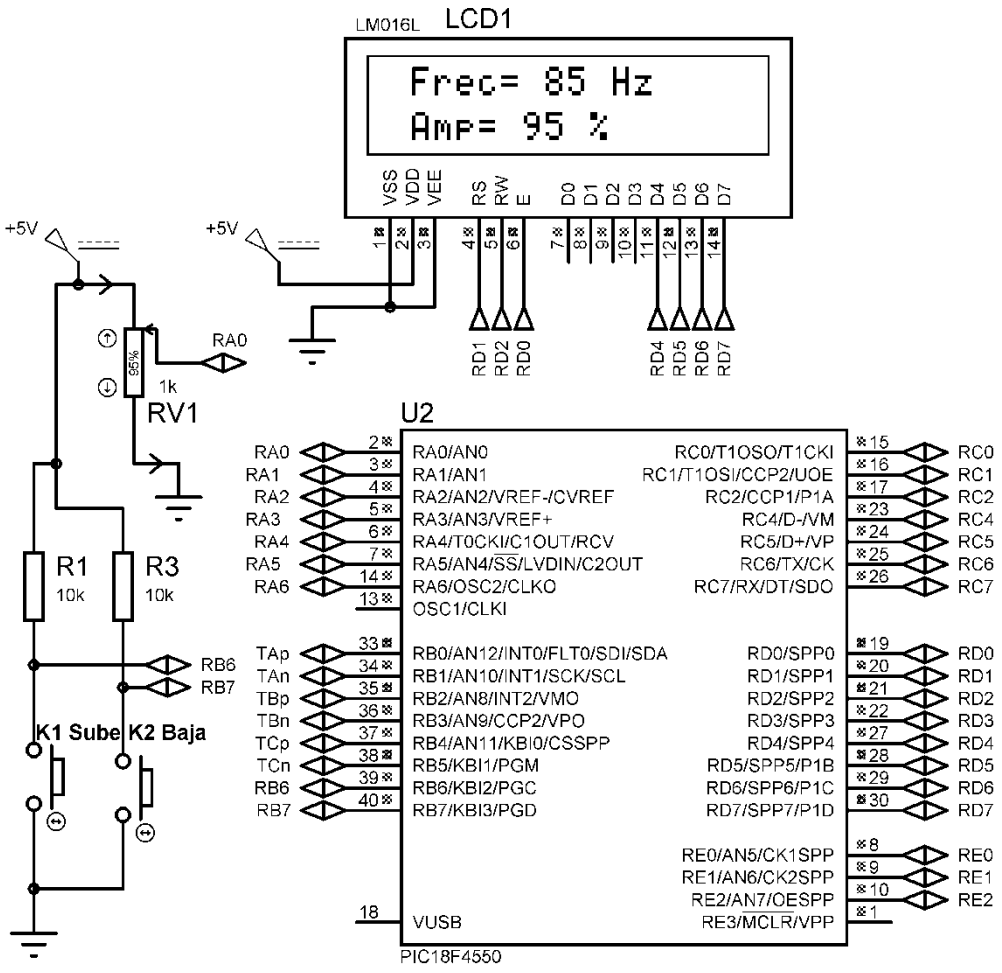


Fig. 3. Diagrama electrónico del microcontrolador y los pines de salida de las señales de conmutación.

```
#include <18F4550.h>
#device adc=10
#fuses PROTECT, NOLVP, PUT, NoMCLR,
HSPLL, PLL5, NOWDT,
#use          delay(oscillator=20Mhz,
clock=48Mhz)
#define use_portd_lcd TRUE
#include <lcd.c>

int16 i,cont,ADCR,contador;
int1                              const
TAp[600]={1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,
1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,
1,…};

#int_rtcc
void desborde()
{setup_counters(rtcc_internal,
rtcc_div_2);
set_rtcc(ADCR);
output_bit(PIN_B0, TAp[i]);
delay_cycles(3);
output_bit(PIN_B1, ~TAp[i]);
output_bit(PIN_B2, TAp[i+120]);
delay_cycles(3);
output_bit(PIN_B3, ~TAp[i+120]);
output_bit(PIN_B4, TAp[i+240]);
delay_cycles(3);
output_bit(PIN_B5, ~ TAp[i+240]);
if(i>360)
 {i=0;}
i++;}

void main()
{setup_counters(rtcc_internal,rtcc_div
_2);
set_rtcc(120);
enable_interrupts(int_rtcc);
enable_interrupts(global);
setup_adc_ports(AN0);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
contador = 50;
lcd_init();
lcd_putc("\f \t SPWM ");
lcd_putc("\n Inicializando ");
delay_ms(500);
do{set_adc_channel(0);
   ADCR=(read_adc()/10)-2;
```


ISBN 978-607-8242-11-5

```
if(ADCR<1)
   {ADCR=0;}
if(input(PIN_B6)==0)
  {delay_ms(10);
   contador = contador + 10;
      if(contador>240)
        {contador = 60;}
  }
if(input(PIN_B7)==0)
  {delay_ms(10);
   contador = contador - 10 ;
      if(contador  <= 60)
         {contador = 240;}
 }
printf(lcd_putc,"\fFrec=   %LdHz   ",
ADCR);
printf(lcd_putc,"\n  Amp=  %Ld  %%",
contador);
delay_ms(100);
   } while(true);
}
```

Listado 1. Código de programa para microcontrolador

La rutina de interrupción permite que cada 23µs se saque un dato por el puerto B, es decir por los pines TXp y TXn, que, al sacar los 360 elementos se obtiene una frecuencia de 120Hz de la señal equivalente a la senoidal de control; con el potenciómetro RV1, se puede variar el tiempo de espera entre cada salida de datos hasta 92µs, por lo que al sacar los 360 valores se genera una señal con frecuencia de 30Hz equivalente a la senoidal de control.
A partir de la señal TAp, se obtienen cada una de las señales de control de los tres medios puentes, TAn es el valor complementado de TAp, como TBp y TBn están defasados 120° con respecto de TAn, es por esto que al índice i se incrementa en 120, de forma similar para TCp y TCn, el índice i se incrementa en 240, que equivale al desfasamiento de 240°. El retardo de 3 ciclos de maquina equivale a 250ns, tiempo suficiente para que se apague Q1 y pasado este tiempo se pueda encender Q2, con la finalidad de que no se puedan poner en estado alto simultáneamente las salidas TXp y TXn, lo que pudiera ocasionar un corto circuito y daño permanente entre los transistores o dispositivos de conmutación de potencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 4 muestra un oscilograma de las señales TAp y TBp, que están desfasadas 120°, que se obtienen de las respectivas salidas del microcontrolador, el oscilograma tiene 1ms/div y 1V/div, por lo que la frecuencia de las señales es de 85Hz y 5 volts de amplitud.

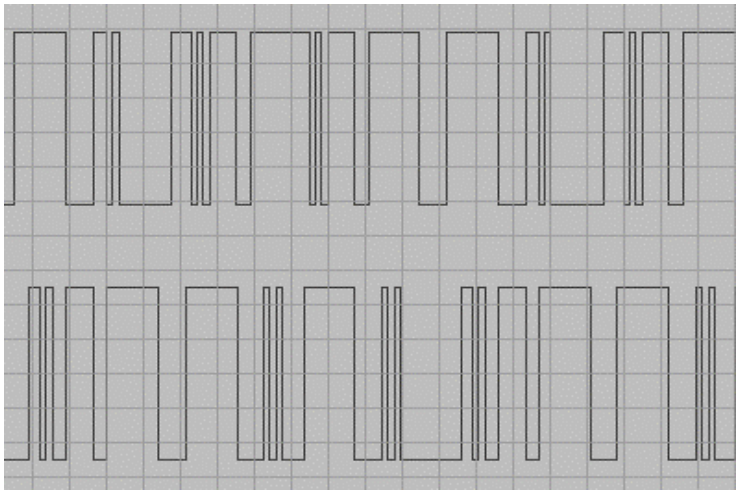


Fig. 4. Oscilograma de las señales TAp y TBp

Con el análisis del SPWM hecho previamente con Matlab, se pudo implementar el programa para microcontrolador de manera fácil y rápida, concluyendo que una vez obtenido el código de conmutación del SPWM, este es prácticamente el mismo para cualquier frecuencia de señal, con la única diferencia que cada uno de los valores de la variable TAp y las demás de conmutación, se deben mantener en la salida por intervalos de tiempo diferentes y proporcionales al periodo de la frecuencia de la señal deseada en las salidas.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden indicar las siguientes conclusiones: 1) Al generar el código de conmutación para SPWM utilizando Matlab se le descarga trabajo al micro controlador. 2) El estudio muestra que el programa para micro controlador que se elaboró resultó útil para la obtención de las señales de conmutación de SPWM.

REFERENCIAS

Daniel W. Hart *"Electronica de potencia"* Ed. Person Educación, México 2001

Muhamed H. Rashid *"Electronica de Potencia*" Ed. Prentice Hall, México 2004

A. De la Barrera González, A. A. Arellano Sánchez, I. Reséndiz Maldonado, M. A. Javier Sánchez. *"Análisis de PWM sinusoidal (SPWM) utilizando Matlab para generar el código de conmutación digital"*. IEEE ROC&C 2015, Acapulco México 08 al 11 de noviembre.

De la Barrera González A., del Muro Cuellar B., Duchen Sánchez G. I., Guevara López P. "*Generador de ozono por efecto corona para fines germicidas basado en un micro controlador con PWM"*. IEEE ROC&C 2012, Acapulco México 11 al 15 de noviembre.

Microchip, *"Microcontrolador PIC18F4550, hoja de datos"*. http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf. Consultado en marzo del 2017
Custom Computer Services Inc. *"Manual de usuario del compilador PIC-C PCH"*. http://www.ccsinfo.com/ Consultado en marzo del 2017

Eduardo García Breijo. "*Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC"*. Ed. Alfaomega México 2008.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Sistema de control automático de demanda para un edificio público

Enrrique Modai[1, 2] y Francisney Daza[1]
(1) Instituto De Industria, Grupo de Ingeniería y Automatización, Univ. Nacional de general Sarmiento, Juan María Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Buenos Aires Argentina
(2) Instituto De Industria, Coordinación de tecnicatura Superior en Automatización y Control, Univ. Nacional de general Sarmiento, Juan María Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Buenos Aires Argentina

E-mail: Emodai@ungs.edu.ar; fneydaza@ungs.edu.ar

Resumen

Mucho se habla hoy día acerca del uso racional de la energía. Si bien se realizan denodados esfuerzos para utilizar fuentes renovables en la generación energética, muchos de los problemas pasan por las limitaciones de las redes de distribución eléctrica para enfrentar la demanda creciente, sobre todo en los períodos estivales, en los cuales las altas temperaturas disparan el uso masivo de acondicionadores de aire.
A nivel de dichas redes existen pautas para evitar que las mismas se sobrecarguen, determinando la aplicación de cortes sectorizados en base a prioridades de consumo, de manera de mantener activos los servicios eléctricos esenciales, asociados principalmente a hospitales, centro asistenciales, industrias críticas, etc. Sin embargo, el ahorro energético debería provenir de los usuarios, sean estos domiciliarios, industriales, o públicos, como elementos autorreguladores de un sistema eléctrico colapsado (3). En la Universidad Nacional de General Sarmiento, un grupo de alumnos e Investigadores docentes, está desarrollando un novedoso sistema de control automático de cargas, basado en la utilización de equipos analizadores de redes eléctricas, controladores lógicos programables, redes de área local y contactores eléctricos, todos ellos supervisados a través de una aplicación de tipo SCADA residente en un servidor web, que permite no solo realizar una evaluación en tiempo real y acumulado de los parámetros de consumo energético, y demanda de potencia pico, sino que también permite realizar cortes selectivos sobre los consumos no prioritarios en determinados sectores. El valor agregado de este trabajo es que será aplicado sobre la misma universidad, entendiendo a la misma como un edificio público, atendiendo las prioridades y problemas reales que padece el grupo de mantenimiento, y los costos excesivos que generan dichos consumos, que impactan directamente sobre su presupuesto.

Palabras clave: Analizador de redes, PLC, SCADA, protocolo Modbus, Servidor OPC.

Automatic demand control system for a public building

There is much talk today about the rational use of energy. While vigorous efforts are being made to use renewable sources in energy generation, many of the problems go through the limitations of electricity distribution networks to meet the growing demand, especially in the summer periods, where high temperatures trigger Massive use of air conditioners .At the level of these networks, there are guidelines to avoid overloading them, determining the application of sectorized cuts based on consumption priorities, in order to keep active the essential electrical services, associated mainly to hospitals, care centers, critical industries, etc. However, energy savings should come from users, be they home, industrial, or public, as self-regulating elements of a collapsed electrical system. At the National University of General Sarmiento, a group of students and Teaching researchers, is developing a new automatic load control system, based on the use of electrical network analyzer equipment, programmable logic controllers, local area networks and electrical contactors, All of which are monitored through a SCADA-type application residing on a web server, which allows not only a real-time and accumulated evaluation of energy consumption parameters and peak power demand, but also allows selective cuts on Non-priority consumption in certain sectors.
The added value of this work is that it will be applied to the same university, understanding it as a public building, attending to the priorities and real problems suffered by the maintenance group, and the excessive costs generated by these consumptions, which directly impact on Your budget.

Key words: Grid analyzer, PLC, SCADA, Modbus protocol, OPC server.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

A partir de la inquietud de realización de un proyecto final que pudiera servir de marco de graduación a los alumnos de la Tecnicatura Superior en Automatización y Control de la Universidad Nacional de general Sarmiento de Argentina, se determinó la posibilidad de desarrollar un sistema que permita colaborar en la mejora de un aspecto interno de la Universidad. En particular, atendiendo a diversas inquietudes conversadas con directivos y personal de mantenimiento de la Universidad, pudo detectarse un cierto malestar debido a los aumentos de la facturación eléctrica (4) operados durante el año pasado, sumado al hecho del desconocimiento acerca de la prevención de posibles problemas de sobrecarga eléctrica, situaciones que normalmente se atienden ante la presentación de las fallas eléctricas y desconexiones por actuación de los sistemas de protecciones. Para los usuarios resulta de suma importancia garantizar la calidad del servicio de suministro eléctrico, a la vez de poder concientizar la importancia del uso eficiente de la energía, en principio para resguardo de esta calidad de servicio, pero en definitiva, para mejorar la filosofía de utilización de todo el parque eléctrico de la universidad (3). Resulta muy común encontrar situaciones de derroche de energía: salones vacíos con iluminación artificial conectada, luminarias que permanecen encendidas sin presencia de personas por largos períodos, uso indebido de equipos de aire acondicionado y ventilación, reparto de cargas desbalanceado, etc. Por otro lado, los responsables deben poner especial atención en las prioridades de uso de los consumos, ya que el uso racional de la energía determina la posibilidad de decidir cuáles de estos consumos pueden desconectarse sin afectar el uso de los servicios esenciales o de importancia relativa mayor. Entonces, frente a un pico de la demanda energética, un sistema puede decidir cómo disminuirla a partir de la toma de ciertas decisiones de corte o cambio de condiciones de contorno, como por ejemplo, apagar luces y abrir cortinas, o aumentar levemente los niveles de temperatura para lograr que los equipos no funcionen en forma permanente, o hacer que las zonas climatizadas permanezcan suficientemente aisladas, para mantener la carga térmica.
Desde el punto de vista del diagnóstico, entendemos que una visualización en tiempo real e historizada de los parámetros eléctricos generales y sectorizados, puede claramente contribuir a la detección temprana de fallas, sobrecargas, consumos prolongados y desbalances (2). Por el otro lado, resulta necesario contar con elementos de actuación remota para producir estas desconexiones en forma automática

RELEVAMIENTO INICIAL

Ante la diversidad de posibilidades se realizó un relevamiento relativo a detectar qué elementos de medición pueden ser útiles para conectar a una red de datos, y de ellos, cuál sería la combinación más eficiente y efectiva para lograr este propósito. En general, la mayoría de los tableros eléctricos seccionales actuales poseen uno o varios instrumentos que se denominan Analizadores de redes (10). Estos analizadores se conectan a un punto de carga a través de transformadores de medición, a fin de estandarizar la toma de datos dentro de un rango prefijado. Normalmente, en baja tensión, los analizadores no requieren transformadores de tensión, ya que pueden medir en forma directa tensiones desde los 100 a los 400 VCA. Sin embargo, para la mayoría de los casos se hace necesario conectarlos a través de transformadores de intensidad, elementos que pueden proveer una lectura de corriente eléctrica alterna que va de 0 a 1 A, o bien de 0 a 5 A en su secundario, siendo elegible de una gama bastante amplia el rango de la corriente de entrada del sistema. Algunos de estos equipos suelen proveerse con módulos de comunicaciones, por lo que en estos casos, las magnitudes proporcionadas en el frente de estos dispositivos podrán estar disponibles para su envío en forma digital hacia un posible elemento supervisor, historizador o reportador de información. A veces estos módulos son opcionales, y otras, sólo son provistos en las versiones más completas de estos equipos. Ahora bien, los equipos pueden de por si conectarse en redes de datos. Algunos lo hacen como esclavos mediante protocolos de comunicaciones claramente conocidos y disponibles, como es el caso del Modbus RTU (7)(8), en este caso creado por la empresa Modicon en los Estados Unidos, a principio de la década del 80. Otros, más nuevos y más sofisticados, lo hacen mediante Ethernet, con alguno de estos protocolos industriales más conocidos. En particular, la limitante principal de este equipamiento es la de poder actuar frente a una falla o situación anormal. Algunos pueden disponer de un par de señales de salida, normalmente para alertar situaciones de alarma mediante dispositivos luminosos o auditivos. Pero, por lo general no poseen capacidad de actuación o corte. Por esta razón se decidió utilizar dispositivos de control como siguiente capa al conjunto de analizadores. Los PLCs (Controladores Lógicos Programables) y los PACs (Controladores de Automatización Programables) son equipos altamente comunicables y con resuelta capacidad de procesamiento lógico de entradas y salidas. Estos equipos pueden leer la información proveniente de los analizadores, procesarla, y tomar decisiones de alarma o corte desde un mismo dispositivo o bien en una red de datos, además de permitir el redireccionamiento de los datos hacia los sistemas supervisores (13). Como se pueden conectar a múltiples redes, los controladores pueden actuar como maestros de una red de analizadores, y entradas/salidas, a la vez que pueden formar parte de una red de esclavos de un sistema supervisor. Las entradas y salidas normalmente requieren de sensores y actuadores que no se encuentran disponibles porque la instalación eléctrica no fue diseñada para admitir esta opción. Las entradas son necesarias para poder detectar situaciones que permiten tomar decisiones. Por ejemplo, una detección de

 ISBN 978-607-8242-11-5

presencia en un ambiente vacío por prolongados períodos permite tomar una decisión de apagado de un sector eléctrico. O bien, una detección de temperatura alta en un tablero puede permitir accionar un ventilador forzador para enfriar la zona (1).
Por lo general, en los edificios suele haber sectores con interrupción manual de alimentación eléctrica, por lo que se requieren modificaciones para poder hacer que estos circuitos puedan ser actuados o interrumpidos en forma automática. Para esto, estos sectores deben identificarse por consumo y por prioridades, además de ser lo suficientemente selectivos para sacar de servicio consumos superfluos sin perjudicar abastecimientos esenciales. Esto requiere muchas veces rediseñar la red eléctrica interna, y puede llegar a ser muy complicado o muy costoso. Identificados estos sectores, deben interponerse contactores eléctricos entre la carga y los interruptores termomagnéticos, que pueden ser actuados mediante salidas digitales a tensiones de control (24 VCC) y confirmados mediante contactos auxiliares en la misma tensión. Esto debe realizarse en espacio ocioso de los tableros existentes, o bien en nuevos tableros que puedan interponerse a los otros. Como el proyecto finalmente debía extenderse demasiado, se optó inicialmente por la realización de un piloto de laboratorio, para permitir que el sector de mantenimiento y servicios generales pudiera observar el sistema inicial en funcionamiento en forma localizada, a fin de poder verificar los beneficios de la supervisión remota.

PILOTO INICIAL

Hecha la presentación inicial al sector de mantenimiento y servicios generales, la administración de la universidad resolvió dar apoyo mediante la compra de los equipos que fuesen necesarios, con la finalidad de poner en funcionamiento un piloto en el laboratorio de Ingeniería de la UNGS. El laboratorio de Ingeniería cuenta con un equipo móvil para realizar análisis eléctricos, que permite ser conectado a cualquier carga o sector. Por otro lado, en uno de los tableros de distribución del mismo laboratorio, se pudo detectar la presencia de otro equipo analizador de redes. Los dos equipos son de la misma marca y modelo, y ambos claramente poseen el módulo de comunicaciones Modbus para poder conectarse en red. El piloto tenía como objetivo establecer las comunicaciones entre un sistema supervisor residente en un computador conectado a la red de área local de la Universidad, un PLC conectado a la misma red, y un analizador de red eléctrica conectado vía RS-485 917) con el puerto Modbus del PLC (12). El esquema inicial es el siguiente:

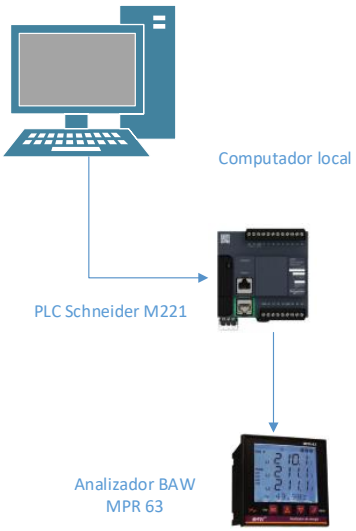


Figura1:Conexión del sistema supervisor inicial; Fuente: Elaboración propia

Pero este piloto debía ser compatible con la posibilidad de distribuir la información desde la toma de datos, tanto sean estos provenientes de analizadores como de sensores o estados, y la ejecución de órdenes de interrupción o alarma en forma distribuida, como de la visualización de los mismos. Así, el esquema final debería ser compatible con el inicial, genéricamente representado por la siguiente figura 2.

ISBN 978-607-8242-11-5

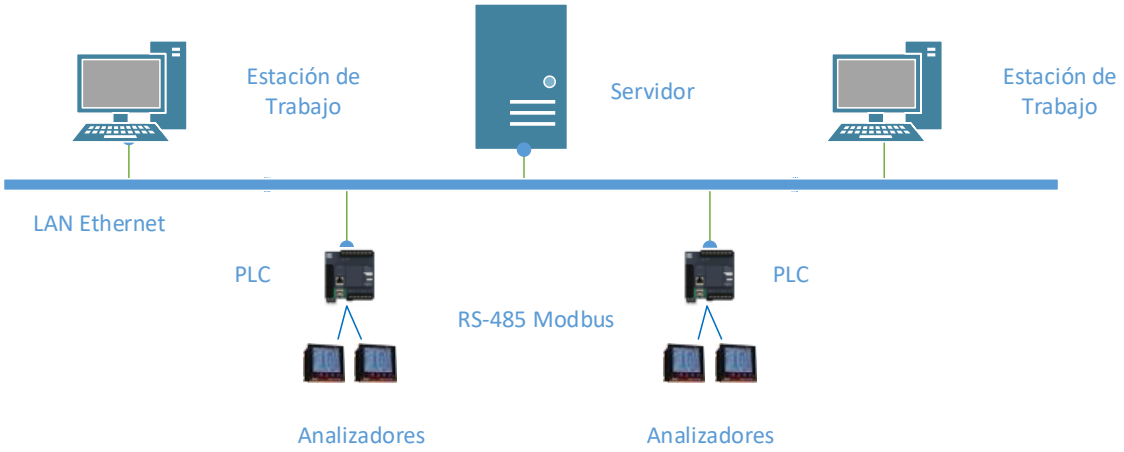


Figura 2:Representación de redes genéricas; Fuete: Elaboración propia

En la figura anterior se han representado redes genéricas. En las redes Ethernet pueden ser redes con dispositivos de ruteo o direccionamiento. Eventualmente la red puede estar preparada para ser accedida desde Internet, ya que el software supervisor debe correr sobre un servidor web. Las redes RS-485 con protocolo Modbus RTU (7)(8), son redes locales que permiten conectar hasta 32 dispositivos en tendidos de hasta 1.200 m de longitud, siendo este valor una referencia que depende fundamentalmente de la atenuación provocada por la distancia y la cantidad de dispositivos conectados. A veces se requiere un dispositivo repetidor.

EJECUCIÓN DEL PILOTO

En la ejecución se utilizaron los siguientes elementos, algunos de ellos existentes, otros de utilización transitoria, como licencias de software, y adquisición de equipos

- Analizadores de red: Equipos BAW MPR 63 (existentes en la universidad) (10)
- PLC: Schneider Modicon M221 (adquirido especialmente para la aplicación) (11) (12)
- Sofware de Supervisión: SCADA Ignition de InductiveAutomation, Cliente OPC (15)
- Software de comunicaciones: Servidor OPC de Kepware Technologies (16)

Cada uno de ellos cumple una función específica, y representan la opción más estándar posible. Todos ellos pueden ser reemplazados por otras alternativas. En este caso, la relación entre ellos viene dada por el diagrama en bloques de la figura 3

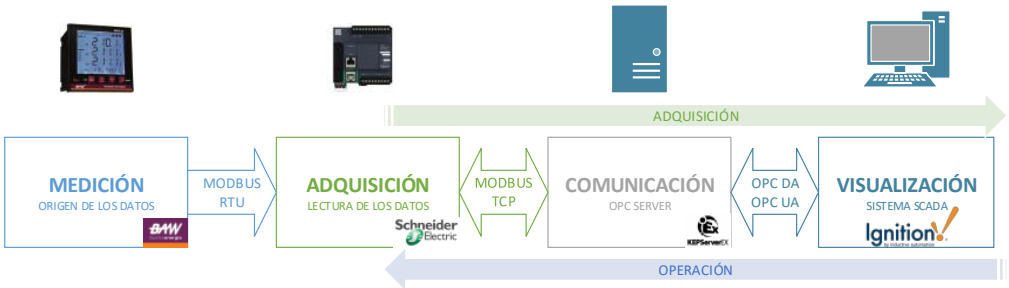


Figura 3:Representación de Piloto; Fuente Elaboración propia

El Analizador de red mide los datos de tensión y corriente, y luego calcula una importante lista de parámetros derivados, que a su vez aloja en registros, o posiciones de memoria, a los cuales les asigna una dirección Modbus determinada y única. Estos datos, además se pueden leer a través de la aplicación de ciertos multiplicadores, que deben interponerse para obtener el valor correcto de la medición, como puede verse en la figura 4, a continuación, que muestra una porción de estos registros.

ISBN 978-607-8242-11-5

3.12 Mapa de registros (16 bits)

DIRECCIÓN	DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN (16	MULTIPLICADOR	RANGO	UNI
0000H	Tensión LN1	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
0001H	Tensión LN2	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
0002H	Tensión LN3	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
0003H	Corriente LN1	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. Imáx	A
0004H	Corriente LN2	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. Imáx	A
0005H	Corriente LN3	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. Imáx	A
0006H	Corriente total	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. Imáx	A
000TH	Potencia activa L1	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Pmáx	W
0008H	Potencia activa L2	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Pmáx	W
0009H	Potencia activa L3	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Pmáx	W
000AH	Potencia reactiva L1	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Qmáx	VAr
000BH	Potencia reactiva L2	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Qmáx	VAr
000CH	Potencia reactiva L3	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Qmáx	VAr
000DH	Potencia aparente L1	Palabra	Dato x VT x CT	0 .. Smáx	VA
000FH	Potencia aparente L2	Palabra	Dato x VT x CT	0 .. Smáx	VA
000FH	Potencia aparente L3	Palabra	Dato x VT x CT	0 .. Smáx	VA
001OH	Factor de potencia L1	Ent. con signo	Dato x 0,001	-1.000 .. 1.000	-
0011H	Factor de potencia L2	Ent. con signo	Dato x 0,001	-1.000 .. 1.000	-
0012H	Factor de potencia L3	Ent. con signo	Dato x 0,001	-1.000 .. 1.000	-
OO13H	Cos L1	Ent. con signo	Dato x 0,001	-1.000 .. 1.000	-
0014H	Cos L2	Ent. con signo	Dato x 0,001	-1.000 .. 1.000	-
0015H	Cos L3	Ent. con signo	Dato x 0,001	-1 -000 .. 1 -000	-
OO16H	Tensión L12	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO17H	Tensión L23	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO18H	Tensión L31	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO19H	Tensión LN	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO1AH	Tensión LL	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
001BH	Frecuencia	Palabra	Dato x 0,01	45.00 .. 65.00	Hz
001CH	Potencia activa total	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Pt máx	W
001DH	Potencia reactiva total	Ent. con signo	Dato x VT x CT	0 .. ±Qt máx	VAr
001EH	Potencia aparente total	Palabra	Dato x VT x CT	0 .. St máx	VA
001FH	THD V1	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
002OH	THD V2	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
0021H	THD V3	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
0022H	THD V3P	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
0023H	THD I1	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
0024H	THD I2	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
0025H	THD I3	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
OO26H	THD I3P	Palabra	Dato x 0,1	0 .. 999.9	%
OO2TH	•Tensión alto LN1	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO28H	•Tensión alto LN2	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
0029H	•Tensión alto LN3	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO2AH	•Tensión bajo LN 1	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO2BH	•Tensión bajo LN2	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
OO2CH	*Tensión bajo LN3	Palabra	Dato x VT x 0,1	0 .. Vmáx	V
002DH	•Corriente alto L1	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. máx	A
OO?FH	•Corriente alto L2	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. máx	A
002FH	•Corriente alto L3	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. máx	A
OO3OH	•Corriente bajo L1	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. máx	A
0031H	•Corriente bajo L2	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. máx	A
0032H	•Corriente bajo L3	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. máx	A
OO33H	•Corriente de demanda L1	Palabra	Dato x CT x 0,001	0 .. máx	A

Figura 4: Registros ;Fuente: Manual Baw

Estos datos son los que se deben adquirir desde el PLC maestro de cada una de las redes Modbus RTU (7)(8). Todos ellos se leen desde una sentencia sencilla del programa, y se vuelcan en otros registros Modbus, en este caso TCP, que luego serán interrogados desde el OPC Server (6), vía la red Ethernet. Las direcciones Modbus TCP de cada uno de los PLCs serán por lo general direcciones consecutivas, y pueden abarcar uno o varios bloques de lectura Modbus RTU.

Es el OPC Server (5) en su configuración Modbus TCP, el encargado de realizar la lectura de los registros almacenados, y colocarlos en tablas que inmediatamente pone a disposición de los clientes, en este caso el Sistema Ignition, responsable de estar corriendo una aplicación configurada a este efecto, que muestra diversas pantallas con la información requerida, al mismo tiempo que puede ir guardando todos los datos en una base, en forma periódica, sean estos registros analógicos de todos los valores adquiridos, para luego ser mostrados en cartas de tendencia, o bien en tablas, o digitales que determinan estados o alarmas que también pueden guardarse en registros de memoria, ya en la computadora que oficia de servidor del sistema.

Todos estos datos se presentan en pantallas de lo que se denomina el HMI (Interfaz Humano/Máquina) del sistema SCADA (Sistema de Control Supervisor y Adquisición de Datos).

Estas pantallas han sido desarrolladas cuidando el aspecto original del frente del analizador de redes, por lo menos en su presentación primaria. En una sucesión de pantallas, el HMI puede mostrar todos los frentes que se obtienen en el analizador mismo a través de las flechas de navegación del equipo. La gran ventaja es que estas pantallas se están mostrando en forma remota, respecto de la ubicación del analizador

La figura 5 representa capturas de pantallas realizadas sobre el sistema en funcionamiento, a partir de su ingreso desde el menú principal, para luego presentar el conjunto de los frentes del equipo mostrando todos los datos.

ISBN 978-607-8242-11-5

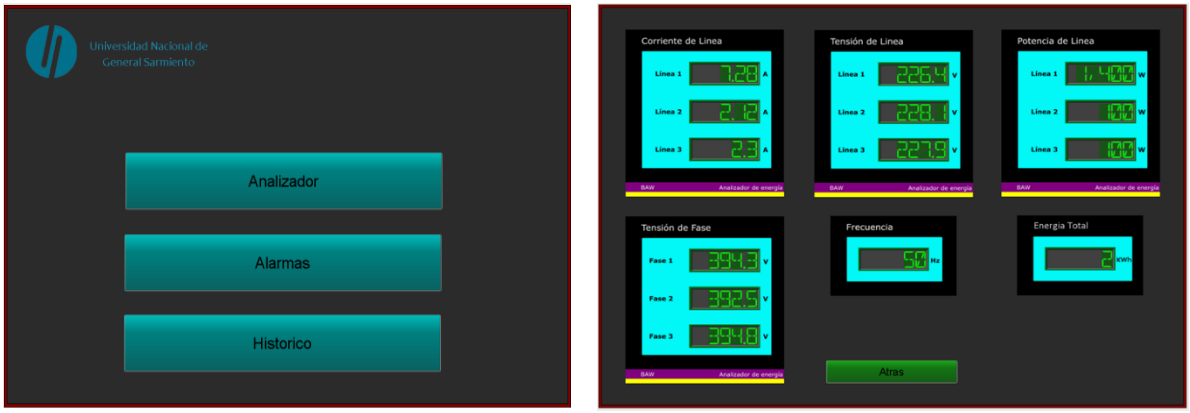


Figura 4: Captura de pantalla, Muestra de datos

El sistema se ha confeccionado inicialmente además para mostrar alarmas de consumo de energía y de potencia. En este caso el tablero al cual estaba conectado al analizador era responsable de una sección de máquinas herramientas, por lo que el sistema se configuró para alarmar ante el encendido simultáneo de las tres máquinas, como se puede ver en la figura 5. A la derecha se muestra el histórico de estas situaciones.

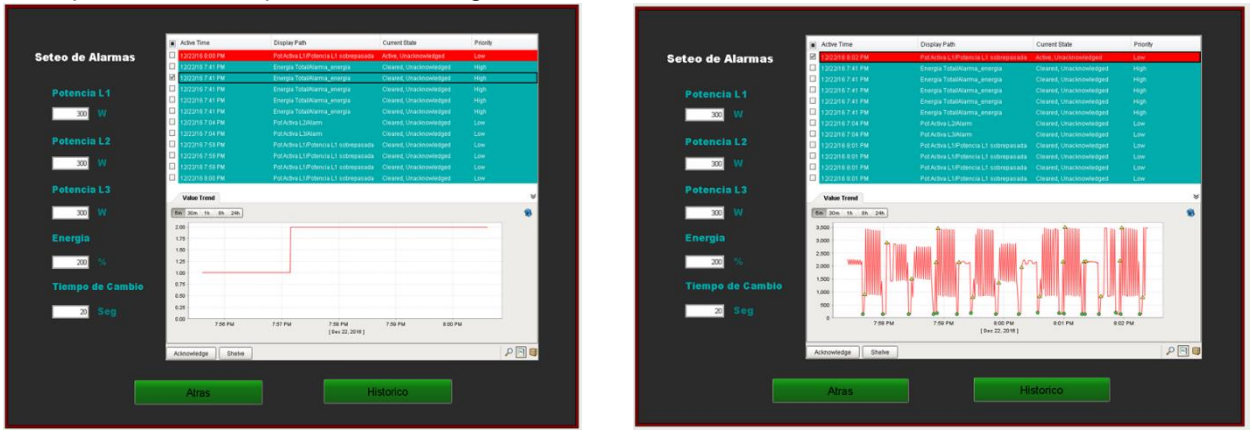


Figura 5: Pantallas de eventos

La parte inferior representa la tendencia histórica de una potencia activa que muestra alarma en el momento en que se supera el límite prefijado. En la siguiente se pueden ver todas las variaciones de la potencia por la entrada y salida de máquinas en la red eléctrica local, a lo largo de un intervalo de tiempo mayor.
Por último se muestran dos pantallas más en la figura 6: una de alarmas en la cual se ven debajo el sumario, con el estado de las últimas, y a la derecha con la secuencia de lo ocurrido en cada una de ellas, incluidos los eventos de reconocimiento y de normalización. La otra muestra ventanas históricas de tres potencias, energía y tablas de potencias, en un intervalo de tiempo muy corto.

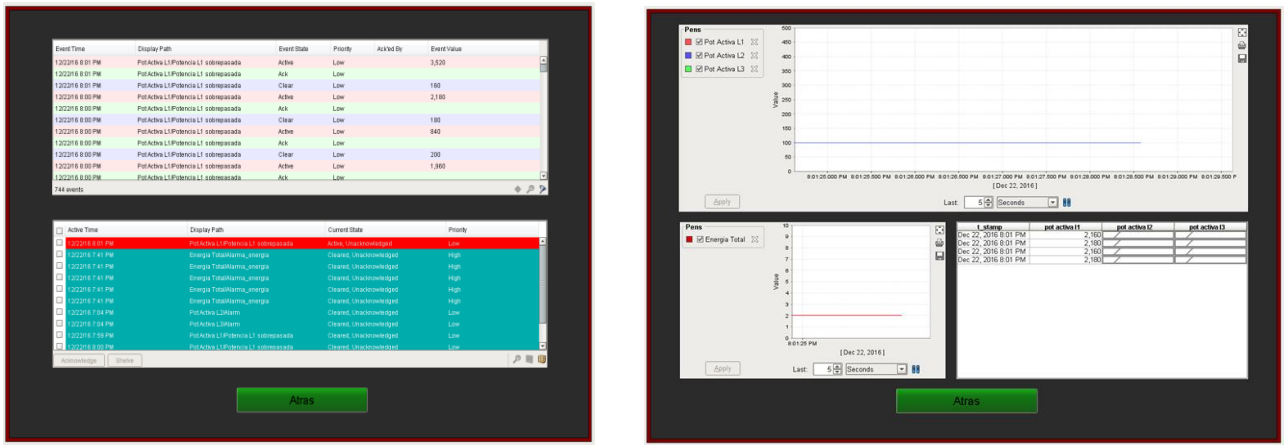


Figura 6:Estado de Alarmas e Históricos

ISBN 978-607-8242-11-5

SEGUNDA ETAPA

El piloto se presentó a fines del año pasado a los responsables de mantenimiento, y tuvo una recepción muy positiva, por lo que se pidió se avance sobre la siguiente etapa, que consiste en supervisar el tablero principal de entrada de baja tensión de toda la universidad. La universidad cuenta con una entrada de suministro en Media Tensión, una celda, un transformador, y luego un lado de baja tensión que alimenta a tres anillos independientes, con un analizador operando sobre cada uno de ellos. El requerimiento fue, en este caso, visualizar los datos eléctricos de estos analizadores desde la oficina de Servicios Generales, para tener un registro de los consumos, potencias y otros parámetros eléctricos, y tomar decisiones en función de las lecturas, aún cuando las mismas no sean automáticas en esta etapa

ALCANCE TOTAL DEL PROYECTO

El proyecto total no está aún definido, porque dependerá a futuro de la selección y separación de cargas para su posterior priorización. Estas cargas luego deben quedar conectadas a sistemas de arranque y parada comandados en forma remota, desde PLCs conectados a la red de datos. El grado de detalle puede ser tan fino como se quiera, pero implicará una mayor granularidad en el manejo de las entradas y salidas, respecto de la identificación de sectores posiblemente sobrecargados, cuyas demandas no sean consideradas como de uso esencial, como por ejemplo, aires acondicionados, o en todo caso, la regulación de los mismos a temperaturas mayores, sabiendo que desde el sistema central podemos conocer las mismas en determinados puntos de los edificios, produciendo un apagado forzado hasta llegar a las temperaturas aconsejadas para el uso racional de la energía.
Otros aspectos a tener en cuenta para el futuro del proyecto es temporizar el apagado de ciertas luminarias en combinación con la detección de presencia de personas, y además con sensores de iluminación diurna que determinen si se pueden apagar luminarias innecesarias. En edificios inteligentes, suele haber una combinación de apertura o cierre de cortinas automáticas, con disminución o dimerización de luminarias, a través del control de escenarios con redes de artefactos inteligentes, como los buses DALI (14). Claro que, para que esto sea posible, se deben cambiar los balastos comunes de las luminarias fluorescentes, por otros inteligentes, conectables en red y dimerizables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La posibilidad de contar con sistemas de monitoreo de energía lo suficientemente detallados para poder comprender instante a instante el estado de carga eléctrica de un predio, permite realizar distintos análisis, todos ellos beneficiosos, ya que suponen desde distintos aspectos, ahorros en mantenimiento, ahorros en consumos, y mejoras en las instalaciones. Está claro que la implementación de estos sistemas tiene un costo. Normalmente este costo debe confrontarse con las mejoras y ahorros producidos a partir de la implementación. Por ello, es muy importante que las etapas de implementación se orienten a resolver problemas concretos, como por ejemplo, evitar multas por exceso de potencia demandada, hacer más eficiente el consumo de energía reduciendo la tarifa abonada, o bien mejorar la tasa de falla reduciendo las intervenciones de mantenimiento por salidas de servicio parcial o total del sistema eléctrico.
La visualización eficiente de parámetros diarios supone acciones inmediatas a tomar, puesto que la primera parte del problema, es justamente poder detectarlo o prevenirlo. El uso cotidiano del sistema permitirá claramente delinear las acciones futuras de expansión del mismo, basadas en el mismo concepto inicial, o bien agregando nuevos requerimientos que surjan de la observación minuciosa del comportamiento de la red.
.

REFERENCIAS

1 Producción Más Limpia y Eficiencia Energética. UNEP, 1º Edición, (2003)

2 Supervisión energética para Monitorización y control de Consumo eléctrico. Un caso Práctico. Francisco Javier Cárcel Carrasco, José Grau Carrión - 3C Tecnología (Edición núm. 13) Vol.4 – Nº 1 Marzo – junio'15 015, 19 – 31 Área de Innovación y Desarrollo, S.L. - ISSN: 2254 – 4143

3 Hacia el Uso Racional y Eficiente de la Energía en la Administración Pública Nacional - DOCUMENTOS IEDS sobre Ciencia y Tecnología - Instituto De Energía y Desarrollo Sustentable - Comisión Nacional de Energía Atómica - Álvarez, Marcelo, Baragatti, Alicia, Bergallo, Juan, Bourges, Camilo, Casabianca, Gabriela, Czajkowski, Jorge, Durán, Julio, Gil, Salvador, Ham, Nora Pasquevich, Daniel M., Pedace, Roque, Plá, Juan, Prieto, Roberto, Rodríguez, Raúl A. - ISBN:978-987-1323-47-0

 ISBN 978-607-8242-11-5

4 Resolución SE 1281/06 Metodología de Cálculo para los Cargos por Excedentes de Energía sobre la Demanda Base .Edesur. Buenos Aires .Febrero (2007)

5 Standardized Smart Grid Semantics using OPC UA for Communication - Sebastian Rohjans, Klaus Piech R&D Department Energy OFFIS – Institute for Information Technology Oldenburg, Germany – Wolfgang Mahnke Industrial Software Systems ABB AG Ladenburg, Germany. IBIS – Interoperability in Business Information Systems – 2011

6 OPC UA Connects your Systems - Top 10 reasons why to choose OPC UA over OPC - Andreas Frejborg*, Martti Ojala*, Lauri Haapanen*, Otso Palonen**, Jouni Aro** - Finnish Society of Automation Biannual Seminar no 20 – 2013

7 Modbus Application Protocol Specification V1.1b3 – www.modbus.org

8 MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.02 - www.modbus.org

9 MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b - www.modbus.org

10 Manual de Analizador de Energía BAW MPR-63

11 Catálogo Controladores Lógicos Modicon M221 – 2014 – Schneider Electric - ESMKT01131B14

12 Modicon M221 Logic Controller – Guía de Hardware 11/2015 – Schneider Electric - EIO0000001387.04

13 Modicon M221 Logic Controller – Guía de Programación SoMachine Basic 12/2015 – Schneider Electric - EIO0000001363.06

14 Digitally Addressable Lighting Interface (DALI) Communication - DS01465A - Shaima Husain, Microchip Technology Inc – 2012

15 Inductive Automation Ignition SCADA - https://support.inductiveautomation.com/index.php?/iaenhancements/UserManuals/Index

16 Modbus Ethernet Manual – Kepware Technologies – PTC Inc – 2017

17 Normas de Comunicación en Serie: RS-232, RS-422 y RS-485 – Néstor Gabriel Forero Saboya – Ingenio Libre - 2012

 ISBN 978-607-8242-11-5

Hacia la obtención de rutas óptimas de navegación de un robot móvil en base a la aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) y Algoritmo de Búsqueda Local (ABL) en ambientes de operación estructurados

Alejandro Hossian[1], Lilian Cejas[1], Roberto Carabajal[1], César Echeverría[1], Verónica Olivera[1], Maximiliano Alveal[1]

[(1)]Facultad Regional del Neuquén – Universidad Tecnológica Nacional, Avda. Padre Rotter S/N° - Plaza Huincul (8316) – Provincia de Neuquén – Argentina
[1]e-mail: alejandrohossian@yahoo.com.ar, verolivera@gmail.com

Resumen

La Inteligencia Artificial (IA) concentra un variado espectro de tecnologías transversales a diferentes campos disciplinares (García Martínez y otros, 2003), como es el caso de la navegación de robots móviles cuando los usuarios demandan que estos agentes lleven a cabo prestaciones de diferente complejidad; asimismo, estos tópicos de investigación constituyen un aporte sustancial en distintos sectores del desarrollo (industriales, medicinales, seguridad, aeroespacial, entre otros). El núcleo de análisis del presente artículo se focaliza en el comportamiento que registran los robots móviles en ambientes de navegación estructurados, en los cuales los obstáculos permanecen fijos mientras el robot realiza sus tareas.
El desarrollo del presente artículo se estructura en dos fases; a saber: en la primera, son las RNA la tecnología de aplicación, donde se analizaron resultados obtenidos aplicando técnicas de navegación robótica basadas en RNA de tipo Perceptrón y Backpropagation, las que concentran los mejores atributos de la aproximación basada en comportamientos (Santos y otro, 2005) y (Harvey, 1996). El análisis de las conductas de navegación bajo esta aproximación, cuya arquitectura de control es de tipo reactiva, constituye la base conceptual de la primera etapa. En otros términos, cuando un robot realiza cierta acción en su entorno de operación y en un instante determinado, debe nutrirse de la información contenida en su sistema sensorial. Durante el proceso de entrenamiento, el robot recibe información del ambiente; la cual es volcada en un mapa sensor – motor, que modeliza este ambiente con obstáculos definidos; y a través de un software diseñado a tal efecto, se simula su interacción luego de su entrenamiento para evaluar su performance bajo las premisas del paradigma reactivo. Este mapa sensor-motor se traduce en una matriz con la descripción sensorial en cada posición de la grilla, que representa el entorno y los posibles movimientos en respuesta a los estímulos sensados, conforme a las políticas de proximidad y de movimiento (Ollero Baturone, 2007). En la segunda fase, las investigaciones se focalizan en la aplicación de algoritmos inteligentes de carácter deliberativo, los cuales se orientan hacia la planificación de las tareas que el robot debe realizar dentro de su entorno de operación; en este sentido, se hace uso del Algoritmo de Dikstra, que constituye un Algoritmo de Búsqueda con información que optimiza la ruta de navegación del robot en base a los costos de desplazamiento del mismo. Por consiguiente, mediante este "Algoritmo Constructivo Voraz" el robot podrá navegar en su entorno de operación por la "Ruta Menos Costosa" entre dos puntos preestablecidos del mismo. Para llevar a cabo con éxito la ejecución del algoritmo es preciso guardar la información de la ruta óptima en cada nodo que se va visitando en el proceso de ruteo, hasta hallar una arista que conduzca a una ruta mejor que sustituirá a la anterior. A tal efecto, la información es almacenada "on – line" mediante dos estructuras:

i. Árbol del camino más corto (SPT): muestra la ruta óptima desde un punto de partida preestablecido hasta cualquier punto considerado como objetivo, en función de los requisitos del usuario.
ii. Terna ordenada (nodo conocido, costo acumulado, nodo padre): el primer elemento indica si el nodo ha sido visitado; el segundo, representa el costo acumulado desde el nodo actual hasta el punto de partida o nodo de inicio; y el tercer elemento hace referencia al nodo padre del nodo actual.

A diferencia de las RNA, los algoritmos de búsqueda conocen cuál es el nodo objetivo al que se desea llegar y pueden guardar información sobre cuáles nodos y aristas se han visitado previamente; mientras que las RNA actúan en función de los estímulos que recibe y de los ejemplos con los cuales ha sido entrenada, es decir que si es mayor el número de ejemplos con el cual se entrena puede inferirse que aprenderá mejor. En ambos paradigmas de aplicación se dispone de conocimiento previo del entorno de trabajo del robot.

Palabras claves: Redes Neuronales, Algoritmos de Búsqueda, Análisis de Conductas.

Towards the obtaining of optimal routing routes of a mobile robot based on the application of Artificial Neural Networks

 ISBN 978-607-8242-11-5

(RNA) and Local Search Algorithm (ABL) in structured operating environments

Abstract

Artificial Intelligence (IA) concentrates a wide spectrum of technologies transversal to different disciplines (García Martínez and otherss, 2003), as is the case of navigation of mobile robots when users demand that these agents carry out features of different complexity; In addition, these research topics constitute a substantial contribution in different sectors of development (industrial, medical, security, aerospace, among others). The core of the analysis of this article focuses on the behavior of mobile robots in structured navigation environments, in which obstacles remain fixed while the robot performs its tasks.

The development of this article is structured in two phases; Namely: the RNA is the application technology, where results obtained using robotic navigation techniques based on Perceptron and Backpropagation type RNA, which concentrate the best attributes of the behavior-based approach (Santos and other, 2005) and (Harvey, 1996). The analysis of navigation behaviors under this approach, whose control architecture is of a reactive type, constitutes the conceptual basis of the first stage. In other words, when a robot performs some action in its operating environment and at a certain time, it must be nourished by the information contained in its sensory system. During the training process, the robot receives information from the environment; Which is overturned in a sensor - motor map, which models this environment with defined obstacles; And through a software designed to that effect, its interaction is simulated after its training to evaluate its performance under the premises of the reactive paradigm. This sensor-motor map is translated into a matrix with the sensory description at each position of the grid, which represents the environment and the possible movements in response to the sensed stimuli, according to the proximity and movement policies (Ollero Baturone, 2007). In the second phase, the research focuses on the application of intelligent deliberative algorithms, which are oriented towards the planning of tasks that the robot must perform within its operating environment; In this sense, use is made of the Dikstra Algorithm, which is a Search Algorithm with information that optimizes the navigation route of the robot based on the costs of moving it. Therefore, through this "Voracious Constructive Algorithm" the robot will be able to navigate in its operating environment by the "Less Expensive Route" between two pre-established points of the same. In order to successfully execute the algorithm, it is necessary to store the information of the optimal route in each node that is visited in the routing process, until finding an edge that leads to a better route that will replace the previous one. To this end, the information is stored "on - line" through two structures:

i. Shortest Road Tree (SPT): shows the optimal route from a pre-established starting point to any target point, depending on user requirements.
ii. Three ordered elements (known node, cumulative cost, parent node): the first element indicates if the node has been visited; The second represents the cumulative cost from the current node to the starting point or start node; And the third element refers to the parent node of the current node.

Unlike RNAs, search algorithms know which target node to reach and can store information about which nodes and edges have been previously visited; While the ANNs act in function of the stimuli that it receives and the examples with which it has been trained, that is to say that if more is the number of examples with which it trains it can be inferred that it will learn better. In both application paradigms, previous knowledge of the working environment of the robot is available.

Keywords: Neural Networks, Search Algorithms, Behavior Analysis.

INTRODUCCIÓN

En un principio, las investigaciones en el campo de la robótica se realizaban en base a ambientes de desarrollo con células de trabajo fijas en sus posiciones para que el robot desarrolle sus tareas, tal es el caso del robot ensamblador o soldador en una planta de montaje.

Los avances tecnológicos fueron tan significativos en los diferentes ambientes industriales, que constituyeron una de las razones principales para dotar a los sistemas de robots de una adecuada capacidad de desplazamiento, más allá de las prestaciones que realizaban en sus células de trabajo. Es entonces cuando esta disciplina dio en llamarse “robótica móvil” y constituye uno de los mayores desafíos que aborda la comunidad científica que trabaja dentro del rico y extenso campo de la robótica.

Es dable señalar, que las sucesivas investigaciones desarrolladas intentaron proporcionar a estos sistemas móviles de un nivel de autonomía suficiente, que le permitan navegar en su entorno de operación y reaccionar ante situaciones que no han sido consideradas en su programa de control (García Martínez y otros, 2003).

La navegación permite guiar el curso de un robot móvil a través de un entorno con presencia de obstáculos. Se conocen diferentes esquemas para llevar a cabo esta tarea, pero todos ellos tienen el objetivo común de dirigir el vehículo hacia su destino de la manera más segura y eficiente posible. La capacidad de reacción que pueda poseer el robot cuando se encuentra ante situaciones inesperadas, debe constituir su cualidad

 ISBN 978-607-8242-11-5

más distintiva para desenvolverse eficazmente en el entorno donde éste deba operar, lo cual indica el grado de autonomía que este posee.
Siguiendo esta línea, en la primera subsección se presentan los principios fundamentales de las RNA; como así también los experimentos realizados en el campo de la Robótica Móvil, mediante la aplicación de aprendizaje supervisado del tipo Backpropagation. En la subsección posterior se hace referencia a las características generales de los Algoritmos de Búsqueda, en particular las correspondientes a las Técnicas no informadas o a ciegas.

Experimentos realizados con Redes Neuronales

En la primera fase de este trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de técnicas de navegación robótica basadas en redes neuronales con aprendizaje supervisado de tipo Backpropagation, representativo de las características más potentes del paradigma reactivo concerniente a la navegación autónoma de robots (Santos y otro, 2005), (Harvey, 1996). Este trabajo se realiza en un marco un poco más amplio considerado una evolución del paradigma reactivo, que se denomina “Aproximación Basada en Comportamientos” (Ollero Baturone, 2007). Esto es, los comportamientos describen la forma en que se reacciona (en este caso un sistema robótico) ante un determinado estado de sensores y donde las actuaciones se determinan de manera más elaborada que una simple consulta a una tabla de correspondencias, realizando cálculos a los efectos de decidir qué acción se debe llevar a cabo.

Algoritmos de búsqueda: principios y fundamentos

Los Algoritmos de Búsqueda constituyen una de las tecnologías más importantes de la IA, cuyo objetivo principal consiste en hallar una solución válida dentro del espacio de estados. Entre otras técnicas que se pueden implementar con estos algoritmos se conocen las de búsqueda no informada y búsqueda con información. La primera debe su denominación a que el problema que se pretende resolver no proporciona ninguna información adicional que sirva de soporte para encontrar una solución de forma más rápida. En tanto que la segunda técnica sí proporciona información que ayuda a guiar la búsqueda.
En el presente artículo se utilizan técnicas de búsqueda no informada, o también llamada búsqueda a ciegas. En primer lugar se muestra un experimento relacionado con la Técnica de búsqueda en profundidad, cuyo objetivo central es encontrar una ruta entre el nodo raíz y el nodo objetivo; en segundo término se hace uso de la técnica de búsqueda en amplitud, la cual además de hallar una ruta entre el nodo raíz y el nodo objetivo, encuentra la más corta. Cabe destacar a tal efecto, que tanto el entorno estructurado como el nodo raíz y destino son los mismos a la hora de implementar ambas técnicas, a fin de poder medir la performance de cada uno de ellos.

EL MODELO PROPUESTO

En las siguientes subsecciones se desarrollan las distintas tecnologías inteligentes abordadas en el presente trabajo.

Modelo de aplicación de Red de tipo Backpropagation

Para este desarrollo se propone un esquema de robot tal como se observa en la figura 1.a). La arquitectura de la red neuronal para este procedimiento consta de una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida (Hilera-Martínez, 2000). La capa de entrada está formada por seis neuronas: cuatro de ellas corresponden a sensores de proximidad (SA, SB, SC, SD), y dos a neuronas que hacen referencia a la posición según el eje X y según el eje Y, que ocupa el robot en el ambiente en ese momento (PX y PY). Por su parte, la capa de salida está conformada por dos neuronas, correspondientes a los dos motores que comandan las dos ruedas laterales (MA y MB). De esta manera, se intenta que el robot pueda realizar trayectorias de mayor complejidad que para las que fue entrenado.

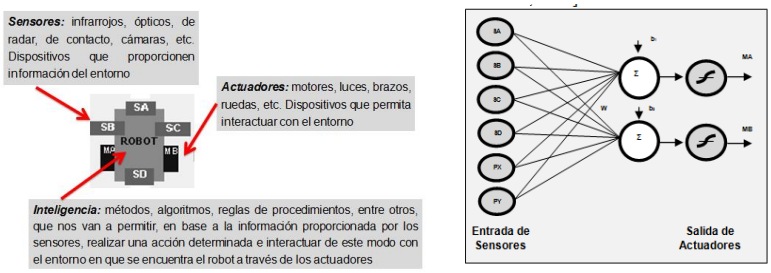


Figura 1: a) Esquema del robot propuesto. b) Arquitectura de red de tipo Backpropagation

Mediante un software de simulación en computadora distintas rutas de navegación del robot para diferentes entornos de operación. La combinación de rutas definidas para diferentes configuraciones del ambiente de navegación, constituyen las distintas conductas de navegación que exhibe el robot. Con este motivo se utilizaron un hardware y un software adecuados. Mediante estos recursos se procedió a implementar un

ISBN 978-607-8242-11-5

método de trabajo para llevar a cabo la investigación, el cual consistió en el desarrollo de un entorno de navegación con obstáculos definidos en el mismo, y en el marco de un ambiente de desarrollo presentado en forma de menú que permite entrenar la red neuronal propuesta para luego colocar al robot en fase de operación. Se observa en la figura 2 un esquema de la organización del entorno, como una grilla cuyas coordenadas (x, y) se encuadran dentro de un eje cartesiano, entorno de simulación donde navega el robot. En este último se puede observar la información referida a la localización del robot (proporcionada por las coordenadas X e Y, que en este caso corresponden a 0 según X y a 6 según Y), su orientación (dada por Norte, Sur, Este y Oeste), el entorno en sí, con la ubicación de sus obstáculos y las opciones para entrenar la red, reiniciar el proceso cuando sea necesario y simular los pasos de la trayectoria seguida por el robot.
Tal como se puede observar los espacios de la grilla ocupados por una cruz corresponden a posiciones con "obstáculos", los cuales no pueden ser ocupados por el robot, y por consiguiente, deben ser evitados por el mismo para no colisionar. Mientras que el resto de los casilleros, considerados "libres", son aptos para su desplazamiento. Cabe destacar que, los límites de la grilla también representan un obstáculo para el mismo. Cada casillero puede individualizarse mediante el mencionado sistema de coordenadas, cuyos valores se indican en los márgenes de la grilla. El robot empleado en este trabajo consta de cuatro sensores, uno en cada cara, dos sensores internos de posición y posee, además, dos motores, cada uno de los cuales ordena el movimiento de las ruedas laterales.
Los sensores de posición Px y Py son los que contienen las coordenadas horizontal y vertical respectivamente, correspondientes a la posición del robot en su ambiente de navegación. Los sensores SA, SB, SC y SD, son los encargados de detectar la proximidad de objetos u obstáculos. Estos sensores pueden adoptar, por ejemplo, el valor 1 ante la presencia cercana de un objeto (considerando cercano un objeto cuando está a dos casilleros o dos posiciones o menos respecto de la ubicación del sensor, dentro del entorno de operación); o el valor -1 ante la no cercanía de objetos (considerando que un objeto no es cercano cuando está a más de dos casilleros o posiciones respecto del sensor, dentro del entorno de operación.
De igual forma, los motores (MA, MB) adquieren un par ordenado de valores que ponen de manifiesto un efecto determinado, a saber: el par (-1 -1) representa un desplazamiento del robot una posición hacia atrás, el par (-1 1) representa un desplazamiento del robot una posición hacia la izquierda, el par (1 -1) representa un desplazamiento del robot una posición hacia la derecha y el par (1 1) representa un desplazamiento del robot una posición hacia delante.
Por consiguiente, el método de experimentación consiste en la confección de una determinada trayectoria de entrenamiento a partir de la elaboración de un mapa sensor motor del robot de acuerdo a dicha trayectoria, luego entrenar la red para esa trayectoria, y ya en fase de operación verificar si la misma fue aprendida por el robot. Como paso final del procedimiento, se procede a presentarle al robot otras trayectorias diferentes de las que aprendió para evaluar su performance (Hossian y otros, 2014).

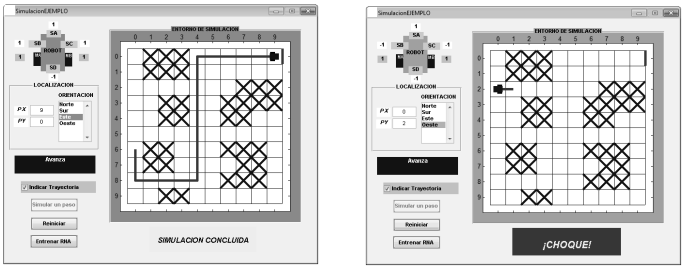
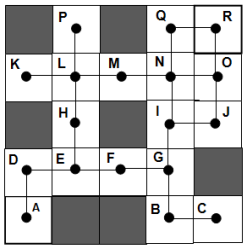


Figura 2: a) Trayectoria exitosa de un robot entrenado con RNA. b) Trayectoria no exitosa partiendo desde un lugar distinto al aprendido.

Modelo de aplicación de Algoritmos de Búsqueda

Los grafos de navegación permiten trabajar con una abstracción del entorno real y son usados en la navegación robótica cuando se conocen previamente las características del entorno.
El entorno se expresa en una grilla donde los casilleros oscuros representan los obstáculos y los casilleros libres indican el espacio transitable, tal como se observa en la figura 3. En estos espacios libres se colocan nodos o vértices nombrados con letras mayúsculas, para luego trazar las aristas posibles que los conectan.



ISBN 978-607-8242-11-5

Figura 3: Entorno propuesto con su respectiva distribución de los nodos para el posterior diseño del grafo.

El grafo de este caso estudio cuenta con dieciocho vértices o nodos y veinte aristas. Se conoce como grafo de navegación o navgraph y permite trabajar con una abstracción de robots cuando se conoce previamente las características del entorno (Arrioja Landa Cosio, 2007).
A partir de la definición de estos elementos, se puede entonces comenzar con la presentación de los modelos de algoritmos propuestos.
Cabe destacar que estos algoritmos trabajan con cierta información. Es decir, el algoritmo aplicado conocerá cuál es el nodo objetivo al que se desea llegar y también puede guardar información sobre cuáles nodos y aristas se han visitado previamente.
El primer algoritmo que se analiza se conoce como Depth First Search (DFS) o búsqueda en profundidad. La búsqueda que realiza este algoritmo consiste en el descenso hasta el máximo nivel de profundidad de la rama llegando hasta al nodo más profundo y luego continuar con la siguiente rama. Este algoritmo se inicia en un nodo del grafo, considerado nodo raíz. A partir de ese punto, observa cuáles son los nodos hijo y visita al primero. De este nuevo nodo, ve cuáles son los hijos y visita al primero que encuentra. El proceso sigue hasta hallar a una hoja, es decir, un nodo que no tenga hijos o a uno que esté conectado a nodos que ya se hayan visitado previamente. En ese momento, regresa al nodo padre inmediato y visita al siguiente hijo del nodo. El proceso continua hasta que se encuentra el nodo objetivo o se han visitado todos los nodos del grafo. Esto puede observarse detenidamente en el diagrama de flujo que se despliega en la figura 4.

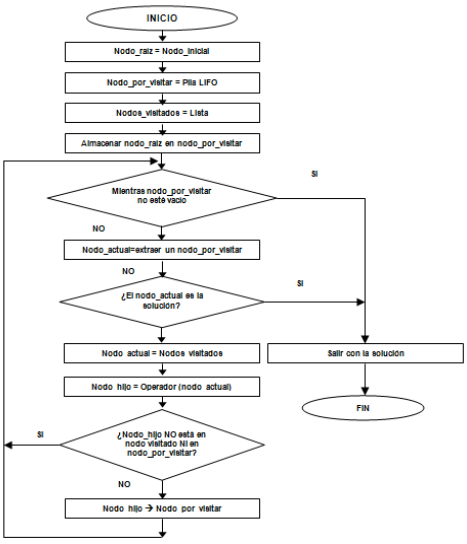


Figura 4: Diseño del grafo en el entorno.

Este algoritmo expresado en el pseudocódigo descripto a continuación garantiza encontrar una ruta entre el nodo raíz y el objetivo, siempre y cuando el nodo objetivo exista y esté conectado al grafo.

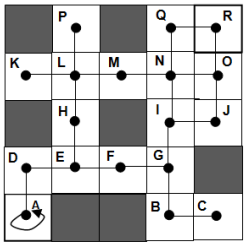
```
INICIO
Inicializar Nodo_raiz = estado_inicial
Inicializar Nodo_por_visitar = Pila LIFO
Inicializar Nodos_visitados = Lista
Almacenar nodo_raiz en nodo_por_visitar
Mientras que nodo_por_visitar no esté vacío
        Nodo_actual = extraer un nodo_por_visitar
        Si nodo_actual == solución entonces
                Salir con solución
                Terminar
        Caso contrario
                Introducir el nodo_actual en nodos_visitados
                Hacer por cada operador
                        Actualizar Nodo_hijo = operador (nodo_actual)
                        Si el nodo_hijo no está en nodos_visitados ni nodo_por_visitar entonces
                                Introducir nodo_hijo en nodo_por_visitar
                                Volver a Mientras...
FIN
```

Figura 5: Pseudocódigo del Algoritmo de Búsqueda en Profundidad.

Desde el punto de vista de la implementación, la búsqueda en profundidad utiliza una pila LIFO (Last In First Out). Una pila LIFO tiene dos operaciones: una para introducir un dato en la pila y otra para extraer un dato de la pila. El dato que se extrae de la pila es el último que se introdujo.

ISBN 978-607-8242-11-5

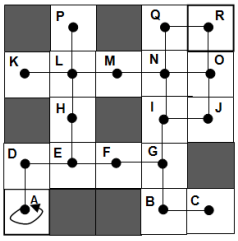
Teniendo en cuenta las consideraciones expuestas precedentemente, el ejemplo propuesto tiene como objetivo que el robot parta del nodo A y llegue al nodo R, es decir que encuentre una ruta que pueda seguir. Paro ello es necesario contar con una “pila o stack” que sea capaz de guardar las aristas que faltan por visitar y además, un arreglo en el que se registren los nodos y su nodo padre. Es importante al iniciar este algoritmo, hacer una arista del nodo raíz a sí mismo para poder iniciar y colocarlo en la pila. Esto se ilustra en la figura 6:



PILA	PADRES
A-A	Vértice Padre
	A
	B
	C
	D
	E
	F
	G
	H
	I
	J
	K
	L
	M
	N
	O
	P
	Q
	R

Figura 6: Grafo propuesto con un autolazo en el nodo A para de dar inicio al algoritmo.

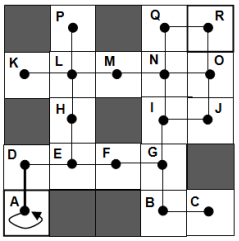
Se toma la primera arista que se encuentra en pila. Este lleva al nodo con el que se trabajará. Apenas se llega a este nuevo nodo se registra quiénes son sus nodos padres, marcando el nodo actual como ya visitado. A continuación se verifica si el nodo actual es el objetivo. Si lo es, finaliza el algoritmo, de lo contrario se continúa y se coloca en el registro de pila las aristas que se inician a partir del nodo actual. Si alguna arista ya estuviera previamente visitada, no se coloca. Esto se observa en la figura anterior y se registra nuevamente como sigue en la figura 7:



PILA	PADRES
A-D	Vértice Padre
	A - A
	B
	C
	D
	E
	F
	G
	H
	I
	J
	K
	L
	M
	N
	O
	P
	Q
	R

Figura 7: Grafo propuesto con el registro de las aristas adyacentes al nodo A.

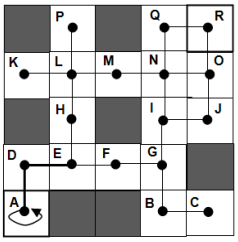
Luego se toma la primera arista de la pila y de esta manera el robot se posiciona en el nodo D. Se verifica que este nodo no sea el nodo destino. Su padre es el nodo A y se continúa con los pasos del algoritmo de la manera que se ilustra en la figura 8:



PILA	PADRES
D - E	Vértice Padre
	A - A
	B
	C
	D - A
	E
	F
	G
	H
	I
	J
	K
	L
	M
	N
	O
	P
	Q
	R

Figura 8: El robot se posiciona en el nodo D. Se registra en la tabla a su nodo padre que es A.

Entonces, se toma la primera arista de la pila y de esta manera el robot se posiciona en el nodo E. Su padre es el nodo D y se continúa con los pasos del algoritmo de la manera que se ilustra en la figura 9. Se observa que desde E se desprenden dos aristas: E-H y E-F.

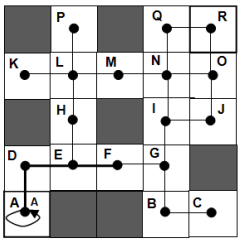


PILA	PADRES
E – F	Vértice Padre
E - H	A - A
	B
	C
	D - A
	E - D
	F
	G
	H
	I
	J
	K
	L
	M
	N
	O
	P
	Q

Figura 9: El robot se posiciona en el nodo E. Se registra en la tabla a su nodo padre que es D.

ISBN 978-607-8242-11-5

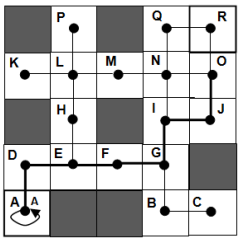
Se escoge recorrer la arista que se encuentra primero en la pila, es decir E-F y de esta forma el robot puede posicionarse en el nodo F. Ahora bien, el vértice E es el padre de F y la arista posible de ser recorrida es la arista F-G. Observe la figura 10.



PILA	PADRES
F - G	Vértice Padre
E – H	A – A
	B
	C
	D – A
	E – D
	F – E
	G
	H
	I
	J
	K
	L
	M
	N
	O
	P
	Q
	R

Figura 10: El robot se posiciona en el nodo F. Se registra en la tabla a su nodo padre que es E.

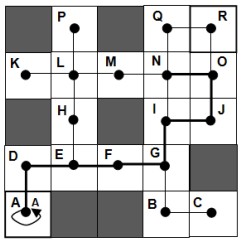
Procediendo son este razonamiento y conforme se ha actualizado la pila, el robot se dirige hasta el vértice O, siendo J su nodo padre. Observe la figura 11.



PILA	PADRES
O - N	Vértice Padre
O - R	A – A
I – O	B
I - N	C
G - B	D – A
E – H	E – D
	F – E
	G - F
	H
	I – G
	J – I
	K
	L
	M
	N
	O - J
	P
	Q
	R

Figura 11: El robot se posiciona en el nodo O. Se registra en la tabla a su nodo padre que es J.

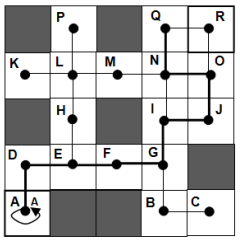
Se ha actualizado la pila y el robot se dirige hasta el vértice N, siendo O su nodo padre, como se ilustra en la figura 12.



PILA	PADRES
N – Q	Vértice Padre
N - M	A – A
O - R	B
I – O	C
I - N	D – A
G - B	E – D
E – H	F – E
	G - F
	H
	I – G
	J – I
	K
	L
	M
	N - O
	O - J
	P
	Q
	R

Figura 12: El robot se posiciona en el nodo N. Se registra en la tabla a su nodo padre que es O.

Se ha actualiza la pila nuevamente y el robot se dirige hasta el vértice Q, siendo N su nodo padre, como se observa en la figura 13.

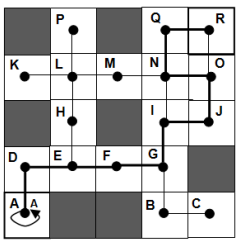


PILA	PADRES
Q - R	Vértice Padre
N - M	A – A
O - R	B
I – O	C
I - N	D – A
G - B	E – D
E – H	F – E
	G - F
	H
	I – G
	J – I
	K
	L
	M
	N - O
	O - J
	P
	Q - N
	R

Figura 13: El robot se posiciona en el nodo Q. Se registra en la tabla a su nodo padre que es N.

Conforme se ha actualizado la pila, el robot se dirige hasta el vértice R, siendo Q su nodo padre. Aquí se verifica que R es el nodo destino. En este caso concluye el algoritmo pues R es el punto hasta donde el robot debía llegar. De esta manera, se ha encontrado una ruta posible: A – D – E – F – G – I – J – O – N – Q – R, tal como se muestra en la figura 14.

ISBN 978-607-8242-11-5



PILA	PADRES
Q - R	Vértice Padre
N - M	A – A
O - R	B
I – O	C
I - N	D – A
G - B	E – D
E – H	F – E
	G - F
	H
	I – G
	J – I
	K
	L
	M
	N - O
	O - J
	P
	Q - N
	R - Q

Figura 14: El robot se posiciona en el nodo destino R.

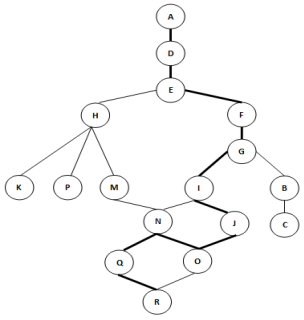


Figura 15: Diseño del grafo solución.

Este algoritmo ha permitido encontrar una ruta, que no significa que sea la más corta. Esto queda representado, además, en el grafo de la figura 15.

Modelo de aplicación de Algoritmo de Búsqueda en Amplitud

Uno de los objetivos fundamentales de este algoritmo de búsqueda consiste en la optimización de las vías que comunican los puntos de paso obligado que deben ser visitados por el vehículo robótico, redundando ello en un importante ahorro de recursos (tiempo, combustible, desgaste de sus partes constitutivas, entre otros).
En especial, este algoritmo recorre el grafo por niveles. Es decir, primero se visita el nodo raíz. Seguidamente se visitan todos sus hijos y para cada hijo en el paso anterior se visitan todos sus hijos y así sucesivamente. Este algoritmo verifica los nodos del siguiente nivel antes de ir a él y hasta que no finaliza un nivel de profundidad no pasa la siguiente. Esto puede observarse detenidamente en el diagrama de flujo que se despliega a continuación.

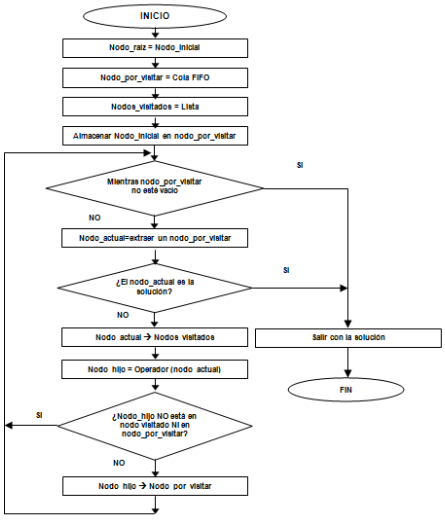


Figura 16: Diseño del grafo solución.

El pseudocódigo descrito a continuación permite encontrar la ruta más corta entre el nodo raíz y el objetivo, siempre y cuando el nodo objetivo exista y esté conectado al grafo.

ISBN 978-607-8242-11-5

```
INICIO
Inicializar Nodo_raíz = estado_inicial
Inicializar Nodo_por_visitar = cola FIFO
Inicializar Nodos_visitados = Lista
Almacenar el nodo_raíz en nodo_por_visitar
Mientras que nodo_por_visitar no está vacío
        Hacer Nodo actual = extraer nodo_por_visitar
        Si el nodo_actual == solución
                Salir con solución
                Terminar
        Caso contrario
                Introducir el nodo_actual en nodos_visitados

                Hacer Nodo_hijo = operador (nodo_actual)
                Si el nodo _hijo no está en nodos_visitados ni nodo_por_visitar entonces
                        Introducir un nodo_hijo en nodo_por_visitar
                        Volver a Mientras…
FIN
```

Figura 17: Pseudocódigo del Algoritmo de Búsqueda en Amplitud

Este recorrido se implementa en la práctica usando una cola FIFO (First In First Out) para la lista de nodos adyacentes. Una cola FIFO es una estructura de datos en la que podemos hacer dos operaciones principales: almacenar un dato y sacar un dato. La particularidad de las colas FIFO es que cuando sacamos un dato, este se extrae en el mismo orden en el que se almacenó.
La aplicación de este algoritmo garantiza la existencia de una ruta óptima, es decir, la ruta más corta en términos de aristas y vértices recorridos. Si hubiera más de una ruta con la misma cantidad de nodos y aristas recorridos, la solución sería la primera de ellas que se encuentre.
Tal como se desarrolló el algoritmo de búsqueda en profundidad y considerando los elementos definidos en la subsección precedentemente, se proponemos la aplicación de este algoritmo tal como se ilustra en la figura 18. Allí se muestran las condiciones de inicio. Se crea un autolazo en el nodo A para dar comienzo al algoritmo y se registra el nodo A como visitado. El objetivo es llegar al nodo R transitando la ruta más corta.

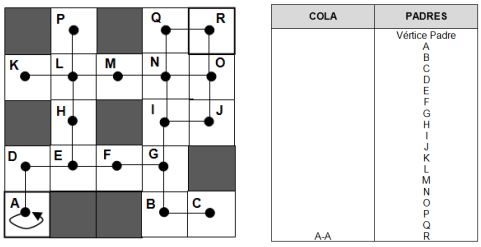


Figura 18: Condiciones iniciales. Registro de los nodos padres.

Se toma de la cola la arista, se coloca a A como padre del nodo A, se adiciona la arista que sale del nodo A y se marca el nodo que recibe a la arista como conocida. De esta manera, se verifica que el nuevo nodo no es el objetivo. Observe la figura 19.

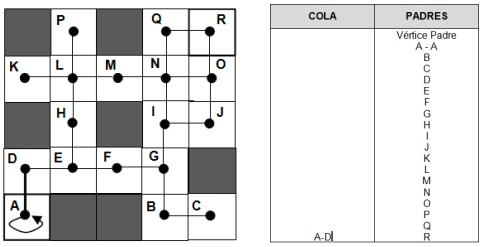


Figura 19: El robot llega al nodo D. Se registran los datos en la cola.

Se toma la siguiente arista, A-D, se coloca a A como padre de D y se registran las aristas que salen de D, como se muestra en la figura 20.

ISBN 978-607-8242-11-5

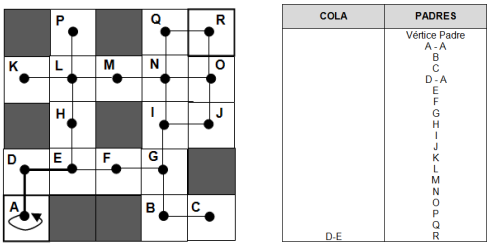


Figura 20: El robot llega al nodo E. Se registran los nodos padres.

Se toma la siguiente arista, D - E, se coloca a D como padre de E y se registran las aristas que salen de E, E – H y E – F, como se muestra en la figura 21. En este momento se marcan los nodos H y F como conocidos.

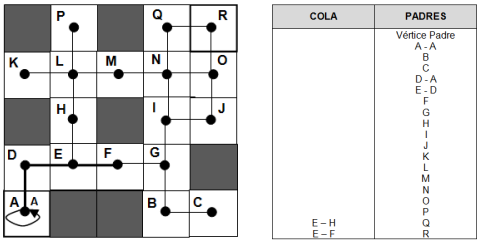


Figura 21: El robot llega al nodo F. Se registran los nodos padres.

Mientras no se encuentre el nodo objetivo se continúa con la aplicación del algoritmo tal como se demostró para el caso del algoritmo de búsqueda en profundidad. A modo de ilustración, en las figuras 22 y 23, se observa la ruta más corta encontrada tras la conclusión del algoritmo, como así también el grafo resultante. La ruta más corta para este caso está dada por el recorrido de los nodos: A-D-E-F-G-I-J-O-R.

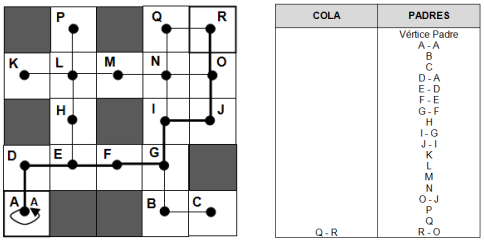


Figura 22: El robot llega al nodo destino R.

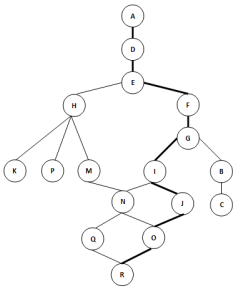


Figura 23: Diagrama del grafo resultante.

LOS RESULTADOS

En las siguientes subsecciones se presentan los resultados que oportunamente se obtuvieron mediante la aplicación de las distintas tecnologías.

Resultados de la aplicación de la Red de tipo Backpropagation

Teniendo en cuenta que el paradigma es netamente reactivo, basado en la filosofía de estímulo-reacción, los resultados obtenidos por la aplicación de la tecnología de las RNA de tipo Backpropagation en función del entorno, del tipo de robot y su interacción, ha evidenciado las diferentes conductas del robot. Las observaciones realizadas para distintas orientaciones, distintos puntos de partidas, entre otras, deja en

ISBN 978-607-8242-11-5

evidencia que el modelo resulta suficiente para algunos casos y limitada para otros. Asimismo, cuando el mundo adquiere mayor complejidad, o bien, cuando se hace partir al robot desde otro origen muy diferente al punto de origen con el cual se ha entrenado, éste adquiere conductas que le permiten resolver el problema a veces acertadamente y otras terminan en una colisión o en el ingreso a un bucle del que no logra salir.
Si bien el tiempo de ejecución es más rápido, puesto que actúa en función de la información que le proveen los sensores, no siempre resulta esto eficiente, puesto que se ha observado que eventualmente no logra el objetivo aunque actúe con mayor velocidad.

Resultados de la aplicación de Algoritmos de Búsqueda

Los experimentos realizados con algoritmos de búsqueda garantizan la existencia de una ruta siempre y cuando el nodo objetivo exista y esté conectado al grafo.
El algoritmo de búsqueda en profundidad ha permitido encontrar una ruta que puede o no ser la más corta mientras que la búsqueda en amplitud ha permitido encontrar una ruta de navegación más corta en términos de nodos visitados. La optimalidad de este algoritmo se basa en función del objetivo que se ha definido para el problema en cuestión; es decir que el robot parta de un nodo raíz y llegue a un nodo destino (García Serrano, 2012). Desde el punto de vista computacional, el algoritmo de búsqueda en profundidad requiere mucho menos memoria pues sólo debe guardar el camino actual.
El algoritmo de búsqueda en amplitud no se "pierde" explorando caminos infructuosos que consumen mucho tiempo sin llegar a una solución o de los que no se vuelve nunca; pero computacionalmente, el requerimiento de memoria es mayor, y en consecuencia si aumentara la complejidad del entorno en términos de cantidad de nodos, la situación sería comprometida.

CONCLUSIONES

Sobre la aplicación de la Red Backpropagation

De acuerdo a las investigaciones y experimentos realizados se puede concluir que el robot se desempeña bien dependiendo del lugar de salida e intentando siempre hallar la trayectoria de entrenamiento. Es notable que el patrón de entrenamiento ha sido suficiente para algunas trayectorias, aunque en ciertos casos dicho patrón no resulta ser representativo del entorno en el cual opera el robot, ya que la mayoría de las salidas de la red correspondientes al movimiento de los motores del robot, es avanzar y por ese motivo es que choca partiendo desde otras posiciones. O bien, ingresa en un bucle sin poder resolver esa situación, quedando inmóvil.
Para aminorar este problema, se aumenta el número de patrones de entrenamiento utilizando varias trayectorias o más largas, vigilando siempre la convergencia de la red para obtener mayor convergencia para los patrones de entrenamiento y máxima generalización, para las nuevas posibles situaciones.
Sintetizando, se asume que el uso de las RNA como técnica de navegación de características reactivas proporciona resultados satisfactorios para ciertas trayectorias en la fase de operación, tanto más en la medida que estas trayectorias presenten mayor similitud con las que desarrolló en la fase de entrenamiento; así es que se tendrá por caso, que el robot buscará girar más para el lado que lo hace en la trayectoria de entrenamiento que para el otro. A medida que las trayectorias que se le proponen al robot son tanto más complejas que la que este entrenó, este paradigma exhibe sus limitaciones haciendo que la red no converja y se produzcan situaciones de colisión o bucles en el ambiente de navegación. En otros términos, se produce una incorrecta generalización de la red neuronal para las nuevas situaciones que debe afrontar el robot, las cuales no se encontraban presentes en las trayectorias de entrenamiento.
La idea que subyace detrás de este objetivo central, es que dichas mejoras puedan verse reflejadas en términos de evitación de obstáculos, velocidad de respuesta, optimización de las trayectorias y logro de los objetivos (Ollero Baturone, 2007).

Sobre la aplicación de Algoritmos de Búsqueda

El experimento realizado con el algoritmo en profundidad encontró un camino entre el nodo A y el nodo R cumpliendo con el objetivo propuesto, no asegurando que ésta sea la ruta con el cual el robot visita menos puntos de paso. El experimento realizado con el algoritmo en amplitud encontró un camino entre el nodo A y R cumpliendo no sólo con el objetivo de llegar a destino sino que además ha visita menos nodos a su paso. Por esa razón, ambos algoritmos se consideran completos, dado que aseguran que aseguran la existencia de una ruta entre el nodo raíz y el nodo destino.
La medida de la performance de ambos algoritmos, en términos de los puntos de paso visitados por el robot en su recorrido para desarrollar su trayectoria, deja ver que la búsqueda en profundidad puede considerarse menos eficiente (subóptima) que la búsqueda en amplitud (óptima). Dado que para cubrir la misma trayectoria entre el mismo origen y el mismo destino y la misma complejidad de mundo, la búsqueda en amplitud necesitó visitar menos puntos en la trayectoria realizada.
El algoritmo de búsqueda en profundidad ha permitido recorrer todos los nodos del grafo de manera ordenada, pero no uniforme mientras que el algoritmo de búsqueda en amplitud recorre todos los nodos de

ISBN 978-607-8242-11-5

un árbol de manera uniforme y expande cada uno de los nodos de un nivel antes de continuar con el siguiente por esta razón sólo asegura la existencia de una ruta.
La búsqueda en profundidad es muy similar a la búsqueda en amplitud, aunque poseen una diferencia fundamental en cuanto a la estructura de datos usada en cada caso para guardar el registro de las aristas.
Los algoritmos de búsqueda, a diferencia de las RNA, conocen cuál es el nodo objetivo al que se desea llegar y pueden guardar información sobre cuáles nodos y aristas se han visitado previamente; mientras que las RNA actúan en función de los estímulos que recibe y de los ejemplos con los cuales ha sido entrenada, es decir que si es mayor el número de ejemplos con el cual se entrena puede inferirse que aprenderá mejor. En ambos casos deben tener un conocimiento previo del entorno con el cual interactúan.
En este sentido, las RNA no siempre encuentran una ruta acertada de acuerdo a los requerimientos, y los algoritmos de búsqueda, de acuerdo al tipo que se utilice, no sólo entrega una ruta sino que puede incluso entregar la ruta más corta en términos de puntos de paso visitados, los que pueden traducirse en espacios de trabajo que el robot deba visitar previamente antes de llegar a destino.
Por otro lado, dado que la arquitectura de la red Backpropagation actúa en base a un sistema sensar-actuar de características reactivas, esto le proporciona mayor velocidad al vehículo robótico; como contrapartida, la implementación de los algoritmos de búsqueda, de carácter deliberativo y secuencial (desde el punto de vista de la programación), por lo tanto es más lento, lo cual puede traducirse, en un mundo complejo, en una desventaja en términos de tiempo, dinero, consumo energético, entre otros.

FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

Por todo lo expuesto cabe considerar la consiguiente investigación sobre el objetivo de mejorar el desempeño del robot en lo que se refiere a sus conductas de navegación, a través de la aplicación de técnicas de razonamiento de alto nivel de tipo deliberativas (aprendizaje automático y planificación autónoma de tareas entre otras) como complemento de las técnicas reactivas; las cuales, si bien son de menor velocidad de reacción que estas, también le permiten al robot afrontar requerimientos de desempeño más complejos.
En este sentido, se propone como futura línea de investigación el análisis de la performance del robot en ambientes estructurados de mayor complejidad como así también su desempeño en entornos de operación de carácter dinámico, en los cuales los obstáculos puede cambiar de posición mientras el robot realiza su tarea.
Asimismo, y dado el objetivo planteado por los autores, se considera la aplicación de algoritmos de búsqueda más eficientes como nuevas técnicas para la resolución de este caso de estudio. Esto es posible, pues el robot se desempeña en un entorno estructurado, es decir invariante en el tiempo. Con lo cual y bajo estas circunstancias se plantean alternativas como algoritmos de búsqueda con costos, como posibles tópicos de análisis, como así también el abordaje de algoritmos de búsqueda informada, tales como el Algoritmo de Dijkstra y el Algoritmo A*.

REFERENCIAS

Arrioja Landa Cosio, N. "*Inteligencia Artificial*", Gradi, Buenos Aires 2007.

García Martínez, Ramón; Servente, M.; Pasquín, D. "Sistemas Inteligentes", Ed. Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina, 2003.

García Serrano, A. "*Inteligencia Artificial. Fundamentos, práctica y aplicaciones*", Alfaomega, México 2012.

Harvey, I. "*Artificial Evolution and Real Robots, Proceedings of Internacional Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB)*", Masanori Sugisaka (Ed), Beppu, Japan, pp. 138-141, (1996).

Hilera, J. R.; Martínez, V. J. "*Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones*", Ed. Alfaomega Ra-Ma. Madrid, España, 2000.

Hossian, A. A.; Cejas, L. A.; Olivera, L. V. "*Estudio del comportamiento de vehículos robóticos en ambientes computarizados. Hacia un enfoque basado en conductas del tipo estímulo-respuesta*", IVº Jornadas de Enseñanza de la Ingeniería JEIN - UTN – FRA, Buenos Aires, Argentina 2014.

Hossian, A. A.; García Martínez, R.; Olivera, L. V. "*Robótica de Navegadores. Un enfoque desde las Tecnologías Inteligentes*", Ed. Nueva Librería, Buenos Aires 2014.

Ollero Baturone, A. "*Robótica Manipuladores y robots móviles*". Ed. Alfaomega – Marcombo, Barcelona España, 2007.

Santos, J.; Duro, R. "*Evolución Artificial y Robótica Autónoma*", Ed. Alfaomega – Ra-Ma, México 2005.

Scillato, A.; Colón, D.; Balbuena, J. "*Técnicas de Navegación Híbrida para Navegación de Robots Móvile*s", Ed. Rama de Estudiantes del IEEE. Tesis de grado para obtener el grado de Ingeniero Electrónico. Universidad Nacional del Comahue 2005.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Una propuesta de proceso para la obtención del Modelo Dinámico de un Manipulador Robótico Industrial en el marco de la Mecánica Lagrangiana

Alejandro Hossian[1], Lilian Cejas[1], Roberto Carabajal[1], César Echeverría[1], Verónica Olivera[1] and Maximiliano Alveal[1].

(1) Facultad Regional del Neuquén, Universidad Tecnológica Nacional, Avda. Padre Rotter S/N, Plaza Huincul, Provincia de Neuquén, Argentina
E-mail: alejandrohossian@yahoo.com.ar;

Resumen

Un robot manipulador es un sistema mecánico complejo cuya descripción analítica requiere de la formulación de ecuaciones diferenciales. El Modelo Dinámico del robot manipulador permite explicar ciertos fenómenos físicos intrínsecos de su naturaleza dinámica. Tales fenómenos pueden ser fuerzas centrípetas y de Coriolis, efectos inerciales, par gravitacional y efectos de fricción. En este contexto, dicho modelo se ocupa de estudiar la relación entre el movimiento producido en el robot y los pares/fuerzas aplicados por los accionadores en las articulaciones del mismo. Para obtener esta importante relación es fundamental la construcción del modelo dinámico, el cual permite vincular matemáticamente las siguientes cuestiones: la localización del robot definida por sus variables articulares o coordenadas de su extremo, y sus derivadas (velocidad y aceleración), los pares y fuerzas aplicados en las articulaciones o extremo del robot y los parámetros dimensionales del robot (longitudes, masas e inercia de sus elementos. En el presente artículo se trabaja sobre el proceso de obtención del modelo dinámico del robot manipulador de dos grados de libertad, cuyo modelo matemático se expresa mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de 2° orden, cuya integración proporciona el tipo de movimiento que surge al aplicar fuerzas; o qué fuerzas hay que aplicar para alcanzar un cierto movimiento. A tal efecto se hace uso de la Formulación de Lagrange que describe la dinámica de un robot a partir de un balance de energía, la cual se expresa en términos de energía cinética y potencial. Esta última es la que se adopta en el presente trabajo, dado que constituye un planteo más sistemático que el anterior y hace más sencilla su formulación. El proceso metodológico empleado para la obtención del modelo dinámico es el siguiente: una primera fase de la investigación donde se obtiene la cinemática directa y diferencial (Torres y otros, 2002) (posiciones y velocidades articulares), una segunda fase en la cual se aborda la formulación lagrangiana (Craig, 1989) con los cálculos de la energía cinética, potencial, el lagrangiano; y una tercera fase de construcción del modelo dinámico en base al desarrollo matricial que permite obtener el vector de fuerzas o pares que se aplica a cada articulación en función de las coordenadas articulares, sus velocidades y aceleraciones. Los otros actores que intervienen en este proceso son: la matriz de inercias D(q) de n x n cuyos elementos están en función de q, la matriz de fuerzas de Coriolis de n x 1 cuyos elementos están en función de las posiciones y velocidades; y la matriz de fuerzas de gravedad C(q) de n x 1 dependiente de q. Siendo n el número de grados de libertad del robot.

Se usan las ecuaciones de Lagrange (Reyes Cortés, 2011) como uno de los métodos superiores de la Mecánica Analítica, que tiene la ventaja de que no intervienen las fuerzas de ligadura, puesto que realiza un balance de energía. Así se obtienen ecuaciones diferenciales estructuradas en los tipos de pares y fuerzas que intervienen (inercia, Coriolis, gravedad y fricción). Es así que se obtiene el Modelo Dinámico del robot en función de sus variables articulares y derivando la función de energía que depende de estas variables. También se observa la respuesta del modelo de robot propuesto en términos de la evolución temporal de las variables articulares, ante un determinado perfil de pares aplicados a las articulaciones.
Un Modelo Dinámico robusto impacta en forma directa en los siguientes aspectos:

1. Simulación del movimiento del robot (en el espacio articular o en el cartesiano).
2. Diseño, evaluación y construcción de todo el sistema mecánico del robot.
3. Diseño de un adecuado sistema de control.

Palabras claves: modelo dinámico, ecuaciones de Lagrange, trayectorias articulares, pares y fuerzas.

A proposal of process for obtaining the Dynamic Model of an Industrial Robotic Manipulator in the framework of Lagrangian Mechanics

 ISBN 978-607-8242-11-5

Abstract

A manipulator robot is a complex mechanical system whose analytical description requires the formulation of differential equations. The Dynamic Model of the robot manipulator allows to explain certain physical phenomena intrinsic of its dynamic nature; Such as: centripetal and Coriolis forces, inertial effects, gravitational torque and friction effects. In this context, this model is concerned with studying the relationship between the movement produced in the robot and the torque / forces applied by the actuators in the joints of the robot. In order to obtain this important relation, it is fundamental to construct the dynamic model, which allows to mathematically link the following questions: the location of the robot defined by its articular variables or coordinates of its end, and its derivatives (velocity and acceleration), pairs and forces In this article we work on the process of obtaining the dynamic model of the manipulator robot of two degrees of freedom, whose mathematical model is applied to the robot 's joints or end and the dimensional parameters of the robot (lengths, masses and inertia of its elements) Is expressed by a set of second order differential equations, whose integration provides the type of motion that arises when applying forces, or which forces must be applied to achieve a certain movement. For this purpose use is made of the Lagrange Formulation described The dynamics of a robot from a balance of energy, which is expressed in tea Terms of kinetic and potential energy. The latter is the one adopted in the present work, since it is a more systematic approach than the previous one and makes its formulation easier. The methodological process used to obtain the dynamic model is the following: a first phase of the research where direct and differential kinematics (Torres y others, 2002) (positions and joint velocities) are obtained, a second phase in which the lagrangian formulation is addressed [2] with calculations of kinetic, potential, lagrangian energy; And a third phase of construction of the dynamic model based on the matrix development that allows obtaining the vector of forces or pairs that is applied to each joint as a function of articular coordinates, its velocities and accelerations. The other actors involved in this process are the inertial matrix D (q) of n x n whose elements are in function of q, the matrix of Coriolis forces of n x 1 whose elements are in function of the positions and velocities; And the matrix of forces of gravity C (q) of n x 1 dependent on q. Where n is the number of degrees of freedom of the robot.
The Lagrangian equations (Reyes Cortés, 2011) are used as one of the superior methods of Analytical Mechanics, which has the advantage that ligand forces do not intervene, since it makes use of energy balance. Thus we obtain structured differential equations in the types of pairs and forces that intervene (inertia, Coriolis, gravity and friction). In this way, we obtain the Dynamic Model of the robot in function of its articular variables and deriving the energy function that depends on these variables. It is also observed the response of the proposed robot model in terms of the temporal evolution of the articular variables, before a certain profile of pairs applied to the joints.
A robust Dynamic Model has a direct impact on the following aspects:

1. Simulation of robot movement (in articular or Cartesian space).
2. Design, evaluation and construction of the entire mechanical system of the robot.
3. Design of an adequate control system.

Keywords: Dynamic model, Lagrange equations, articular trajectories, pairs and forces.

INTRODUCCIÓN

En el marco de la mecánica analítica, la dinámica constituye un amplio campo dedicado al estudio de la relación entre las causas (fuerzas o pares) que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina. Desde este punto de vista, en robótica la dinámica estudia la vinculación existente entre el movimiento que se produce en el sistema – robot y los pares o fuerzas que ejercen los actuadores de las articulaciones. Generalmente, los manipuladores robóticos están formados por articulaciones de un grado de libertad; rotacionales o prismáticas. Cuando se hace referencia a una articulación de tipo rotacional, los actuadores producen pares de fuerzas entre los eslabones que son conectados por la articulación; asimismo, cuando la articulación es prismática, los actuadores producen fuerzas entre dichos eslabones (Torres y otros, 2002). Así, la consecuencia real es que mediante las relaciones dinámicas es factible controlar los actuadores de las articulaciones, y por consiguiente el movimiento de todos los eslabones del manipulador, de manera tal que el órgano terminal del mismo realice una determinada trayectoria. En este sentido, si por ejemplo se desea acelerar un manipulador desde una posición inicial, deslizarlo a una velocidad constante del extremo para finalmente desacelerarlo hasta detenerlo por completo; los actuadores de las articulaciones deben aplicar un profuso conjunto de funciones de momento de torsión (Craig, 1989). En la figura 1 se ilustra la relación entre los momentos de torsión τ, las variables articulares Θ y la trayectoria (T) que desarrolla el órgano terminal del robot desde un punto A hasta el B.

 ISBN 978-607-8242-11-5

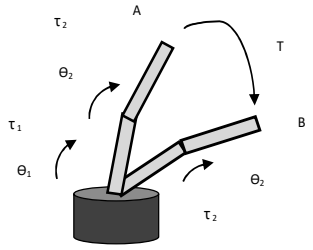


Figura 1: Relación entre los momentos de torsión τ, las variables articulares Θ y la trayectoria (T) que desarrolla el órgano terminal del robot desde un punto A hasta el B

En este sentido, es preciso señalar que la descripción analítica y la forma exacta de estas funciones de momento de torsión de un actuador de articulación, dependen de las características espaciales y temporales de la trayectoria seguida por el extremo. Aunque también dependen de las propiedades de masa de los vínculos y de la carga útil, de la fricción en las articulaciones, entre otros factores. Por medio de las ecuaciones dinámicas de movimiento de un robot manipulador, es posible calcular las funciones de momento de torsión del actuador, a los fines de controlar al manipulador para que siga una ruta deseada.
Las relaciones entre los pares o fuerzas que se aplican en los actuadores de las articulaciones; y las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares que tienen lugar en las mismas, se obtienen por medio del **modelo dinámico** del robot manipulador. Este modelo permite explicar una gran variedad de fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del sistema – robot; tales como, fuerzas centrífugas y de Coriolis, efectos inerciales, par gravitacional y fenómenos de fricción (viscosa, Coulomb y estática). Estos fenómenos son intrínsecos de la naturaleza dinámica del robot (Reyes Cortés, 2011). Por las razones expuestas y como se podrá inferir del desarrollo del presente trabajo, la conformación del modelo dinámico para estos sistemas se realiza por medio de ecuaciones diferenciales no lineales. Es por eso que la identificación del modelo dinámico, sobre todo para dispositivos robóticos de más de dos grados de libertad, es considerada una tarea de alta complejidad (Ollero Baturone, 2007). Asimismo, este aspecto también dificulta el desarrollo e implantación del sistema de control; lo que ha originado que en diversas circunstancias, los sistemas de control se hayan diseñado en base al modelo cinemático[1]. En este sentido, es importante destacar la relevancia que adquiere el modelo dinámico en el diseño del manipulador robótico, así como también contar con una sólida estructura matemática de control de alto desempeño práctico, a los efectos de que los actuadores del robot no alcancen niveles de saturación que le impidan a este realizar las tareas requeridas por el usuario.

OBJETIVOS

El grupo de investigación en *"Robótica aplicada a la Ingeniería"* que desarrolla sus actividades en la casa de altos estudios arriba mencionada, lleva a cabo un proceso de investigación y desarrollo que se estructura en base a dos objetivos centrales que subyacen en la elaboración del presente trabajo.
El primer objetivo central es de carácter "didáctico – pedagógico", mediante el cual se coloca especial énfasis en el enorme potencial que poseen diversos tópicos pertenecientes a las ciencias básicas en la formación del ingeniero, tales como: Álgebra Matricial, Cálculo Diferencial, Sistemas de Referencia Fijos y Móviles, la Cinemática y Dinámica de los Cuerpos Rígidos y Funciones Polinómicas entre otros, los cuales conforman un excelente conjunto de herramientas analíticas para modelar el funcionamiento de un robot manipulador.
El segundo objetivo central es de carácter "científico – tecnológico", y se orienta a la aplicación de estas herramientas para la obtención de instrumentos de modelado (matrices de transformación homogénea, modelo cinemático, modelo diferencial, modelo dinámico, generación de trayectorias articulares y fundamentos de control, entre otros), que permiten comprender el funcionamiento de estos sistemas. Desde un punto de vista más específico, este segundo objetivo consiste en la implementación de un modelo de proceso de investigación en base a tres fases que procuran optimizar el diseño de un manipulador robótico industrial; a saber: una primera *fase* corresponde a la Cinemática del Robot, para la obtención de los Modelos Cinemático Directo e Inverso y del Modelo Diferencial de los manipuladores robóticos industriales; una segunda *fase* se corresponde con la Dinámica del Robot, que se aplica a la obtención del Modelo Dinámico de estos brazos; y una tercera *fase* vinculada a los aspectos que hacen al Control del robot, cuyos algoritmos permiten mejorar las características de velocidad y precisión.
El problema que se analiza en este artículo se encuadra dentro de la segunda fase del modelo de proceso de investigación, correspondiente al campo de estudio de la Dinámica del Robot; cuyo objetivo central

[1] Se obtuvieron resultados razonables para movimientos "suaves" y sin que se produzcan aceleraciones de significancia. No obstante, para movimientos rápidos con masas y aceleraciones de relevancia, es imprescindible considerar el modelo dinámico del robot.

ISBN 978-607-8242-11-5

consiste en la obtención de su Modelo Dinámico, el cual establece la vinculación matemática entre los siguientes elementos:

a. La localización del robot definida por sus variables articulares y sus derivadas (velocidad y aceleración).
b. Los parámetros dimensionales del robot (longitudes, masas e inercia de sus elementos).
c. Los pares y fuerzas aplicados en las articulaciones del robot para que su extremo realice una determinada trayectoria (Barrientos y otros, 2007).

El análisis de la dinámica del robot puede abordarse en base a dos enfoques:

I. **Modelo Dinámico Directo**: se basa en obtener la evolución temporal de las variables articulares ($\Theta(t)$, $\Theta'(t)$ y $\Theta''(t)$, bajo la aplicación de un vector de fuerzas y momentos de torsión aplicados en los actuadores de las articulaciones. Es decir, obtener $\Theta(t) = f(\tau(t))$ y sus derivadas. Esta formulación del problema dinámico, tiene especial valor en el análisis de la simulación del robot (Kelly y otro, 2003).
II. **Modelo Dinámico Inverso**: se basa en obtener la evolución temporal de las fuerzas y momentos de torsión que se aplican en los actuadores de las articulaciones, para conseguir una determinada evolución temporal de las variables articulares ($\Theta(t)$, $\Theta'(t)$ y $\Theta''(t)$. Es decir, obtener $\tau(t) = f(\Theta(t), \Theta'(t), \Theta''(t))$. Un correcto desarrollo del modelo dinámico inverso repercute directamente en el problema del control del manipulador[2].

Desde un punto de vista más específico, y ya en el contexto de la fase de dinámica del robot, en este trabajo se propone un método de obtención del modelo dinámico inverso de un robot manipulador de dos grados de libertad en base a la formulación de las *"Ecuaciones de Lagrange"*. Por medio de esta herramienta analítica[3], es posible describir la dinámica de un robot manipulador a través del balance de la energía cinética y potencial presentes en sus eslabones). En una segunda instancia, y a partir del modelo dinámico obtenido, se proponen trayectorias articulares ($\Theta(t)$), y por consiguiente $\Theta'(t)$ y $\Theta''(t)$, con idea de obtener los pares de torsión que se deben aplicar en los actuadores de las articulaciones para alcanzar estas trayectorias.

El modelo de proceso de investigación y desarrollo con sus tres fases (Cinemática del Robot, Dinámica del Robot y Control del Robot) que ilustra este segundo objetivo central, se detalla en la figura 2.

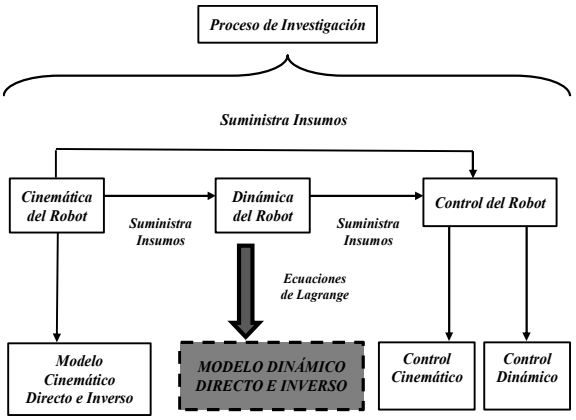


Figura 2: Modelo de Proceso de Investigación y Desarrollo

Tal como lo indica la figura 2, se observa resaltado el módulo correspondiente al Modelo Dinámico Directo e Inverso y su vinculación con la fase de Dinámica del Robot; así como también, el suministro de insumos entre las diferentes fases del proceso. En este sentido es menester destacar, que por un lado la fase de cinemática debe suministrar a la de dinámica las ecuaciones cinemáticas necesarias para la desarrollar los balances de energía que exige la formulación Lagrangiana; y por otra parte, que para la obtención del modelo dinámico inverso es preciso contar con la forma adaptada de las ecuaciones de Lagrange; las cuales son suministradas desde la fase de dinámica del robot al módulo de construcción de los modelos dinámicos directo e inverso. Continuando con la explicación del modelo de proceso de investigación y desarrollo, la fase de cinemática del robot genera referencias a las fases de dinámica y control del robot (Iñigo Madrigal y otro, 2004); y la fase de dinámica suministra insumos a la fase de control, para la realización del control dinámico (Spong y otro, 2006).

[2] Lo que se busca significar es la posibilidad de diseñar un controlador fiable que permita predecir en forma adecuada los momentos de torsión y fuerzas requeridas en las articulaciones; lo cual se espera origine que el extremo del robot pueda moverse a velocidades mayores.

[3] Otra formulación alternativa es la de Newton – Euler, que se sustenta en el planteamiento del equilibrio de fuerzas, mientras que la de Lagrange, se basa en el balance de energías. Se considera que este último es más sistemático que el primero, por lo que tiene mayor grado de consideración en la literatura.

ISBN 978-607-8242-11-5

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA PROPUESTO

La contextualización del problema que se aborda en el marco del proceso de investigación y desarrollo descripto en la figura 2, corresponde al módulo de construcción del modelo dinámico directo e inverso. De manera más precisa, se propone un proceso de obtención del modelo dinámico de un robot manipulador en base a la mecánica Lagrangiana, conforme a los insumos que el módulo de cinemática le suministra y los parámetros dinámicos. En este sentido, el presente trabajo parte de la premisa de que en un nivel de diseño preliminar, se han obtenido los modelos cinemáticos directo y el inverso. Es decir, se dispone de los parámetros dinámicos (masas, longitudes y momentos de inercia de eslabones), la matriz de transformación homogénea con la información de las coordenadas cartesianas del efector final en función de las variables articulares ($^0p_n(t)$ en función de q(t)[4]), respecto al sistema de referencia asociado a la base del robot. El producto de salida que se obtiene de este proceso, es un vector (τ) de fuerzas y momentos de torsión aplicados en los actuadores de las articulaciones para obtener determinadas trayectorias articulares (posición, velocidad y aceleración).
La figura 3 exhibe un esquema global con la entrada y la salida al módulo de construcción del modelo dinámico directo e inverso para la implementación de este proceso de obtención del modelo dinámico; teniendo en especial consideración, que en primer término se obtiene el vector τ en forma general conforme a la configuración del robot de que se trate (robot de dos grados de libertad para el caso de estudio en cuestión), para luego hallar el vector τ para las trayectorias articulares propuestas.

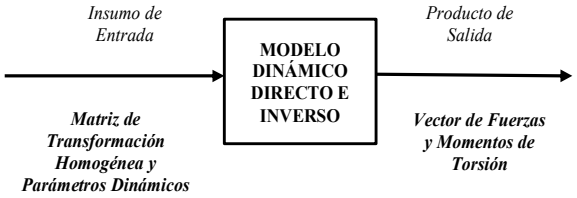


Figura 3: Insumo de entrada y Producto de salida al Módulo Dinámico Directo e Inverso para la implementación del proceso de obtención del modelo dinámico

A continuación, en los próximos dos epígrafes se analizan los aspectos centrales de las dos herramientas que actúan de soporte del proceso propuesto. A tal efecto es importante destacar, que ambas herramientas provienen del campo de la mecánica analítica, por lo que se intenta adaptar al análisis dinámico de un manipulador robótico.

Los aspectos fundamentales del Modelo Dinámico de un Robot Manipulador

Tal como se expuso precedentemente, el modelo dinámico exhibe de manera explícita los principales[5] fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del sistema – robot; tales como, fuerzas centrífugas y de Coriolis, efectos inerciales, par gravitacional y fenómenos de fricción (viscosa, Coulomb y estática).
La descripción matemática del modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad, está dada por la ecuación diferencial no lineal 1:

$$\tau(t) = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + F_f(\dot{q}, f_e) \quad (1)$$

Donde $\tau(t)$ es el vector de fuerzas o pares que se aplica a cada articulación, q ϵ Rn es el vector de posiciones articulares o coordenadas generalizadas[6], $\dot{q} \in R^n$ es el vector de velocidades articulares, $\ddot{q} \in R^n$ es el vector de aceleraciones articulares, $M(q) \in R^{nxn}$ es la matriz de inercia (representa el cambio de estado de movimiento del robot y es fundamental para el estudio de la estabilidad del sistema de control), $C(q,\dot{q}) \in R^{nxn}$ es la matriz de fuerzas centrípetas (fuerzas radiales en movimientos curvilíneos hacia adentro del centro de curvatura) y de Coriolis (esta fuerza representa la desviación del movimiento de traslación a raíz de su componente de rotación (Meriam y otro, 2016) y, al igual que la matriz M(q), también es vital en el estudio de la estabilidad del sistema de control del robot (Sciavicco y otro, 2005)), G(q) ϵ R_n es

[4] Cabe señalar que para la especificación de las trayectorias articulares, se usa en forma indistinta q(t) y Θ(t). De igual manera para sus derivadas.
[5] Otros fenómenos que pueden estar presentes tales como: fenómenos de dinámica caótica en algunas configuraciones; o la consideración de eslabones "no rígidos", donde se deben tener en cuenta las deformaciones, son otros de los fenómenos que pueden estar presentes en la estructura del modelo dinámico.
[6] Para estas coordenadas se destaca que pueden variar cada una físicamente independientemente de la otra.

ISBN 978-607-8242-11-5

el vector de pares gravitacionales (vector gradiente[7] de la energía potencial) y $F_f(\dot{q}, f_e) \in R^n$ es el vector de pares de fricción (viscosa, Coulomb y estática) de cada articulación del manipulador.
Es importante señalar, a modo de síntesis, que la expresión 1 es una ecuación diferencial compleja, multivariable con dinámica fuertemente acoplada y "no lineal" en el vector de estados $[q^T, \dot{q}^T]^T$; además de ser válida cuando el robot tiene una estructura en cadena cinemática abierta y que no incluye el fenómeno de elasticidad.

Las propiedades del Modelo Dinámico

El modelo dinámico posee algunas propiedades que son de fundamental importancia para el estudio de los sistemas de control de robots manipuladores; entre las cuales se destacan:

- *Efectos inerciales*: este efecto está representado por la matriz de inercia $M(q)\ddot{q}$, cuyo principal significado se manifiesta en el cambio de estado de movimiento del robot. A su vez, la matriz M $(q)_{nxn}$ (siendo n los grados de libertad del robot) es una matriz simétrica $M(q) = M(q)^T$, definida positiva M (q) > 0 y, por lo tanto, que admite inversa ($\exists M(q)^{-1}$).Los elementos de la matriz M dependen de las variables articulares y sus coeficientes son expresiones que incluyen las masas concentradas y las longitudes entre ellas.
- *Fuerzas Centrípetas y de Coriolis*: Esta matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis ($C(q,\dot{q})_{nxn}$) depende de q y $\dot{q}$ y puede no ser única; pero el vector $C(q,\dot{q})_{nxn} * \dot{q}_{nx1}$ si lo es.
  Las fuerzas centrípetas son radiales y se originan debido al movimiento de rotación; mientras que las fuerzas de Coriolis, se originan por el movimiento relativo existente entre los distintos elementos que dependen de la configuración instantánea del manipulador, y siempre contienen el producto de dos velocidades de articulación distintas.
- *Efecto gravitacional*: el vector de pares gravitacionales G (q) depende de las variables articulares q_i y contiene todos los términos donde aparece la constante gravitacional "g". Cabe señalar, que este vector se presenta en aquellos robots que, desde el punto de vista mecánico, no se diseñaron con compensación de pares de gravedad.
- *Efecto de fricción*: este fenómeno posee el efecto físico de oponerse al movimiento del robot. Un modelo clásico de fricción es el que combina la fricción viscosa y la de Coulomb, el cual depende de la velocidad de la variable articular y está dado por el vector $F_f(\dot{q}) = f_{m1}\dot{q} + f_{m2}\,sign(\dot{q})$. Donde f_{m1} y f_{m2} son matrices diagonales definidas positivas. Los elementos de la diagonal de f_{m1} son los parámetros de la fricción viscosa, y los de f_{m2} son los de la fricción de Coulomb. La característica disipativa de la fricción que convierte parte de la energía mecánica en energía térmica, se traduce en desgaste y envejecimiento de las partes mecánicas del sistema. En virtud de lo expuesto, es que resulta complejo modelar con exactitud los términos de la fricción.

Formulación Lagrangiana: sus aspectos fundamentales.

Una potente herramienta para el modelado de robots manipuladores la constituyen las ecuaciones de Lagrange. Esto se debe a que permiten describir la dinámica de un manipulador a partir de un balance de energía, la cual se expresa en términos de la energía cinética y potencial de sus eslabones.
Para realizar la formulación Lagrangiana, es preciso contar con las expresiones de la cinemática directa del manipulador, lo que brinda la posibilidad de llevar a cabo cuatro procedimientos de cálculo:

A) cálculo de la energía cinética ($\mathrm{K}(q(t), \dot{q}(t))$),

B) cálculo de la energía potencial ($U(q(t))$),

C) cálculo del Lagrangiano ($L = \mathrm{K}(q(t), \dot{q}(t)) - U(q(t))$)

D) formulación de las ecuaciones escalares dinámicas de movimiento de Lagrange (**(Reyes Cortés, 2011)**) para un robot manipulador de n grados de libertad (gdl); las cuales se desarrollan para cada uno

[7] El gradiente es un campo vectorial cuyas componentes son las derivadas parciales de primer orden de una función escalar.

ISBN 978-607-8242-11-5

de ellos (expresión 2), y donde el miembro $\tau - F_f(\dot{q}, f_e)$ se refiere a fuerzas o pares no conservativos en cada articulación.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_i}\right] - \frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_i} = \tau - F_f(\dot{q}, f_e) \quad i = 1,2,\ldots n \tag{2}$$

Proceso de obtención del Modelo Dinámico de un robot manipulador basado en la formulación de las ecuaciones de Lagrange

Conforme a la figura 2, y en el marco de la fase de *"Dinámica del Robot"*, se resalta el módulo del *"Modelo Dinámico Directo e Inverso"*, a partir del cual se implementa un proceso que permite obtener los pares de torsión a aplicar en cada articulación del manipulador, en función de la información proporcionada por la cinemática directa.

El proceso propuesto en el presente trabajo tiene como *"insumos de entrada"* los parámetros dinámicos (masas, longitudes y momentos de inercia de eslabones) la matriz de transformación homogénea suministrada por modelo cinemático directo, la cual posee toda la información referida a la posición y orientación cartesiana del extremo final del manipulador (por lo general con respecto a un sistema de referencia asociado a la base del robot), en términos de las variables articulares del mismo. En forma análoga, este proceso provee como *"producto de salida"* las fuerzas y pares de torsión que se deben aplicar en cada articulación, ajustados a las trayectorias articulares que se proponen. Con base en el escenario global propuesto en el esquema de figura 3, en la figura 4 se exhibe el núcleo de aplicación del proceso; el cual se conforma de **tres etapas** que se desarrollan en forma interconectada, a los efectos de obtener las correspondientes fuerzas y pares de torsión. La primera etapa se focaliza en realizar la *"Formulación Lagrangiana"* mediante los cuatro procedimientos ya citados. La segunda etapa consiste en la obtención de los pares de torsión $\tau = \tau(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t))$ en forma matricial; es decir, la obtención del modelo dinámico inverso en forma general de acuerdo a la configuración del robot manipulador que se plantea. Obtenido este modelo en su acepción general, para llevar a cabo la tercera etapa se necesita contar con trayectorias articulares a tal efecto $(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t))$. De esta forma, se calculan los pares de torsión que es preciso aplicar en las articulaciones del robot, para que el órgano terminal del robot respete dichas trayectorias.

Cabe señalar, que los resultados obtenidos constituyen importantes referencias hacia el módulo de control dinámico, siendo sustanciales en el diseño del sistema de control del robot.

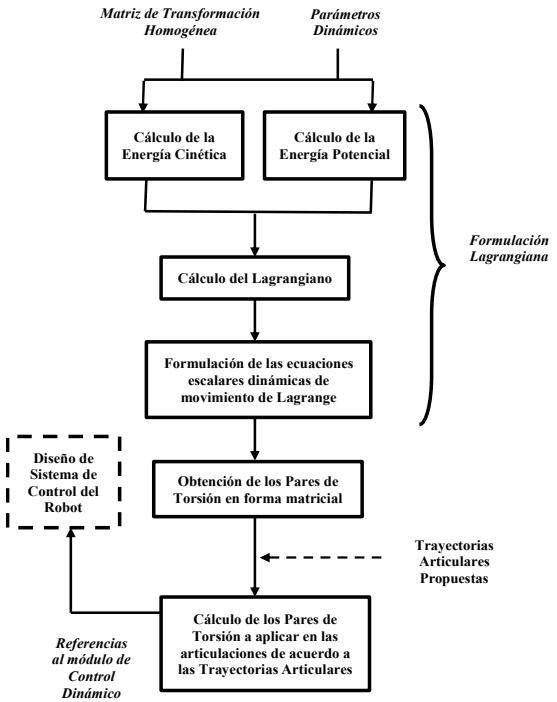


Figura 4: Proceso de obtención de los pares de torsión en las articulaciones de robots manipuladores en el marco del módulo de Modelo Dinámico Directo e Inverso

ISBN 978-607-8242-11-5

En la próxima sección se aborda un caso de estudio para un robot planar de dos grados de libertad, en el cual se implementan las tres etapas del proceso.

CASO DE ESTUDIO

La figura 5 ilustra un robot planar experimental de dos grados de libertad, con dos articulaciones rotacionales y dos eslabones rígidos. Tal como lo muestra la figura 4, los insumos de entrada se corresponden con los parámetros dinámicos del robot y su matriz de transformación homogénea respecto al sistema de referencia asociado a la base del robot. Sus parámetros dinámicos son: longitudes de eslabones (l_1 y l_2), masas de eslabones (m_1 y m_2), las distancias entre los centros de masas (CM) y los ejes de giro (l_{c1} y l_{c2}) y los momentos de inercia de cada eslabón con respecto al eje que pasa por su centro de masa (J_1 e J_2). La matriz de transformación homogénea es:

$$ {}^{0}T_{2} = \begin{pmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1c_1 + l_2c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1c_1 + l_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} $$

En esta matriz[8], la última columna indica las componentes (x, y) del vector posición del extremo del robot, respecto al sistema de referencia asociado a la base $S_0(X_0, Y_0)$.

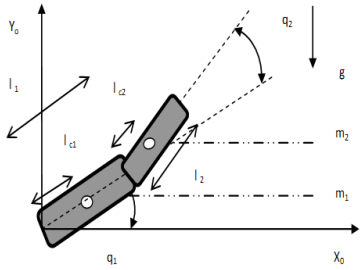


Figura 5: Robot planar de dos grados de libertad

Con los parámetros dinámicos y la matriz de transformación homogénea, se implementa el proceso de obtención de los pares de torsión en las articulaciones del robot manipulador de dos (gdl).

Primera Etapa: *Formulación Lagrangiana.*

Por medio de la aplicación de los cuatro procedimientos (A, B, C y D) ya citados, se obtienen las ecuaciones escalares dinámicas de movimiento de Lagrange.

A) Cálculo de la Energía Cinética ($K(q(t), \dot{q}(t))$): la energía cinética total del robot es la suma de la energía almacenada en cada eslabón ($K_{Total} = K_1 + K_2$); para cada uno, la contribución a la energía cinética total está dada por la porción de energía que aporta la velocidad de traslación del centro de masa, más la aportada por la velocidad de rotación en torno al CM. De la cinemática diferencial se obtiene las coordenadas y velocidades del CM de cada eslabón. Para el eslabón 1: $x_1 = l_{c1}C_1$[9], $y_1 = l_{c1}S_1$; luego: $v_1 = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1}C_1\,\dot{q}_1 \\ l_{c1}S_1\,\dot{q}_1 \end{bmatrix}$, siendo el cuadrado de la velocidad del CM_1 es $v_1^T v_1 =$ $\begin{bmatrix} l_{c1}C_1\,\dot{q}_1 & l_{c1}S_1\,\dot{q}_1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} l_{c1}C_1\,\dot{q}_1 \\ l_{c1}S_1\,\dot{q}_1 \end{bmatrix} = l_{c1}^2\,\dot{q}_1^2$. La energía cinética total del eslabón 1 (K_1) se calcula sumando las contribuciones de la energía cinética de traslación (K_{1T}) y de rotación (K_{1R}). Por lo tanto, la energía cinética del eslabón 1 se calcula:

[8] Considere las siguientes abreviaturas cos (q_1) = C_1, cos (q_2) = C_2, cos ($q_1 + q_2$) = C_{12}, sen (q_1) = S_1 & sen ($q_1 + q_2$) = S_{12}
[9] Considere las siguientes abreviaturas cos (q_1) = C_1, cos (q_2) = C_2, cos ($q_1 + q_2$) = C_{12}, sen (q_1) = S_1 & sen ($q_1 + q_2$) = S_{12}

ISBN 978-607-8242-11-5

$$K_1(q,\dot{q}) = K_{1T} + K_{1R} = \frac{1}{2}m_1 v_1^T v_1 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 = \frac{1}{2}m_1 l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 \quad (3)$$

Para el eslabón 2 se tiene: $x_2 = l_1C_1 + l_{c2}\,C_{12}$, $y_2 = l_1S_1 + l_{c2}S_{12}$. Derivando respecto al tiempo, efectuando $v_2^T v_2$, y considerando que el efecto de la energía cinética rotacional está dado por la suma de las velocidades $(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$, la energía cinética total del eslabón 2 (K_2) se calcula sumando las contribuciones de la energía cinética de traslación (K_{2T}) y de rotación (K_{2R}). Por lo tanto, la energía cinética del eslabón 2 se calcula:

$$K_2(q,\dot{q}) = K_{2T} + K_{2R} = \frac{1}{2}m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2$$

Desarrollando esta expresión:

$$K_2(q,\dot{q}) = \frac{m_2}{2}l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_{c2}^2\left(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2\right) + m_2 l_1 l_{c2}\left(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2\right)C_2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \quad (4)$$

La energía cinética total del robot reemplazando 3) y 4) en $K_{Total} = K_1 + K_2$ obteniéndose:

$$K_{Total}(q,\dot{q}) = \frac{1}{2}m_1 l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_{c2}^2\left(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2\right) + m_2 l_1 l_{c2}\left(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2\right)C_2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \quad (5)$$

B) Cálculo de la Energía Potencial ($U(q(t))$): la energía potencial total del robot es la suma de la energía almacenada en cada eslabón. Esto es:
($U_{Total} = U_1 + U_2 = m_1 g l_{c1} S_1 + m_2 g\,(l_1 S_1 + l_{c2} S_{12})$ (6)

C) Cálculo del Lagrangiano ($L = \mathrm{K}_{Total}(q(t),\dot{q}(t)) - U_{Total}(q(t))$ 7): la forma de calcular el lagrangiano del robot manipulador es realizando la diferencia entre la energía cinética total y la energía potencial gravitatoria total. Por consiguiente, sustituyendo 5) – 6) en 7) se tiene:

$$L(q,\dot{q}) = \frac{1}{2}m_1 l_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_1^2\dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2}l_{c2}^2\left(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2\right) + m_2 l_1 l_{c2}\left(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2\right)C_2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 - m_1 g l_{c1} S_1 - m_2 g(l_1 S_1 + l_{c2} S_{12}) \quad (7)$$

D) Formulación de las ecuaciones escalares dinámicas de movimiento de Lagrange, aplicando la ecuación (2) para cada (gdl) del robot, o cada coordenada generalizada q_1 y q_2)[10]:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_i}\right] - \frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_i} = \tau - F_f(\dot{q}, f_e) \quad i = 1,2,\ldots n \quad (2)$$

Se obtienen las cuatro expresiones (8, 9, 10 y 11) derivando L respecto a la posición y velocidad articular de cada coordenada generalizada:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_1}\right] = \left[m_1 l_{c1}^2 + J_1 + J_2 + m_2\left(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2}C_2\right)\right]\ddot{q}_1 - \left[m_2 l_{c2}(l_1 C_2 + l_{c2}) + J_2\right]\ddot{q}_2 - \left[2m_2 l_1 l_{c2} S_2\right]\dot{q}_1\dot{q}_2 - \left[m_2 l_1 l_{c2} S_2\right]\dot{q}_2^2 \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_2}\right] = \left[m_2 l_{c2}^2 + J_2\right]\ddot{q}_2 + \left[m_2 l_{c2}(l_1 C_2 + l_{c2}) + J_2\right]\ddot{q}_1 - \left[m_2 l_1 l_{c2} S_2\right]\dot{q}_1\dot{q}_2 \quad (9)$$

$$\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_1} = -g\left[\left(m_1 l_{c1} + m_2 l_1\right)C_1 + m_2 l_{c2} C_{12}\right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_2} = -\left[m_2 l_1 l_{c2} S_2\right]\dot{q}_1^2 - \left[m_2 l_1 l_{c2} S_2\right]\dot{q}_1\dot{q}_2 - g m_2 l_{c2} C_{12} \quad (11)$$

Segunda Etapa: *Obtención de los pares de torsión en forma matricial.*

Se aplica la ecuación 2) para las coordenadas articulares 1 y 2, obteniéndose el par 1 y 2. Para obtener estos pares, se opera de esta manera con las ecuaciones (8), (9), (10) y (11):

[10] Obsérvese que se omite para este análisis los fenómenos de fricción (viscosa, Coulomb y estática) de cada articulación.

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\tau_1 = (8) - (10) \quad \& \quad \tau_2 = (9) - (11)$$

Estos son los pares de torsión que actúan en las articulaciones 1 y 2; que expresados en forma matricial y donde por simplicidad para el análisis se omiten los momentos de inercia J_1 y J_2, adoptan la forma de la expresión 12:

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2\left(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2\right) & m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right) \\ m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right) & \left(m_2 l_{c2}^2\right)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{q}_1\\ \ddot{q}_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} -2 m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{q}_2 \\ m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{q}_1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} g\left[\left(m_1 l_{c1} C_1 + m_2\left(l_1 C_1 + l_{c2} C_{12}\right)\right)\right] \\ g m_2 l_{c2} C_{12}\end{bmatrix} \qquad (12)$$

Si se efectúa el producto matricial en 12; y se expresa cada par de torsión por separado, se arriba a las expresiones 13 y 14:

$$\tau_1 = \left[m_1 l_{c1}^2 + m_2\left(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2\right)\right]\ddot{q}_1 + \left[m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right)\right]\ddot{q}_2 - \left(2 m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_1 \dot{q}_2 - \left(m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_2^2 + g\left[\left(m_1 l_{c1} C_1 + m_2\left(l_1 C_1 + l_{c2} C_{12}\right)\right)\right] \qquad (13)$$

$$\tau_2 = \left[m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right)\right]\ddot{q}_1 + \left(m_2 l_{c2}^2\right)\ddot{q}_2 + \left(m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_1^2 + g\, m_2 l_{c2} C_{12} \qquad (14)$$

Tercera Etapa: *Cálculo de los pares de torsión a aplicar en las articulaciones de acuerdo a las Trayectorias Articulares.*

Para realizar esta tercera etapa se necesita contar con determinadas trayectorias articulares, como: $(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t))$. De esta forma, se calculan los pares de torsión que es preciso aplicar en las articulaciones del robot, para que el órgano terminal del robot respete dichas trayectorias. Estos resultados son sustanciales referencias hacia el módulo de control dinámico, siendo vitales en el diseño del sistema de control del robot.

A modo ilustrativo, se planten dos casos experimentales en el contexto del presente caso de estudio siendo los parámetros dinámicos del robot manipulador de la figura 5: $m_1 = m_2 = 10$kg, $l_1 = l_2 = 1$m, $l_{c1} = l_{c2} = 0{,}5$m, g = 10m/seg^2 (no se consideran J_1 y J_2).

Caso 1: se adopta un lapso de tiempo que va de 0 a 200 segundos, donde la variable articular q_1 se mueve a una velocidad constante de 0,0157rad/seg y q_2 permanece nulo. A la luz de esta información, se observa que el brazo completo del manipulador conformado por ambos eslabones permanece estirado durante los 200 segundos que dura el movimiento, y donde solo varía q_1. En la figura 6 se ve la evolución temporal de la variable articular q_1; mientras que q_2 es nula en todo el intervalo, al igual que su velocidad y aceleración.

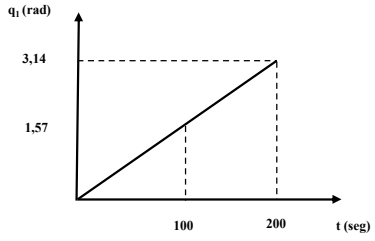


Figura 6: Evolución temporal de la variable articular q_1

Se tienen las siguientes expresiones:

$$q_1(t) = 0{,}0157\, {}^{rad}\!/_{seg} * t \quad \dot{q}_1(t) = 0{,}0157\, {}^{rad}\!/_{seg}$$

$$\ddot{q}_1 = 0 \; y \; q_2 = \dot{q}_2 = \ddot{q}_2 = 0$$

Sustituyendo estos valores y los de los parámetros dinámicos en las expresiones 13 y 14 para los pares de torsión que se deben aplicar en las articulaciones 1 y 2, se tiene:

$$\tau_1 = 200\, {}^{N}\!/_{m} * \cos\left(0{,}0157\, {}^{rad}\!/_{seg} * t\right) \qquad (15)$$

 ISBN 978-607-8242-11-5

$$\tau_2 = 50\ {}^{N}\!/_{m} * \cos\left(0{,}0157\ {}^{rad}\!/_{seg} * t\right) \quad (16)$$

En la figura 7 se muestran las gráficas de 15 y 16.

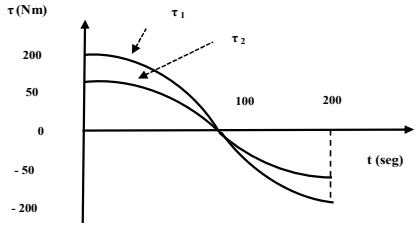


Figura 7: Evolución temporal de los pares de torsión τ_1 y τ_2

Cabe señalar que de acuerdo a las ecuaciones 15 y 16, ambas articulaciones proveen pares de torsión para contrarrestar el efecto gravitatorio de ambos eslabones (solo se mantienen los términos de $\cos(q_1)$). Por lo tanto, la forma de estas ecuaciones se debe a que no contribuyen los siguientes términos: los correspondientes a los efectos inerciales (las dos aceleraciones articulares son nulas), el término de Coriolis (una velocidad articular es nula) y los términos de las fuerzas centrípetas (el brazo 2 está siempre estirado, siendo $\text{sen}(q_2=0)$ y es nula la velocidad articular 2.
Un breve análisis de la situación física real, en sintonía con el gráfico de figura 7 indica que: en t = 0seg es $q_1 = q_2 = 0^o$ (ambos brazos estirados en forma horizontal, figura 8), $\tau_1 = 200$Nm y $\tau_2 = 50$Nm (requiriendo ambas articulaciones par de torsión máximo en este instante). En t = 100seg es $q_1 = q_2 = 90^o$ ($\pi/2$) (ambos brazos estirados en forma vertical, figura 9), $\tau_1 = \tau_2 = 0$Nm (en este instante el par de torsión es nulo en ambas articulaciones. Si continúan aumentando las variables articulares pasados los 90º hasta los 180º en t = 200seg, ambos pares vuelven a crecer en su valor pero con signo contrario. Esto se debe a que ambos brazos tienden a caer por efecto gravitatorio; y debe graduar esa "caída" mediante los pares aplicados en las articulaciones para que el manipulador "baje" conforme a la trayectoria propuesta. Es decir, en t = 200seg es $q_1 = q_2 = 180^o$ (π) (ambos brazos estirados en forma horizontal, figura 10), $\tau_1 = -200$Nm y $\tau_2 = -50$Nm (requiriendo ambas articulaciones par máximo en este instante).

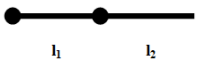


Figura 8: Posición del Manipulador en t = 0seg ($q_1 = q_2 = 0^o$, $\tau_1 = 200$Nm y $\tau_2 = 50$Nm)

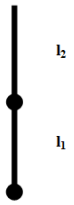


Figura 9: Posición del Manipulador en t = 100sg (q1 = q2 = 90º, τ1 = 0Nm y τ2 = 0Nm)



Figura 10: Posición del Manipulador en t = 200seg (q1 = q2 = 180º, τ1 = -200Nm y τ2 = -50Nm)

Por otra parte y tal como se observa en figura 7, el par τ_2 que requiere la articulación 2 es en todo instante menor que el par τ_1 que requiere la articulación 1; habida cuenta de que esta última, tiene que contener el doble de masa a mayor longitud. Es notable destacar, que debe existir un par de torsión τ_2 no nulo en la articulación 2; en caso contrario, el eslabón 2 se caería y estaría en posición casi vertical en todo el movimiento.

ISBN 978-607-8242-11-5

Caso 2: se adopta un lapso de tiempo que va de 0 a 200 segundos, donde la variable articular q_2 se mueve a una velocidad constante de 0,0157rad/seg y q_1 permanece nulo. A la luz de esta información, se observa que el eslabón 1 permanece estirado durante los 200 segundos que dura el movimiento, y donde solo varía q_2. En la figura 11 se ve la evolución temporal de la variable articular q_2; mientras que q_1 es nula en todo el intervalo, al igual que su velocidad y aceleración.

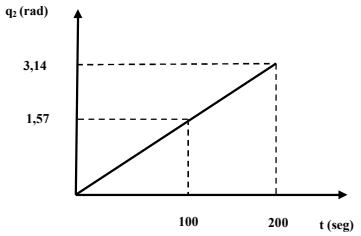


Figura 11: Evolución temporal de la variable articular q2

Se tienen las siguientes expresiones:

$$q_2(t) = 0{,}0157 \, {}^{rad}\!/_{seg} * t \quad \dot{q}_2(t) = 0{,}0157 \, {}^{rad}\!/_{seg}$$

$$\ddot{q}_2 = 0 \; y \; q_1 = \dot{q}_1 = \ddot{q}_1 = 0$$

Sustituyendo estos valores y los de los parámetros dinámicos en las expresiones 13 y 14 para los pares de torsión que se deben aplicar en las articulaciones 1 y 2, se tiene:

$$\tau_1 = 150Nm + 50 \, {}^{N}\!/_{m} * \cos\left(0{,}0157 \, {}^{rad}\!/_{seg} * t\right) - 0{,}00123Nm * sen\left(0{,}0157 \, {}^{rad}\!/_{seg} * t\right) \quad (17)$$

$$\tau_2 = 50 \, {}^{N}\!/_{m} * \cos\left(0{,}0157 \, {}^{rad}\!/_{seg} * t\right) \quad (18)$$

En la figura 12 se muestran las gráficas de 17 y 18; debiendo señalar que se desprecia el efecto de la fuerza centrípeta de m_2 (coeficiente 0,00123 en 17) como contribución al par τ_1 sobre la articulación 1.

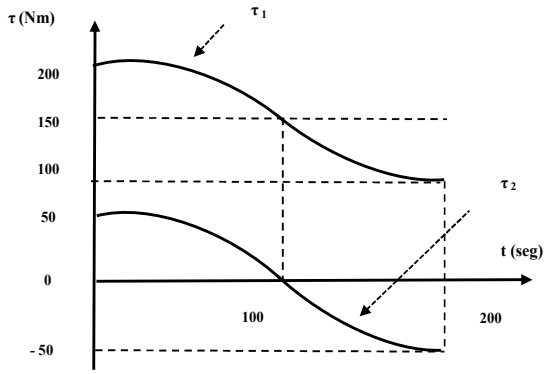


Figura 12: Evolución temporal de los pares de torsión τ1 y τ2

En función de las ecuaciones 17 y 18, aquí también se da que ambas articulaciones proveen pares de torsión para contrarrestar el efecto gravitatorio de ambos eslabones; con la salvedad que existe el término de la fuerza centrípeta de m_2 sobre la articulación 1, pero es despreciable frente a los otros valores. También se anula el término de Coriolis por las mismas razones; y como $q_1 = 0$, se origina un término independiente de 150Nm en la ecuación 17 para τ_1. Este hecho modifica sustancialmente la situación con respecto al caso anterior, en virtud de que no se anula el par τ_1 en ningún instante, según el siguiente estudio.

Un breve análisis de la situación física real, en sintonía con el gráfico de figura 12 indica que: en t = 0seg es $q_1 = q_2 = 0^o$ (ambos brazos estirados en forma horizontal, figura 13), $\tau_1 = 200$Nm y $\tau_2 = 50$Nm (requiriendo

 ISBN 978-607-8242-11-5

ambas articulaciones par de torsión máximo en este instante). Es decir que para este instante la situación es igual al caso anterior. En t = 100seg es q_1 = 0º y q_2 = 90º (π/2) (situación que se ilustra en la figura 14); aquí τ_1 = 150Nm y τ_2 = 0Nm. En este instante la articulación 1 requiere un par de 100Nm ejercido por el peso del eslabón 2 en posición vertical (se redujo en 50Nm con respecto al caso anterior porque se acortó el brazo de palanca en 0,5m con respecto a cuándo éste está estirado), más el otro par de 50Nm proveniente del peso del eslabón 1. Si el eslabón 2 continúa girando respecto a la vertical y la variable articula supera los 90º hasta llegar a los 180º en t = 200seg, permaneciendo siempre el eslabón 1 en posición horizontal, será q_1 = 0º, q_2 = 180º (π) (el brazo 2 doblado sobre el 1 en forma horizontal, figura 15), τ_1 = 100Nm (valor mínimo que adopta el par τ_1 sobre la articulación 1) y τ_2 = -50Nm. Desde el punto de vista físico, el valor del par τ_1 se compone de 50 Nm que aporta el peso del eslabón 1 (que siempre transmite par de torsión a la articulación 1 porque permanece en posición horizontal los 200 segundos), más los otros 50 Nm que aporta el eslabón 2 (también en posición horizontal para este instante de 200 segundos). En la ecuación 17 se llega a este resultado porque el factor cos(0,0157 rad/seg · t) es -1 para t = 200 segundos. Para el par de torsión sobre la articulación 2, se llega al valor de τ_2 = -50Nm, dado que al invertirse la posición del eslabón 2 (como se ve en figura 15), el par de torsión mantiene su valor pero ahora la articulación 2 debe reaccionar con un par en sentido contrario (antihorario) al primer caso en donde q_2 = 0.

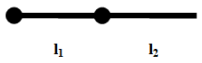


Figura 13: Posición del Manipulador en t = 0seg (q1 = q2 = 0º, τ1 = 200Nm y τ2 = 50Nm)

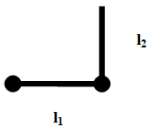


Figura 14: Posición del Manipulador en t = 100seg (q1 = 0º, q2 = 90º, τ1 = 150Nm y τ2 = 0Nm)

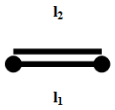


Figura 15: Posición del Manipulador en t = 200seg (q1 = 0º, q2 = 180º, τ1 = 100Nm y τ2 = -50Nm)

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el presente caso de estudio se obtuvieron en base a la implementación de las tres etapas que conforman el proceso de obtención del modelo dinámico de un robot manipulador de dos grados de libertad; con dos articulaciones rotacionales y dos eslabones rígidos, en base a la formulación Lagrangiana. Mediante este enfoque, se describe la dinámica del manipulador en base a efectuar un balance de la energía cinética y potencial de sus eslabones. De esta forma, el modelo que se obtiene permite analizar los fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del robot: *"Efectos Inerciales"* – *"Fuerzas Centrípetas y de Coriolis"* – *"Par Gravitacional" y "Fricción"* (no se tuvo en cuenta para este caso de estudio). En este sentido, el primer resultado de interés que se obtuvo fueron las ecuaciones de Lagrange 13 y 14 para el manipulador de dos grados de libertad del caso estudiado, y que se transcriben a continuación.

$$\tau_1 = \left[m_1 l_{c1}^2 + m_2\left(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2\right)\right]\ddot{q}_1 + \left[m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right)\right]\ddot{q}_2 - \left(2 m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_1 \dot{q}_2 - \left(m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_2^2 + g\left[\left(m_1 l_{c1} C_1 + m_2\left(l_1 C_1 + l_{c2} C_{12}\right)\right)\right] \quad (13)$$

$$\tau_2 = \left[m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right)\right]\ddot{q}_1 + \left(m_2 l_{c2}^2\right)\ddot{q}_2 + \left(m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_1^2 + g\, m_2 l_{c2} C_{12} \quad (14)$$

En ambas ecuaciones los términos inerciales son los que contienen $\ddot{q}_1$ y $\ddot{q}_2$; y los factores entre corchetes, son los que contribuyen en cada par de torsión mediante la inercia rotacional (recordar que no se tienen en cuenta los momentos de inercia respecto al centro de masa de cada eslabón J_1 y J_2, considerándose toda la masa concentrada en el centro de masa de cada eslabón (CM_1 y CM_2), lo que origina que la longitud del eslabón 2 (l_2) no influya en las ecuaciones 13 y 14 del modelo dinámico). En base

ISBN 978-607-8242-11-5

a este detalle y a modo ilustrativo, se discuten las distintas contribuciones al par τ_1, de los efectos inerciales y de Coriolis. La contribución del efecto inercial vinculada a $\ddot{q}_1$ está dada por los momentos de inercia de las masas m_1 y m_2 respecto a la articulación 1: ($m_1 l_{c1}^2$ y $m_2(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2)$). El primer término ($m_1 l_{c1}^2$) es el momento de inercia de m_1 respecto a la articulación 1 (A_1), y $m_2(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2)$ se refiere al momento de inercia de m_2 respecto a A_1. Este último paréntesis refleja el cuadrado de la distancia (D^2) desde el CM_2 a A_1, aplicando el teorema del coseno. Se muestra en la figura 16.

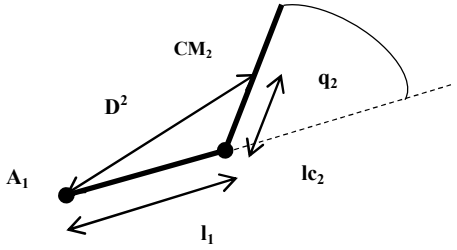


Figura 16: Posición de los eslabones para ver el momento de inercia de m_2 respecto a A_1 ($D^2 = l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2$)

La contribución del efecto inercial vinculada a $\ddot{q}_2$ está dada por la expresión $m_2 l_{c2}(l_1 C_2 + l_{c2})\ \ddot{q}_2$. Esta ecuación se puede analizar de la siguiente forma: el producto $m_2 l_{c2} \ddot{q}_2$ es como una fuerza tangencial (F_{t2}) aplicada en el CM_2 por el efecto de de $\ddot{q}_2$. El paréntesis ($l_1 C_2 + l_{c2}$) es la distancia desde el CM_2 medida perpendicularmente hasta A_1. El producto de F_t por esta distancia es la contribución al par de torsión τ_1 sobre A_1 por efecto de $\ddot{q}_2$. En la figura 17 se ve este hecho.

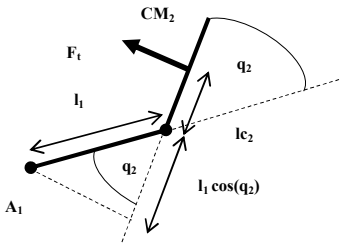


Figura 17: Contribución del efecto de $\ddot{q}_2$ al par de torsión τ_1 manifestado por el momento de la F_t respecto a A_1

También se ve que los factores ($m_1 l_{c1}^2$ y $m_2(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2)$) y $m_2 l_{c2}(l_1 C_2 + l_{c2})$ varían en el tiempo a causa de la variable articular q_2 (en especial, del cos (q_2) = C_2). De este hecho se infiere que: conforme transcurre el tiempo crece q_2, decrece C_2 y también los factores mencionados; haciendo que baje la contribución del efecto inercial sobre τ_1, necesitando menos par de torsión.
Se ve físicamente que a medida que aumenta q_2, disminuye la distancia D^2, y por ende, el momento de inercia de la masa m_2 respecto a A_1.
El efecto de Coriolis contribuye solamente al par τ_1 tal como se ve en las ecuaciones 13 y 14; que se origina por el movimiento relativo existente entre los eslabones 1 y 2, que está dado por – ($2m_2 l_1 l_{c2} S_2$) $\dot{q}_1 \dot{q}_2$. La expresión de la fuerza Coriolis en mecánica analítica es ($F_{cor} = m_2 a_{cor}$), donde la aceleración de Coriolis es: $a_{Cor} = 2\dot{q}_1 \wedge v_{rel}$. Es un producto vectorial entre estos dos vectores perpendiculares, donde $\dot{q}_1$ sale perpendicular al plano y v_{rel} es la velocidad relativa vista desde un sistema de referencia asociado a la articulación 2 (A_2) por efecto de $\dot{q}_2$, aplicada en el CM_2, perpendicular al eslabón 2 y en el plano del robot. Su valor es: $v_{rel} = \dot{q}_2 l_{c2}$ y la F_{cor} está sobre el eslabón 2 hacia A_2 y es: $F_{Cor} = 2m_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 l_{c2}$. Su

 ISBN 978-607-8242-11-5

contribución a τ_1: $\tau_{Cor} = -2m_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 l_{c2} l_1 S_2$. El factor $l_1 S_2$ es el brazo de palanca respecto a A_1, y el signo (–) indica que el par con que contribuye el efecto de Coriolis al par τ_1 es antihorario y tiende a equilibrar las contribuciones inerciales (figura 18).

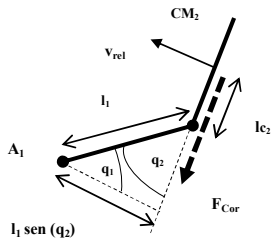


Figura 18: Contribución del efecto del efecto de Coriolis al par de torsión τ_1 que se da por el momento de la F_{Cor} respecto a A_1

La discusión de los casos experimentales 1 y 2, fueron realizados en conjunto con sus desarrollos.

CONCLUSIONES

Se extraen las siguientes conclusiones de esta propuesta: 1) el problema analizado en este trabajo, se enmarca en el modelo de proceso de investigación y desarrollo de la figura 2; y más precisamente, en el marco de desarrollo del módulo de modelo dinámico directo e inverso. 2) se implementa un proceso de obtención del modelo dinámico de un robot manipulador en base a la formulación Lagrangiana y conformado de tres etapas que se desarrollan en forma interconectada. 3) este proceso se nutre con la matriz de transformación homogénea y los parámetros dinámicos del robot, y proporciona como salida las fuerzas y pares de torsión que se deben aplicar en cada articulación, de acuerdo a las trayectorias articulares que se proponen. 4) se describe un caso de estudio de un robot manipulador de dos grados de libertad con dos articulaciones rotacionales, y se obtiene su modelo dinámico inverso aplicando el proceso, y se analizan en detalle dos casos experimentales. 5) se presenta una discusión de estos resultados en base al análisis de los efectos inerciales y de Coriolis sobre el principal par de torsión aplicado en la articulación A_1. 6) La formulación de Lagrange tiene la ventaja de que no intervienen las fuerzas de ligadura, dado que hace uso de balance de energía; pero tiene la desventaja de no ser eficiente computacionalmente, dado que el algoritmo es de un orden de complejidad O(n4); es decir, la cantidad de operaciones que realiza crece con la potencia cuarta del número de gdl.

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

De acuerdo a todo lo expuesto, se está trabajando en las siguientes líneas de investigación:

I) Análisis de la dinámica de los sistemas de trasmisión, actuadores y equipos electrónicos.
II) Probar el modelo analítico obtenido en banco experimental donde los eslabones, actuadores y sistemas de trasmisión se construyen en el laboratorio de nuestra facultad.
III) Diseño y evaluación del sistema de control dinámico del robot haciendo uso de los pares de torsión obtenidos como entrada al sistema; de esta forma, el algoritmo de control debe llevar en forma asintótica a cero el vector de error de posicionamiento ($q_{error} = q_{deseada} - q_{actual}$).
IV) Probar otras trayectorias articulares más complejas y analizar los efectos de acoplamiento de los ejes de las articulaciones.
V) Determinación de los valores de parámetros dinámicos del robot (momentos de inercia, centros de masa y coeficientes de fricción), mediante técnicas de identificación paramétrica, tales como modelos de regresión.
VI) Introducción de fricciones viscosas en las articulaciones, y medir la respuesta del sistema en condiciones similares a los casos experimentales estudiados.

Referencias

Barrientos, Antonio; Peñín, Luis Felipe; Balaguer Carlos y Aracil Rafael. “Fundamentos de Robótica”. Editorial McGraw – Hill. Madrid – España, 2007.

Craig, J. J, “Introduction to Robotics”. Ed. Addison Wesley, Reading, MA, 1989.

Iñigo Madrigal, R. & Vidal Idiarte, E., “Robots industriales manipuladores”. Ed. Alfaomega, México, 2004.

Kelly, R. & Santibáñez, V., “Control de Movimiento de Robots Manipuladores”. Ed. Prentice Hall – México, 2003.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Meriam, J. L. & Kraige, L. G., “Engineering Mechanics Dynamics”. Ed. John Wiley & Sons, Inc, 7th Edition. 2016.

Ollero Baturone, A., “Robótica Manipuladores y robots móviles”. Ed. Alfaomega, España, 2007.

Reyes Cortés, F., “Robótica – Control de Robots Manipuladores”. Ed. Alfaomega, México, 2011.

Sciavicco, L. & Siciliano, B., “Modelling and control of robot manipulators”. Ed. Springer, 2005.

Spong, M. & Hutchinson, S. “Robot Modeling and Control”. Ed. John Wiley & Sons, 2006.

Torres, F., Pomares, J., Gil, P., Puente, S. & Aracil, R., “Robots y Sistemas Sensoriales”. Ed. Prentice Hall – España, 2002.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Propuesta del Concepto del "Típico": Una alternativa para la Enseñanza de la Nomenclatura en Química Básica y Fundamental en Ingenierías

Luis F. Montoya[1], Edison Durango[1], Juan C. Oviedo Lopera[2] y Paula A. Gutierrez[1]
(1) Centro de Ciencia Básica, Esc. Ingenierías, Univ. Pont. Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
(2) Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Univ. Pont. Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
E-mail: juan.oviedo@upb.edu.co

Resumen

Este artículo pretende evidenciar una propuesta didáctica para mejorar los procesos de enseñanza - aprendizaje de la química específicamente en lo concerniente a la nomenclatura inorgánica y evitar procesos memorísticos, logrando un mayor alcance en la sistematización de la nomenclatura tradicional y por ende un aprendizaje más significativo.

Para nadie es un misterio que contadas y afortunadas excepciones los docentes de Química deben usar exageradamente procesos memorísticos para llegar a un aprendizaje de la nomenclatura específicamente con los iones y quienes no desean que sus alumnos los memoricen les permiten sacar la tabla de iones para sus evaluaciones, con la realidad de que no siempre en otras situaciones cotidianas van a tener dicha tabla con ellos, la propuesta del típico favorece que el alumno analíticamente llegue al nombre correcto de los diferentes compuestos sin uso excesivo de la memoria y sin llevar siempre a mano la lista de iones.

Para una mayor comprensión se mostrará con ejemplos como desde la fórmula química se puede deducir el nombre pero también como desde el nombre se llega al nombre adecuado usando el concepto de típico.

Concept proposal "Tipico": An alternative for the Teaching of Nomenclature in Basic and Fundamental Chemistry in Engineering

Abstract

This article aims to demonstrate a didactic proposal to improve the teaching - learning processes of chemistry specifically with regard to inorganic nomenclature and to avoid memory processes, achieving a greater scope in the systematization of the traditional nomenclature and therefore a more meaningful learning.

For no one is a mystery that counted and fortunate exceptions teachers of chemistry should use exaggerated memory processes to reach a nomenclature learning specifically with ions and those who do not want their students memorize them allow them to remove the ion table for their evaluations, with the reality that not always in other everyday situations will have such a table with them, the proposal of the typical favors that the student analytically reaches the correct name of the different compounds without excessive use of memory and without always carrying the list by hand of ions.

For a greater understanding will be shown with examples as from the chemical formula you can deduce the name but also as from the name you get to the appropriate name using the concept of Típico.

Keywords: Típico, Nomenclature, didactics of chemistry, general formula.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La química es una ciencia que se encarga de estudiar la estructura, propiedades y reacciones que tiene la materia, lo que la convierte en una ciencia central. Lo anterior, sobrelleva a que se encuentra en la mayoría de los programas de las ingenierías en Colombia y otros países de Latinoamérica, inclusive en ingenierías que no tienen especialidades químicas como civil, eléctrica entre otras (Seijo, Peón y Varela, 2015)

El estudio y la enseñanza de la química durante mucho tiempo estuvo reducido a una minoría de investigadores, quienes tenían como objetivo final analizar las sustancias y estudiar sus propiedades; con el pasar del tiempo y encontrar que interviene en todas las facetas de la vida cotidiana, se fue introduciendo en otras áreas del conocimiento, como la ingeniería (Mondeja y Zumalacárregui, 2009).

La química tiene un lenguaje muy especializado, proveniente de la acumulación de conocimientos y conceptos que se han recolectado a lo largo de su historia, gracias a científicos prominentes y para comprenderlos se requiere de gran preparación (Mondeja y Zumalacárregui, 2009).

Se ha encontrado que los estudiantes de los primeros años de los programas de ingeniería, ven compleja y difícil la química tanto en la teoría como en la práctica, por lo que deben buscarse estrategias de enseñanza para que los futuros profesionales, sean ingenieros idóneos, capaces de desenvolverse en el sistema productivo del mundo actual (Sandoval, Mandolesi y Cura, 2013)

Por lo general, dentro de los contenidos de química básica o fundamentos de química, existe un común denominador el tema de nomenclatura. La nomenclatura, es el sistema utilizado para nombrar las sustancias, termino derivado de las palabras latinas *nomen* (nombre) y *clare* (llamar). De forma general, se podría hablar de nomenclatura para compuestos inorgánicos y orgánicos (Brown, Theodore; LeMay Jr., Eugene, Woodward, Patrick, 2014), sin embargo es una clasificación muy amplia; adicionalmente, el alcance de éste trabajo corresponde a la nomenclatura de compuestos inorgánicos. Existen varias formas de enseñar el tema de nomenclatura inorgánica: la sistemática (o moderna), la Stoke y la tradicional. La nomenclatura tradicional, es frecuentemente enseñada en ingenierías y es además ampliamente empleada en la industria, sin embargo, específicamente en la enseñanza de la nomenclatura, en algunos textos clásicos se plantea como una colección de casos particulares, en los que en algunas ocasiones su aplicación lleva a errores (Montoya, 2007).

Uno de los grandes retos de la enseñanza de la química, es poder encontrar nuevas didácticas para los diferentes temas del contenido de los fundamentos en química, con el ánimo de disminuir la deserción y mejorar la formación profesional de los futuros ingenieros; adicionalmente, estudios muestran que tanto las ingenierías como en general las ciencias, no son del interés de los futuros estudiantes universitarios (Solbes, Monserrat, y Furió, 2007; Valle y Zamora, 2012); de acuerdo a lo anterior, el ingeniero Luis Fernando Montoya Valencia adscrito al Centro de Ciencia Básica de la Escuela de Ingenierías, preocupado e inquieto por encontrar estrategias para el aprendizaje de la química por parte de los estudiantes de los primeros semestres, a través de 30 años de experiencia académica y docente, desarrolló el concepto del Típico (T), con el cual se facilita la nomenclatura de la química inorgánica. El objeto de este trabajo, es definir, aplicar y explicar el concepto del T para la nomenclatura química.

Dichas inquietudes, buscan que la enseñanza de la nomenclatura no sea tan tediosa y que los nombres de los compuestos y sus fórmulas se puedan establecer, con base en formulas generales y evitar que el estudiante trabaje con estos casos de memoria, ya que es común que si no ha visto un caso particular le dificulta reconocerlo.

EL MODELO

Conceptualmente se define el Típico (T), como la deficiencia absoluta respecto de la regla del octeto, y su valor solo se considera para los elementos no metálicos considerados en la figura 1, al igual que para el cromo y el manganeso, los cuales en algunas situaciones presentan comportamientos similares a los no metales.

IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
Boro	Carbono	Nitrógeno	Oxígeno	Flúor
	Silicio	Fósforo	Azufre	Cloro
		Arsénico	Selenio	Bromo
			Telurio	Yodo
		”		Ástato

Fig. 1:No metales de la Tabla Periódica

ISBN 978-607-8242-11-5

Según la definición anterior, el típico se calcula para los no metales, antes mostrados, de acuerdo al grupo al cual pertenece así:

Elementos del grupo *VIIA*, poseen 7 electrones de valencia, falta un electrón para cumplir la regla del octeto; por lo tanto T=1; de igual manera para los elementos del grupo *VIA* el T=2, para el grupo *VA* el T=3; grupo *IVA* el T=4. Sin embargo, el valor T, tiene excepciones:

- Para el grupo *IIIA* el T=3; este último no es 5, como podría pensarse, para el Boro es más fácil perder tres electrones que ganar 5.
- Las otras excepciones, las tiene el N cuyo valor de T=1 (y no 3) y el C con T=2 (y no 4), La posible explicación del valor diferente de estos elementos, podría radicar en que son tan excepcionales que originan dos ramas de la química, el N origina la química de aminoácidos y el C la química orgánica (Fessenden y Fessenden, 1984).

Adicionalmente, se deben tener en cuenta el cromo (Cr) y el manganeso (Mn), debido a que éstos se pueden comportar como metales (M) y como η. En el caso, del Cr, cuando su comportamiento es el de un η, tendría como valencia 6, por lo tanto el valor de T es 2. En el caso del Mn, cuando se comporta como η, las valencias serian 7 y 6, por lo tanto los valores de T serian 1 y 2 respectivamente mostrando el Mn como el único elemento con dos valores de T.

Un esquema gráfico que facilita la sistematización de las valencias (V) empleadas en la formación de compuestos inorgánicos, con los prefijos y sufijos de la nomenclatura tradicional y los valores de T se muestran en la figura 2.

						No metales (η)				
						IIIA	**IVA**	**VA**	**VIA**	**VIIA**
						B	**C** $^{T=2}$	**N** $^{T=1}$	**O**	**F**
			Excepciones				**Si**	**P**	**S**	**Cℓ**
			Cr	**Mn**				**As**	**Se**	**Br**
									Te	**I**
										At
Valor T de los η			**2**	**1**	**2**	**3**	**4**	**3**	**2**	**1**
		Oxisales								
Valencias **V** de los no-metales η	per~ ico	per~ ato		7						7
	~ ico	~ ato	6		6	3	4	5	6	5
	~ oso	~ ito				1	2	3	4	3
	hipo~ oso	hipo~ ito						1	2	1

Fig. 2: Resumen de las Valencias (V) y el Típico (T) para los no metales (η)

De acuerdo a la anterior Figura, se podrían plantear las siguientes fórmulas generales (FG), en la Tabla 1, con su respectivo esquema de nombre, para algunos grupos funcionales de empleo tradicional en la docencia y en la industria:

Tabla 1: Formulas generales y esquemas de algunos grupos funcionales empleando el T

No.	Grupo Funcional	Formula General	Esquema de Nombre
1	Ácido hidrácido	$H_T\ \eta_1$	Hidruro $^{(Raíz\ No\ Metal)}$ hídrico
2	Ácido Oxácido Orto	$H_T\ \eta\ O_{SS}$	Acido Orto $^{(Raíz\ no\ Metal)}$ Ico/Oso
3	Ácido Oxácido Meta	$H_{T-2}\ \eta\ O_{SS-1}$	Acido Meta $^{(Raíz\ no\ Metal)}$ Ico/Oso
4	Ácido Oxácido Piro	$H_{2T-2}\ \eta_2\ O_{T+v-1}$	Acido Piro $^{(Raíz\ no\ Metal)}$ Ico/Oso
5	Sal Haloidea	$M_T\ \eta_V$	$^{(Raíz\ no\ metal)}$ uro $^{(Raíz\ Metal)}$ ico/oso
6	Sal Oxisal	$M_T\ (\eta O_{SS})_{VM}$	$^{(Raíz\ no\ metal)}$ ato/ito $^{(Raíz\ metal)}$ ico/oso

ISBN 978-607-8242-11-5

De acuerdo a lo mostrado en la Tabla 1, se deben hacer las siguientes consideraciones:

- El sufijo SS, significa semi-suma y se obtiene de la ecuación 1.

$$SS = \frac{T + V}{2} \qquad 1$$

- VM es la valencia del metal.

- Los ácidos oxácidos, pueden ser de tres tipos: orto, meta y piro; los ácidos orto, son los tradicionales o normales; para el caso del meta, la fórmula del ácido orto si se le resta una molécula de agua. Nótese que si $T \leq 2$ este tipo de ácido no existe. En el caso del ácido piro, se obtiene tomando dos veces la fórmula del ácido orto y restándole una molécula de agua. Nótese que si $T < 2$ este tipo de ácido, tampoco existe.

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a lo anteriormente descrito veamos la aplicación del T. Escribir la fórmula de los siguientes compuestos:

Ácido fosfórico

Lo primero es, ubicar el fosforo (P) en la figura 2. se encuentra en el grupo *VA*, donde la terminación **ico** nos lleva a la valencia (V=5) y su típico 3 por tanto la semisuma (ss) es 4 (ver ecuación 1) y según la fórmula general N° 2 de la tabla 1 tenemos:

$$H_3PO_4$$

Este ácido también se puede llamar ortofosfórico

Ácido Sulfhídrico

Siguiendo el procedimiento anterior, el azufre (S), se encuentra en la grupo *VIA*, y tiene como T=2. De acuerdo a la Tabla 1, la FG que debe aplicarse es la No. 1, por lo que el compuesto sería:

$$H_2S$$

Sulfato ferroso

En este caso el metal es el hierro (Fe) y sus valencias (2 y 3), como termina en **oso** su valencia es la menor (VM = 2), el azufre se ubica en el grupo VIA su terminación **ato** nos lleva a V=6 y T=2, por lo tanto la semisuma es 4 (ver ecuación 1) y la fórmula es:

$$Fe_2(SO_4)_2$$

Al simplificar, se obtiene: $FeSO_4$

Sulfuro plumboso

En este caso, según la estructura del nombre, el compuesto pertenece a la fórmula N°5 de la tabla 1. El η es el azufre (S) y según la figura 2 el T=2, el M es el plomo que tiene dos valencias (2 y 4) y por la terminación OSO trabaja con la V=2. Con todo lo anterior la fórmula del compuesto es:

Pb_2S_2 la cual simplificada es PbS

En otros casos, dada una fórmula se nombra el compuesto así:

Nombrar el siguiente compuesto: $Ca(NO_3)_2$:

Según la Tabla 1 el compuesto es una sal oxisal (ver N°6), en este caso el M es el calcio y su valencia es 2, con terminación ICO o de calcio por ser su única valencia. Para el η, es decir el N, su T=1 que es una de las excepciones de la Fig. 2, finalmente su V se calcula al despejar de la semisuma (ver ecuación 1), obteniendo como resultado V=5 para esta valencia la terminación es ATO (ver Figura 2) por lo tanto el nombre del compuesto es Nitrato cálcico.

Nombrar el siguiente compuesto: HI:

Según la Tabla 1 el compuesto es un ácido hidrácido (ver N°1), en este caso tenemos η con Hidrógeno, no hay que determinar la valencia, ya que no depende sino de T, la terminación para este tipo de compuesto es HIDRICO, por lo tanto el nombre del compuesto es ácido yodhídrico.

Como se observa en los ejemplos anteriores el docente debe suministrar de manera clara, los datos correspondientes a los metales usados tradicionalmente en la industria y la academia. Por su parte el estudiante debe tener claridad conceptual de las valencias, los prefijos y sufijos al igual que el Típico.

CONCLUSIONES

A partir de la experiencia, en la enseñanza y aprendizaje de la nomenclatura inorgánica, conceptuando sobre la diferencia absoluta respecto del octeto (Típico), se tiene que su uso: Permite al estudiante no tener que aprender una lista de iones para poder nombrar un compuesto., facilita nombrar compuestos dada una fórmula

ISBN 978-607-8242-11-5

e igualmente dar la fórmula a partir del nombre del compuesto y da una herramienta a los estudiantes para que se familiaricen con la nomenclatura tradicional

REFERENCIAS

Brown, Theodore L.; LeMay Jr., Eugene; Woodward, Patrick M. "*Química, la Ciencia Central*. Ciudad de México, México: Pearson Education. 12 Edición, (2014)

Fessenden, R y Fessenden, J. *"Química Orgánica"*, Grupo Editorial Iberoamérica, México, 2nda Edición, 1984

Mondeja D y Zumalacárregui, B. *"Química virtual en la enseñanza de las ingenierías de perfil no químico"*, Revista Pedagogía Universitaria, XIV(1), 9-17 (2009)

Montoya V., L. F. *Nomenclatura Química, no es memoria*. Universitas Científica, X, 76-79. Diciembre (2007)

Sandoval, M.J. Mandolesi, M. E y Cura, R. O, *"Estrategias didácticas para la enseñanza de la química en la educación superior"*, Educación y Educadores, 16(1), 126-138 (2013).

Seijo-Echavarría, M. Peón-Espinosa, A. M y Varela-de-Moya, H. *"Integración de la Química General en la carrera de Ingeniería Civil"*, Rev. Cubana Quím, 27(3), 252-261 (2015)

Solbes, J. Montserrat, R y Furió, C, *"El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza"*, Didáctica de las ciencias experimentales y sociales, 21, 91-117, (2007)

Valle, R y Zamora, G, "*Ingenierías. En caida por desinterés y deserción*." Vision Industrial, 1(1), 32-33, (2012)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis Numérico del Procesamiento Digital de Imágenes en la Cinética del *Pleurotus pulmonarius* en Fermentación Solida

Juan C. Oviedo-Lopera[1], Jaime A. Valencia M[2], Ana E. Casas B[3] y Diego L. Zapata[4]
(1) Fac. Ing. Agroindustrial, Esc. Ingenierías, Univ. Pont. Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
(2) Depto. Ing. Eléctrica, Fac. Ingenierías, UdeA, Calle 67 No. 53 - 108, Medellín-Colombia
(3) Fac. Ing.Textil, Esc. Ingenierías, Univ. Pont. Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
(4) Fac. Ing. Industrial, Esc. Ingenierías, Univ. Pont. Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
e-mail: juan.oviedo@upb.edu.co

Resumen

Un criterio importante en los bioprocesos es la cinética de crecimiento, porque permite conocer las condiciones óptimas de crecimiento de cualquier microorganismo. En el caso de la Fermentación en Estado Sólido (FES), existe un grado de dificultad mayor, sobre todo cuando se hace la medición directa de la biomasa, dado que los microorganismos penetran y se unen firmemente a las partículas del sustrato, haciendo difícil el proceso de separación del sustrato. Lo anterior ha llevado a buscar métodos indirectos, como el Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), con lo cual se ha logrado realizar estimaciones del monitoreo del crecimiento. Este trabajo, parte de trabajos realizados en anteriormente, (Caip 2013 y 2015), iniciando con medidas experimentales realizadas sobre imágenes digitales y los valores obtenidos de proteína y ergosterol. Con los datos se plantean modelos de ajustes, para aproximar los valores de las concentraciones de proteína y ergosterol a partir de información digital, del Índice de Blanco y Área medida.

Se han planteado 4 modelos con ajuste de sus parámetros para estimar en un proceso de FES, los valores de biomasa (ergostoerol y proteína) a partir de datos obtenidos del PDI, como son el área de cubrimiento y el índice de blanco en función del tiempo. Para el ajuste de los parámetros del modelo se aplicaron técnicas numéricas de optimización del módulo Scipy del lenguaje Python. El mejor ajuste fue de 2.52% para un modelo no lineal y permiten estimar los valores de proteina y ergosteron a partir de medidas simples usando procesamiento digital de imágenes con cámaras de precio economico.

Numerical Analysis of Digital Image Processing in Kinetics of *Pleurotus pulmonarius* in Solid State Fermentation

Abstract

An important criterion in bioprocesses is the kinetics of growth, because it allows to know the optimal conditions of growth of any microorganism. In the case of Fermentation in Solid State (SSF), there is a greater degree of difficulty, especially when direct measurement of biomass is made, since microorganisms penetrate and bind firmly to the substrate particles, making the substrate separation process difficult. This has led to the search for indirect methods, such as Digital Image Processing (DIP), which has been able to make estimates of growth monitoring. This work is based on previous work (Caip 2013 and 2015), starting with experimental measurements made on digital images and the values obtained of protein and ergosterol. With the data, models of adjustments are proposed, to approximate the values of protein and ergosterol concentrations from digital information, White Index and Measured Area.

Four models have been proposed with adjustment of their parameters to estimate in an SSF process, values of biomass (ergostoerol and protein) from data obtained from DIP, such as the coverage area and the target index as a function of time. For the adjustment of the parameters of the model, numerical optimization techniques of the Scipy module of the Python language were applied. The best fit was 2.52% for a nonlinear model and allow estimation of protein and ergosteron values from simple measures using digital image processing with economical price cameras.

Keywords: solid state fermentation, numerical analysis, Digital image processing, cell growth, extraction,

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La fermentación en estado sólido (FES), es una técnica de cultivo de células, la cual es un proceso biológico que se desarrolla en un material no soluble, donde una célula, emplea dicho material como soporte y fuente de nutrientes en ausencia de fase líquida (Oviedo, Casas, Valencia, & García, 2016; Oviedo, Casas, Valencia, & Zapata, 2014; Hölker y Lenz, 2005; Rodríguez et al., 2005; Velmurugan et al., 2011). La FES es una alternativa en bioprocesos que tiene entre otras ventajas, el poder aprovechar residuos agroindustriales como sustrato; dentro de las grandes desventajas esta las dificultades que se tienen para la medición de biomasa y por consiguiente la modelación de su crecimiento (Rani, 2009 y Oviedo et al,2014). La medición de la biomasa es un fundamental en cualquier bioproceso, debido a que permite conocer productividad y permite calcular la cinética del crecimiento de un microorganismo; con la cinética, se puede establecer conocer las condiciones óptimas de crecimiento de cualquier microorganismo, sin embargo la medición de la biomasa es una situación por resolver (Acevedo, F. Genitina, J. Illanes, A., 2002). Por su parte, los modelos matemáticos son herramientas útiles para guiar el diseño, la ampliación y operación de biorreactores, además que pueden describir procesos como la transferencia de calor y masa (Krull y Bley, 2015)

En el caso de la Fermentación en Estado Sólido (FES), existe un grado de dificultad mayor, sobre todo cuando se hace la medición directa de la biomasa, dado que los microorganismos penetran y se unen firmemente a las partículas del sustrato, haciendo difícil el proceso de separación del sustrato (Ooijkaas, Tramper, & Buitelaar, 1998). Lo anterior ha llevado a buscar métodos indirectos, como el Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), con lo cual se ha logrado realizar estimaciones del monitoreo del crecimiento (Oviedo, Casas, Valencia, & García, 2016; Oviedo, Casas, Valencia, & Zapata, 2014).

El PDI es una técnica de procesamiento de imágenes, donde a partir de imágenes digitales se puede extraer información significativa o importante de diferentes parámetros y/o variables (Khodaskar y Ladhake, 2015). El PDI ha tomado fuerza ya que proporciona una respuesta rápida, económica y menos laboriosa que los análisis químicos. (Becker et al., 1996; Oviedo et al, 2014). Varios autores se han dedicado al estudio del PDI para medir biomasa tanto en fermentaciones líquidas como sólidas. En fermentaciones líquidas, el PDI se ha empleado para identificar y caracterizar colonias de basidiomicetos (Dörge et al., 2000). Para el caso de la FES, una de las aplicaciones en las que se ha empleado el PDI, ha sido la cuantificación de biomasa fúngica (Firrao et al., 2010; Duan et al., 2012; Cunha et al, 2012).

El objetivo de este trabajo, consisten en ajustar los datos obtenidos de biomasa (ergostoerol y proteína) con los respectivos datos obtenidos del procesamiento digital de imágenes (PDI) en función del tiempo. Para estimar a partir de la información digital, los valores de proteína y ergotsterol. El análisis parte de trabajos realizados en anteriormente, (Caip 2013 y 2015), iniciando con medidas experimentales realizadas sobre imágenes digitales y los valores obtenidos de proteína y ergosterol. Con los datos se plantean modelos de ajustes, para aproximar los valores de las concentraciones de proteína y ergosterol a partir de información digital, del Índice de Blanco (IB) y el Área de Crecimiento (A) medidos.

EL MODELO

Lo primero, es plantear cuatro grupos de modelos, para describir el comportamiento de las medidas analíticas a partir de las medidas de procesamiento digital de imágenes. El primer grupo de modelos propuestos es lineal, tanto para la proteína como para el ergosterol, los que se describen en las ecuaciones 1 y 2, donde los valores a_{ij}, son los parámetros del mejor modelo que se deben ajustar. El segundo modelo que se propone, es no lineal y esta descrito en las ecuaciones 3 y 4, donde se tienen 6 parámetros a_{ij} que se deberán ajustar.

$$P_i = a_{11}*B_i + a_{12}*A_i \quad (1)$$

$$E_i = a_{21}*B_i + a_{22}*A_i \quad (2)$$

$$P_i = a_{11}*B_i + a_{12}*A_i + a_{13}*B_i*A_i + a_{14} \quad (3)$$

$$E_i = a_{21}*B_i + a_{22}*A_i + a_{23}*B_i*A_i + a_{24} \quad (4)$$

Para la descripción de los modelos anteriores P_i, es la proteína en el instante t_i; Ei, el ergosterol en el instante t_i; B_i, el índice de blanco en el instante t_i y A_i, el área en el instante t_i. El subíndice i, significa el valor en una medición en el respectivo tiempo T_i, que se tienen los valores de la evolución de las medidas de la proteína y el ergosterol con métodos analíticos, mientras que los valores respectivos del índice de blanco y el área se realizan con métodos de procesamiento de imágenes.

ISBN 978-607-8242-11-5

Otro grupo de modelos que se plantean, es el de los no lineales del tipo redes neuronales, empleando funciones conocidas como sigmoides. Dichos modelos, se describen en las ecuación 5 y 6, donde los parámetros a_f y b_f son de la función sigmoidea, mientras que los parámetros a_{ij} son los que relacionan los valores de índice de blanco y el área. Las diferencias entre las ecuaciones 5 y 6, radica en que la última solo tiene un parámetro.

$$Ft = \frac{af}{1 - \exp(-bf * \lambda)} \tag{5}$$

Con $P_i = F_t(a_{11}*B_i + a_{12}*A_i + a_{13})$, para proteína y $E_i = F_t(a_{21}*B_i + a_{22}*A_i + a_{23})$ para ergosterol.

$$Ft = \frac{1}{1 - \exp(-bf * \lambda)} \tag{6}$$

Con $P_i = F_t(a_{11}*B_i + a_{12}*A_i + a_{13})$, para proteína y $E_i = F_t(a_{21}*B_i + a_{22}*A_i + a_{23})$ para ergosterol.

Para el ajuste de los parámetros en cada uno de los modelos, se plantea minimizar el error, descrito en las ecuaciones 7 y 8, para todos los datos obtenidos en los cuatro experimentos realizados, variando los diferentes parámetros en cada uno de los modelos. Para ajustar los modelos se normalizaron los datos con el valor máximo de cada una de las variables para tenerlos en un mismo rango numérico entre 0 y 1. Los valores de cada modelo se obtuvieron con algoritmos de optimización local del submódulo scipy.optimize, del lenguaje de programación Phyton.

$$Error_i = (P_{datoi} - P_{modeloi})^2 + (E_{datoi} - E_{modeli})^2 \tag{7}$$

Donde el error total, queda expresado en la ecuación 8.

$$Error(total) = \sum_{i=0}^{n} Error(i) \tag{8}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran en las figuras de 1 a 4, los ajustes gráficos de los cuatro grupos de modelos expuestos anteriormente. Cada una de las figuras, muestra 4 conjuntos de 4 ejes, correspondiendo cada conjunto a una muestra experimental. En un conjunto se muestra la evolución en el tiempo de las entradas al modelo (Índice de blanco y Área) y los resultados de la evolución de las salidas (Proteína y Ergosterol) comparando modelo con la respectiva medida.)

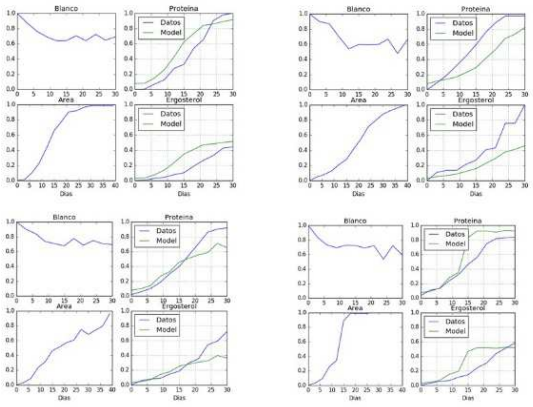


Fig. 1: Modelo 1

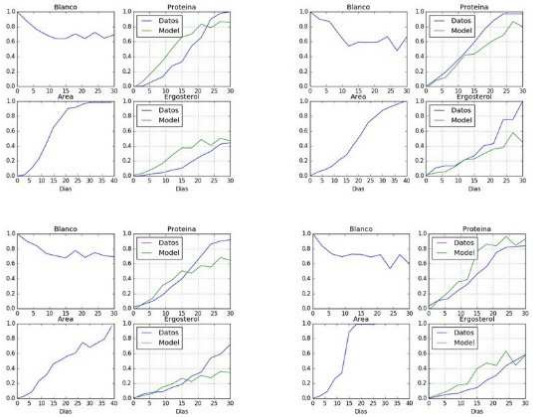


Fig. 2: Modelo 2

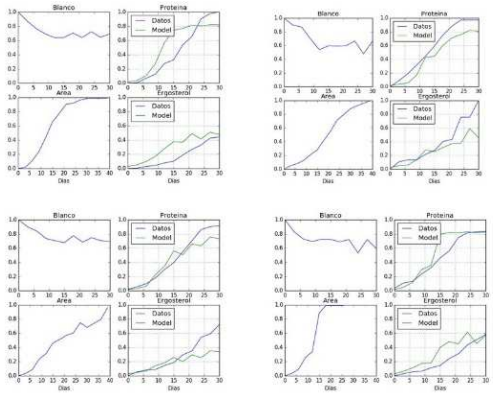


Fig. 3: Modelo 3

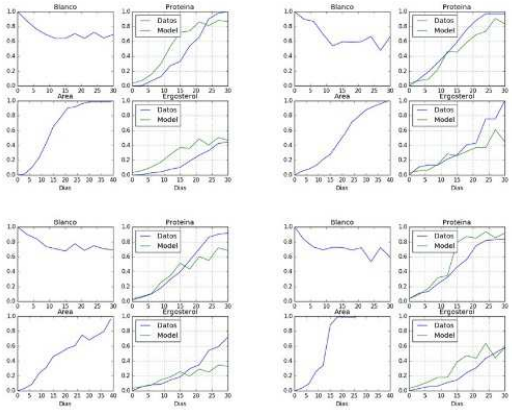


Fig. 4: Modelo 4

Respecto a los resultados anteriormente mostrados, los errores cuadráticos medios de cada uno de los modelos se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Resumen de los errores que para cada modelo.

Tipo de Modelo	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3			Muestra 4		
	Error Prot.	Error Ergos.	Error Total	Error Prot.	Error Ergos.	Error Total	Error Prot.	Error Ergos.	Error Total	Error Prot.	Error Ergos.	Error Total
Lineal	2.13%	2.02%	2.08%	5.28%	5.78%	5.53%	2.05%	2.04%	2.05%	2.98%	2.26%	2.62%
No Lineal	3.07%	2.09%	2.58%	2.52%	4.56%	3.54%	2.53%	2.60%	2.56%	2.24%	1.81%	2.03%
No Lineal NN 1	3.91%	2.15%	3.03%	1.93%	4.47%	3.20%	1.33%	2.81%	2.07%	1.75%	1.82%	1.78%
No Lineal NN 2	3.50%	2.07%	2.79%	1.68%	4.54%	3.11%	2.11%	2.95%	2.53%	2.23%	1.81%	2.02%

Donde Erro Prot., corresponde al error de los datos de la proteína y Error Ergos., a los datos de ergosterol.

Por su parte el promedio de los errores cuadráticos medios de cada una de las pruebas se puede observar en la Tabla 2.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 2. Promedio de los errores Cuadráticos medios

Tipo de Modelo	Promedio Modelos
Lineal	3.07%
No Lineal	2.68%
No Lineal NN 1	2.52%
No Lineal NN 2	2.61%

De acuerdo a los resultados mostrados tanto en las figuras como en las tablas, hay varios aspectos por mencionar. El menor error para el modelo lineal, lo tiene la muestra 1 para los datos de proteína (2.05%) y la muestra 1 para el ergosterol (2.02%). En cuanto al modelo no lineal, los mejores errores fueron 2.52% y 1.81% en las muestras 2 y 4 respectivamente. En lo que tiene que ver con los modelos no lineales neuronales, el mejor error para la proteína estuvo en las muestras 4 (1.33%) y 2 (1.68%) para el primero y segundo respectivamente; siguiendo con los modelos neuronales, tanto para el primero como pare el según, en el caso específico del ergosterol, los mejores errores se encontraron en la muestras 4 con valores de 1.82% y 1.81% respectivamente.

Referente a los datos menor ajuste, es decir con el error más alto, en el modelo lineal, lo obtuvo la muestra 2 del ergosterol, con un valor de 5.78%. En el caso del modelo lineal, nuevamente la muestra 2, obtuvo el valor más alto con el ergosterol, con un valor de 4.56%. El primer modelo neuronal, el error más alto, se encuentra en la proteína de la primera muestra. En el segundo modelo neuronal, estuvo en el ergosterol de la muestra 2.

De la comparación de los errores cuadráticos medios que se resumen en la Tabla 2, en general los ajustes de todos los grupos fueron relativamente buenos, debido a que cuando se hacen aproximaciones numéricas, errores en los modelos por debajo de 5% se pueden considerar buenos, sin embargo se debe resaltar que los modelos neuronales, obtuvieron los dos valores menores (2.52% y 2.61%) y aunque el modelo lineal tuvo el error más alto (3.07%), hace una aproximación apropiada.

En cuanto a los modelos neuronales, estos están basados en funciones tipo sigmoide, las cuales se han empleado para explicar el crecimiento celular en FES (Mitchell, 2004). Por lo general este tipo de ecuaciones dan aproximaciones satisfactorias al crecimiento especialmente de hongos y basidiomicetos. El menor error, obtenido en el primer modelo neuronal, probablemente se debe a que esta ecuación tiene un parámetro más; se ha demostrado que las ecuaciones sigmoideas con mayor número de parámetros obtienen un mejor ajuste y por ende un menor error, en diferentes tipos de análisis a sectores económicos o tecnologías en el tiempo (Arbolea et al, 2016; Grajales et al, 2016; Zartha et al, 2015; Zartha et al, 2014 y Avalos et al, 2010). Modelos logísticos se han aplicado ampliamente para ajustar datos de poblaciones en el tiempo para sistemas biológicos o bioproceos (Diestefano III, 2013; Castro et al, 2008).

Sin embargo, en muchos casos, cuando los modelos tradicionales no muestran ajustes, se debe recurrir a modelos empíricos, los que por lo general, permiten hacer un análisis del matemático apropiado de los datos obtenidos en el tiempo (Campos, 2014); para el caso específico de la FES, donde, cuando se estudian hongos o basidiomicetos, se deben obtener modelos a partir de compuestos propios de estos organismos para obtener un modelo empírico en función del tiempo, como la glucosamina (Nagel, Tramper, Marjolein, Bakker y Rinzema, 2001), para el caso de este estudio, se llevó a cabo con proteína y ergosterol, compuestos propios del *Pleurotus pulmonarius*.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de la biomasa del *Pleurotus pulmonarius*, expresada en proteína y ergosterol en el tiempo, comparada con los análisis digitales de áreas de crecimiento e índice de blanco, fue posible obtener un modelo empírico que podría predecir la biomasa en el tiempo, basado en el error medio cuadrático, mostrando que los modelos neuronales basados en sigmoides fueron menores. Estos modelos también permiten estimar los valores de proteina y ergosteron a partir de medidas simples usando procesamiento digital de imágenes con cámaras de precio accesible

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

Acevedo, F. Genitina, J. Illanes, A. (2002). *Fundamentos de ingeniería bioquímica*. Valparaíso: Ediciones universitarias de Valparaíso de la Universidad Católica de Valparaíso.

Arboleda, G y Villada, H. "*Análisis de curvas en S para artículos y patentes de empaques semirrígidos Biodegradables"*, Espacios, Vol. 38 (Nº 22), p 20 2017

Avalos, A. Aguilar, S. Zartha, J. *"Curvas en S. Aplicación en Innovaciones de tres Sectores Industriales Colombianos*", Espacios. Vol. 32 (2), 2011

Becker, J. C. Becker, J. Caldwell, G. Zachgo, E *Biotechnology. A laboratory course*, Second Edition, 119124, Academic Press, New York (1996)

CAMPOS-ARANDA, D.F. *Obtención de ecuaciones empíricas para estimación de crecientes de diseño en la Región Hidrológica* Núm. 10 (Sinaloa) de México. Tecnología y Ciencias del Agua. Vol. V, núm. 1, enero-febrero de 2013, pp. 125-143.

Castro, G y 6 autores más. "*Vigilancia Tecnológica y Análisis del Ciclo de Vida de la Tecnología: Revisión de herramientas para el diagnóstico empresarial y la aplicación del ciclo de vida del producto en el sector turismo",* Espacios. Vol. 37 (Nº 36), P 19, 2016

Castro, G., Valbuena, E., Sanchez, E., Briñez, W., Vera, H y Leal, M. *"COMPARACIÓN DE MODELOS SIGMOIDALES APLICADOS AL CRECIMIENTO DE Lactococcus lactis subsp. Lactis*", Revista Científica, FCV-LUZ / Vol. XVIII, Nº 5, 582 - 588, 2008

Cunha, F. M. y otros seis autores, doi: 10.1007/s12257-011-0405-z, *Indirect Method for Quantification of Cellular Biomass in a Solidscontaining Medium Used as Pre-culture for Cellulase Productio*n. Biotechnology and Bioprocess Engineering 17: 100-108 (2012)

Dorge, T., Carstensen, J. M., y Frisvad, J. C. *Direct identification of pure Penicillium species using image analysis*. Journal of Microbiological Methods, 41(2), 121-33 (2000)

Duan, Y., Wang, L., y Chen, H. doi:10.1016/j.bej.2012.04.020, Digital image analysis and fractal-based kinetic modelling for fungal biomass determination in solid-state fermentation. Biochemical Engineering Journal, 67, 60-67. (2012)

Firrao, G., Torelli, E., Gobbi, E., Raranciuc, S., Bianchi, G., y Locci, R, doi:10.1016/j.jcs.2010.06.017, Prediction of milled maize fumonisin contamination by multispectral image analysis. Journal of Cereal Science, 52(2), 327-330. (2010)

Holker, U., y Lenz, J., doi:10.1016/j.mib.2005.04.006, *Solid-state fermentation--are there any biotechnological advantages?* Current Opinion in Microbiology, 8(3), 301-6. (2005)

Khodaskar, A. y Ladhake, S., *Semantic Image Analysis for Intelligent Image* Retrieval, ISSN 1877-0509, Procedia Computer Science,. Volume 48, Pages 192-197 (2015)

Krull, R. y Bley, T. (Eds.), *"Filaments in Bioprocesses",* Adv. Biochem. Engin./Biotechnol, Springer, 370 p, (2015)

Mitchell, D. Von Meien, O. Krieger, N. Diba, Dalsenter, F. *A review of recent developments in modeling of microbial growth kinetics and intraparticle phenomena in solid-state fermentation.* Biochemical Engineering Journal 17 15-26 (2004)

Nagel, J. Tramper, S.N. Marjolein, M.S.N. Bakker, A. Rinzema, *Model for on-line moisture-content control during solid-state fermentation,* Biotechnol. Bioeng., 72, pp. 231-243 (2002)

Ooijkaas, L. P., Tramper, J., & Buitelaar, R. M. (1998*). Biomass Estimation of Coniothyrium Minitans in Solid-State* Fermentation. Enzyme and Microbial Technology, 22(6), 480–486. http://doi.org/10.1016/S0141-0229(97)00246-9

Oviedo, Juan C et al."*Análisis de la Medición de la Biomasa en Fermentación en Estado Sólido empleando el Modelo Logístico y Redes Neuronales*." Inf. tecnol., 2014, vol.25, no.4, p.141-152. ISSN 0718-0764

Oviedo, Juan C et al."*Evaluación de Tres Variables de Crecimiento del Pleurotus pulmonarius sobre Tusa de Maíz Empleando Procesamiento Digital de Imágenes"*., Inf. tecnol., 2016, vol.27, no.5, p.27-36. ISSN 0718-0764

Oviedo-Lopera, J.C., Zapata, D. L., Garcia, L., Echeverri, N. y Echeverri, D., "*Evaluación del enriquecimiento proteico de residuos de papa y yuca con Paecilomyces variotti*", Revista Ingeniería y Región, 16(2), 73-83 (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Rani, R. Kumar, A. Soccol, C. Pandey, A. *Recent advances in solid state fermentation.* Biochemical Engineering Journal. 44 13-18 (2009)

Rodríguez Couto, S., y Sanromán, M.A., *Application of solid-state fermentation to ligninolytic enzyme production*. Biochemical Engineering Journal, 22(3), 211 -219. (2005)

Velmurugan, P.,y otros cinco autores. *Monascus pigment production by solid-state fermentation with corn cob substrate*. Journal of Bioscience and Bioengineering, 112(6), 590-4. doi:10.1016/j.jbiosc.2011.08.009 (2011)

Zartha, J y otros 5 autores. "*Curvas en S y análisis de cluster en ciclo de vida de la ", tecnología: Aplicación en 11 tecnologías en alimentos*", Espacios. Vol. 36 Nº 12, P5 2015

Zartha, J. Arango, B. Hernandez, R. Moreno, J. "Análisis del ciclo de vida de la tecnología a través de curvas en S: Aplicación en operaciones unitarias en alimentos", Espacios. Vol. 35 (Nº 7), Pág. , (2014.)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Sistema de Información Estratégica para la Gestión Universitaria en la Universidad de Otavalo (Ecuador)

INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más desafiantes de la educación superior en la actualidad es el perfeccionamiento de la gestión universitaria y de cada uno de los procesos que la integran. En la Conferencia Mundial sobre la Educación Superior "La educación superior en el siglo XXI: Visión y acción", organizada en París por la UNESCO en octubre de 1998 se expresó el deber de generalizar en la mayor medida posible la utilización de las nuevas tecnologías para que ayuden a los establecimientos de educación superior a reforzar el desarrollo académico, a ampliar el acceso, a lograr una difusión universal y extender el saber, y a facilitar la educación durante toda la vida. Los gobiernos, los establecimientos de enseñanza y el sector privado deberán procurar, enfatiza el informe, en que se faciliten en un nivel suficiente infraestructuras de informática y de redes de comunicaciones, servicios informáticos y formación de recursos humanos (UNESCO, 1998).

Muchas veces se confunde el concepto de tecnología de la información (TI) con el de sistemas de información (SI). En las definiciones conceptuales del término "tecnología de la información", generalmente se hace énfasis en determinados aspectos, como pueden ser: el tratamiento de la información, la solución de problemas, la toma de decisiones y la integración de las tecnologías, entre otros. Al respecto, Mansfield expone una definición bastante amplia cuando afirma que las TI se pueden definir como el conjunto de desarrollos tecnológicos relacionados con la elaboración, transmisión, manipulación y presentación de datos, que sobre la base del microprocesador se aplican en las áreas de la comunicación, el cálculo y el control (Mansfield, 1984).

Para obtener el máximo de las tecnologías de la información es necesario gestionarla con eficiencia y ello conduce al análisis del concepto de sistemas de información. Muy precisa es la definición que los considera como un conjunto de personas, datos, procesos y tecnología de la información que interactúan para recoger, procesar, almacenar y proveer la información necesaria para el correcto funcionamiento de la organización (Whitten, et al., 2004). De ahí, la atención que merecen por constituir un soporte imprescindible que permite desarrollar y fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje; organizar las investigaciones en correspondencia con los intereses de la propia institución y de su entorno; automatizar los procesos administrativos y las actividades de vinculación con la comunidad. Muchas instituciones educativas han encontrado en las TI un potente aliado (Martin–Gutiérrez, et al., 2015), al punto que el progresivo avance de las TI se posiciona como una de las principales fuentes de innovación y de ventaja competitiva en los sectores que las han implementado, como es el caso de la educación (Dastan, et al., 2011)

La propia evolución de las TI ha condicionado el desarrollo de una tipología de SI en paralelo. Para Senn (1992), desde la perspectiva de la toma de decisiones, los SI pueden ser: de Procesamiento de Datos **(**TPS-*Transactional Processing Systems*), Sistemas de Información para la Administración o Gerenciales **(**MIS- *Management Information Systems*), Sistemas de Soporte a la Toma de Decisiones (DSS– *Decision Support Systems*), Sistemas de información para ejecutivos (EIS– *Executive Information Systems*) y Sistemas Expertos o sistemas basados en el conocimiento (WKS–*Knowledge Working Systems*).

Lo que hoy es conocido como "Sistema de Información Gerencial" ha ido evolucionando con el transcurso del tiempo. En una primera instancia, los canales de comunicación eran informales en estructura y utilización; sin embargo, con la aparición y el uso en masas de la informática, se transformaron en "Sistemas de Procesamiento Electrónico de Datos". Posteriormente, dieron lugar al concepto de "Sistema de Información Basado en Computadoras", que se popularizaron como "Sistemas de Información Gerencial". Al introducir en esta terminología el concepto de "Estrategia", entendida como la formulación, ejecución y evaluación de acciones que permitirán que una organización logre sus objetivos, conceptualmente se deriva a los conocidos *Sistemas de Información Estratégica* (SIE), que forman parte del ser de la organización, bien porque supone una ventaja competitiva por sí mismo, o bien porque está unido de una forma esencial al negocio y aporta un atributo especial a sus procesos y a la toma de decisiones (Puello, et al., 2013).

En la planificación institucional de la Universidad de Otavalo (UO), Ecuador, se establece como una de sus metas más importantes para el período 2015-2020, la elaboración e implementación de un SIE, que contribuya a proporcionar la información necesaria y oportuna para la toma de decisiones. Por ello, se avanza en la formación de los directivos y profesores en temas relacionados con la importancia de la dirección estratégica y la evaluación

 ISBN 978-607-8242-11-5

institucional y se fortalece el trabajo de dirección en equipos, el alineamiento de las estrategias, objetivos estratégicos y la visión de futuro**,** compartida e integrada a nivel institucional mediante el uso de las TI (Ali, et al., 2014). Se reconoce como una de las principales fortalezas de la institución, la tecnología de punta aplicada a la educación en todas las aulas, la accesibilidad plena a internet e intranet, así como el compromiso y la motivación de la mayoría de los profesores con la visión y proyección estratégica institucional (Martelo, et al., 2015).

Sin embargo, se detectan un grupo de problemas o barreras (Hosseini et al., 2012) de diversa índole que exigen la búsqueda de soluciones acorde a las propias exigencias actuales de la gestión universitaria y de los retos actuales y futuros de la nueva universidad ecuatoriana. Luego, la cuestión esencial a analizar en esta investigación está relacionada con *las características debe tener un SIE aplicado a la gestión universitaria, de modo que permita sustentar de manera efectiva la planificación, evaluación y toma de decisiones en la universidad, para contribuir eficazmente al mejoramiento de la calidad de los procesos universitarios.*

Los argumentos que justifican la necesidad de disponer de este sistema son: la inexistencia de un mecanismo único para la recolección de la información y la poca eficacia en su tratamiento, análisis y distribución; la insuficiente racionalidad y eficiencia en el uso y manejo de la información en el tiempo adecuado, de manera que permita dar respuesta a los problemas que se presentan con ayuda de la tecnología; la comunicación ineficaz entre la dirección, la secretaría académica y el resto de las áreas de la institución; la incipiente formación en conocimientos en el área del saber de la informática de algunos de los protagonistas del proceso; la utilización de diversos criterios para la clasificación de la información, la duplicidad de bases de datos, el deficiente control de la fiabilidad de la información y la escasa cultura del uso de la misma.

En el contexto universitario, las TI permiten apoyar el proceso enseñanza–aprendizaje en un entorno virtual (desarrollo de los programas de las asignaturas de cada carrera), optimizar los procesos que se llevan a cabo en las distintas áreas del conocimiento, tanto en el pregrado como en la continuidad de estudios, potenciar la calidad de las investigaciones en las distintas ramas del saber, desarrollar actividades de vinculación con la sociedad y las comunidades, y automatizar los procesos de gestión administrativa para favorecer la toma de decisiones. Las TI son parte central de la mejora de las Instituciones de Educación Superior (Lau & Yuen, 2014) y repercuten tanto en el modo de gestionar como en las funciones sustantivas: docencia, investigación y gestión del conocimiento (Yassin, et al., 2013).

METODOLOGÍA

Para lograr coherencia entre la propuesta del SIE-GU con los pilares de calidad de la UO, se diseñó una metodología de trabajo que consta de diez etapas: (1) Evaluación de la *planificación estratégica* institucional: Delimitación del objeto de estudio, la estructura de la organización y el análisis de su ambiente externo e interno (2) Examen de *la información disponible* en la organización: Políticas y procedimientos, modelo de gestión, manuales de procedimientos específicos, entre otros; (3) Identificación de *la información necesaria* para la elaboración del SIE-GU; (4) Balance de información: *compatibilización* de la información disponible y necesaria; (5) Identificación de los *procesos* de la organización: Manual de procesos, entradas, salidas. Procesos estratégicos, claves y de apoyo; (6) Construcción del *equipo de trabajo*: Encargado de analizar las principales metodologías de trabajo, resaltando el enfoque participativo, donde el diseño y desarrollo de la entidad están centrados en el usuario (Briede & Mora, 2013); (7) Definición de los *componentes* del SIE-GU; (8) Elaboración de los planes estratégicos para la *implementación* de las aplicaciones informáticas; (9) *Evaluación* de los resultados: Incluye la validación del sistema y la satisfacción de los usuarios; y (10) Examen de *alternativas de mejora* del SIE-GU.

Para evaluar el nivel de implementación del SIE-GU, se realizó un cuestionario en junio de 2016, donde se solicitó a cada uno de los directivos su valoración sobre el nivel de utilización e implementación de las aplicaciones informáticas pertenecientes a cada uno de los cuatro por módulos del sistema, otorgando una calificación de 1 a 5 (ver Tabla 1). Para ello se utilizó una escala común, con los siguientes niveles: 1 = No se está utilizando esta aplicación de TI en la universidad; 2 = Está prevista la utilización de la aplicación de TI, pero no se ha implantado todavía; 3 = Esta aplicación de TI está en proceso de implantación; 4 = Esta aplicación de TI está implantada y requiere de ser perfeccionada; y 5 = Esta aplicación de TI está en pleno funcionamiento y continúa su actualización.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

 ISBN 978-607-8242-11-5

El SIE-GU está formado por cuatro módulos principales con sus respectivas aplicaciones, responde al modelo cliente–servidor y considera los procesos más importantes de la institución y sus respectivas actividades; con acceso pleno a intranet e internet; es único e integrado y favorece la participación de los actores implicados, aportando información valiosa orientada a la toma de decisiones para el mejoramiento continuo de la calidad y los resultados de la gestión universitaria. El SIE-GU abarca un espacio digital, a través de las plataformas unificadoras (Zhan, et al., 2003). Son muy importantes las características, de acuerdo a los objetivos propuestos (Ng, et al., 2011). En el caso del SIE-GU, sus características pueden resumirse en: (1) Módulos personalizados; (2) Información centralizada; (3) Administración de ususarios; (4) Administración de roles y permisos; (5) Reportes on-line; (6) Estructura cliente-servidor; (7) Seguimiento continuo; y (8) Estándares de calidad de sofware

El SIE-GU, al ofrecer información sobre el Plan Estratégico de Desarrollo Institucional, incluye: la misión, la visión, los valores compartidos, la metodología de elaboración y las herramientas aplicadas, las áreas de resultado clave, objetivos estratégicos, estrategias y planes de acción, la matriz de objetivos estratégicos, los programas, proyectos y actividades, el sistema de indicadores utilizado para medir la gestión universitaria, el presupuesto y el plan de monitoreo y evaluación. Como parte del proceso de evaluación del cumplimiento de los objetivos, el SIE-GU apoya el proceso del chequeo del cumplimiento parcial y final de los resultados para cada uno de los ejes estratégicos, programas y proyectos. Para controlar el nivel de cumplimiento de los indicadores se apoya en un sistema de alerta basado en una gama de colores, expresado en un cuadro de mando integral, lo que representa una gran ayuda para los directivos en el análisis de los resultados y la toma de decisiones relacionadas con el Plan Operativo Anual y el modelo de evaluación.

La aplicación referida a la evaluación institucional se presenta en dos secciones: información y gestión. En la primera sección se carga al sistema la información por criterios, subcriterios e indicadores establecida en el modelo aplicado por el Consejo de Evaluación, Acreditación y Aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior (CEAACES) y en cada indicador se reportan las evidencias que lo sustentan con su porciento de cumplimiento. Con respecto a la gestión el sistema facilita evaluar con agilidad los niveles porcentuales de cumplimiento de cada uno de los indicadores, subcriterios y criterios con respecto al patrón de calidad, lo que es de mucha utilidad para los directivos en los seguimientos diarios, semanales, mensuales y anuales y para la obtención de información útil para la toma de decisiones estratégicas y operativas.

Mediante el SIE-GU se realiza la evaluación del desempeño de los docentes a tiempo completo y parcial. Los propios profesores realizan su autoevaluación con ayuda del sistema, los estudiantes efectúan la heteroevaluación de sus profesores, los pares evalúan a los docentes y los directivos valoran el cumplimiento de los planes de trabajo individuales de sus subordinados. Finalmente, a través del sistema se realiza la evaluación integral considerando las funciones reglamentadas: docencia, investigación y gestión.

Al analizar y evaluar el grado de implementación de las aplicaciones (ver Tabla 2), se puede apreciar que la mayoría está en pleno funcionamiento y continúa su actualización o están implantadas y requieren ser perfeccionadas. Finalmente, se elaboró un plan de alternativas de mejora donde destaca el plan estratégico para la culminación de las aplicaciones no concluidas y la necesidad de continuar perfeccionando su integración, así como la eliminación de las posibles redundancias.

Tabla 1: Módulos del SIE-GU y sus aplicaciones

No.	*Módulos del SIE-GU y aplicaciones*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Academia						
1	Sistema Académico- SA					
2	Sistema de Actualización de Datos- SADTS					
3	Ficha Socioeconómica- FSE					
4	Repositorio Digital- DSPACE					
5	Sistema de Seguimiento del Sílabo-SSS					
6	Sistema de Homologaciones-SH					
7	Sistema de Evaluación a Docentes- SED					
Investigación						
8	Entorno Virtual de Aprendizaje- EVA					
9	Sistema de Administración de Bibliotecas- SAB					
10	Sistema de Proyectos-SP					
Vinculación						

 ISBN 978-607-8242-11-5

11	Sistema de Administración de Herramientas Psicológicas- SAHP					
12	Sistema de Encuestas- SE					
13	Sistema de Graduados- SG					
14	Sistema Consultorios Jurídicos Gratuitos- SCJG					
Administración						
15	Sistema de Registro de Personal- SRP					
16	Sistema de Archivos e Inventarios- SAI					
17	Sistema Contable-SC					
18	Sistema de Gestión Documental-Help Desk (SHD)					
19	Sistema de Planificación Universitaria (SPU)					
20	Sistema de Evaluación Interna- SEI					
21	Sistema de Escuela de Conducción (SEC)					

Los principales aportes que resaltan de la elaboración del SIE-GU son los siguientes:

(i) Una contribución teórica, enmarcada en la fundamentación del diseño e implementación de un SIE-GU, de carácter integrado, considerando los procesos más importantes de la institución y sus interrelaciones.

(ii) Una contribución metodológica, al proponer una metodología fundamentada científicamente para la elaboración de un SIE-GU, incluyendo etapas, contenido, pasos necesarios y estructura requerida para aplicarlo a la realidad concreta y específica de la UO.

(iii) Una contribución práctica mediante la implementación del SIE-GU, el cual se apoya en un programa informático de consulta permanente por los actores involucrados, y que incluye a toda la comunidad universitaria.

El SIE-GU tiene sus antecedentes en un Sistema de Gestión Académica y Administrativa (SGAA) implementado en los últimos años en la Universidad de Otavalo. Independientemente de los elementos positivos que resaltan de las aplicaciones informáticas y del reconocimiento social por esta experiencia, el proyecto SGAA dejó algunos vacíos importantes. De la valoración crítica realizada al SGAA, surgió la necesidad de avanzar a un estadio superior, mediante el diseño e implementación del SIE-GU, cuyas características y contenido favorecen de manera efectiva la toma de decisiones estratégicas, tácticas y operativas en materia de planificación estratégica y operativa, autoevaluación institucional, evaluación del desempeño y otras dimensiones de la gestión universitaria.

El principal vacío identificado en las aplicaciones del SGAA estuvo dado por la no existencia de una plataforma centralizada de información en línea para la gestión. Por ello, existen sólidos argumentos que refuerzan la necesidad de fundamentar teórica y metodológicamente la necesidad de implementar un SIE-GU. Las continuas amenazas a que está sometida la UO ante los retos actuales y futuros de la educación superior ecuatoriana imponen la necesidad y urgencia de consolidar una cultura de gestión de la calidad y a ello contribuye la utilización de un sistema integrado para apoyar el desarrollo de la planificación, la ejecución de los procesos universitarios, la evaluación institucional y su adecuada interrelación con las exigencias del patrón de calidad definido por el organismo externo evaluador.

En este sentido, la evidencia empírica permite ratificar que en la mayoría de las universidades existen pocas experiencias en el diseño e implementación de un SIE-GU. Cuando existen, generalmente se trata de aplicaciones incompletas debido a que no integran los cuatro ejes básicos mencionados. Haber logrado un nivel de implementación e interrelación de las aplicaciones informáticas concluidas es el resultado más importante de la investigación realizada y se convierte en un desafío permanente para la asimilación de otras experiencias nacionales e internacionales, la integración plena de las aplicaciones y el monitoreo permanente del grado de satisfacción de los clientes internos y externos, considerando los grandes volúmenes de información que se procesan sistemáticamente en una universidad.

CONCLUSIONES

La implementación práctica de las aplicaciones informáticas concluidas y que forman parte del contenido del SIE-GU, favorecen la automatización de la mayoría de los procesos y actividades de la institución. El plan incluye veintiuna aplicaciones pertenecientes a cuatro módulos, de las cuales catorce están en pleno funcionamiento, cuatro están implantadas pero requieren ser perfeccionadas y tres están en proceso de implantación. Todas las aplicaciones ofrecen reportes de salida que nutren los indicadores de la planificación y evaluación institucional, el cuadro de mando integral y la evaluación del desempeño de los docentes a tiempo completo y parcial, de modo

ISBN 978-607-8242-11-5

que contribuyen a la toma de decisiones estratégicas, operativas y tácticas en esas áreas de la gestión universitaria. El sistema está en un 91,4 % de implementación.

REFERENCIAS

Ali, R. H., *Strategic is Planning Practices: A Comparative Study of Malaysia and New Zealand*. Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 164,* 516-521 (2014)

Briede, J. C., Mora, M. L. *Propuesta evaluativa para el Taller de Diseño Centrado en el Usuario (DCU), en la Carrera de Diseño Industrial de la Universidad del Bío-Bío, Chile*. Formación Universitaria, 6(2), 33-42. (2013)

Dastan, D.C. *The Effects of Information Technology Supported Education on Strategic Decision Making: An Empirical Study*. Procedia-Social and Behavioral Sciences*,* 24, 1134-1142 (2011)

Hosseini, M. H., Karimzadegan, D., y Sazvar, A. *Identification of Management Information System (MIS) strategies barriers in higher education institutions through multi-criteria decision making (MCDM) approach: Case study of Ferdowsi University of Mashhad,* Educational Research and Reviews: *7*(5), 111-120 (2012).

Lau, W. W., y Yuen, A. H. *Developing and validating of a perceived ICT literacy scale for junior secondary school students: Pedagogical and educational contributions*. Computers & Education*, 78*, 1-9. (2014)

Mansfield, R. "*Changes in Information Technology, Organizational Design and Managerial Control"*, en Piercy, N., The Management Implications of New Information Technology, London: Croom Helm. (1984)

Martelo, Raúl J; PONCE, Antonio L y Acuña, Franklin. *Guía Metodológica para el Diseño de un Plan Estratégico Informático en Instituciones de Educación Superior***.** Formación Universitaria, 9(1), 91-98. (2016)

Martín-Gutiérrez J., Fabiani P., Benesova W., Meneses M.D., Mora C. *Augmented reality to promote collaborative and autonomous learning in higher education*. Computers in Human Behavior, 51, 752–761 (2015).

Ng, S. C., Wong, C. K., Lee, T. S., y Lee, F. Y. Design of an Agent-based Academic Information System for Effective Education Management. Information Technology Journal: 10(9), 1784-1788 (2011).

Puello, Plinio; Cabarcas, Amaury y Martelo, Raúl. *Sistema de información gerencial para la administración de recursos educativos***.** Formación Universitaria, 6(5), 13-20. (2013)

Senn, J.A. (1992). *Análisis y Diseño de Sistemas de Información*. México: McGraw-Hill.

UNESCO. *Conferencia Mundial sobre la Educación Superior La educación superior en el siglo XXI Visión y acción. Informe Final. Tomo I*. UNESCO, París, Francia. Retrieved from: unesdoc.unesco.org/images/0011/001163/116345s.pdf. (1998).

Whitten, J, Bentley. L.D y K.C. Dittman. *Sistem análisis & design methods* citado por Fernández Vicenç, 2006: Desarrollo de sistemas de información: una metodología basada en el modelado. (2004)

Yassin, F. S., *The Influence of Organizational Factors on Knowledge Sharing Using ICT among* Teachers. *Procedia Technology, 11,* 272-280 (2013)

Zhan, H. F., Lee, W. B., Cheung, C. F., Kwok, S. K., yGu, X. J. *A web-based collaborative product design platform for dispersed network manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 138(1-3), 600– 604. (2003).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Superficie de Respuesta para Optimizar el Crecimiento del *Pleurotus pulmonarius* sobre tusa de maíz en una biorreactor de bandeja

Edisson Patiño-Suarez[1], , Margarita E. Ramirez Carmona[2] y Juan C. Oviedo Lopera[3]
(1) Alcaldía Medellín, Secretaria de Salud Municipio de Medellín, Cl. 42 #52 -106, Medellín-Colombia
(2) Fac. Ing. Química, Esc. Ingenierías, Univ. Pont. Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
(3) Fac. Ing. Agroindustrial, Esc. Ingenierías, Univ. Pont. Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
e-mail: juan.oviedo@upb.edu.co

Resumen

Los problemas de acceso a los alimentos y el alto precio de algunos compuestos como las proteínas hacen que se busquen alternativas para sustituir estos compuestos. Una forma de reemplazarlas es a través de las proteínas unicelulares (PUC), producidas a través de fermentación en estado sólido (FES). Se aplicó la metodología de superficie de respuesta, como proceso de enriquecimiento del proteico de la tusa de maíz, empleando *Pleurotus pulmonarius*. Para ello, se realizó una optimización a través de un superficie de respuesta central compuesto rotable 2^3 + *, con las veintitrés combinaciones. Las variables que se evaluaron fueron porcentaje de humedad, tamaño de partícula y adicción de minerales por medio de una mezcla organizada en un sistema de convención; el proceso se verificó en biorreactor de bandeja de 500 gr. Se obtuvo una concentración de proteína de 1.26 mg /100mL en el prototipo de biorreactor de bandeja reportado por el método Biuret logrando adicionalmente, una ganancia de proteína del 7.9%. Por otro lado, el biorreactor de bandeja, mostró un enriquecimiento una ganancia proteica de 132.35% y una productividad de 2 g Proteína/ g sustrato*L*d.

Response Surface to Optimize *Pleurotus pulmonarius* Growth on Corncob in a Bioreactor Tray

Abstract

The problems of access to food and the high price of some compounds such as proteins, make it look for alternatives to replace these compounds.One way to replace them is through unicellular proteins (SCP), produced through solid state fermentation (SSF). The response surface methodology was applied as a process of enrichment of corn protein, using Pleurotus pulmonarius. For this, an optimization was performed through a composite central response surface rotable 23 + *, with the twenty-three combinations. The variables that were evaluated were percentage of humidity, particle size and mineral addiction by means of a mixture organized in a convention system; the process was verified in 500 gr tray bioreactor. A protein concentration of 1.26 mg / 100mL was obtained in the Biuret bioreactor prototype of the tray, further achieving a protein gain of 7.9%. On the other hand, the tray bioreactor showed a protein gain of 132.35% and a productivity of 2 g Protein / g substrate * L * d.

Keywords: solid state fermentation, Pleurotus pulmonarius,tray bioreactor, cell protein

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que siempre ha enfrentado la humanidad, ha sido el acceso a los alimentos, ya sea por su escases o por los altos precios que estos tienen. Según la FAO (2015), en Colombia para el período de 2014 a 2016 la proporción de personas subalimentadas en la población total fue del 8.8%. Dentro de los problemas de escases y alto precios, se destaca el caso de las proteínas. En el caso particular de las de proteínas de origen animal, para el año 2016, en Colombia se reportaron los siguientes datos: los consumos de carne per capita de pollo, res y cerdo fue de 30 Kg(Fenavi, 2017), 18.6 Kg (Fedegan, 2017) y 8.6 Kg (Porkcolombia, 2017); para el caso de la carne de res, el incremento del costo acumulado fue de 28% (Katherin, 2017); aunque no se encontraron cifras para el cerdo y el pollo, es conocido que las materias primas para elaborar piensos para la alimentación de pollos y cerdos son similares, lo que probablemente hizo que también incrementaran su costo de producción anual, teniendo en cuenta además, aspectos económicos y fiscales que tuvo el país, durante 2015 y 2016 (Fenavi, 2016); es importante tener en cuenta, que las proteínas son uno de los componentes alimenticios más costos, además que su producción, sobre todo las de origen animal, que son las mas lentas de sintetizar de los otros grupos bioquímicos de alimentos (Oviedo *et a*l, 2016)

Con este panorama, se deben buscar alternativas para sustituir este tipo de proteínas y una de ellas son las celulares, también llamadas en la literatura científica con proteína unicelular (PUC), o SCP (por sus siglas en inglés, singell cell protein). Las PUC son proteínas producidas por procesos de fermentación controlada por cepas puras o mezcladas de hongos, bacterias, y algas unicelulares y filamentosas (Oviedo, 2016 y Wang 2012). Este tipo de proteínas podría ser a futuro una alternativa para reemplazar algunas de las fuentes tradicionales de proteína (soya, harina de pescado, suero descremado de leche) en piensos para el consumo animal, además de ser una alternativa para solventar el problema de la cada vez más limitada disponibilidad e ingesta de proteína (Hu, *et al*., 2013).

Para producir PUC, usualmente, se ha empleado bacterias y hongos filamentosos Entre las décadas de los 60s y 70s, los bioprocesos para obtener PUC empleaban como materia prima subproductos de la industria de los hidrocarburos y el petróleo. Sin embargo, hoy estos sustratos son económicamente inviables, debido a los incrementos del petróleo y sus derivados (Biocyclopedia, 2012; Ukaegbu-Obi, 2016); otra forma de producir PUC, es a través de setas, basidiomicetos u hongos comestibles, los cuales tienen como ventaja que emplean residuos agroindustriales que se producen en grandes cantidades y tiene un costo muy bajo (Oviedo *et al*, 2016),

Para el caso específico de este trabajo, se empleó como sustrato la tusa de maíz, un residuo que se obtiene cuando desgrana la mazorca o el elote. La tusa constituye alrededor del 40% del cuerpo completo (mazorca – granos – capacho), por lo que se destaca su gran generación dentro de la producción del cultivo de maíz (Beltran, A. Pineda, J., 2010). De esta manera, se aprovecha un residuo como sustrato para cultivar hongos comestibles para alimentación tanto animal como humana. Esta publicación, es la segunda fase de un trabajo, que en su primera parte se llevó a cabo en cajas de Petri evaluando las condiciones iniciales del cultivo, cuyos resultados se emplearon como insumo para la presente publicación. Con esos datos, se da inició al proceso de optimización en un fermentador solido de bandeja a escala piloto, con el objetivo de incrementar el enriquecimiento proteico.

EL MODELO

Tal como se mencionó anteriormente, como paso previo, se llevó a cabo un proceso de enriquecimiento proteico en cajas de Petri, con lo que se obtienen la condiciones iniciales del proceso de optimización; las variables que se evaluaron fueron: Porcentaje de humedad (%), tamaño de partícula (mm) y la mezcla de minerales; los minerales que se adicionaron fueron Mg, K y N a partir de sales, $MgSO_4$, K_2HPO_4 y $(NH_4)_2SO_4$, respectivamente. Con el fin de facilitar la mezcla de las sales, se implementó un sistema de convención de acuerdo a la mezcla de sales, para facilitar su denotación durante este documento, como se muestra la Tabla 1.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1. Sistema de convenciones para la mezcla de minerales a partir de sales.

Niveles	Adición de Minerales para el Diseño de Experimentos	
	Convención	Concentración y Composición
Superior	10	0.04g / 100 mL de $MgSO_4$; 0.2g /100 mL de K_2HPO_4 y 0.2g /100 mL de $(NH_4)_2SO_4$).
Inferior	5	0.02g / 100 mL de $MgSO_4$; 0.1g /100 mL de K_2HPO_4 y 0.1g /100 mL de $(NH_4)_2SO_4$).
Central	7.5	0.03g / 100 mL de $MgSO_4$; 0.15g /100 mL de K_2HPO_4 y 0.15g /100 mL de $(NH_4)_2SO_4$).
Axial Superior	11.4	0.046g / 100 mL de $MgSO_4$; 0.23g /100 mL de K_2HPO_4 y 0.23g /100 mL de $(NH_4)_2SO_4$).
Axial Inferior	3.3	0.013g / 100 mL de $MgSO_4$; 0.066g /100 mL de K_2HPO_4 y 0.066g /100 mL de $(NH_4)_2SO_4$).

A principio del apartado el modelo, se explicó que el trabajo era la continuación de un proceso previo, donde se evaluaron humedad, tamaño de partícula y sales minerales. Los niveles de las variables a optimizar en el proceso de FES sobre la tusa de maíz, en este trabajo, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles de las variables analizadas mediante el modelo RSM

Niveles	Humedad %	Tamaño Partícula (mm)	Minerales (Convención)
Superior	82.0	5.0	10.0
Inferior	78.0	4.0	5.0
Central	80.0	4.5	7.5
Axial Inferior	83.6	5.3	11.4
Axial Superior	76.4	3.6	3.3

En la Tabla 3 se muestra la matriz del diseño de optimización (superficie de respuesta central compuesto rotable 2^3 + *), con las veintitrés combinaciones.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 3. Matriz de diseño de optimización a través de la superficie de respuestas

Cajas/Ensayo	Humedad %	Tamaño Partícula (mm)	Convención Minerales
1	80.0	4.5	7.5
2	80.0	4.5	7.5
3	80.0	4.5	7.5
4	80.0	4.5	7.5
5	83.6	4.5	7.5
6	80.0	5.3	7.5
7	80.0	4.5	7.5
8	80.0	4.5	11.4
9	80.0	3.6	7.5
10	80.0	4.5	7.5
11	78.0	5.0	10.0
12	80.0	4.5	7.5
13	78.0	5.0	5.0
14	82.0	5.0	5.0
15	78.0	4.0	5.0
16	80.0	4.5	3.3
17	78.0	4.0	10.0
18	82.0	4.0	5.0
19	80.0	4.5	7.5
20	80.0	4.5	7.5
21	82.0	4.0	10.0
22	82.0	5.0	10.0
23	76.4	4.5	7.5

El montaje del experimento de optimización, se realizó de manera simultánea, se prepararon las 23 cajas con cada una de las tres condiciones de las variables (humedad, minerales y tamaño de partícula) establecidas por la matriz del diseño de experimentos, empleando en las cajas de petri aproximadamente 15 g de sustrato, ajuste de pH a 5.7 con adición de HCL, esterilización del sustrato (121 ºC por 30 min), inoculación en el centro de la caja 4mm de cepa de *Pleurotus pulmonarius* empleando siempre cámara de siembra para evitar la contaminación, e incubación durante 48 horas. Finalmente se cuantificó el enriquecimiento proteico de cada caja, empleando el método de Biuret que inicialmente requiere del proceso de extracción de proteína del sustrato descrito por Oviedo y colaboradores (2014), se calculó la concentración de proteína en cada combinación de la matriz, con los resultados obtenidos se alimentó el programa Statgraphics Centurion XV, el cual analizó las diferentes combinaciones con sus respuestas de proteína obtenidas y calculó finalmente las condiciones óptimas de las variables probadas en el proceso de FES de la tusa de maíz, utilizando el *Pleurotus pulmonarius*.

Las condiciones óptimas encontradas a microescala se llevaron a ensayo. Las cuales fueron probadas en un prototipo de biorreactor de bandeja a escala semipiloto, conservando todas las mismas condiciones anteriores además el mismo grosor del lecho de la caja de petri de 8 milímetros y aprovechando el área superficial de la bandeja del biorreactor, buscando así criterios válidos para aumentar el volumen fermentado y evitar en el experimento variaciones significativas de la temperatura, considerada el factor más crítico en el escalado de procesos de fermentación en estado sólido. El biorreactor utilizado está construido de fibra de vidrio, basado en un diseño de biorreactor de bandeja con un tamaño de 25cm^2, su descripción de abajo hacia arriba consta de un tanque de agua, una base que soporta la bandeja, una bandeja construida en malla metálica para facilitar la aireación, un termómetro y una tapa plástica.

El prototipo de biorreactor fue cargado con 500g (capacidad de la bandeja a un espesor de lecho aproximado 7 a 8 milímetros) de tusa de maíz previamente esterilizados y esparcidos uniformemente en la bandeja, luego se realizó la inoculación con *Pleurotus pulmonarius* previamente sembrado en cebada de trigo, utilizando un 3% del peso de la carga total del biorreactor, después se incubo durante 180 horas (7,5 días) en oscuridad y a temperatura ambiente, realizándose monitoreo de temperatura durante todo el proceso de fermentación, para comprobar que la temperatura no varía y que el calor generado por el metabolismo del hongo no aumenta la temperatura interna de fermentación a estas condiciones y finalmente se cuantificó la proteína transformada en el proceso por el mismo método que se viene utilizando en la investigación (Biuret) y por el método Kjeldahl, el

ISBN 978-607-8242-11-5

cual se empleó en la cuantificación proteica inicial del sustrato para observar en porcentaje el enriquecimiento. Este ensayo se realizó por cuatro veces para validar el ensayo y corregir el error.

Finalmente, se calcularon el porcentaje de proteína ganada y la productividad del biorreactor, según los métodos modificado según Schmidt y Furlong (Schmidt & Furlong, 2012) que aparece en la Ecuación 1 y Mitchell y colaboradores (Mitchell, D. Krieger, N. Berovic, M, 2006) que se describe en la Ecuación 2, respectivamente.

$$\%PG = \left(\frac{CF-CI}{CI}\right) * 100 \quad (1)$$

Donde, %PG, es el porcentaje de proteína ganada; CF, es la concentración de proteína enriquecida en la tusa al final del bioproceso y CI, es la concentración de proteína de la tusa al inicio del bioproceso.

$$Productividad = \frac{Pf-Po}{t*V} \quad (2)$$

Donde, Pf, es la cantidad o concentración de producto obtenido al final del bioproceso, Po, es la cantidad o concentración de producto al inicio de bioproceso, t, del bioproceso y V, el volumen del biorreactor.

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los efectos de cada variable y sus interacciones de segundo orden fueron se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Efectos estimados para el diseño compuesto central

Factor	Efecto ± error estándar
Media Global	1.34 +/- 0.049
Humedad (H)	-0.192 +/- 0.080
Tamaño Partícula (P)	0.189 +/- 0.080
Minerales (M)	0.169 +/- 0.080
H-H	-0.759 +/- 0.074
H-P	0.012 +/- 0.105
H-M	-0.037 +/- 0.105
P-P	-0.154 +/- 0.074
P-M	0.017 +/- 0.105
M-M	-0.084 +/- 0.074

El valor absoluto de los efectos de los factores de primer orden (no interactuantes: Humedad, tamaño de partículas y minerales) significa el porcentaje de influencia del factor sobre la variable de respuesta. Los signos de los efectos estimados indican en qué nivel del factor se presenta esa influencia. Es decir que un cambio en el valor de los factores humedad, tamaño de partículas y minerales, desde el nivel inferior hasta el superior produce cambios en la variable respuesta. El análisis anterior puede extenderse también a los efectos de las interacciones, aunque en el caso de los signos el significado ya no será tan explícito por tratarse de contrastes entre los factores. Como puede observarse en los resultados las tres variables analizadas influencian sobre el desempeño del proceso de enriquecimiento en FES y a la vez la parte cuadrática de la humedad también tiene un efecto apreciable lo que ratifica la relevancia de la humedad sobre el proceso de FES; donde la humedad aporta un 0.192% a la FES en su nivel inferior, el tamaño de partícula aporta un 0.189% a la FES en su nivel superior y los minerales aportan un 0.169% a la FES en su nivel superior.

A través de la prueba t de Student se evaluó si los efectos estimados de los factores y sus interacciones son significativamente diferentes de cero. El análisis de la prueba t se hace sobre los efectos estandarizados de los factores de primer y segundo orden, el cual es calculado como la razón entre el efecto estimado y su error estándar. Por medio de la Figura 1, se muestran los resultados de la t de Student, mediante un gráfico dePareto.

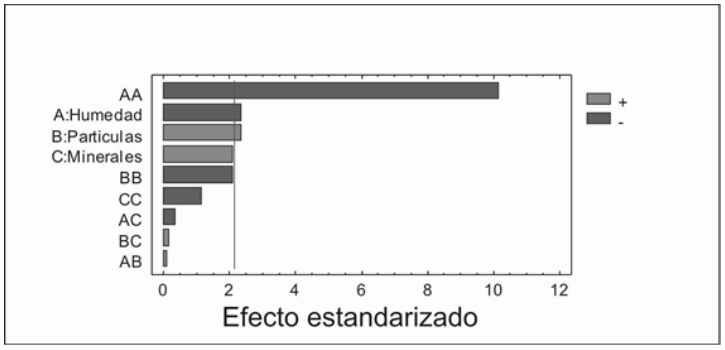


Figura 1. Gráfico de Pareto de los efectos estimados y sus interacciones

Se puede extraer del gráfico que los parámetros que más influencia tienen en el proceso de FES de la tusa de maíz empleando el *Pleurotus pulmonarius* son humedad y tamaño de partículas que son estadísticamente significativos, al igual que la interacciones A*A, además el resto de interacciones entre ellas mismas no presentan significancia por estar alejadas del límite de confianza.

Con el objeto de evaluar que tan significativamente afectan los factores y sus interacciones al proceso de estudio, se llevó a cabo la prueba F por medio de una ANOVA para un nivel de confianza del 95%, como aparece en la Tabla 5

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 5. ANOVA para el enriquecimiento proteico de la tusa de maíz.

Fuente	SS	Gl	MS	Fº
Humedad (H)	0.125	1	0.125	5.68
Tamaño Partícula (P)	0.122	1	0.1222	5.54
Minerales (M)	0.097	1	0.097	4.42
HH	2.291	1	2.291	103.42
PH	0.0003	1	0.0003	0.01
HM	0.002	1	0.002	0.13
PP	0.095	1	0.095	4.3
PM	0.0006	1	0.0006	0.03
MM	0.028	1	0.028	1.27
Total Error	0.288	13	0.022	

Al analizar los resultados presentados en la tabla ANOVA se compararán los valores de Fº con el dato anterior, de tal forma que aquellos que tengan un valor mayor serán significativos estadísticamente y aquellos que tengan un valor menor no lo serán. De la Tabla 3 se puede observar que solo los factores humedad y tamaño de partículas, al igual que la interacción A*A, son significativos estadísticamente, lo cual corrobora los resultados arrojados por la prueba t de Student, debido a que los F^0 de las variables antes mencionadas son mayores que el F teórico expresado en la tabla t de Student; donde el valor de F con un grado de libertad en el numerador y 13 grados de libertad en el denominador es de 4.67, para un nivel de confianza del 95%. De acuerdo a lo anterior, en la Tabla 6, se muestra los resultados óptimos del proceso.

Tabla 6. Resultado de la optimización

Variable	Valor Óptimo
%Humedad	80.00
Tamaño de Partícula (mm)	4.80
Minerales (Convención)	10.00
Proteína (mg/100mL)	1.42

Debido a que en la mayoría de problemas de RSM se desconoce la relación entre la respuesta y las variables independientes, se debe determinar una aproximación adecuada por medio de modelos polinómicos. El método de mínimos cuadrados es utilizado para estimar los parámetros del polinomio de aproximación. La superficie de respuesta, es una técnica secuencial cuyo objetivo consiste en determinar las condiciones de operación óptimas para un sistema, o determinar la región del espacio de los factores en la que se satisfacen las condiciones de operación. Uno de los diseños más utilizados es el 2k + estrella ,rotable y ortogonal, que consiste en un diseño factorial 2k, al que se le han adicionado 2k puntos axiales, a una distancia α del centro y un número determinado de puntos centrales (Montgomery, 1999)

En realidad el valor de la humedad, fue 79.8%, sin embargo por practicidad en los cálculos y en el proceso, se dejó 80%. En el método de medición de proteína empleado en la investigación (Biuret) al realizar una prueba de cuantificación de proteína en la tusa de maíz solo sin crecimiento de microorganismo, no se reporta contenido de proteína inicial y después del proceso de FES con el crecimiento del hongo se obtiene un enriquecimiento proteico de 1.42 mg/100 mL. Las condiciones óptimas encontradas y probadas a escala semipiloto en un prototipo de birreactor de bandeja, dieron como resultado un enriquecimiento proteico de 1.42 mg/mL a condiciones de microescala, siendo estos ensayos un aporte inicial para lograr un escalonado del proceso de FES de la tusa de maíz y poder fomentar el aprovechamiento de este sustrato y otros residuos agroalimentarios. El resultado final de la cuantificación del enriquecimiento proteico de la tusa de maíz empleando el método Kjeldahl fue de 7.9%; lo que indica que comparado con la determinación inicial de 3.4% hay un enriquecimiento del substrato.

Los cálculos correspondientes a % de proteína ganada y productividad, se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultado de enriquecimiento proteico en el biorreactor de bandeja

Variable	Valor
Ganancia (%)	132.35
Productividad (g Proteína/ g sustrato*L*d)	1.2

ISBN 978-607-8242-11-5

Los resultados obtenidos, muestran que con las FES, se pueden aprovechar residuos como el del maíz, por medio de un proceso de bajo nivel tecnológico, reducido volumen del reactor por unidad de peso de sustrato convertido y la directa aplicabilidad del producto fermentado como propósito para la alimentación (Niga et al, 1996; Robinson y Nigan, 2002)

El incremento proteico de 132.35%, podría parecer exagerado, sin embargo, un incremento superior fue reportado por Dhillon, Kaur y Brar (2013) con un valor del 500% de proteína con *Candida utilis* y *Pleurotus ostreatus* en pulpa de manzana (Dhillon, Kaur, & Brar, 2013). El enriquecimiento proteico en la tusa de maíz, podría explicarse entre otras razones desde la biodegradación de la celulosa, hemicelulosa y la lignina; este último proceso, es catalizado por las actividades de los complejos enzimáticos de las oxidorreductasas, lacasas y peroxidasas. Dichos complejos enzimáticos, se encuentran en los hongos descomponedores de la madera, en los que se incluye el Pleurotus pulmonarius, además del incremento nutricional de residuos lignocelulósicos entre otros, a través la proteína (Knežević et al., 2013).

De otro lado, la mayoría de los organismos cultivados en tejidos lignocelulósicos, pueden producir células ricas en proteínas que permanecen en el sustrato después del proceso de fermentación, contribuyendo a un aumento en el contenido de proteína (Villas-Bôas, Esposito, & Mitchell, 2002) . El aumento en el nivel de proteína, es uno de los objetivos de la bioconversión de los residuos lignocelulósicos a través microrganismos o basidiomicetos en residuos agroindustriales, además de aumentar la digestibilidad y mejorar el sabor del producto.

En la bibliografía se encuentran trabajos para la producción de PUC, con hongos filamentosos, como los realizados por Álvarez y colaboradores (Alvarez, M. Larrea, P. Paredes, M., 2010) en el cual se tenía como sustrato el banano de rechazo y se alcanzó un aumento en la proteína del 9,56% empleado *Aspergillus niger*. Por su parte, Brizuela y colaboradores (Brizuela, 1998) pudieron enriquecer proteicamente los residuos de la cosecha de caña hasta niveles entre 6 y 10 %, con el hongo filamentoso *Aspergillus terreus*. En el caso de basidiomicetos, Membrillo y colaboradores (Membrillo et al., 2011) lograron obtener 809 µg proteína/g seco de sustrato con *Pleurotus ostreatus* en bagazo de caña y Darwish y colaboradores (Darwish, Bakr, & Abdallah, 2012) lograron incrementar el contenido proteico 2,75 veces con *Pleurotus ostreatus* empleando tallos de maíz como sustrato; estos autores lograron aumentar 3,3 veces el contenido proteico de los tallos de maíz, empleado *Saccharomyces cerevisiae* como ingrediente para la fermentación.

CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo, permitió un enriquecimiento proteico en el proceso de FES de la tusa de maíz; empleando al hongo *Pleurotus pulmonarius*, es de 1.26 mg /100mL en el prototipo de biorreactor de bandeja reportando por el método Biuret logrando adicionalmente, una ganancia de proteína del 7.9%. Adicionalmente, el biorreactor de bandeja, mostró un enriquecimiento una ganancia proteica de 132.35% y una productividad de 2 g Proteína/ g sustrato*L*d

REFERENCIAS

Alvarez, M. Larrea, P. Paredes, M. (2010). Fermentación sólida del banano de rechazo utilizando Aspergillus niger para alimento animal. Ambato: Universidad Técnica.

Beltran, A. Pineda, J. (2010). Valorización de la tusa de maíz para la producción de proteína con *Pleurotus pulmonarius*. Medellín: Trabajo de grado de Ingeniero Químico. Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierias.

Brizuela, M. A. (1998). Enriquecimento proteico de resíduos de cosecha cañera por FES con hongos filamentosos. Laborat acta, 10(3), 85-88.

Darwish, G. a. M. a., Bakr, a. a., & Abdallah, M. M. F. (2012). Nutritional value upgrading of maize stalk by using *Pleurotus ostreatus* and *Saccharomyces cerevisiae* in solid state fermentation. Annals of Agricultural Sciences, 57(1), 47–51. doi:10.1016/j.aoas.2012.03.005

Dhillon, G. S., Kaur, S., & Brar, S. K. (2013). Perspective of apple processing wastes as low-cost substrates for bioproduction of high value products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27, 789–805. doi:10.1016/j.rser.2013.06.046

FAO, "*Mapa del Hambre*", El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo 2015, Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i4674s.pdf. 2015

FEDEGAN, *Balance y perspectivas del sector ganadero colombiano 2016-2017*, Contexto Ganadero, Oficina de Planeación, 2017

 ISBN 978-607-8242-11-5

Hu, C., Liu, L, Yang, S., 2013. Protein enrichment, cellulase production and *in vitro* digestion improvement of pangolagrass with solid state fermentation. Journal of Microbiology, Immunology and Infection, Volume 45, Issue 1, February, pp 7–14

Katherin A. "*Los colombianos comen 31 kilos de pollo, 18 de res y ocho de cerdo cada año*." Diario la Republica, Jueves, 9 de marzo de 2017.

Knežević, A., Milovanović, I., Stajić, M., Lončar, N., Brčeski, I., Vukojević, J., & Cilerdžić, J. (2013). Lignin degradation by selected fungal species. Bioresource Technology, 138, 117–23. doi:10.1016/j.biortech.2013.03.182

Membrillo, I., Sánchez, C., Meneses, M., Favela, E., & Loera, O. (2011). Particle geometry affects differentially substrate composition and enzyme profiles by *Pleurotus ostreatus* growing on sugar cane bagasse. Bioresource Technology, 102(2), 1581–1586. doi:10.1016/j.biortech.2010.08.091

MONTGOMERY, Douglas C. *Diseño y análisis de experimentos*. México distrito federal. Ed. Limusa S.A. 1999.

NIGAM P. et, al. Ind.Res. (1996) citado por ROBINSON T. and NIGAN Poonam. *Bioreactor design for protein enrichment of agricultural residues by solid state fermentation* En: Biochemical Engineering Journal, Northern Ireland; Vol. 13 (Julio);2002. p. 198-204

Oviedo, Juan C et al."*Análisis de la Medición de la Biomasa en Fermentación en Estado Sólido empleando el Modelo Logístico y Redes Neuronales*." Inf. tecnol., 2014, vol.25, no.4, p.141-152. ISSN 0718-0764

Oviedo, Juan C et al."*Evaluación de Tres Variables de Crecimiento del Pleurotus pulmonarius sobre Tusa de Maíz Empleando Procesamiento Digital de Imágenes"*., Inf. tecnol., 2016, vol.27, no.5, p.27-36. ISSN 0718-0764

Oviedo-Lopera, J.C., Zapata, D. L., Garcia, L., Echeverri, N. y Echeverri, D., "*Evaluación del enriquecimiento proteico de residuos de papa y yuca con Paecilomyces variotti*", Revista Ingeniería y Región, 16(2), 73-83 (2016).

PORKCOLOMBIA, *ANÁLISIS DE COYUNTURA DEL SECTOR PORCICULTOR DEL AÑO 2016 Y PERSPECTIVAS 201*7, Boletín, Asociación Porkcolombia, Fondo nacional de la porcicultura, 2017

Portada Fenavi, No 250. El momento de la Avicultura

Villas-Bôas, S. G., Esposito, E., & Mitchell, D. A. (2002). Microbial conversion of lignocellulosic residues for production of animal feeds. Animal Feed Science and Technology, 98(1-2), 1–12. doi:10.1016/S0377-8401(02)00017-2

Wang, C., Li, Y., 2012. Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass. Biotechnology Advances, 30(6), p 1447–1457.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Estudio numérico de la disipación viscosa inducida por un impulsor de alto corte en un tanque agitado sin deflectores

Román Guadarrama-Pérez[1], Gastón Martínez-de Jesús[1], Jorge Ramírez-Muñoz[1], Valaur E. Márquez-Baños[2]
(1) Depto. De Energía, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, MÉXICO.
(2) Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México, MÉXICO.
al2153806067@azc.uam.mx, g.martinez.dj@gmail.com, jrm@correo.azc.uam.mx, vekbalam@gmail.com

Resumen

Se estudió el flujo tridimensional laminar y estacionario inducido por un impulsor de alto corte de dos anillos tipo Hockmeyer utilizando el enfoque de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El estudio se realizó en un tanque agitado sin deflectores. Se evaluó el efecto de la altura del fluido de trabajo (Z) (expresada de forma adimensional como Z/T, siendo T el diámetro del tanque) y del tipo de fluido (newtoniano y adelgazante) en la disipación de energía viscosa inducida por el impulsor. Con el fin de capturar detalles de la hidrodinámica en la región cercana al impulsor y extraer valores promedio de la disipación de energía en esta región, la malla computacional se dividió en diferentes volúmenes. Se utilizó el enfoque de marcos de referencia múltiples (MRF) para modelar el flujo y el modelo de volumen de fluido (VOF) para modelar la evolución de la interface líquido-aire. Los resultados de las simulaciones fueron analizados estadísticamente mediante un análisis de varianza y los resultados numéricos fueron validados con mediciones de potencia experimentales. Dicho análisis arrojó con un nivel de confiabilidad del 95.0% que existe un efecto significativo de Z/T y del tipo de fluido en la disipación de energía viscosa. Se encontró que, los valores de la disipación viscosa en la región cercana al impulsor son mucho más altos para el caso del fluido adelgazante. Estos resultados sugieren que modificar la reología del fluido (slurry) en procesos industriales de dispersión de sólidos mediante el uso de un fluido adelgazante permitiría en principio alcanzar una mejor eficiencia de dispersión a una misma potencia inyectada.

Abstract

The three-dimensional laminar and stationary flow induced by a high-shear impeller of two rings Hockmeyer-type was studied with Computational Fluid Dynamics (CFD) approach. The study was carried out in a stirred tank without baffles. The effect of the fluid height (Z) (expressed as dimensionless Z / T, where T is the diameter of the tank) and the type of working fluid (Newtonian and shear thinning) in the energy viscous dissipation induced by the impeller was evaluated. In order to capture the hydrodynamics in the region near the impeller and to extract average values of the energy dissipation in this region, the computational mesh was divided into different volumes. The multiple reference frames (MRF) approach and volume of fluid model (VOF) were used to model the flow and the evolution of the liquid-air interface. The simulations results were analyzed statistically by an analysis of variance and the numerical results were validated with experimental power measurements. The analysis of variance showed with a reliability level of 95.0% that there is a significant effect of Z/T and the fluid type on the viscous energy dissipation. It was found that the viscous dissipation values in the region near the impeller are much higher for the shear thinning fluid case. The results obtained in this study suggest that modifying the slurry rheology in industrial solids dispersion processes by the use of a shear thinning fluid, would allow in principle, achieve a better dispersion efficiency at the same injected power

Keywords: CFD, Shear thinning fluid, Newtonian fluid, viscous energy dissipation, high shear impeller.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El mezclado es una operación unitaria importante y de uso común en la industria química, alimentaria y biotecnológica, por mencionar algunas (Chhabra y Richardson, 1999). Generalmente se lleva a cabo en tanques agitados a través usando impulsores rotativos o mediante jets que generan chorros de líquido a alta velocidad (Murthy Shekhar y Jayanti, 2002). Los tanques agitados mecánicamente son preferidos para para obtener un nivel adecuado de uniformidad debido a que presentan una gran versatilidad, especialmente en la mezcla de fluidos multifásicos (Ranade, 2002).

Existen diversos tipos de impulsores los cuales pueden ser de flujo axial, radial o mixto, dependiendo de las características de mezclado requeridas. Los impulsores axiales se emplean típicamente para procesos limitados por flujo (e.g., suspensión de sólidos), mientras que los impulsores radiales se utilizan para procesos limitados por corte (e.g., dispersión de gases en un líquido) (Paul et al., 2004). Dentro de los impulsores que imponen un flujo radial, existe una gama especial llamada, impulsores de alto corte (IAC) que son dispositivos de mezclado comúnmente usados en la industria de pinturas y recubrimientos, cosmética y farmacéutica (Nienow et al., 1997). Los IAC son dispositivos que se encuentran ubicados en la parte baja de un eje el cual gira a velocidades periféricas relativamente altas. Estos dispositivos se caracterizan por su capacidad de suministrar grandes cantidades de energía localizada la cual es útil para la dispersión de aglomerados de pigmentos (Xie et al., 2007; Xie et al., 2008).

Por otro lado, debido a la gran variedad de impulsores presentes en el mercado, es muy importante seleccionar el más adecuado para un proceso en particular. El criterio de selección del impulsor dependerá del tipo de mezcla, de la capacidad del recipiente y de las propiedades del fluido, principalmente la viscosidad (Das, 2005). Los agitadores convencionales (e.g., turbina de paletas planas, turbina de paletas inclinadas, de hélice o cintas helicoidales) son mezcladores eficientes, pero generalmente no son capaces de entregar la energía que localmente se requiere para provocar el rompimiento de los aglomerados, esto sin importar el tiempo que se mantenga la agitación (Freudig et al., 1999; Hockmeyer, 2010). Por lo cual, la dispersión de material aglomerado usando agitadores convencionales con frecuencia se lleva a cabo de manera insatisfactoria (Freudig et al., 1999). En cambio, los impulsores de alto corte (e.g., de dos anillos tipo Hockmeyer) suelen inducir zonas de elevado cizallamiento (i.e. disipación de energía) y alto flujo en las cercanías de las cuchillas, lo que genera fuerzas de corte y niveles de bombeo suficientes para primero desaglomerar las partículas y después distribuirlas uniformemente en el medio (Paul et al., 2004; Hockmeyer, 2010).

Los IAC son usados en la industria de pinturas en tanques cilíndricos sin deflectores, operando en el régimen de flujo laminar y de transición a turbulento, esto último para crear un pequeño vórtice en la superficie libre, útil para succionar rápidamente los pigmentos en polvo adicionados en la superficie del fluido hacia la zona de alto corte del impulsor (Hockmeyer, 2010; Jorge Ramírez-Muñoz, García-Cortés, et al., 2016). Este régimen de flujo es útil para inducir los gradientes de velocidad máximos en la zona de barrido del impulsor (Ramírez-Gómez et al., 2015).

Con el fin de lograr las especificaciones finales de calidad del producto a fabricar (e.g. pasta dental), normalmente en la etapa de dispersión del proceso fabricación se presentan altas concentraciones de sólidos, y las viscosidades efectivas del medio están en el rango entre 0.8-9.0 Pa·s. Además de la posibilidad de que el fluido adquiera propiedades no newtonianas por los ingredientes añadidos o que ciertas propiedades reológicas que sean requeridas en el producto final. A pesar del interés práctico, la mayoría de la información técnica encontrada acerca de los impulsores de alto corte operando en el régimen laminar y de transición, es escasa y a veces únicamente es la publicada por los fabricantes de estos equipos, los cuales no presentan análisis exhaustivos de lo ocurrido en estos impulsores.

Recientemente Ramírez-Gómez et al. (2015) y Ramírez-Muñoz et al. (2016) compararon experimentalmente el desempeño de la turbina Rushton y el impulsor Hockmeyer en un líquido newtoniano. Ellos reportaron una relación directa entre la tasa de desaglomeración de polvo mineral y la tasa de disipación de energía viscosa obtenida de manera numérica. Además, encontraron que a una misma potencia inyectada el impulsor tipo Hockmeyer de dos anillos es más eficiente que la turbina Rushton para procesos de dispersión de polvos. Esto debido a que una mayor disipación de energía efectiva se produce dentro del volumen barrido por la cuchilla del impulsor de alto corte. Con base en los resultados experimentales y numéricos, los autores sugieren que la región barrida por las cuchillas del impulsor debe ser considerada como la región de máxima disipación de energía efectiva para la desaglomeración de partículas.

ISBN 978-607-8242-11-5

Lo discutido anteriormente corrobora la importancia que tiene la disipación viscosa en los procesos de dispersión operados en el régimen laminar, a pesar de ello los estudios para impulsores de alto corte en este régimen aún son escasos y no existen trabajos reportados donde se evalúe de manera sistemática el efecto de variables como la reología del fluido, el tipo de impulsor o el efecto de las relaciones geométricas sobre la disipación de energía. Con la finalidad de avanzar en el entendimiento de este tipo de agitadores, en este trabajo se realiza un estudio empleando simulación CFD del efecto de la altura del fluido de trabajo, es decir, la relación geométrica Z/T, así como el efecto tiene el uso de un fluido newtoniano o un fluido adelgazante en la disipación de energía viscosa generada por un impulsor de alto corte tipo Hockmeyer®

MATERIALES Y METODOS

Equipo experimental

Las relaciones geométricas adimensionales correspondientes a la distancia del impulsor al fondo del tanque (C) y el diámetro del impulsor (D) que se usaron fueron C/T=D/T=0.3848, y los diferentes valores de la para la altura del fluido de trabajo evaluados fueron Z/T = 1.00, Z/T = 0.80. Se trabajó con un tanque de fondo toriesférico con diámetro (T) de 132 milímetros. Para generar el movimiento del fluido se utilizó un impulsor de alto corte tipo Hockmeyer® de dos anillos acoplado a un equipo de agitación Dispermat® tipo AE01.

Para la obtención del fluido newtoniano se preparó una solución de glucosa al 37.0% en peso con agua destilada. El fluido no newtoniano (adelgazante) fue generado a partir de una solución de carboxi-metil-celulosa (CMC) al 1.5% en peso usando agua destilada. La densidad se determinó considerando la masa del fluido en una probeta de 50 mL. Las propiedades reológicas de estas soluciones fueron determinadas en un reómetro Anton Paar modelo MCR 502. Las propiedades para el fluido newtoniano fueron μ=1.08 Pa·s y ρ=1338 Kg·m^{-3} y en el caso del fluido no newtoniano se obtienen los valores para el modelo ley de potencia n=0.3463 y K=14.38, con ρ=997 Kg·m^{-3}.

El torque generado en el sistema de agitación se midió empleando un sensor de torque marca Futek modelo TRH300-FSH1980 acoplado a la flecha del sistema de agitación Dispermat® tipo AE01. Se obtuvieron experimentalmente los valores del torque a diferentes velocidades de agitación (500-1000 rpm). La información generada por el sensor de torque se procesó en tiempo real mediante un sistema de adquisición de datos. El sistema de adquisición de datos consiste en dos dispositivos: (1) el transductor de señal Andilog® modelo CNR-EA-TRD6, el cual recibe la señal emitida por el sensor de torque, y (2) el software Caligraph versión 1.3.0, que nos permite tener los datos registrados por el transductor en un formato adecuado para su análisis. En la Figura 1 se muestra de manera general la configuración del sistema experimental.

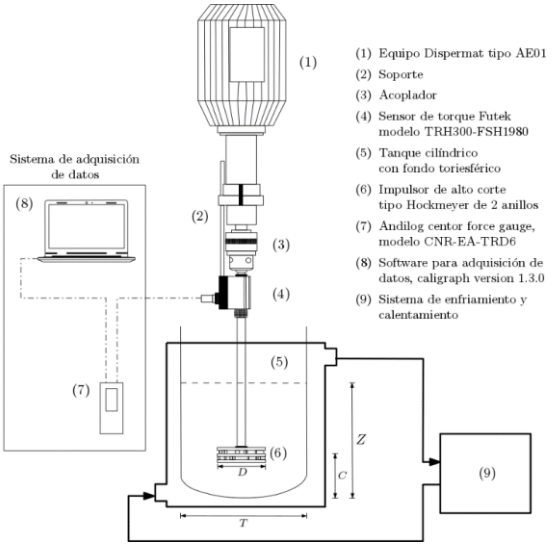


Figura 1. Diagrama de la configuración experimental

La potencia inyectada al sistema, se determinó a partir del torque mediante la siguiente ecuación:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$P_T = 2\pi N\Im \tag{1}$$

Donde N representa la velocidad de agitación en s^{-1} y $\Im$ el torque en N·m.

Metodología numérica

La digitalización, el mallado y la simulación de los sistemas de mezclado se realizaron en DesignModeler, Meshing y Fluent, respectivamente, siendo todos módulos de Ansys® versión 17.1. Se trabajó con una computadora de escritorio de 64 bits con procesador Intel Core i7-4790k y 32 GB de memoria RAM. Con la finalidad de reducir el tiempo cómputo y aprovechando la periodicidad del flujo, el modelo construido considera solo la sexta parte del sistema, reduciendo así, en aproximadamente un 83.0% el costo computacional.

La solución numérica se realizó mediante el modelo de Marco de Referencia Múltiple (MRF, por sus siglas en inglés), para ello, se consideran dos regiones dentro del dominio computacional: 1. Marco de Referencia Estacionario (SRF, por sus siglas en inglés) y, 2. Marco de Referencia Rotativo (RRF, por sus siglas en inglés). Con el propósito de obtener valores promedio de los parámetros de interés en regiones específicas, se construyeron distintos volúmenes dentro del RRF (Figura. 2): el volumen barrido por el impulsor (V_{IS}), compuesto por el volumen barrido por las cuchillas (V_{BS}) y el volumen barrido por el centro (V_{CS}), y tres volúmenes que envuelven a V_{IS}, nombrados como V_1, V_2 y V_3.

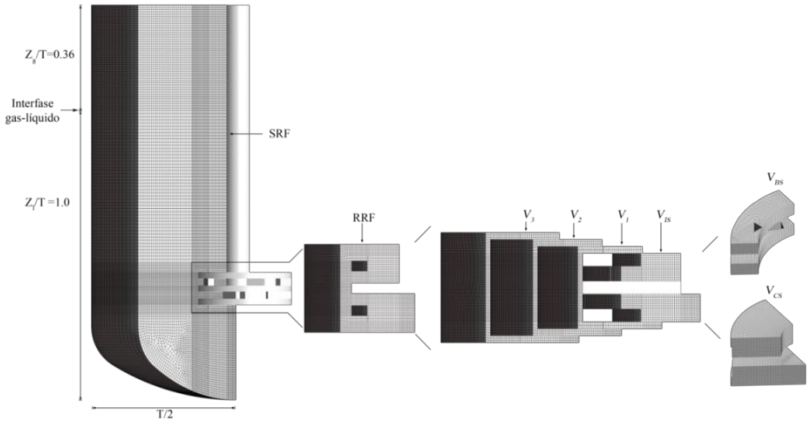


Figura. 2. Dominio computacional y los volúmenes de análisis definidos.

En cuanto a los modelos de flujo, las ecuaciones (2) y (3) describen el movimiento del fluido dentro del tanque,

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{2}$$

$$-\nabla P + \eta\left[\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T\right] + \rho\vec{g} = 0 \tag{3}$$

Donde η representa la viscosidad aparente está determinada por el modelo de ley de potencia y $\vec{v}$ es la velocidad del fluido.

$$\eta = K\left(\dot{\gamma}\right)^{n-1} \tag{4}$$

Donde $\dot{\gamma}$ es la tasa de corte,K y n son el índice de consistencia y de flujo, respectivamente. En el caso n=1, se tiene η=μ, i.e., la viscosidad del fluido newtoniano.

Para representar la deformación de la interface gas-líquido se utilizó el modelo de volumen de fluido (VOF, por sus siglas en inglés). La altura del fluido de trabajo se establece definiendo la fracción volumen de líquido en el dominio computacional. El acoplamiento entre presión-velocidad se realizó por medio del esquema Coupled y, en la discretización espacial se utilizaron los esquemas PRESTO Y QUICK para la presión y el momento, respectivamente.

El mínimo número de elementos necesarios para la solución de estas ecuaciones se determinó mediante un análisis de independencia de malla basado en el refinamiento por gradientes de velocidad, considerando como parámetro de evaluación la potencia neta, y la potencia en las distintas regiones definidas alrededor del

ISBN 978-607-8242-11-5

impulsor. La potencia neta es calculada a partir del torque extraído de las simulaciones y ecuación (1). La potencia también es calculada mediante la disipación viscosa de energía y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\varepsilon} = 6 \cdot \left[\int -\left(\overline{\overline{\tau}} : \nabla \vec{v} \right) dV \right] \tag{5}$$

Donde el factor 6 se introduce debido a que solo se está trabajando con la sexta parte del dominio computacional, $\overline{\overline{\tau}}$ representa el tensor de esfuerzos viscosos. El producto $-\left(\overline{\overline{\tau}} : \nabla \vec{v} \right)$ puede escribirse como:

$$-\left(\overline{\overline{\tau}} : \nabla \vec{v} \right) = \eta \left(\nabla \vec{v} \right)^2 \tag{6}$$

Para la validación del modelo computacional, fueron comparados los valores de potencia (basado en torque y disipación) obtenidos numéricamente con los obtenidos por experimentación a diferentes velocidades de agitación. El efecto de la altura del fluido de trabajo y del tipo de fluido sobre la disipación de energía viscosa, se evalúo a una potencia inyectada de 24 W. Los resultados numéricos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés), empleando el paquete estadístico OriginPro 8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de independencia de malla

Para garantizar que los resultados obtenidos de manera numérica son independientes del número de elementos que representan el sistema físico, se construyeron mallas de entre 100 mil y 1.2 millones de elementos, evaluando el valor de la potencia neta inyectada al sistema de manera global (i.e. en todo el dominio computacional) y de manera local (i.e. en cada uno de los volúmenes que envuelven al impulsor) a 1000 rpm.

En la

Figura 3a se presenta un análisis global de la variación de la potencia inyecta (calculada por medio de las ecuaciones) en función del número de elementos, se observa que, hay independencia, a partir de 200 mil elementos, sin embargo, al determinar el valor de la potencia en los distintos volúmenes alrededor del impulsor (Figura 3b), la independencia se alcanza con una malla de alrededor de 400 mil elementos.

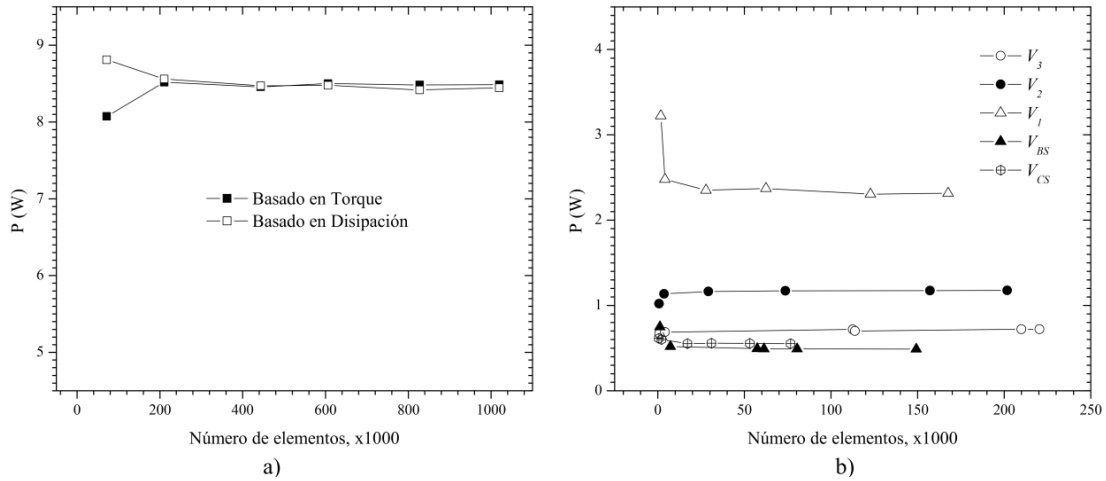


Figura 3. Análisis de independencia de malla. a) análisis global, b) análisis local.

Validación de los resultados numéricos

Para la validación de las simulaciones numéricas en tanques agitados, es común determinar parámetros de macro-mezclado a partir de las simulaciones y compararlos con datos experimentales (Werner et al., 2014).

ISBN 978-607-8242-11-5

En la Figura 4 se muestran los resultados del consumo de potencia obtenidos experimentalmente y calculados a partir de las simulaciones para ambos fluidos. Como puede observarse, los valores de las simulaciones están dentro de la desviación estándar de las mediciones experimentales (con un error relativo promedio menor al 5.0% respecto a la media), lo cual nos brinda alto grado de confiabilidad en el uso de los resultados obtenidos de manera numérica.

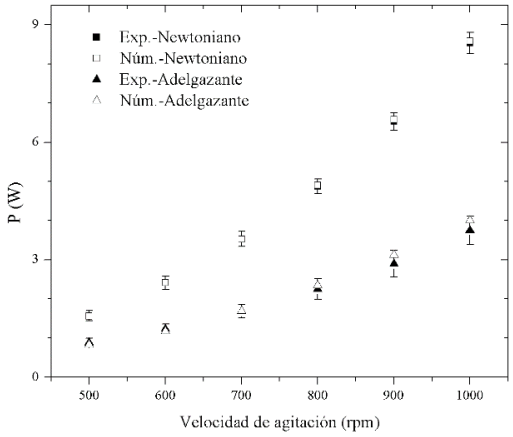


Figura 4. Potencia inyectada en función de la velocidad de agitación, para fluido newtoniano y adelgazante.

Perfiles de disipación de energía viscosa.

En la Figura 5 se muestran los patrones de flujo en forma de líneas de corriente y sobre ellas se marca el perfil de disipación de energía para los sistemas analizados. Las líneas de corriente de esta figura muestran que los distintos sistemas presentan un patrón de flujo característico de los impulsores de tipo radial, con dos grandes zonas de recirculación que se desarrollan por abajo y por arriba del plano central del impulsor.

Sin embargo, para el fluido adelgazante (Figura 5a), los lazos de circulación son más reducidos, lo cual, tienen como consecuencia una mayor circulación del fluido en la zona barrida por el impulsor y un mayor bombeo efectivo sobre dicha region. Esto puede tener gran impacto sobre la eficiencia de estos equipos, principalmente en el tiempo de mezclado y los niveles de energía disipada en la cercanía del impulsor, la cual como se mencionó anteriormente es el parámetro hidrodinámico clave para la desaglomeración de partículas. Además, es notorio que al elevar la altura del líquido el lazo de circulación superior incrementa su tamaño y por ende aporta flujo con una componente axial predominante en esta región.

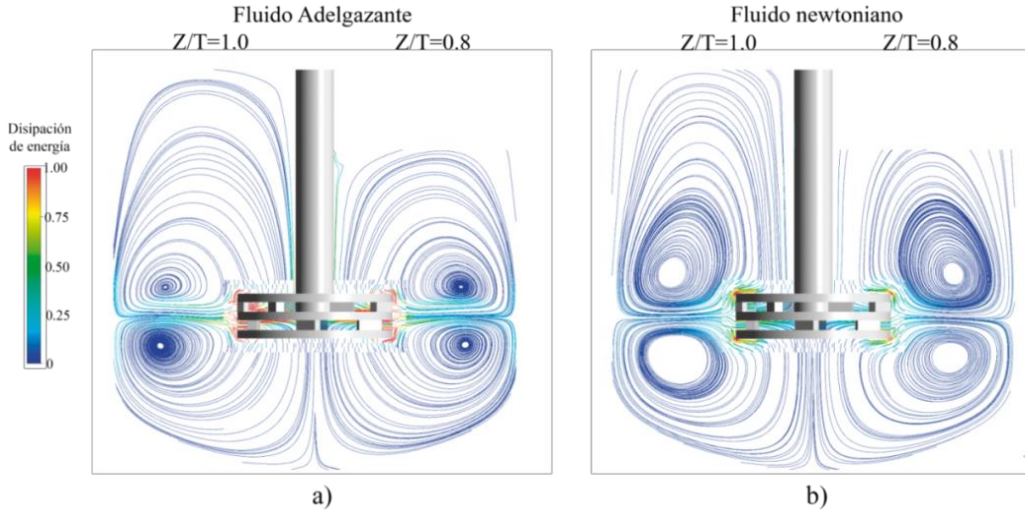


Figura 5. Líneas de corriente y Contorno de disipación de energía viscosa a una misma potencia inyectada de 24 W: a) Fluido adelgazante, b) Fluido newtoniano

ISBN 978-607-8242-11-5

En cuanto a los perfiles de disipación de energía viscosa, en estas imágenes se distingue que la región de máxima disipación se encuentra en la región de fluido cercana al impulsor y que, además, la energía se disipa siguiendo la trayectoria del fluido. También se distingue que, la disipación de energía es menor para un fluido newtoniano (Figura 5b). Por lo cual, el proceso de dispersión de polvos sería más eficiente en el fluido adelgazante. En este trabajo se considera a la zona barrida por las cuchillas del impulsor como la región de máxima disipación de energía (i.e., denominada como región efectiva), siendo esta región la conformada por el volumen barrido por las cuchillas más el primer volumen que envuelve al impulsor (V_{BS} + V_1).

También podemos notar que al elevar la altura del líquido, se observa un incremento en la disipación de energía viscosa en (V_{BS} + V_1). Estos perfiles de disipación de energía se encuentran íntimamente relacionados con los gradientes de velocidad, tal como lo describe la Ec. (6), por lo que el incremento de la disipación viscosa con al elevar el nivel de líquido Z/T se puede atribuir a que los valores máximos de la componente axial de la velocidad (i.e. el gradiente de velocidad) que también se incrementan.

Análisis estadístico

Con base en lo anterior se consideró tomar como variable respuesta para un análisis estadístico a la energía disipada por unidad de volumen $\left(\varepsilon, \mathrm{kW \cdot m^{-3}}\right)$ en la región efectiva (V_{BS} + V_1). El análisis de datos se realizó en el paquete estadístico OriginPro 8, y tienen una confiabilidad del 95.0%. Para la elaboración de la tabla ANOVA, se verifica el supuesto de Normalidad, obteniendo el siguiente resultado, de acuerdo a la Tabla 1, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov indica que se cumple el supuesto de normalidad (estadístico=0.147, p>0.05).

Tabla 1. Prueba de Normalidad. *es el número de datos

Prueba de Kolmogorov-Smirnov			
Variable	m*	Estadístico	Valor-p
ε	12	0.166	< 0.05

El ANOVA multifactorial (Tabla 2) indica que existe una diferencia estadísticamente significativa en la disipación de energía viscosa (ε) al variar la altura del líquido de trabajo y el tipo de fluido, así como, en su interacción (estadísticos entre 40.52 y 1262.54, p<0.05).

Tabla 2 Análisis de Varianza para dos Factores (Z/T y Fluido).

ANOVA					
	DF	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Estadístico	Sig.
Z/T	1	1.29E+06	1.29E+06	1262.54	> 0.05
Fluido	1	3.89E+05	3.89E+05	381.33	> 0.05
Interacción	1	4.13E+04	4.13E+04	40.52	> 0.05
Error	8	8.16E+03	1.02E+03	--	--
Total corregido	11	1.73E+06	--	--	--

En la Figura 6 se muestran los valores de disipación de energía, para la interacción entre los distintos valores de la relación Z/T y el tipo de fluido, obteniendo como resultado, que, los valores más altos en la disipación se tienen utilizando una relación Z/T=1.0 trabajando con un fluido adelgazante. Por lo anterior, puede concluirse que tanto el Z/T como la reología del fluido afectan significativamente la disipación de energía viscosa.

ISBN 978-607-8242-11-5

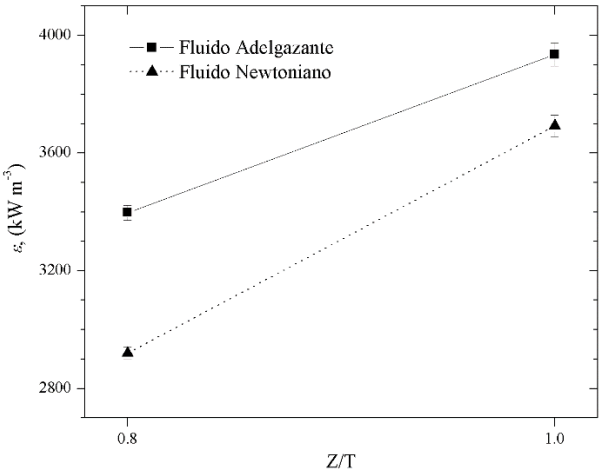


Figura 6. Variación de la Disipación de energía viscosa en función de la relación Z/T, para fluido adelgazante y newtoniano.

De acuerdo con la ecuación (6), dos parámetros influyen en la disipación de energía, estos son la viscosidad Newtoniana o aparente, y el gradiente de velocidad. En la Tabla 3 se muestran los valores del gradiente de velocidad promediado en el volumen definido por la región efectiva de disipación de energía (V_{BS}+V_1). En esta tabla se observa que, para la misma potencia inyectada y una misma Z/T, el fluido adelgazante demanda mayor velocidad de agitación debido a la reducción de la viscosidad en los alrededores del impulsor, aumentando así, los gradientes de velocidad y teniendo como consecuencia valores más altos en la disipación de energía (Chhabra y Richardson, 1999).

Tabla 3. Valores promedio en la zona efectiva a 24 W de potencia inyectada.

Z/T	Fluido	*P/V*, (W/mL)	*V* (mL)	rpm	Gradiente de velocidad, (s^{-1})	Disipación de energía, ($kW \cdot m^{-3}$)
0.8	Adelgazante	0.113	1269.6	1998	2056.1 ± 15.7	3397.5 ± 25.9
0.8	Newtoniano	0.113	1269.6	1374	583.8 ± 4.5	2920.1 ± 22.3
1.0	Adelgazante	0.088	1627.2	2136	2237.7 ± 22.4	3935.2 ± 39.4
1.0	Newtoniano	0.088	1627.2	1472	639.4 ± 6.4	3692.6 ± 36.9

Al analizar los datos correspondientes a un mismo fluido pero distinta Z/T, notamos que el aumento del volumen genera que la velocidad de agitación se incremente para mantener la misma potencia en ambos fluidos, sin embargo al operar a una misma potencia el gasto de potencia por unidad de volumen se ve reducido en el sistema con una Z/T=1, lo cual es resulta ser beneficioso para los procesos de dispersión al generarse una mayor disipación de energía con el mismo gasto de energía y con un un lote de mayor volumen, i.e. se incrementa la capacidad del equipo.

CONCLUSIÓN

Se determinó mediante el empleo de herramientas de dinámica de fluidos computacional y por medio de un análisis estadístico de varianza, con el 95.0% de confiabilidad, que, a una misma potencia inyectada, la variación de la altura del fluido de trabajo y el tipo de fluido (Newtoniano o adelgazante) tienen un efecto significativo en la disipación de energía viscosa. Estableciendo la combinación entre la relación Z/T=1.0 y fluido adelgazante como la configuración en donde el impulsor induce los valores mayores de disipación viscosa, siendo notorio también el impacto del patrón flujo de cada configuración geométrica. Estos resultados sugieren que modificar la reología del fluido (slurry) en procesos industriales de dispersión de sólidos mediante el uso de un fluido adelgazante permitiría en principio alcanzar una mejor eficiencia de dispersión a una misma potencia inyectada.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (1999). Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications: Butterworth-Heinemann.

Das, S. K. (2005). Process heat transfer: Alpha Science Int'l Ltd.

Freudig, B., Hogekamp, S., & Schubert, H. (1999). Dispersion of powders in liquids in a stirred vessel. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 38(4), 525-532. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701(99)00049-5

Hockmeyer, H. (2010). Practical Guide to High-Speed Dispersion. Paint Coat. Ind, 26, 32-36.

Murthy Shekhar, S., & Jayanti, S. (2002). CFD Study of Power and Mixing Time for Paddle Mixing in Unbaffled Vessels. Chemical Engineering Research and Design, 80(5), 482-498. doi: http://dx.doi.org/10.1205/026387602320224067

Nienow, A. W., Edwards, M., & Harnby, N. (1997). Mixing in the process industries: Butterworth-Heinemann.

Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). Handbook of industrial mixing: science and practice: John Wiley & Sons.

Ramírez-Gómez, R., García-Cortés, D., Martínez-de Jesús, G., González-Brambila, M. M., Alonso, A., Martínez-Delgadillo, S. A., & Ramírez-Muñoz, J. (2015). Performance Evaluation of Two High-Shear Impellers in an Unbaffled Stirred Tank. Chemical Engineering & Technology, 38(9), 1519-1529. doi: 10.1002/ceat.201400792

Ramírez-Muñoz, J., García-Cortés, D., Colín-Luna, J. A., & Tapia-Medina, C. R. (2016). Efecto de la Evolución del Vórtice sobre los Parámetros Hidrodinámicos de un Sistema de Dispersión Mecánica de Pigmentos. Información tecnológica, 27, 145-154.

Ramírez-Muñoz, J., Martínez-de-Jesús, G., Soria, A., Alonso, A., & Torres, L. G. (2016). Assessment of the effective viscous dissipation for deagglomeration processes induced by a high shear impeller in a stirred tank. Advanced Powder Technology, 27(5), 1885-1897. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2016.06.019

Ranade, V. V. (2002). Reactor engineering and flow modeling. In V. R. Vivek (Ed.), Process Systems Engineering (Vol. Volume 5, pp. 3-31): Academic Press.

Werner, S., Kaiser, S. C., Kraume, M., & Eibl, D. (2014). Computational fluid dynamics as a modern tool for engineering characterization of bioreactors. Pharmaceutical Bioprocessing, 2(1), 85-99.

Xie, L., Rielly, C. D., Eagles, W., & Özcan-Taşkin, G. (2007). Dispersion of Nano-Particle Clusters Using Mixed Flow and High Shear Impellers in Stirred Tanks. Chemical Engineering Research and Design, 85(5), 676-684. doi: http://dx.doi.org/10.1205/cherd06195

Xie, L., Rielly, C. D., & Özcan-Taşkin, G. (2008). Break-Up of Nanoparticle Agglomerates by Hydrodynamically Limited Processes. Journal of Dispersion Science and Technology, 29(4), 573-579. doi: 10.1080/01932690701729211

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo de Simulación de Alternativas de Productividad para Apoyar los Procesos de Toma de Decisiones en Empresas del Sector Floricultor Antioqueño.

Diego L. Zapata[1] y Juan C. Oviedo[2]
(1) Fac. Ing. Industrial, Esc. Ingenierías, Univ. Pontificia Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
(2) Fac. Ing. Agroindustrial, Esc. Ingenierías, Univ. Pontificia Bolivariana, Cr.1 No. 70-01, Medellín-Colombia
E-Mail: diego.zapata@upb.edu.co, juan.oviedo@upb.edu.co

Resumen

En el presente estudio se analizan los resultados obtenidos al intervenir un grupo de empresas del sector floricultor del departamento de Antioquia – Colombia, dedicadas a la producción de flores de exportación, en las cuales se desarrolló una descripción general del modelo procesos bajo la notación de Modelado de Procesos de Negocio (MPN), permitiendo esto la identificación y recolección de datos asociados a las variables críticas del proceso productivo en sus fases de precosecha y poscosecha. Posteriormente, se realiza una simulación del proceso de productivo, con el fin de encontrar cuál debería ser la utilización de los recursos disponibles que optimicen su productividad, logrando como fin último el diseño de alternativas que determinen un incremento de la rentabilidad de la empresa.

Gracias a los escenarios de simulación discreta con el paquete de software Promodel® se determinó un índice relevante de la productividad en torno a las fases de producción, y se plantearon escenarios en los cuales se recomienda realizar cambios significativos en el proceso productivo. Con el paquete de software PowerSim® se determinaron las características asociadas a la competitividad de este tipo de empresas y se plantearon 3 escenarios en los cuales se observa la rentabilidad al variar el tipo de flor que se cosechaba, la demanda y el cambio de la divisa.

Palabras claves: Simulación discreta, Dinámica de sistemas, Sector floricultor colombiano, Productividad y Competitividad.

Abstract

The present study analyzes the results obtained in the group of companies from the floriculture sector of Antioquia - Colombia, dedicated to the production of export flowers, in which a general description of the model of processes was developed under the notation of Modeling De Business Processes (MPN), allowing the identification and collection of data associated with the critical variables of the production process in its pre-harvest and postharvest phases. Subsequently, a simulation of the production process is performed, in order to find the cube, the use of the available resources that optimize its productivity, achieving as the last one the design of the alternatives that determine an increase of the profitability of the company.

Thanks to the scenarios of discrete simulation with the Promodel® software package, a relevant production index was determined around the production phases, and scenarios were proposed in which it is recommended to make significant changes in the production process. With the PowerSim® software package, the characteristics associated to the competitiveness of this type of company were determined and 3 Scenarios in which profitability is observed by varying the type of flower that was harvested, the demand and the change of currency.

Keywords: Discrete simulation, System dynamics, Colombian floriculture sector, Productivity and Competitiveness.

Introducción

El sector floricultor colombiano se consolida como el primer sector exportador de productos agrícolas no convencionales, con el 2,5% de las exportaciones nacionales, ostentando el segundo puesto como exportador mundial de flores. Sin embargo, actualmente alrededor del 70% de las empresas asociadas a este sector cuenta con un sistema de producción basado en la experiencia de los socios fundadores, donde los procesos aún no han sido documentados, siendo esto una barrera para la gestión adecuada de su potencial (Asocolflores, 2015). Lo anterior demuestra un alto reto de mercado, que, si bien se destaca como creciente, deberá ser analizado en torno a las capacidades y el desarrollo de ventajas competitivas. Por esta razón, se

 ISBN 978-607-8242-11-5

hace importante utilizar herramientas cuantitativas de administración para el mejoramiento de la rentabilidad, analizando diversas variables que pueden ser medidas y validadas de forma estadística y que posteriormente pueden ser simuladas para determinar alternativas que mejoren el beneficio de este tipo de empresas (Vanegas & Retrepo, 2015).

A lo largo de los años, las grandes potencias mundiales han tenido un marcado proteccionismo hacia el sector primario de su economía; a diferencia de países como Colombia en donde nuestro sector primario sufre cada vez más la ausencia del estado. Alejándose de toda discusión política hay que reconocer que, si dicho sector sufre tal exclusión, se deben abocar todas las posibilidades que logren que las empresas pertenecientes al sector primario aumenten su productividad, de manera que esto les permita competir en un entorno global.

Desde mediados del siglo XX, los métodos cuantitativos han sido usados por diferentes organizaciones como una potente herramienta de apoyo a la toma de decisiones en los niveles operativo, táctico y estratégico (Gallagher & Watson, 1982). La simulación es un método cuantitativo asistido por computador, el cual puede ser aplicado bajo dos de sus paradigmas de modelización (Simulación Discreta y Simulación Continua) de forma combinada o mixta, para mejorar los factores asociados a la productividad y rentabilidad, a partir del planteamiento de diferentes escenarios de simulación en torno a las fluctuaciones de la demanda de las flores.

En este trabajo se analizan los resultados obtenidos al intervenir un conjunto de empresas de la región de Antioquia dedicada a la producción de hydrangeas de exportación, en la cual se desarrolló una simulación del proceso de productivo, con el fin de encontrar cuál debía ser la utilización de los recursos disponibles que optimicen la productividad de esta, permitiendo así el planteamiento de escenarios futuros en torno a la rentabilidad.

Generalidades del sector floricultor colombiano

“La floricultura colombiana se desarrolla a partir de la década de 1960, estableciéndose desde entonces como una actividad de rápido crecimiento. Se basa en un modelo de agricultura intensiva, lo que significa uso de tecnología, insumos y optimización del espacio. Se caracteriza por ser la actividad agrícola con más mano de obra por hectárea y un el evado número de profesionales de diversas disciplinas trabajando en el sector” (Asocolflores, 2016).

Para el año 2016, el sector floricultor colombiano representaba el 5% de las exportaciones nacionales, cifra que ha permanecido en los últimos 5 años con un leve decrecimiento desde 2014, ocupando el tercer puesto como sector exportador, después del petróleo y sus derivados (44%) y el café (7%). El departamento de Antioquia, representa un 27% de las exportaciones nacionales, ocupando el segundo lugar, después del departamento de Cundinamarca (72%), donde su principal destino es Estados Unidos con un 75%. (DANE, 2016).

Este sector surgió orientado hacia el mercado externo y Colombia actualmente ocupa el segundo lugar a nivel mundial, después de Holanda, como país exportador. La posición de Colombia se ha reforzado como resultado de la demanda del mercado de Estados Unidos, mercado que ofrece ventajas absolutas y comparativas tanto para la producción como para la comercialización (Arango, 2015).

A pesar del constante incremento de las exportaciones de flores colombianas, los productores, los gremios y el gobierno han debido enfrentar numerosos problemas, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- El aumento progresivo de los costos de producción con una baja en los precios internacionales de la flor ha afectado sensiblemente la rentabilidad de los cultivos.
- Los programas de control de estupefacientes han dificultado los envíos de flores, por un mayor número de inspecciones, demora en las exportaciones y una disminución de la calidad del producto.
- La falta de programas de investigación continuada para resolver problemas agronómicos, fitosanitarios y de poscosecha.
- Variación del riesgo cambiario.

Antecedentes investigativos

Monsalve & Ortiz (2011), proponen un modelo de simulación en Inversiones Coquette, con el fin de optimizar los tiempos y recursos en el proceso de poscosecha. En el desarrollo de su trabajo se vió evidenciado que existen pocos estudios relacionados con el mejoramiento de los procesos de poscosecha en el sector floricultor y que la gran información disponible corresponde a los procesos de cultivo y tratamiento de flores enfocado en el manejo agrónomo, por lo que estos estudios no evaluan el impacto del mejoramiento del proceso que llevaría a pensar en un cultivo de flores como un proceso industrial, de manera que el trabajo de Monsalve & Ortiz (2011), consitió en realizar un estudio de métodos y tiempos que facilitara desarrollar un

 ISBN 978-607-8242-11-5

modelo de simulación acerca del proceso de poscosecha en el software Promodel®, en donde se encontró que los recursos (trabajadores) están siendo mal utilizados, ya que existe mano de obra ociosa a lo largo del proceso, además se encontró que los procesos de clasificación y boncheo son críticos por ser los que más tiempo de operación requieren en poscosecha. Para mejorar estos inconvenientes Monsalve & Ortiz (2011), plantean un nuevo escenario para poscosecha en donde se reducen el número de operarios asignados a clasificación y bocheo, y además se reducen las locaciones para estos dos procesos, con lo cual lograron aprovechar efectivamente los trabajadores, reduciendo la mano de obra ociosa, y reduciendo mínimamente el tiempo que requiere el producto en clasificación.

Leutscher, Renkema, & Challa (1999), apoyaron por medio de la simulación la toma de decisiones operativas en la producción de plantas de maceta en condiciones de incertidumbre, respecto al crecimiento de los cultivos y formación de precios. El principal objetivo de dicho estudio fue explorar las oportunidades para mejorar la gestión del rendimiento de los procesos de toma de decisiones operativas, en la ejecución de un plan de producción táctica, formulando así las estrategias que apoyan el proceso de toma de decisiones. A manera de conclusión proponen que la "…toma de decisiones operativas en la producción de planta de maceta no puede reducirse a una selección normativa de la "óptima" estrategia. En cambio, las metas más intangibles de los productos deben ser tomados en consideración, además de los objetivos económicos comunes, en el proceso de toma de decisiones y de cómo esta debe ser reconocida como una parte importante de la gestión agrícola." También indican que los modelos basados en las investigaciones de los sistemas de producción pueden ayudar a los productores a mejorar sus habilidades de gestión en relación con el diseño y control del sistema. Su metodología apoya al productor para hacer frente a la información disponible sobre procesos individuales dentro del sistema, así como para explorar las opciones para la gestión de los sistemas de producción en diversas condiciones. Por otra parte, el modelo basado en las investigaciones de los sistemas de producción puede establecer principios generales para el apoyo directo en la toma de decisiones.

Pérez, Arango, & Pérez (2010), presentan la aplicación de una propuesta metodológica para el mejoramiento de procesos. Se hace con base en el enfoque Harrington para el mejoramiento de procesos y la Ingeniería de Métodos, en una empresa dedicada al cultivo de flores tipo Snapdragon. A partir de allí construyen un esquema de mejoramiento para los procesos críticos durante la producción de la flor, con el fin de aumentar la competitividad en la empresa.

Situación problemática

Si bien el sector floricultor colombiano goza de un crecimiento significativo y una representatividad importante en la última década, se cuenta con sistemas de producción basados en la experiencia de los socios fundadores. Los procesos aún no han sido documentados, siendo esto una barrera para la gestión adecuada de su potencial. Lo anterior se refiere a la gran acogida que ha tenido el sector en términos de exportación, en donde lo que es producido es vendido en su gran mayoría, si se superan los inconvenientes de control y logística de transporte. Por lo mencionado anteriormente, se hace importante utilizar herramientas cuantitativas de administración para el mejoramiento de la rentabilidad, analizando diversas variables que pueden ser medidas y validadas de forma estadística y que posteriormente pueden ser simuladas para determinar alternativas que mejoren el beneficio marginal de los factores de producción.

Enfoque metodológico

El objeto principal del presente estudio, radica en el diseño de alternativas de producción para un conjunto de 5 empresas del sector floricultor antioqueño, a partir de la identificación y documentación del proceso de cosecha y poscosecha bajo la metodología BPNM (Business Process Model and Notation), la identificación de variables asociadas a dichos procesos, el levantamiento de datos a partir de un diseño experimental completamente aleatorizado, la representación computacional a través de la simulación basada en eventos de tipo discreto, la validación estadística de resultados, el planteamiento de escenarios a partir de modificaciones en las variables asociadas a los procesos, y posteriormente, la inclusión de los resultados de simulación discreta en un modelo de dinámica de sistemas para la simulación de la rentabilidad de la empresa considerando variaciones en

Documentación de procesos

A continuación, se presentan los procesos de negocio, precosecha y poscosecha genéricos para las 5 empresas, documentados en BPMN, los cuales permitirán a tener conocimiento y control de las diferentes secuencias de actividades de su actividad económica.

ISBN 978-607-8242-11-5

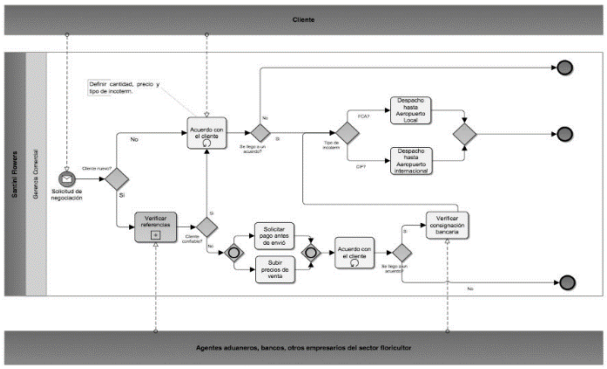


Fig. 1: Proceso de Negociación.

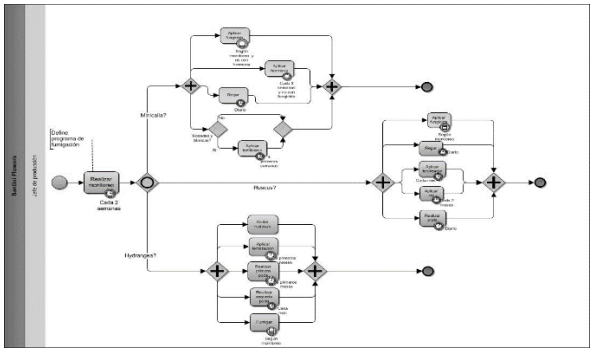


Fig. 3: Proceso de mantenimiento

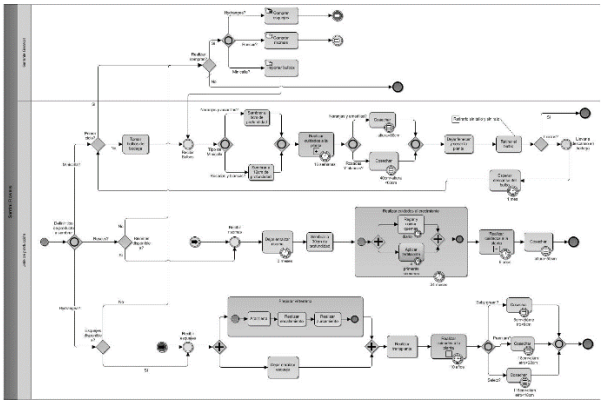


Fig. 2: Proceso de precosecha.

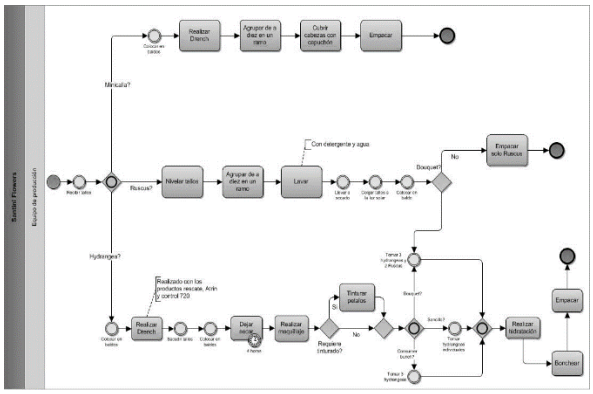


Fig. 4: Proceso de poscosecha.

Proceso de negociación:

En la Fig.1. se puede apreciar el proceso de negociación de las empresas, el cual comienza con una solicitud que puede ser de un cliente nuevo o de un cliente antiguo. Cuando se trata de un cliente antiguo, se debe llegar a un acuerdo con el cliente en términos de Incoterms (Términos de negociación internacional), cantidad y precio; si se logra llegar a un acuerdo, entonces se hará el despacho dependiendo del Incoterm negociado: Si se trata de FCA (Free Carrier), entonces la mercancía se transportará únicamente hasta el aeropuerto internacional José María Córdoba - Antioquia y el cliente se encargará de recogerla allí; y si por el contrario el Incoterm negociado es CIF (Cost, Insurance and Freight), la mercancía será llevada al aeropuerto internacional convenido con el cliente y el cliente se encargará de recogerla allí. Cuando se trata de un cliente nuevo con el cual no existen experiencias previas de comercio, se procede a verificar las referencias de dicho cliente (generalmente con empresa floricultoras de la misma región); si es un cliente confiable, entonces se procederá a realizar toda la negociación como si este fuese un cliente antiguo, de lo contrario, se le pedirá un pago por anticipado al cliente o se le hará un cobro más elevado; Si se logra llegar a un acuerdo con el cliente potencial, entonces se verificará la consignación bancaria previa al envío de la mercancía, si dicha consignación no existe, entonces el producto no se envía; y si se verifica que la consignación fue realizada, entonces el producto se envía al cliente con los términos de negociación internacional pactados.

Proceso de Precosecha:

En la Fig.2. y en la Fig.3. Se puede observar el proceso de precosecha y el proceso de mantenimiento y cuidado de la planta en la producción de hydrangeas. Lo primero que se debe tener en cuenta de la precosecha de la hydrangea es la disponibilidad de esquejes; si no se poseen, se debe realizar una compra de los mismos, si se poseen esquejes propios, entonces se procede a preparar el terreno (Arar la tierra, realizar el encalamiento y realizar el zurcamiento), mientras se hace este proceso, se deja enraizar el esqueje en unas camas especiales; cuando el esqueje esté listo, se procede a trasplantarlo a las parcelas de la finca adecuadas para el crecimiento de las hydrangeas. Una vez plantadas en campo, las hydrangeas son cuidadas cada día por medio, dichos cuidados consisten en abonar, regar, esparcir insecticidas y fungicidas, quitar malezas y realizar podas; tal como se puede observar en la imagen 3. Una vez las hydrangeas estén listas para ser cortadas (Baby green, Select o Premium dependiendo del pedido del cliente), se procede a cosechar la flor (Actividad de corte).

ISBN 978-607-8242-11-5

Proceso de poscosecha, análisis y validación estadística de datos:

En la Fig.4. se puede observar el proceso de poscosecha de la producción de hydrangeas. Los tiempos de las actividades de la cadena productiva fueron medidos y validados con Statfit, el complemento estadístico de Promodel®, a continuación, se presentan las variables asociadas al proceso de poscosecha y los datos tomados sobre los tiempos de proceso. Ver Tabla 1.:

- Corte: Se encarga de cortar las flores necesarias para suplir la demanda de la empresa, este es realizado en el bloque que tenga el ciclo de productividad más alta.
- Deshoje: Esta actividad se encarga de recibir las hojas provenientes del corte y eliminar las hojas del tallo para mejorar la presentación del producto.
- Agrupe: Una vez se eliminan las hojas de las flores, el trabajador toma un grupo de 30 flores.
- Empareje: Cuando las flores han sido agrupadas, se realiza el emparejamiento de sus tallos para sean transportados con mayor facilidad.
- Drench: Esta actividad se encarga de realizar el lavado a cada grupo de 30 flores con el fin de eliminar impurezas.
- Secado: Una vez se haya realizado el lavado de las flores, estas deben secarse totalmente durante un tiempo de 4 horas al sol para continuar con el maquillaje.
- Maquillaje: En esta actividad se retiran los pétalos de la flor que se encuentren maltratados o con enfermedades, esto con el fin de garantizar una mejor presentación del producto.
- Hidratación: En esta actividad se encarga de colocar un mecanismo de hidratación en cada tallo de flor, para garantizar su correcta hidratación en el viaje hasta el cliente.
- Boncheo: Se encarga de colocar una capucha delgada de plástico que protege los pétalos de la flor durante el viaje.
- Empaque: Cuando se tiene la flor hidratada y boncheada se realiza el empaque de las flores en cajas para ser exportadas.
- Demanda: Es la cantidad de producto terminado que los clientes requieren; en este caso pueden ser minigreen o hydrangeas select (Comúnmente llamados hortensias).
- Distribución de la mano de obra: En la simulación se realizan variaciones de la mano de obra entre procesos críticos y procesos no críticos, para determinar cómo se comportarán los tiempos con estos cambios.
- Manejo del producto en proceso (Entidades): Se varían algunas características de los productos en proceso que se manejan en la empresa y a su vez la manera como circulan a través del flujo productivo.
- Ciclos de crecimiento de las flores: Las hydrangeas tienen un ciclo de producción que dura aproximadamente 18 semanal.
- Tipo de flor (minigreen o Hydrangea select): La empresa actualmente cuenta con varios tipos de hydrangeas. Las comparaciones se realizan entre la hydrangea select (Hortensia) y la hydrangea minigreen (una hydrangea “inmadura”) con el fin de definir en qué medidas se debe producir cada una de estas para lograr una máxima rentabilidad.
- Productividad: Es la capacidad que tiene una empresa de utilizar eficientemente sus recursos para producir mayores cantidades. Esta variable será dependiente de las variables del proceso productivo y la intención es buscar el óptimo.
- Rentabilidad: Es la capacidad que tiene una empresa para generar ingresos a partir de una inversión dada; en realidad está variable será dependiente de todas las demás, y por consiguiente, la más importante.

Tabla 1: Tiempos de proceso.

Actividades (medidos en minutos/balde)						
Corte	Transporte corte-deshoje	Deshoje	Agrupe	Emparejar Tallos	Llevar Balde	Regreso
5,34	0,32	1,92	6,14	1,23	1,30	1,15
7,70	0,37	1,69	5,67	1,33	1,32	0,92
6,82	0,35	1,93	5,39	1,08	1,62	0,71
5,48	0,30	1,84	6,01	1,19	0,91	0,84
3,55	0,29	1,74	6,17	1,45	0,86	1,06
8,00	0,31	1,61	5,66	0,89	1,39	0,77
4,60	0,32	1,87	6,59	1,55	1,29	1,16
5,06	0,31	1,91	6,01	1,21	1,04	0,88
2,30	0,34	1,95	5,57	1,41	1,49	1,00
5,45	0,35	1,69	5,72	1,80	0,99	0,77
4,68	0,29	1,74	6,21	1,50	1,12	0,94
3,21	0,31	1,73	5,71	1,84	1,07	1,12
3,91	0,29	1,80	5,79	1,52	1,17	0,89
6,52	0,31	2,27	5,74	1,71	1,63	1,00
7,50	0,33	1,85	5,97	1,54	1,31	0,94
6,50	0,28	2,22	6,22	1,31	1,03	1,09
7,00	0,27	1,68	6,36	1,58	1,59	0,74
3,50	0,33	1,85	5,64	1,23	0,98	0,84
5,50	0,28	1,64	6,57	1,22	1,54	0,76
3,85	0,34	1,92	6,72	1,46	0,96	1,08
2,75	0,36	1,99	5,56	1,29	1,19	0,72
4,40	0,29	2,04	6,61	1,61	1,11	0,88
2,75	0,27	1,93	6,67	0,95	1,03	1,14
2,75	0,32	2,18	6,46	1,19	1,42	0,91
4,95	0,28	2,09	6,29	1,48	1,00	1,14
3,30	0,30	1,63	6,77	1,42	1,20	1,04
5,50	0,28	2,34	5,72	1,85	0,95	0,87
4,95	0,35	1,93	6,34	1,26	1,56	0,80
4,40	0,37	1,67	6,37	1,71	1,19	0,94
7,15	0,32	1,77	6,17	1,32	1,39	1,05

ISBN 978-607-8242-11-5

En la Tabla 2. y en la Tabla 3. se presenta la validación estadística para cada actividad, la distribución estadística que sigue, y los valores p, para las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling.

Tabla 2: Validación estadística.

Actividades (medidos en minutos/balde)					
Drench	Secado	Maquillaje	Hidratación	Boncheo	Empaque
4,34	240,00	10,96	10,46	2,76	1,95
4,65	240,00	13,63	10,52	3,63	1,88
4,89	240,00	19,76	12,90	3,64	2,59
4,92	240,00	12,11	13,67	3,35	1,81
4,10	240,00	19,07	12,69	3,15	2,02
4,05	240,00	8,86	13,00	3,22	2,30
4,64	240,00	17,84	12,44	2,87	2,54
4,35	240,00	20,07	15,14	2,70	2,44
4,29	240,00	10,32	13,11	3,47	1,92
4,77	240,00	9,31	12,42	3,65	1,99
4,49	240,00	8,34	12,06	3,04	2,44
4,45	240,00	8,49	13,85	3,22	2,42
4,02	240,00	8,56	13,01	3,60	2,27
4,12	240,00	4,69	12,68	3,14	2,09
4,82	240,00	13,09	12,35	3,49	2,35
4,60	240,00	5,92	13,18	3,44	2,52
4,02	240,00	4,64	11,34	2,97	2,00
4,17	240,00	4,82	12,01	3,54	2,52
4,09	240,00	4,60	14,85	2,74	2,22
4,14	240,00	3,76	10,84	2,99	2,39
4,50	240,00	11,32	10,68	2,77	1,89
4,32	240,00	7,12	13,18	2,97	2,27
4,89	240,00	3,39	12,35	2,80	2,35
4,12	240,00	3,30	15,02	3,12	2,19
4,29	240,00	15,02	14,01	2,69	2,19
4,42	240,00	4,60	14,85	2,69	2,17
4,09	240,00	18,87	14,35	3,47	2,20
4,14	240,00	19,11	11,85	2,79	2,14
4,55	240,00	32,40	12,18	3,00	1,95
4,12	240,00	8,02	15,02	3,35	1,97

Tabla 3: Validación estadística para cada actividad

	Tipo de distribución	Media	Desviación estándar	Valor P prueba de Kolmogorov-smirnov	Valor P prueba de Anderson-Darling
Corte	Lognormal	4,98	1,62	0,90	0,92
Transporte corte-deshoje	Lognormal	0,31	0,03	0,85	0,89
Deshoje	Lognormal	1,88	0,20	0,87	0,92
Agrupe	Uniforme	6,09	0,40	0,96	0,75
Emparejar Tallos	Normal	1,40	0,24	0,97	0,98
Llevar Balde	Lognormal	1,22	0,23	0,898	0,865
Regreso	Uniforme	0,94	0,14	0,967	0,996
Drench	Exponencial	4,41	0,30	0,62	0,28
Secado	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Maquillaje	Lognormal	11,06	6,78	0,72	0,75
Hidratación	Lognormal	12,87	1,37	0,86	0,87
Boncheo	Normal	3,14	0,33	0,74	0,53
Empaque	Uniforme	2,20	0,23	1,00	0,82

Modelo de simulación discreta (Promodel®)

El modelo de simulación discreta, comprende una simulación del estado actual de la empresa, y tres simulaciones de escenarios hipotéticos en los cuales se espera que la productividad del sistema mejore.

Simulación estado actual

Se desarrolla un modelo genérico del comportamiento actual de la cadena productiva, el cual fue simulado durante una semana, lo cual permitió determinar que las actividades con mayor tiempo de procesamiento por entidad son Corte, Maquillaje e Hidratación.

Es importante resaltar que los datos entregados por el software para las actividades Corte y Maquillaje no tienen en cuenta que dichas actividades cumplen la función de almacenar flores que crecen y que deben esperar al día siguiente para continuar con el proceso normal, por tal motivo, se considera que la actividad Hidratación es el "cuello de botella" con un tiempo promedio por entidad de 93,83 minutos, y no las actividades Corte y Maquillaje. También se observa que la planta actualmente tiene una productividad de 6500 flores por semana. De manera complementaria se analizan los recursos, en donde se encuentra que los cortadores tienen un porcentaje de utilización del 99,9% por lo cual se determina que dicho recurso puede estar sobre explotado.

Simulación de Escenarios

Con el fin de presentar diferentes alternativas de mejora en el ciclo productivo de las empresas, se plantean tres escenarios, en los cuales se modifica el comportamiento de las actividades del proceso:

- **Escenario 1:** Ubicar 2 operarios de maquillaje en corte (1 cortando y el otro apoyando el transporte de productos.



modelo escenario 1.MOD (Normal Run - Rep. 1)

Name	Scheduled Time (HR)	Capacity	Total Entries	Avg Time Per Entry (MIN)	Avg Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Utilization
corte	170,50	999999,00	12800,00	4398,66	5257,04	12800,00	88,00	0,53
drench	170,50	999999,00	424,00	4,23	0,17	5,00	0,00	0,00
maquillaje	170,50	999999,00	424,00	1107,36	43,84	108,00	0,00	0,00
hidratacion	170,50	999999,00	424,00	175,99	6,97	108,00	0,00	0,00
boncheo	170,50	1,00	424,00	3,15	0,12	1,00	0,00	12,47
empaque	170,50	1,00	424,00	2,22	0,09	1,00	0,00	8,78
deshoje	170,50	999999,00	424,00	1,88	0,07	2,00	0,00	0,00
emparejar	170,50	999999,00	424,00	2,81	0,11	4,00	0,00	0,00
agrupe	170,50	999999,00	424,00	6,07	0,24	4,00	0,00	0,00
secado	170,50	999999,00	424,00	240,00	9,50	90,00	0,00	0,00

Tabla 4: Resultados simulación – Escenario 1



General | Locations | Location States Multi | Location States Single | Resources | Resource States | Failed Arrivals | Entity Activity | Entity States

modelo escenario 1.MOD (Normal Run - Rep. 1)

Name	Units	Scheduled Time (HR)	Number Times Used	Avg Time Per Usage (MIN)	Avg Time Travel To Use (MIN)	Avg Time Travel To Park (MIN)	% Blocked In Travel	% Utilization
cortador 1	1,00	20,04	212,00	5,36	0,31	0,32	0,00	99,89
cortador 2	1,00	20,05	212,00	5,37	0,30	0,29	0,00	99,90
cortador	2,00	40,09	424,00	5,36	0,30	0,31	0,00	99,90
transportador 1	1,00	20,35	232,00	2,62	1,19	1,25	0,00	72,33
transportador 2	1,00	20,36	192,00	2,60	1,21	1,23	0,00	59,83
transportador	2,00	40,71	424,00	2,61	1,20	1,24	0,00	66,08

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 5: Resultados - Utilización de recursos – Escenario 1

En la Tabla 4. se evidencia que el tiempo de permanencia de las entidades en la actividad corte se disminuye en comparación del escenario actual; por otra parte, el proceso ahora es capaz de procesar 12800 flores, es decir, la productividad mejora un 96.9%.

En la Tabla 5. se puede observar que los dos cortadores se están utilizando menos del 99.9%, por lo cual se puede decir que ahora los cortadores están siendo usados a su máxima capacidad.

- **Escenario 2** - Usar un recipiente con capacidad para 40 flores.

En este escenario es importante analizar que todas las actividades del proceso toman más tiempo, en la Tabla 6 se puede observar los tiempos validados para cada actividad al procesar un balde de 40 flores.

	Tipo de distribución	Media	Desviación estándar	Valor P prueba de Kolmogorov-smirnov	Valor P prueba de Anderson-Darling
Corte	Lognormal	6,64	2,17	0,90	0,92
Transporte corte-deshoje	Lognormal	0,42	0,04	0,85	0,89
Deshoje	Lognormal	2,51	0,26	0,87	0,92
Agrupe	Uniforme	8,13	0,53	0,96	0,75
Emparejar Tallos	Normal	1,87	0,33	0,97	0,98
Llevar Balde	Lognormal	1,63	0,31	0,898	0,865
Regreso	Uniforme	1,25	0,19	0,967	0,996
Drench	Exponencial	5,87	0,40	0,62	0,28
Secado	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Maquillaje	Lognormal	0,49	0,30	0,72	0,75
Hidratación	Lognormal	17,15	1,82	0,86	0,87
Boncheo	Normal	4,19	0,44	0,74	0,53
Empaque	Uniforme	2,93	0,30	1,00	0,82

Tabla 6: Validación de datos – Escenario 2.

modelo escenario 2.MOD (Normal Run - Rep. 1)

Name	Scheduled Time (HR)	Capacity	Total Entries	Avg Time Per Entry (MIN)	Avg Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Utilization
corte	170,68	999999,00	8440,00	4356,31	3591,87	8440,00	0,00	0,36
drench	170,68	999999,00	211,00	5,39	0,11	4,00	0,00	0,00
maquillaje	170,68	999999,00	211,00	1089,56	22,45	72,00	0,00	0,00
hidratacion	170,68	999999,00	211,00	132,01	2,72	72,00	0,00	0,00
boncheo	170,68	1,00	211,00	4,20	0,09	1,00	0,00	8,65
empaque	170,68	1,00	211,00	2,95	0,06	1,00	0,00	6,08
deshoje	170,68	999999,00	211,00	2,50	0,05	4,00	0,00	0,00
emparejar	170,68	999999,00	211,00	51,22	1,06	25,00	0,00	0,00
agrupe	170,68	999999,00	211,00	8,21	0,17	8,00	0,00	0,00
secado	170,68	999999,00	211,00	240,00	4,94	57,00	0,00	0,00

Tabla 7: Resultados Simulación – Escenario 2

Como resultado de simular el proceso productivo con estas características, se encontró que la planta ahora se encuentra en capacidad de procesar 8400 flores, por lo cual se puede decir que la productividad aumenta en 1900 flores, es decir aumenta un 23%. Ver Tabla 7.

Según estos resultados, es posible determinar que la utilización del cortador y transportador es de 86,21% y 70,44% respectivamente, que, en comparación con la situación actual de la empresa, el porcentaje de utilización de los recursos se ha reducido.

- **Escenario 3**: Usar un balde con capacidad para 40 flores y dos cortadores transferidos desde maquillaje.

En este escenario, al igual que en el escenario 2, todas las actividades toman más tiempo. En la Tabla 8, se observan las distribuciones que sigue cada actividad.

	Tipo de distribución	Media	Desviación estándar	Valor P prueba de Kolmogorov-smirnov	Valor P prueba de Anderson-Darling
Corte	Lognormal	6,64	2,17	0,90	0,92
Transporte corte-deshoje	Lognormal	0,42	0,04	0,85	0,89
Deshoje	Lognormal	2,51	0,26	0,87	0,92
Agrupe	Uniforme	8,13	0,53	0,96	0,75
Emparejar Tallos	Normal	1,87	0,33	0,97	0,98
Llevar Balde	Lognormal	1,63	0,31	0,898	0,865
Regreso	Uniforme	1,25	0,19	0,967	0,996
Drench	Exponencial	5,87	0,40	0,62	0,28
Secado	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Maquillaje	Lognormal	0,49	0,30	0,72	0,75
Hidratación	Lognormal	17,15	1,82	0,86	0,87
Boncheo	Normal	4,19	0,44	0,74	0,53
Empaque	Uniforme	2,93	0,30	1,00	0,82

Tabla 8: Validación de datos – Escenario 3

General | Locations | Location States Multi | Location States Single | Resources | Resource States | Failed Arrivals | Entity A

modelo escenario 3.MOD (Normal Run - Rep. 1)

Name	Scheduled Time (HR)	Capacity	Total Entries	Avg Time Per Entry (MIN)	Avg Contents	Maximum Contents	Current Contents	% Utilization
corte	178,50	999999,00	16280,00	4642,88	7057,53	16280,00	0,00	0,71
drench	178,50	999999,00	406,00	5,26	0,20	7,00	0,00	0,00
maquillaje	178,50	999999,00	406,00	1069,25	40,53	124,00	0,00	0,00
hidratacion	178,50	999999,00	406,00	228,50	8,66	124,00	0,00	0,00
boncheo	178,50	1,00	406,00	4,19	0,16	1,00	0,00	15,89
empaque	178,50	1,00	406,00	2,92	0,11	1,00	0,00	11,09
deshoje	178,50	999999,00	407,00	2,51	0,10	7,00	0,00	0,00
emparejar	178,50	999999,00	407,00	57,57	2,19	63,00	1,00	0,00
agrupe	178,50	999999,00	407,00	8,11	0,31	12,00	0,00	0,00
secado	178,50	999999,00	406,00	240,00	9,10	113,00	0,00	0,00

Tabla 9: Resultados Simulación Escenario 3

ISBN 978-607-8242-11-5

En la Tabla 9. se puede apreciar que el tiempo que permanecen las entidades en cada una de las actividades aumenta, esto se debe a que la cantidad de flores que se deben procesar en cada una de las locaciones es mayor, no obstante, como se podrá ver más adelante, los recursos trabajan de manera más eficiente lo que permite que el número de salidas sea mayor; compensando el tiempo extra que se invierte en las locaciones.

General | Locations | Location States Multi | Location States Single | Resources | Resource States | Failed Arrivals

modelo escenario 3.MOD (Normal Run - Rep. 1)

Name	Scheduled Time (HR)	% In Use	% Travel To Use	% Travel To Park	% Idle	% Down
cortador.1	20,02	93,04	6,82	0,14	0,00	0,00
cortador.2	24,28	94,05	5,84	0,11	0,00	0,00
cortador	44,30	93,59	6,28	0,13	0,00	0,00
transportador.1	22,18	47,41	18,92	0,38	33,29	0,00
transportador.2	22,19	45,81	17,80	0,38	36,01	0,00
transportador	44,37	46,61	18,36	0,38	34,65	0,00

Tabla 10: Resultados– Utilización de recursos – Escenario 3

En la Tabla 10. se puede apreciar que la utilización de los cortadores y los transportadores disminuyó 6,31% y 19,47% respectivamente, pudiéndose pensar en colocar a los operarios a hacer algunas actividades en su tiempo extra, tales como ayudar en el maquillaje, realizar labores de cuidado del cultivo, entre otras.

Al analizar el comportamiento de las entidades a lo largo del proceso productivo, se observa que las entidades permanecen en espera un 74,88% del tiempo total de simulación. Haciendo las conversiones correspondientes (teniendo en cuenta que la empresa solamente trabaja un turno al día y la simulación representa las 24 horas del día, obtenemos que el tiempo real de espera está dado de la siguiente manera:

$$\%\, Tiempo\ de\ espera = 74{,}88\% - 66{,}6\% = 8{,}28\%$$

Lo que significa que realmente las entidades tienen un tiempo aproximado de espera de 8,28% del total de producción en un día.

Modelo de simulación dinámica (Powersim®)

Para analizar la rentabilidad del modelo productivo de las empresas durante 2 años (104 semanas) se usó un modelo de dinámica de sistemas, el cual puede ser observado en la Fig.5.

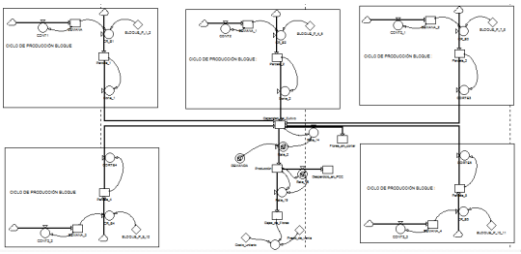


Fig. 5. Diagrama de Forrester.

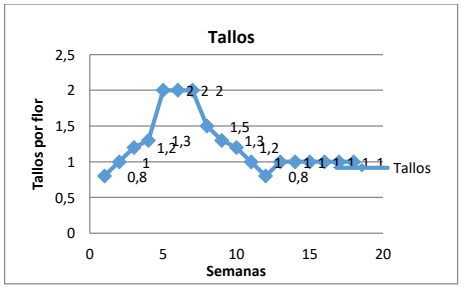
Este modelo simula la rentabilidad, los desperdicios de producción y la eficiencia del cultivo, con el fin de determinar cuál es la manera más adecuada para gestionar los recursos, buscando el máximo beneficio para la empresa. El modelo se divide en 2 partes, proceso de cosecha y proceso de poscosecha:

- **Proceso de cosecha**: Es el proceso que se encuentra enmarcado dentro de los recuadros en la Fig.6., el cual representa el crecimiento de cada uno de los bloques en donde están sembradas las hydrangeas, cada uno se encuentra programado con el ciclo productivo en el cual se encuentra cada bloque a la fecha. Ver Tabla 11.

18	1

Tabla 11 – Ciclos de productividad para la Hydrangea

Semana	Productividad (Tallos/semana)
1	0,8
2	1
3	1,2
4	1,3
5	2
6	2
7	2
8	1,5
9	1,3
10	1,2
11	1
12	0,8
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1



ISBN 978-607-8242-11-5

Fig.6. – Ciclos de productividad para la Hydrangea por semana.

- **Proceso de poscosecha:** es aquel que inicia después del nivel “capacidad_del_cultivo”, este representa el proceso de producción al igual que en el modelo simulado en Promodel®, aunque no tan detallado. Este proceso se hace necesario para determinar en cómo influyen todas las actividades productivas en la rentabilidad de la empresa.

Igualmente, se generaron 3 escenarios diferentes para este modelo: el primero representa la rentabilidad de un cultivo que solo contempla la producción de hydrangeas select, el segundo representa la rentabilidad de un cultivo que solamente contempla la producción de minigreen, y por último, un escenario que representa la rentabilidad de un cultivo mixto. A continuación, se presentan los resultados para el Escenario 3, cuyo modelo de rentabilidad fue mayor.

Escenario 3 – Dinámica de Sistemas – Producción mixta de Hydrangea tipo Select y Minigreen

En el tercer escenario se hace un mix de producción para aprovechar de manera óptima la demanda de cada uno de estos productos. Sembrando un 10% del cultivo con minigreen y el 90% restante con Hydrangea select se obtuvieron los siguientes resultados:

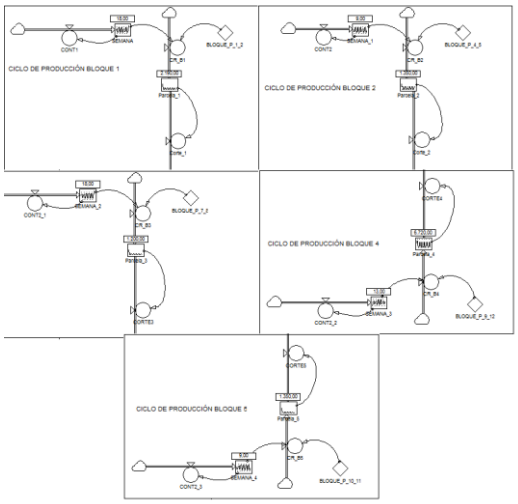


Fig.7. Cosecha minigreen escenario 3 DS.

Time	Parcela_1	Parcela_2	Parcela_3	Parcela_4	Parcela_5	pacidad_del_Cult
84	1.752,00	1.080,00	960,00	8.400,00	1.080,00	22.220,16
85	2.190,00	900,00	1.200,00	8.400,00	900,00	21.213,70
86	2.628,00	720,00	1.440,00	8.400,00	720,00	21.569,83
87	2.847,00	900,00	1.560,00	8.400,00	900,00	21.639,28
88	4.380,00	900,00	2.400,00	8.400,00	900,00	22.764,12
89	4.380,00	900,00	2.400,00	6.720,00	900,00	24.846,12
90	4.380,00	900,00	2.400,00	8.400,00	900,00	23.515,63
91	3.285,00	900,00	1.800,00	10.080,00	900,00	25.041,06
92	2.847,00	900,00	1.560,00	10.920,00	900,00	25.112,89
93	2.628,00	720,00	1.440,00	16.800,00	720,00	24.721,52
94	2.190,00	900,00	1.200,00	16.800,00	900,00	30.443,82
95	1.752,00	1.080,00	960,00	16.800,00	1.080,00	29.544,60
96	2.190,00	1.170,00	1.200,00	12.600,00	1.170,00	29.112,91
97	2.190,00	1.800,00	1.200,00	10.920,00	1.800,00	26.038,77
98	2.190,00	1.800,00	1.200,00	10.080,00	1.800,00	25.787,20
99	2.190,00	1.800,00	1.200,00	8.400,00	1.800,00	25.115,15
100	2.190,00	1.350,00	1.200,00	6.720,00	1.350,00	23.245,91
101	2.190,00	1.170,00	1.200,00	8.400,00	1.170,00	20.210,81
102	1.752,00	1.080,00	960,00	8.400,00	1.080,00	21.687,92
103	2.190,00	900,00	1.200,00	8.400,00	900,00	20.763,76
104	2.628,00	720,00	1.440,00	8.400,00	720,00	21.768,93

Tabla 12: Resultados cosecha minigreen escenario 3 DS.

El diagrama de Forrester plasmado en la Fig.7. arrojó la información que se presenta en la Tabla 12, la cual muestra la cantidad de minigreen que produce cada uno de los bloques sembrados. De igual manera como en los escenarios anteriores, se analizan los resultados de poscosecha para la minigreen. Posterior a la simulación, la minigreen tuvo una variación en la rentabilidad que presenta el escenario 3. Estos nuevos resultados se pueden observar en la Tabla 13.

Time	ANDA_MINIGR	Cajas_de_Flores_en_POC	Millones_sin_costo	Rentabilidad
97	201,89	18.687,10	588,84	1.635.974,62	121.828,89
98	206,20	18.879,02	594,58	1.663.933,09	140.572,03
99	201,36	19.075,78	599,83	1.671.470,22	152.979,90
100	189,68	19.277,19	604,71	1.688.527,37	143.666,21
101	193,70	19.476,95	607,38	1.704.182,92	155.626,62
102	192,00	19.668,20	614,90	1.716.642,64	139.938,64
103	209,62	19.849,59	617,30	1.730.647,17	136.034,25
104	210,69	20.037,42	621,64	1.743.021,83	142.234,02

Tabla 13: Resultados poscosecha minigreen escenario 3.

Por último, la rentabilidad total que se obtiene al realizar un cultivo mixto entre hydrangea (90%) y minigreen (10%), se puede observar para cada una de las 104 semanas simuladas en la Tabla 14.

Time	Rentabilidad_total
98	310.519,75
99	323.799,11
100	317.200,86
101	330.950,79
102	316.898,10
103	314.712,44
104	322.598,18

Tabla 14: Rentabilidad total escenario 3

ISBN 978-607-8242-11-5

Conclusiones

La situación actual de las empresas, mediante un diagnóstico empresarial en las áreas administrativas y más específicamente en la gestión productiva, evidenció la necesidad de contar con herramientas que permitan apoyar los procesos de toma de decisiones sobre sus recursos y capacidades frente a los factores de productividad.

La primera herramienta es la documentación de procesos en diagramas BPMN, un elemento de alta importancia, ya que favorece la ilustración de manera simple, de cómo se realizan los procesos de negocio, precosecha y poscosecha, permitiendo a las empresas realizar modificaciones a sus procesos con una visión más clara de su comportamiento. También favorece el despliegue de la información de los procesos a personas interesadas externos e internas, ya sea para la toma de decisiones o procesos de certificación.

La segunda herramienta es la simulación de procesos discretos y continuos; en donde el primer paso, la identificación de las variables que conformarían los modelos de simulación, implicó una evaluación de los procesos de precosecha y poscosecha, por lo cual se determinó que era importante medir la productividad, la rentabilidad de flores, la cantidad de flores cosechadas y los desperdicios, así como una serie de variables auxiliares para la conformación de los dos modelos de simulación. Una vez se identificaron las variables que conformarían el modelo, se levantaron datos cuantitativos mediante la toma de tiempos e información suministrad, para obtener así variables que modelan los procesos de precosecha y poscosecha, apoyadas por datos cuantitativos reales, validados estadísticamente en el complemento estadístico de Promodel® (StatFit).

Así pues, el desarrollo de estas herramientas se convierte en una potente fuente de información para la toma de decisiones, en donde se puede realizar variaciones a la demanda, número de empleados, actividades del proceso, etc. No obstante, se diseñaron escenarios en Promodel® para mejorar la productividad, y escenarios probables en PowerSim® para analizar la rentabilidad de la empresa. Con los tres escenarios propuestos en Promodel® se obtuvo que:

- Escenario 1: Ubicar dos de los operarios de maquillaje en corte. Logra aumentar la productividad en un 96.9%, al superar en 6300 flores semanales a los modelos productivos actuales.
- Escenario 2: Usar recipiente con capacidad para 40 flores. Incrementa la productividad de en un 29.8%, pasando de producir actualmente 6500 flores semanales a 8440 flores semanales.
- Escenario 3: Usar un recipiente con capacidad para 40 flores y 2 cortadores transferidos desde maquillaje. Este es el escenario que más aumenta la productividad de los tres propuestos, al aumentar esta en un 150.4%.

Para analizar la rentabilidad durante dos años, se crearon igualmente tres escenarios teniendo en cuenta dos tipos de productos de la Hydrangea (Select y Minigreen), obteniendo:

- Escenario 1 DS: Cultivo únicamente Hydrangeas. En este escenario se plantea un cultivo con 45300 plantas de hydrangea sembradas seccionadas en cinco bloques, la demanda está representada con una distribución uniforme con un mínimo de 7000 flores y un máximo de 8000 flores semanales; el escenario propuesto es simulado 104 semanas, el cual evidencia que la rentabilidad en el año dos será de $173537.19 USD.
- Escenario 2 DS: Cultivo únicamente Minigreen. Se plantea un cultivo de 45300 plantas de hydrangea, a diferencia de la hydrangea Select que tiene la capacidad de producir una flor por semana, se pueden producir tres flores por semana de hydrangeas Minigreen lo que aumenta la cantidad de flores que puede dar el cultivo, a diferencia de la Select, la minigreen no tiene una demanda tan alta, encontrándose definida por una distribución uniforme con un mínimo de 7500 flores y un máximo de 8500 flores semanales; Al igual que el escenario uno este es simulado 104 semanas y nos indica una rentabilidad del producto de $ 143664,6 USD.
- Escenario 3DS: Producción del cultivo mixto. En este escenario se plantea un cultivo mixto, es decir, que exista producción de hydrangea tipo Select y minigreen, para ello se tuvo en cuenta la forma de distribución del cultivo para asegurar que la producción de ambos productos fuera mayor o igual a la demanda, se le asignó un 90% de flores sembradas a las hydrangeas tipo Select y un 10% a las minigreen, esta combinación se asegura cumplir con la demanda de ambos productos sin incrementar de manera representativa las flores que no son cortadas. La demanda de cada producto para este modelo es la misma presentada en los dos escenarios anteriores y en términos de rentabilidad logra aumentar con

 ISBN 978-607-8242-11-5

respecto a los anteriores modelos, lo cual permite que la empresa obtenga un beneficio de $31.7201.59 USD.

Referencias

Arango, M. (2015). "*Hydrangea"*. Medellín: Hortitécnica LTDA.

Asocolflores. (2015). "*Las exportaciones del 2014"*. Revista de la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores.

Leutscher, K. J., Renkema, J. A., & Challa, H. (1999). "*Modelling operational adaptations of tactical production plans on pot plant nurseries: a simulation approach. Agricultural Systems",* 67-78.

Monsalve, A., & Ortiz, D. A. (2011). *"Propuesta de un modelo de simulación para un proceso de poscosecha: caso específico Inversiones Coquette"*. Medellín: UPB.

Pérez, G., Arango, M. D., & Pérez, T. M. (2010). "*Propuesta metodológica para el mejoramiento de procesos, a partir de un estudio de métodos"*. Revista Universidad Eafit, 19-39.

Vanegas, J. G., & Retrepo, J. (2015). *"Factores que afectan el posicionamiento de productos en el exterior: el caso del sector floricultor antioqueño"*. Revista Civilizar Ciencias Sociales y Humanas.

Gallagher, C., & Watson, H. (1982). *"Métodos Cuantitativos para la Toma de Decisiones en Administración"*. (M. González, Trad.) México: McGraw-Hill.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Lectores de pantalla para el apoyo académico de estudiantes no videntes

Andrea V. Basantes[1]; Frank E. Guerra[1]; Miguel E. Naranjo[1] y Daniela K. Ibadango[1]
(1) Facultad de Educación Ciencia y Tecnología, Universidad Técnica del Norte, Ibarra-Ecuador
E-mail: avbasantes@utn.edu.ec; feguerra@utn.edu.ec; menaranjo@utn.edu.ec; dkibadango@utn.edu.ec

Resumen

La inclusión de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), en los nuevos escenarios educativos, favorece el desarrollo de habilidades necesarias para desenvolverse eficazmente en el contexto global contemporáneo. Según Padilla (2011) las personas con discapacidad no tienen por qué adaptarse a la normalidad, pues no son anormales, sino que el entorno y el medio les entorpecen su vivir. Existe evidencia positiva en la mejora de la calidad de aprendizaje de las personas con discapacidad mediante la aplicación de las nuevas Tecnologías de Información y Comunicación, tal como manifiestan (Hernández, et al., 2014; Marulanda, et al., 2014). Con base en estudios relacionados, se aplicó los lectores de pantalla en los procesos de interaprendizaje significativo de los estudiantes no videntes del Centro de Educación Popular Especial Imbabura y la Universidad Técnica del Norte de la ciudad de Ibarra. Esta investigación tiene un enfoque cualitativo de corte descriptivo con el uso de metodologías documentales y de campo. Se identificó como aprenden las personas no videntes, los factores que inciden en el proceso académico, para luego determinar la contribución del uso de lectores de pantalla (JAWS y NVDA) en la mejora de las condiciones del aprendizaje de las personas con discapacidad visual. Como resultado, se verificó que el uso de los lectores de pantalla permite a las personas invidentes tener mayor acceso a la información, autonomía en la comunicación, independencia en el manejo de materiales. De esta manera, los estudiantes no videntes pueden acceder a los contenidos curriculares y a su inclusión en las distintas trayectorias educativas y laborales.

Palabras clave: lectores de pantalla; herramientas informáticas; inclusión social; no videntes; aprendizaje; TIC

Screen Readers as Academic Support for Blind Students

Abstract

The Information and Communication Technologies (ICT) inclusion in the new educational settings favors the development of skills needed to become effective in the contemporary global context. According to Padilla (2011), people with disabilities do not have to adapt to normal because they are not abnormal, but the environment slows down their living. There is positive evidence about the improvement of learning quality in people with disabilities through the application of new Information and Communication Technologies, as they manifest (Hernández et al., 2014; Marulanda et al., 2014). Based on other related studies, screen readers were applied in the processes of significant inter-learning of blind students in the Center for Popular Education Imbabura and Técnica del Norte University in Ibarra city. This research has a qualitative approach of descriptive type using documental and field methodologies. Factors that influence the academic process of blind people at learning were identified, in order to determine the contribution of screen readers (JAWS and NVDA) use to improve learning conditions of people with visual disabilities. As a result, it was verified that the use of screen readers allows blind people to have greater access to information, autonomy in communication, and independence in handling materials. Thus, blind students can access the curricular contents and their inclusion in the different educational and labor trajectories.

Keywords: screen readers; computer tools; social inclusion; blind students; learning; ICT

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

De manera básica, se estima que la enseñanza debe apoyar a los seres humanos en el aprendizaje de ciertos contenidos, procedimientos y actitudes, planificados en el marco de una política educativa y operacionalizada con el uso de métodos y medios que provienen de un determinado contexto social. Para la educación institucionalizada, esta dimensión formativa, implica potenciar la autonomía y el desarrollo de habilidades cognitivas superiores en los estudiantes. No obstante, su consecución, en el ámbito de la educación especial, requiere ir más allá de las directrices. En la realidad formativa de las personas con discapacidad visual, la tarea se convierte también en un reto. Para Alaniz, et al. (2006, p.2) "cuando hablamos de una persona con discapacidad visual podemos referirnos a una persona ciega o a una persona con disminución de la visión".

Desde los albores de la civilización, los más variados estudiosos del hecho educativo: filósofos, pedagogos, psicólogos, antropólogos, sociólogos, entre otros, han perfeccionado teorías y experiencias, de tal manera que hoy en la contemporaneidad del siglo XXI, se puedan utilizar esos logros para la mejora de la calidad educativa. Un pedagogo contemporáneo, Meirieu (2007:28) recalca que "nadie puede jamás decir de nadie: <<No es inteligente, no hará nada>> porque nadie puede jamás saber si se han probado todos los medios y métodos para que haga algo". Este pensamiento, sustenta las oportunidades de mejora para la educación institucionalizada, sobre todo aquella que incluye a las personas con discapacidad visual. En este contexto, autores como Moriña (2004), Arnaiz (2003), Ainscow (2001), Murillo y Hernández (2011) y la Unesco (2005), expresan que la educación inclusiva constituye un proceso orientado a dar respuesta a la diversidad de características y necesidades de todos los estudiantes en mira hacia una educación de calidad para todos, haciendo énfasis en el valor positivo de la diferencia y en la oportunidad para enriquecer la sociedad mediante la activa participación social y cultural.

La educación inclusiva para personas con discapacidad visual es uno de los mayores retos que enfrentan los sistemas educativos en el mundo y de manera particular, el Ecuador. El Gobierno Central a través del Plan Nacional del Buen Vivir establece en el objetivo 2, que el estado y la sociedad deben "auspiciar la igualdad, la cohesión, la inclusión y la equidad social y territorial en la diversidad" (Senplades, 2013) a fin de propiciar la mejora de la calidad de vida para las personas con discapacidad. Según el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS), 49.344 personas presentan discapacidad visual, de las cuales 579 residen en la ciudad de Ibarra.

Como respuesta a este requerimiento, en la Universidad Técnica del Norte, como parte de sus procesos investigativos, docentes y de vinculación, se planteó el reto para apoyar en la mejora del aprendizaje de las personas con discapacidad visual. La alternativa, capacitarles en el manejo del computador y el aprendizaje en línea. Sin embargo, "al usar el ordenador, las personas ciegas, se enfrentan a serios problemas de accesibilidad. Aunque no suelen tener dificultades en el uso del teclado, al no poder visualizar la pantalla, les resulta muy difícil interactuar" (Martín-Laborda, 2005:28). Si se tiene en cuenta que las discapacidades no desaparecen, son procesos que perduran la vida entera del individuo, de lo que se trata es de desarrollar habilidades que les permitan alcanzar independencia, seguridad y mejorar mecanismos de adaptación, prepararlos para el futuro, por lo que es fundamental erradicar prejuicios y conductas discriminatorias (Gutiérrez, 2005).

Se consideró que el empleo de las herramientas informáticas (lectores de pantalla), como medios didácticos, fortalecen el aprendizaje de las personas con discapacidad visual al eliminar las barreras de espacio y tiempo, generar mayores oportunidades de acceso a las diversas fuentes de información y fomentar el aprendizaje colaborativo e inclusivo. El estudio se enfocó en obtener respuestas para tres interrogantes: ¿Cómo aprenden las personas no videntes? ¿Qué factores inciden en el proceso académico de estudiantes con discapacidad visual? y ¿Cómo contribuye el uso de lectores de pantalla (JAWS y NVDA) en la mejora de las condiciones del aprendizaje de las personas con discapacidad visual?

METODOLOGÍA

La presente es una investigación con enfoque cualitativo. Constituye un estudio de caso descriptivo, en el marco del cual se utilizó la investigación documental y de campo. La investigación documental, implementada a través del uso de técnicas bibliográficas posibilitó cubrir la primera fase de la investigación tanto para el ordenamiento de la información como para la construcción del marco teórico (Arteaga, Campos y Bermúdez, 2006). La recopilación de la información se llevó a cabo desde el mes de febrero 2015, mediante el uso de las bases de datos bibliográficas de la Universidad Técnica del Norte (Ebsco, Scopus, SCimago y ProQuest) y Google Scholar. Se obtuvo 45 referencias relacionadas con estudios que contienen las palabras claves lectores de pantalla, tecnología y discapacidad visual, uso de las TIC en la educación especial, educación integradora y educación de ciegos. Con el empleo de fichas de trabajo se seleccionó las ideas pedagógicas,

 ISBN 978-607-8242-11-5

didácticas y tecnológicas relevantes relacionadas con el problema y su solución. Se buscó comprender e interpretar cómo aprenden las personas no videntes, los factores que inciden en el proceso académico e información básica sobre la aplicación de las nuevas tecnologías como apoyo a los sujetos con necesidades educativas especiales.

En la segunda fase investigativa de campo, se realizó una matriz de relación (objetivos, variables, indicadores, técnicas y público). Se estableció dos variables investigativas: lectores de pantalla y apoyo académico, de las cuales se derivaron los indicadores que permitieron recolectar la información requerida. Se aplicó los lectores de pantalla a 54 personas que asisten al Centro de Educación Popular Especial Imbabura y 23 estudiantes de la Universidad Técnica del Norte. De la población referida en el Centro de Educación Popular Especial Imbabura el 59% son niños y niñas, el 19% son adolescentes y el 22% son personas adultas; mientras que en la Universidad Técnica del Norte el 47% son niños y niñas, el 49% son adolescentes y el 4% son personas adultas

Durante el proceso investigativo se observó en los estudiantes la habilidad para manejar el computador mediante el uso de los lectores de pantalla (JAWS y NVDA). Al final, se aplicó un cuestionario con 11 preguntas que fue validado por 5 expertos de la Universidad Técnica del Norte en las áreas de informática, psicopedagogía y educación especial. Para el análisis de los datos se elaboró una matriz y gráficos estadísticos en Excel donde se evidencia los porcentajes y frecuencias obtenidos en cada una de las preguntas. Con ello se determinó la contribución del uso de lectores de pantalla (JAWS y NVDA) en la mejora de las condiciones del aprendizaje de las personas con discapacidad visual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta una selección de los resultados obtenidos en este trabajo que responde a las preguntas planteadas.

¿Cómo aprenden las personas no videntes?

De manera general, las personas con discapacidad visual del Centro de Educación Popular Especial Imbabura y de la Universidad Técnica del Norte, aprenden mediante el sistema braille, el que les permite leer y escribir; así mismo desarrollan actividades de motricidad fina y auditiva. En cuanto al tiempo de aprendizaje, tardan entre dos y tres veces más para completar una tarea. Además, se fatigan con mayor facilidad dado que deben mantener la atención concentrada con sus oídos.

Hoy, mediante la integración de lectores de pantalla, acceden a diversas actividades con el computador: desde redactar un documento hasta navegar por internet y acceder a redes sociales (Ver Figura1). Las personas con discapacidad visual poseen una actitud positiva para aprender ante las Tecnologías de Información y Comunicación, son más pacientes y muy receptivos (Ribera, Térmens y García-Martin, 2008). Por lo tanto, se debe potenciar su acercamiento, sin esperar a que el alumno con ceguera o baja visión tenga la edad para conocer el teclado como única vía de acceso a las TIC (Roqueta y Hernández, 2005:2). Sin embargo, a lo expresado, según Fajardo-Flores y Sandoval-Carrillo (2009, p.82), “la participación directa de los usuarios reales es de vital importancia en el proceso de diseño accesible, y no debe ser tomado como una actividad opcional sino como un requisito”.



Fig 1: Aprendizaje de estudiantes no videntes

ISBN 978-607-8242-11-5

Aunque resulte paradójico, si no se tiene en cuenta las necesidades y particularidades de este colectivo, se favorecería la aparición de nuevas formas de exclusión social (Martínez y Prendes, 2004: 6); en concordancia con Cabero (2007), Meirieu (2007), Unesco (2010) y Prieto (2016), se requiere un adecuado aprovechamiento pedagógico de la tecnología como herramienta de apoyo para dinamizar el aprendizaje y desarrollar las capacidades humanas con menos restricciones en los más variados contextos.

¿Qué factores inciden en la mejora del proceso académico de estudiantes con discapacidad visual?

Entre los factores que inciden positivamente en el proceso de aprendizaje de los estudiantes con discapacidad visual, resaltan tres: 1) preparación de los docentes, al respecto se han desarrollado estudios que relacionan directamente la calidad de la docencia con la mejora de los aprendizajes. Según Unesco (2012) es necesario, concentrar mayores esfuerzos en la formación de profesores y profesionales que puedan utilizar las herramientas TIC a favor de los estudiantes con discapacidad; 2) infraestructura accesible y 3) equipamiento informático tanto en hardware como en software.

La atención de estos factores posibilitaría a las personas ciegas o con visión limitada, insertarse en procesos de aprendizaje en los centros educativos, sea a distancia o de manera presencial. Actualmente con el apoyo de tecnología adaptativa, las personas con discapacidad visual pueden participar en discusiones en líneas, realizar compras, escribir cartas, pagar cuentas, hacer nuevos amigos, entre otras actividades; además pueden acceder a materiales digitales sin tener que esperar a la versión impresa en Braille, que, dicho sea de paso, es un proceso mucho más laborioso que el de la impresión de texto común en impresoras de tinta o láser (Fajardo-Flores y Sandoval-Carrillo 2009).

Se evidencia el conocimiento de los lectores de pantalla NVDA (Non Visual, Desktop Access) y JAWS (Job Access With Speech) en los estudiantes de las instituciones que forman parte del estudio, como resultado de la tutoría y acompañamiento pedagógico de la Lcda. Janeth Enríquez funcionaria de la Universidad Técnica del Norte. Estas herramientas informáticas permitieron a los estudiantes la exploración del escritorio, la navegación en Internet, el acceso y uso de las diferentes aplicaciones instaladas en el computador como Microsoft Office.

¿Cómo contribuye el uso de lectores de pantalla (JAWS y NVDA) en la mejora de las condiciones del aprendizaje de las personas con discapacidad visual?

Los resultados obtenidos a través de la encuesta permitieron determinar que el 63% de las personas con discapacidad visual lograron mejoras notables en su aprendizaje; mientras que el 37% restante manifestaron que lo hicieron de manera moderada. Por otra parte, les permitió desenvolverse en un contexto de aula distinto, con acceso a varias herramientas para autoformarse, navegar en internet, trabajar con las aplicaciones de ofimática y mantenerse en contacto con amigos y familiares, sin necesidad de recurrir por completo al docente para adquirir conocimientos.

Luego de intervenir con este colectivo, objeto de la investigación se contrastó las opiniones y percepciones de los estudiantes con la evidencia de la observación realizada. Con ello se confirmó que el uso de los lectores de pantalla JAWS y NVDA contribuyen en la mejora de las condiciones del aprendizaje de las personas con discapacidad visual, de la siguiente manera: manejo autónomo del computador, interacción social a través de las diferentes herramientas de comunicación (videoconferencias, chat, foros, mensajería y redes sociales), conformación de redes de aprendizaje colaborativo, acceso a documentos y contenidos digitales relacionados con su interés y requerimientos para su formación académica.

Los estudiantes con discapacidad visual son capaces de construir su identidad en relación con la tecnología, y su mundo social le proporciona información detallada sobre cómo se posiciona a sí mismo en el mundo dominado por lo visual, tal como lo mencionó Kajee (2010). Así, la tecnología y la educación se convierten en una oportunidad para relacionarse con otros, compartir sus ideas, opiniones y experiencias, hacen que el conocimiento se adquiera mutuamente y los procesos de aprendizajes sean cada vez mejores. Las personas con discapacidad visual pueden lograr su profesionalización tal como se evidenció en la Universidad Técnica del Norte con el primer graduado no vidente en la carrera de mecatrónica de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (Ver Figura 2).

ISBN 978-607-8242-11-5



Fig 2: Graduado de Mecatrónica. Tomado del Diario La Hora (23-10-2016)

Finalmente, cabe destacar que, académicamente, se apreció en los estudiantes del Centro de Educación Popular Imbabura y de la Universidad Técnica del Norte el aumento de autoestima, autonomía, motivación, un mayor acceso a la información, facilidades para la estimulación sensorial, la comunicación y el desarrollo del lenguaje. A decir de Zappalá, Köppel y Suchodolski (2011), las estrategias pedagógicas que, mediante el uso de estos recursos específicos sumados a otros de uso estándar, orientan la incorporación de TIC en la escuela; facilitan no sólo el acceso a los contenidos curriculares y el aprendizaje, sino el logro de una autonomía tal que promueva la inclusión de los alumnos en las distintas trayectorias educativas a lo largo de su vida académica.

CONCLUSIONES

A continuación, se detallan las conclusiones del estudio: 1) Las personas no videntes aprenden mediante el sistema braille y con mayor prevalencia de dispositivos auditivos. Pese a este conocimiento prevalecen algunas limitaciones de carácter económico, educativo, tecnológico, cultural y social que restringen su desarrollo holístico y su inserción en el ámbito profesional. La Universidad Técnica del Norte realiza esfuerzos importantes para atender a este segmento de la población a través de capacitaciones en el uso de lectores de pantalla con la participación de docentes, estudiantes, familiares de personas con discapacidad visual e interesados en aprender estos sistemas. 2) Los factores de mayor incidencia en el proceso académico de los estudiantes son tres: preparación de los docentes, infraestructura accesible y equipamiento informático. Como política del estado ecuatoriano las instituciones públicas y privadas han adecuado sus diferentes espacios para hacerlos accesibles y se les ha dotado con el equipamiento informático básico. El estudio realizado demuestra la necesidad de desarrollar un plan integral de formación para docentes de los diferentes niveles educativos a fin de posibilitar la inclusión socio educativa, ámbito en el cual la Universidad Técnica del Norte concentra sus esfuerzos. 3) El estudio demostró la contribución didáctica de los lectores de pantalla JAWS y NVDA para mejorar el aprendizaje de las personas invidentes del Centro de Educación Popular Especial Imbabura y de la Universidad Técnica del Norte. Su implementación fue positiva para su desarrollo autónomo al compensar las limitaciones funcionales y al mismo tiempo cumplir con responsabilidad social de contribuir con las mejoras para el acceso de las personas con discapacidad visual a procesos de educabilidad permanente y a ser beneficiarios del conocimiento globalizado.

REFERENCIAS

Ainscow, M. *Desarrollo de escuelas inclusivas: ideas, propuestas y experiencias para mejorar las instituciones escolares*, Narcea Ediciones, España (2001)

Alaniz, M., Oyarzún, M., Sandoval, G., Adolfo, S., Rivadeneira, G., García, M., y Salvo, M. Los aportes de la tecnología informática a las necesidades educativas especiales de alumnos con discapacidad visual o auditiva. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, *3*(8), 55-63 (2006)

Arnaiz, P. Educación inclusiva: una escuela para todos. *Aljibe*, Málaga (2003)

Arteaga, C., Campos, G., y Bermúdez, R. *Ciencias sociales e investigación social.* Plaza y Valdés, México (2006)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Cabero, J. *Nuevas tecnologías aplicadas a la educación*. McGraw-Hill, Madrid (2007)

CONADIS. Estadísticas de discapacidad (en línea: http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/ acceso 3 noviembre 2016), Ecuador (2007).

Fajardo-Flores, S. y Sandoval-Carrillo, S. Accesibilidad web: el caso de los usuarios invidentes. *Tecnologías de información*, 59 (2009)

Gutiérrez, R. Cultura política y discriminación. CONAPRED, México (2005)

Hernández, M.R, Rodríguez, V.M, Parra, F.J., y Velázquez, P. Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) en la Enseñanza-Aprendizaje de la Química Orgánica a Través de Imágenes, Juegos y Video, doi: 10.4067/S0718-50062014000100005. Formación Universitaria, (en línea), 7(1), 31-40 (2014)

Kajee, L. Disability, social inclusion and technological positioning in a South African higher education institution: Carmen's story. *Language Learning Journal*, *38*(3), 379-392 (2010)

Martínez, F., y Prendes, M. P. *Nuevas tecnologías y educación*. Editorial I, Madrid (2004)

Martín-Laborda, R. *Las nuevas tecnologías en la educación*. Fundación AUNA, Madrid (2005)

Marulanda, C.E, Giraldo, J., y López, M., Acceso y Uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs) en el Aprendizaje: El Caso de los Jóvenes Preuniversitarios en Caldas, Colombia, doi: 10.4067/S0718-50062014000400006.Formación Universitaria, (en linea), 7(4), 47-56 (2014)

Meirieu, P. *Frankenstein Educador.* Laertes educación, Barcelona (2007)

Moriña, A. *Teoría y práctica de la educación inclusiva*. Aljibe, Archidona (2004)

Murillo, J., y Hernández, R. Una dirección escolar comprometida con la Justicia Social. *Observatorio Social de la Educación*, *4*, 19-28 (2011)

Padilla, A. Inclusión educativa de personas con discapacidad. *Revista colombiana de psiquiatría*, *40*(4), 670-699 (2011)

Prieto, J. P. Una aproximación metodológica al uso de redes sociales en ambientes virtuales de aprendizaje para el fortalecimiento de las competencias transversales de la Universidad EAN. *Virtu@ lmente*, *1*(1), 1-16 (2016)

Ribera, M., Térmens, M., y García-Martín, M. Cómo realizar tests de usabilidad con personas ciegas. *El profesional de la información*, 17(1), 99–105 (2008)

Roqueta, M. C., y Hernández, S. B. Recursos para la aplicación de las nuevas tecnologías en la educación del alumnado con necesidades educativas derivadas de discapacidad visual en edades tempranas. *Integración: Revista Sobre Ceguera y Deficiencia Visual*, (46), 13-22 (2005)

Senplades, S. N. *Plan Nacional del Buen Vivir*. Ecuador (2013)

Unesco. *Guidelines for Inclusion: Ensuring Access to Education for All.* Unesco, París (2005)

Unesco. *Logro Cognitivo de los estudiantes en América Latina y el Caribe*. Salesianos Impresores S.A., Chile (2010)

Unesco. *Informe sobre el Uso de las Tecnologías de Información y Comunicación TIC) en la Educación para Personas con Discapacidad.* Artes gráficas Silva, Quito (2012)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Zappalá, D., Köppel, A., y Suchodolski, M. *Inclusión de TIC en escuelas para alumnos con discapacidad visual.* Ministerio de Educación de la Nación, Buenos Aires (2011)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelos basados en Redes Neuronales Artificiales para la Obtención de Monoglicéridos: Desarrollo y Validación

Nancy F. Balsamo[1], Dolores M. Álvarez[1], Luis E. Kliger[1], Mario R. Modesti[2], Mónica E. Crivello[1]
(1) Centro de Investigación y Tecnología Química, Univ. Tecnológica Nacional
(2) Centro de Investigación en Informática para Ingeniería, Univ. Tecnológica Nacional
Facultad Regional Córdoba, Ciudad Universitaria, Córdoba-Argentina
e-mail: dalvarez@frc.utn.edu.ar

Resumen

La producción de biodiesel genera grandes cantidades de glicerol remanente. Este puede convertirse en monogliceridos, producto de mayor valor agregado. El objetivo del presente trabajo es comprobar la capacidad de generalización de modelos matemáticos basados en Redes Neuronales Artificiales que caractericen la relación entre la conversión del reactivo, estearato de metilo, y el rendimiento de los productos de la reacción de transesterificación con glicerol. Para esto se emplearon distintos parámetros de reacción referidos al catalizador sólido, que consistió en un óxido mixto de Mg y Al con Li incorporado en diferentes proporciones, derivado de hidróxidos dobles laminares. Se crearon tres modelos de Redes Neuronales Artificiales con estructura *backpropagation*. La red que mayor capacidad de generalización mostró fue la constituida por una capa oculta con 35 neuronas y función de transferencia sigmoidea y una capa con función lineal de salida. Esta fue capaz de explicar la relación entre los porcentajes de conversión y rendimiento de la reacción, en cuanto a la obtención de mono- y diglicéridos, cuando la masa del catalizador varía hasta en un 1%, pero no demostró aptitud para explicar dicha relación entre los parámetros de reacción al modificarse el contenido de Li como sitio activo en el catalizador sólido. El empleo de estos modelos es de interés, dada su incidencia en la proyección del proceso a mayores escalas.

Models based on Artificial Neural Networks for Obtention of Monoglicerides: Development and Validation

Abstract

The biodiesel production generates large amounts of remaining glycerol. It can be transformed into monoglycerides, product of greater added value than glycerol. The aim of this work is to verify the generalization capacity of mathematical models based on Artificial Neural Networks. These mathematical models characterize the relationship between the conversion of the reactant, methyl stearate, and the yield of the products of the transesterification reaction with glycerol. The reaction was heterogeneously catalyzed by mixed oxides of Mg and Al with Li incorporated, derived from double layered hydroxides. Different reaction parameters were used, such as the catalyst charge in the reaction and the amount of Li incorporated in the mixed oxide. Three models of Artificial Neural Networks with backpropagation structure were created. The network that showed the greatest capacity for generalization was a hidden layer with 35 neurons and a sigmoid transfer function and a layer with linear output function. The model was able to explain the relationship between conversion rates and reaction yields for the preparation of mono- and diglycerides when the mass of the catalyst varied by up to 1%. But it did not demonstrate the ability to explain that relationship when the content of Li, as active site in the solid catalyst, was changed. The use of these models is of interest due to their impact on the projection of the process to larger scales.

Keywords: modeling, Artificial Neural Networks, glycerol, monoglycerides, diglycerides, heterogeneous catalysis

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las iniciativas para promover el uso de fuentes de energía renovables son de importancia, debido a los beneficios ambientales implicados. Esto genera un interés creciente en la obtención de biocombustibles (Alonso et al., 2010). En este contexto, el biodiesel ha ganado considerable atención como alternativa no tóxica, biodegradable y renovable a los combustibles derivados del petróleo. Este biocombustible se fabrica generalmente por transesterificación de aceites con metanol o etanol, obteniéndose un 10% de glicerol como subproducto (Kartika et al., 2011).

Existen varias rutas para generar productos de mayor valor agregado basados en glicerol. Una de ellas es la transesterificación catalítica de un éster de metilo para producir selectivamente monoglicéridos (MG). Los MG son biodegradables y no tóxicos, por lo tanto son utilizados como agentes emulsionantes para aceites, grasas, disolventes y ceras, proporcionando emulsiones estables en una fase acuosa.

Además de MG, en la reacción de transesterificación se obtienen como productos diglicéridos (DG), triglicéridos (TG) y metanol como subproducto gaseoso. De allí la importancia de buscar que desde la reacción se obtenga el mayor rendimiento a MG, que le confiere mayor propiedad emulsionante a la mezcla obtenida como producto.

La transesterificación con glicerol para generar MG resulta más amigable con el medioambiente a través de catalizadores sólidos básicos (Bálsamo et al., 2017), tal es el caso de los Hidróxidos Dobles Laminares (HDL). Los HDL son nanoarcillas aniónicas con estructura laminar constituida por capas de hidróxidos que tienen la fórmula general $[M(II)_{1-x}M(III)_x(OH_2)]^{x+}(CO_3^{-2})_{x/2}.mH_2O$, donde M(II) y M(III) representan iones metálicos di- y trivalente, como Mg y Al respectivamente, mientras que el anión carbonato se ubica en el espacio interlaminar para compensar las cargas. La descomposición térmica de los HDL produce los óxidos metálicos mixtos. Tanto los HDL como sus óxidos conforman un grupo de materiales que presenta gran interés científico e industrial por la posibilidad de nano-diseño a medida, control de accesibilidad a sitios activos y una amplia gama de aplicaciones. Hoy en día, se conocen muchas modificaciones estructurales, texturales y de composición de estos materiales, lo que permite un ajuste fino y por lo tanto un control de la reactividad catalítica (Chimentao et al., 2007; Angelescu et al., 2008; Bálsamo et al., 2012).

El litio, a su vez, ha tomado actualmente, considerable notoriedad. Uno de sus posibles usos es como catalizador con propiedades básicas, incorporado en materiales sólidos (Ferreti et al., 2011), tales como los HDL.

En el caso de la reacción de transesterificación, la proporción de litio adicionado al catalizador, como así también el porcentaje de catalizador empleado, pueden incidir sobre su rendimiento. En este sentido, es de interés disponer de un modelo matemático que contribuya a anticipar el rendimiento de la reacción a partir del porcentaje de conversión de los reactivos, considerando las variaciones en los parámetros anteriormente mencionadas.

Por otro lado, el control mediante modelos predictivos es una de las estrategias más difundidas en las industrias de procesos químicos y permite que los valores que deben adoptar los parámetros controlados se obtengan del modelo (Nagy, 2007). Dentro de los modelos disponibles, las redes neuronales artificiales (RNA) son herramientas predictivas para tratamientos no lineales y multirelacionales usadas en la optimización de procesos (Aghbashlo et al., 2015; Álvarez et al., 2016).

Las RNA están conformadas por neuronas interconectadas, similares a las encontradas en los sistemas nerviosos biológicos (Turkson et al., 2016). Estas tienen la capacidad de reconocer y reproducir las relaciones de causa y efecto para múltiples sistemas complejos (Mirsoleimani-azizi et al., 2015).

De los diferentes modelos de RNA, las redes con estructura *backpropagation* son la más aplicadas para el modelado de procesos químicos (Nagy, 2007). El funcionamiento de una red *backpropagation* consiste en el aprendizaje de un conjunto predefinido de datos entrada/salida considerados como referencia del proceso, a lo que se denomina entrenamiento.

Mediante el entrenamiento se emplea un ciclo propagación-adaptación de dos fases: primero se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de neuronas de la red, que se propaga a través de todas las capas hasta generar una salida; se compara el resultado obtenido con los resultados que se desea obtener y se calcula un valor de error. A continuación este error se transmite hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la/s capa/s intermedia/s que contribuyan directamente a ella, recibiendo el porcentaje de error aproximado a la participación de cada neurona intermedia en la salida

 ISBN 978-607-8242-11-5

original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aporte relativo al error total.

De acuerdo al valor del error recibido, se ajustan los valores de las relaciones (pesos) de cada una de las conexiones entre neuronas para mejorar su rendimiento. Dicho proceso se repite (iteración) varias veces y finaliza cuando un objetivo específico es aprendido de acuerdo a criterios preestablecidos por el operador o cuando la salida esté más cercana a la deseada, es decir, el error disminuya. El entrenamiento se detiene cuando el error total se estabiliza o se logra un determinado objetivo.

El algoritmo de propagación del error hacia atrás o *backpropagation* se basa en el cálculo del error por mínimos cuadrados, definido como la diferencia cuadrática entre los valores predichos por la red y los valores reales ingresados como salidas, lo que se expresa como:

$$E = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}(Y_j^t - Y_j)^2 \quad (1)$$

En donde *p* es el número de patrones de entrenamiento, *Y* representa a los valores predichos por la red e Y^t a los valores reales o deseados.

El algoritmo utiliza también una función o superficie de error asociada a la red, cuyo gradiente es empleado para actualizar los pesos de las conexiones entre neuronas a través de la siguiente ecuación:

$$w_{ij}\,(t+1) = w_{ij}\,(t) - \eta\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (2)$$

donde w_{ij} representa los pesos de las conexiones entre las neuronas *j* e *i*, *t* el tiempo y η la tasa de aprendizaje.

Una vez que la red ha sido entrenada hasta alcanzar el error mínimo, se procede a su validación. Este procedimiento permite predecir su capacidad de generalización, entendida como la facilidad de dar salidas satisfactorias a entradas que el sistema no ha visto nunca en su fase de entrenamiento.

Dado que para el año 2020 se espera la introducción de más de tres millones de toneladas de glicerol en el mercado como consecuencia de la industria del biodiesel (Bozkurt et al., 2015), la posibilidad de disponer de un modelo matemático que contribuya a mejorar el proceso de obtención de MG es de gran interés. En este sentido, el objetivo del trabajo es comprobar la capacidad de generalización de modelos matemáticos basados en RNA que caractericen la relación entre la conversión del reactivo, estearato de metilo, y el rendimiento de los productos MG, DG y TG, en la transesterificación del glicerol, para proyectar políticas de control sobre el proceso.

METODOLOGÍA

Las reacciones de transesterificación se llevaron a cabo en un reactor batch, a temperatura constante de 493 K. La relación molar de reactivos, glicerol: estearato de metilo, fue de 6:1, empleando óxidos mixtos de Mg y Al modificados con Li, como catalizador. Los productos de reacción se identificaron y cuantificaron mediante cromatografía gaseosa. De esta manera, se obtuvieron los porcentajes de conversión del estearato de metilo y rendimiento de los productos MG, DG y TG a emplear en el modelo. Si bien la reacción tiene una duración máxima de 7 h, se tomaron muestras parciales en tiempos intermedios a los fines de considerarlas en el modelo previsto.

El precursor del catalizador, el HDL, se sintetizó con la incorporación de Li como tercer metal, reemplazando en un 15 y 30 % a los moles de Mg. La relación teórica de moles de los iones metálicos, $(Mg^{2+}+Li^{1+}):Al^{3+}$, fue de 3:1. La incorporación del Li se realizó en forma directa en el momento de síntesis por el método de coprecipitación. El HDL se transformó en óxido mixto por descomposición térmica a 723 K durante 9 h.

Para seleccionar el modelo que mejor represente la dinámica de la reacción se estudió el comportamiento de diferentes configuraciones neuronales. Así, se crearon tres modelos basados en RNA con estructura *backpropagation*; RNA1, RNA2 y RNA3 (Fig. 1 a-c). La primera (RNA1) fue construida con una capa oculta con función de transferencia sigmoidea, conteniendo 35 neuronas y una capa de salida con función de transferencia lineal. La segunda (RNA2) fue estructurada en cascada con capa oculta de 25 neuronas. La capa oculta y la de salida se obtuvieron mediante función de transferencia sigmoidea. En la tercera (RNA3), el modelo se constituyó de dos capas ocultas de 25 y 10 neuronas, con funciones de transferencia sigmoidea y radial, respectivamente.

 ISBN 978-607-8242-11-5

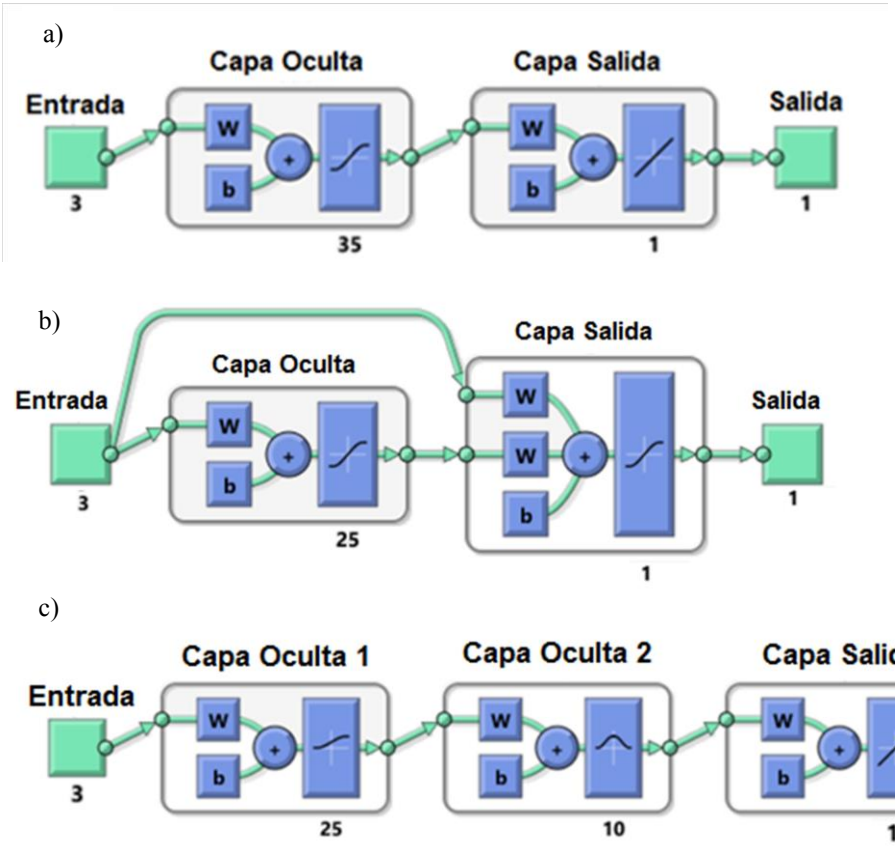


Fig. 1: Estructuras de las redes neuronales artificiales. a) RNA1, b) RNA2 y c) RNA3

La Tabla 1 resume los parámetros de las reacciones empleadas para el entrenamiento (Re) y validación (Rv) de las redes propuestas. Así, para la Re, el porcentaje de moles de Li incorporado al catalizador fue de 15, mientras que el de participación del catalizador, fue de 3 % en relación a la masa total de reactivos. Para las reacciones Rv, en tanto, los porcentajes de moles de Li adicionado al catalizador fueron de 15 (Rv1 y Rv2) y 30 (Rv3). Para estas reacciones, la proporción del catalizador, en relación a la masa total de reactivos, fue de 4% (Rv1 y Rv3) y 5% (Rv2), respectivamente.

Tabla 1: Condiciones de las reacciones para el entrenamiento (Re) y validación (Rv) de las RNA. Datos a 493 K.

Reacción	% moles de Li incorporado	% p/p catalizador
Re	15	3
Rv1	15	4
Rv2	15	5
Rv3	30	4

Para el entrenamiento de las RNA se consideró, como entrada, a la matriz de datos compuesta por el porcentaje de conversión del estearato de metilo y sus primera y segunda derivadas (arreglo de 3x420 elementos), correspondientes a 7 h del proceso. La incorporación de las derivadas hizo posible que la red dispusiera de suficiente información para obtener la salida propuesta, esto debido a la alta no linealidad del proceso. Como salida, se emplearon los datos de porcentaje de rendimiento de MG y DG en tres arreglos matriciales de 1x420 elementos. Los parámetros de esta reacción son los referidos a Re (Tabla 1). Para la validación de los modelos se tomaron los datos relativos a las reacciones Rv1, Rv2 y Rv3.

Dado que las mediciones se realizaron con intervalos de 30 min, se propuso una interpolación de éstas por medio de splines, a modo de disponer de mayor información para el modelo.

Es de destacar que estos modelos matemáticos fueron probados anteriormente, para evaluar sus respectivas capacidades de caracterización en cuanto a la correlación entre el porcentaje de conversión del estearato de metilo y el de la selectividad a los productos obtenidos (Álvarez et al., 2016).

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las RNA entrenadas con los porcentajes de conversión de estearato de metilo, como entrada, y de rendimientos de MG, DG y TG, como salida, bajo condiciones Re fueron validadas con datos análogos obtenidos de reacciones en condiciones Rv1, Rv2 y Rv3.

En las Fig. 2 y 3 (a-c) se muestra la comparación entre los resultados experimentales obtenidos a partir del entrenamiento de RNA1, RNA2 y RNA3 (en verde) y los provenientes de sus respectivas validaciones (en azul). De las RNA evaluadas, las que mayor capacidad de generalización manifestaron fueron RNA1 y RNA2, para la predicción de los porcentajes de rendimiento de MG y DG.

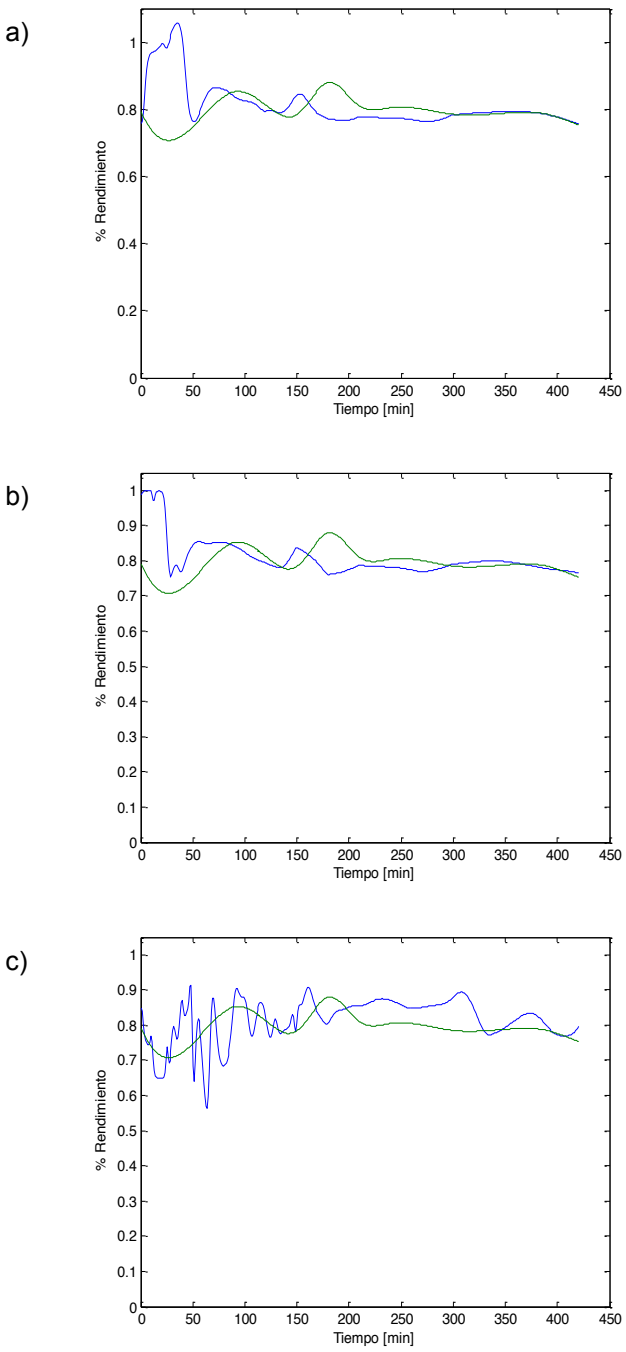


Fig. 2. Aproximación al validar las RNA a) 1, b) 2 y c) 3, para MG (parámetros de Rv1). En verde: salidas del entrenamiento. En azul: salidas de la validación.

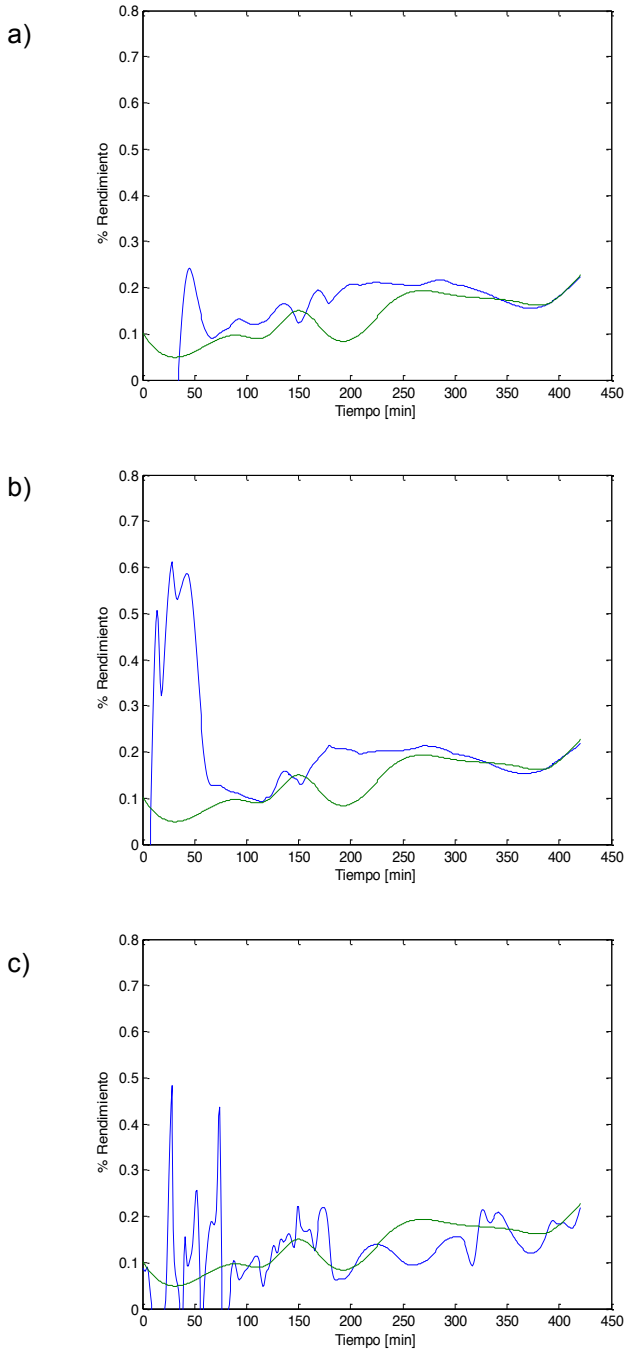


Fig. 3. Aproximación al validar las RNA a) 1, b) 2 y c) 3, para DG (parámetros de Rv1). En verde: salidas del entrenamiento. En azul: salidas de la validación.

ISBN 978-607-8242-11-5

Se observó que tanto RNA1 como RNA2 pudieron explicar favorablemente la relación existente entre los parámetros de reacción para MG y DG, dado el incremento de hasta el 1% en la concentración de catalizador (condiciones Rv1). Sin embargo, RNA 1 manifestó una leve preponderancia por sobre RNA2.

Por otro lado, ninguna de las RNA evaluadas demostró aptitud para explicar la relación entre los parámetros de reacción al modificarse el % de Li en el catalizador (condiciones Rv3), como así tampoco la evolución de los TG obtenidos a partir de las reacciones empleadas para validar los modelos.

Esto puede deberse a las distintas arquitecturas con las que fueron desarrolladas las redes de análisis. En este sentido, RNA1 posee 35 neuronas, a diferencia de la RNA2 que incluye 25. De acuerdo a lo reportado, al incrementarse el número de neuronas en la capa oculta, aumenta también la flexibilidad de la red, y con esto mejora su desempeño (Demuth y Beale, 2012). Asimismo, según Nagy (2007), si se dispone de dos redes semejantes, es preferible la de mayor simplicidad. Ambos factores concurrentes podrían justificar la mayor capacidad de generalización de RNA1.

Las curvas referidas a la validación en condiciones Rv2 y Rv3 y las correspondientes a TG no se muestran en el presente trabajo, dado que no evidenciaron resultados significativos. Sin embargo, puede inferirse que la falta de habilidad de las RNA para explicar la evolución del rendimiento hacia el TG podría deberse a las características particulares de los resultados experimentales logrados. En este sentido, se observó que los porcentajes de rendimiento hacia el TG son muy bajos o nulos, dando cuenta que la participación del porcentaje de este producto, en el total de los obtenidos (MG, DG y TG), no es representativa.

CONCLUSIONES

Se han desarrollado RNA con estructura *backpropagation* que caracterizan la relación entre el porcentaje de conversión del estearato de metilo, reactivo que genera MG, DG y TG durante la transesterificación con glicerol, y el de rendimiento de dichos productos. Se probaron diferentes algoritmos y número de iteraciones, a los fines de definir las que mejores desempeños mostraran, en relación a la capacidad de generalización. Estas arquitecturas se validaron con datos provenientes de reacciones llevadas a cabo en diferentes condiciones, en cuanto a la composición y carga del material empleado como catalizador. Así, se probó la capacidad de dichas redes para anticipar la evolución de reacciones catalizadas con óxidos mixtos de Mg y Al, a los que se adicionó Li en distintas proporciones y concentraciones en relación a la masa total de reactivos.

La RNA que mayor capacidad de generalización mostró fue la constituida por una capa oculta con función de transferencia sigmoidea, conteniendo 35 neuronas y una capa de salida con función lineal. Ésta fue capaz de explicar la relación entre los porcentajes de conversión y rendimiento de la reacción, en cuanto a la obtención de MG y DG, cuando el porcentaje de catalizador varía hasta en un 1%. Sin embargo, no demostró aptitud para explicar la relación entre los parámetros de reacción al modificarse el % de Li incorporado en el catalizador. Se observó que los modelos creados no fueron capaces de explicar de manera satisfactoria la relación existente entre los parámetros de reacción, para los TG.

El empleo de estos modelos es de interés, dada su incidencia en la proyección del proceso a mayores escalas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

Aghbashlo, M., S. Hosseinpour y A.S. Mujumdar, "*Application of artificial neural networks (ANNs) in drying technology: a comprehensive review"*, Dry Technol., 33 (12), 1397–1462 (2015).

Alonso, D., J. Bond y J. Dumesic, *"Catalytic conversion of biomass to biofuels"*, Green Chem. 12, 1493-1513 (2010).

Álvarez D., N. Balsamo, M. Modesti y M. Crivello, "*Estudio comparativo de RNAs aplicadas a la reacción de obtención de monoglicéridos, catalizada por Hidróxidos Dobles Laminares modificados con litio"*, XXV Congreso Iberoamericano de Catálisis, Montevideo-Uruguay (2016).

Angelescu, E., O. Pavel, R. Birjega, M. Florea y R. Zavoianu, *"The impact of the "memory effect" on the catalytic activity of Mg/Al; Mg, Zn/Al; Mg/Al, Ga hydrotalcite-like compounds used as catalysts for cycloxene epoxidation"*, Appl. Catal. A: General 341, 50-57 (2008).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Balsamo, N., K. Sapag, M. Oliva, G. Pecchi, G. Eimer y M. Crivello, "*Mixed oxides tuned with alkaline metals to improve glycerolysis for sustainable biodiesel production",* Catal. Today 279 (2), 209-216 (2017).

Bálsamo, N., S. Mendieta, M. Oliva, G. Eimer y M. Crivello, *"Synthesis and characterization of metal mixed oxides from Layered Double Hydroxides"*, Procedia Mat. Sci. 1, 506-513 (2012).

Bozkurt, Ö. D.; F. M. Tunç, N. Bağlar, S. Çelebi, İ. D. Günbaş y A. Uzun, "Alternative fuel additives from glycerol by etherification with isobutene: Structure–performance relationships in solid catalysts", Fuel Process. Technol., 138, 780-804 (2015).

Chimentao, R., S. Abelló, F. Medina, J. Llorca, J. Sueiras, Y. Cesteros y P. Salagre., "*Defect-induced strategies for the creation of highly active hydrotalcites in base-catalyzed reactions"* J. Catal., 252, 249-257 (2007).

Demuth, H. y M. Beale, *"Matlab user´s Guide, Version 8.0"*, MathWorks (2012).

Ferretti, C., C. Apesteguía y J. Di Cosimo, *"MgO-based catalysts for monoglyceride synthesis from methyl oleate and glycerol: Effect of Li promotion"*, Appl. Catal. A: General 399, 146-153 (2011).

Juan, J., D. Kartika, T. Wu y T. Hin, *"Biodiesel production from Jatropha oil by catalytic and non-catalytic approaches: an overview"*, Bioresour. Technol., 102, 452-460 (2011).

Mirsoleimani-azizi, S. M., A. A. Amooey, S. Ghasemi y S. Salkhordeh-panbechouleh, *"Modeling the Removal of Endosulfan from Aqueous Solution by Electrocoagulation Process Using Artificial Neural Network (ANN)"*, Ind. Eng. Chem. Res., 54, 9844-9849 (2015).

Nagy, Z., *"Model based control of a yeast fermentation bioreactor using optimally designed artificial neural networks"*, Chem. Eng. J. 127, 95-109 (2007).

Turkson, R. F.; F. Yan, M. K. Ahmed Ali y J. Hu, *"Artificial neural network applications in the calibration of spark-ignition engines: An overview"*, Eng. Sci. Technol. Int. J. 19, 1346-1359 (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Diseño Óptimo de una Red de Agua para la Disminución de Cloruros en la Localidad de Ríohacha Colombia

Adrián López-Yáñez[1], Román Guadarrama-Pérez[1], Jorge Ramírez-Muñoz[1], Jhonny Pérez-Montiel[2] y Andrea Nardini[3]
(1) Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco,
Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200, Delegación Azcapotzalco, CDMX-México.
(2) Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Km 5 Vía a Maicao, Riohacha-Colombia.
(3) Fundación CREACUA-Centro Recuperación Ecosistemas Acuáticos, Riohacha, La Guajira-Colombia.
E-mail: mixtili_5050@hotmail.com, al2153806067@azc.uam.mx, jrm@ azc.uam.mx, jpemon@uniguajira.edu.co, nardiniok@gmail.com

Resumen

Se investigó el uso de los recursos hídricos que abastecen la ciudad de Riohacha buscando la mejor mezcla de caudales entre una fuente superficial (Río Tapias, insuficiente en estiajes pronunciados) y bombeo de dos sistemas de pozos (con agua muy cargadas en cloruros). La solución, en términos de configuración del sistema (infraestructura) y uso de los recursos no es trivial porque existen muchas opciones en principio viables y potencialmente efectivas. Es aquí en donde la programación matemática brinda un apoyo para la toma de mejores decisiones. Las restricciones consideradas fueron: (1) no superar el contenido de cloruros fijado por la norma colombiana; (2) respetar un caudal mínimo ecológico en el rio Tapias; (3) satisfacer la demanda de agua de la ciudad; (4) satisfacer la demanda de agua para uso agrícola, y (5) usar como caudal máximo de dilución, la mitad del caudal que abastece a la ciudad de la fuente superficial. La superestructura contempla la actual planta de tratamiento (PT) de la fuente superficial, dos unidades de ósmosis inversa (OI) sin recirculación para desalinizar el agua de pozos y sus interconexiones para permitir usar el caudal de PT para coadyuvar en la disminución de cloruros. La función objetivo incluye las variables de costo de la PT, costo de bombeo de los pozos y costo del proceso de OI. El modelo de programación no lineal (función objetivo, restricciones, parámetros y cotas de las variables) se implementó y resolvió en el software GAMS y se usó algoritmo de optimización CONOPT. La versatilidad y uso del modelo propuesto se muestran con la solución de casos de estudio principales con y sin flujos de dilución. Se encontró que, es posible minimizar los costos de tratamiento y cumplir con todas las restricciones planteadas previamente con el respaldo de los pozos, esto sin requerir el uso de los procesos de OI.

Optimum Design of a Water Network for the Reduction of Chloride in the Locality of Ríohacha Colombia

Abstract

The use of the water resources that supply the city of Riohacha was investigated, searching the best mixture of flows between a surface source (Tapias River, insufficient in steep droughts) and pumping of two well systems (water heavily loaded with chlorides). The solution in terms of system configuration and use of resources is not trivial because there are many options in principle that are feasible and potentially effective. It is here where mathematical programming provides support for making better decisions. The restrictions considered were: (1) a limit of the chloride content set by the Colombian standard; (2) to keep an ecological minimum flow in the Tapias River; (3) to satisfy the city's water demand; (4) to satisfy the demand of water for agricultural use, and (5) to use as a maximum dilution flow, half of the flow that supplies the city from the surface source. The superstructure contemplates the current surface treatment plant (PT), two non-recirculated reverse osmosis (RO) to desalinate well water and their interconnections to allow the use of the PT flow to assist in the reduction of chlorides. The objective function includes the variables of cost of the PT, cost of water pumping from wells and cost of the RO process. The non-linear programming model (objective function, constraints, parameters and limits of the variables) was implemented and solved in the GAMS software and the CONOPT optimization algorithm was used. The versatility and use of the proposed model are shown with case study solution with and without dilution flows. The versatility and use of the proposed model are shown with case study solution with and without dilution flows. It was found that it is possible to minimize the treatment costs and to satisfice with all previously proposed restraints, this without requiring the use of RO processes.

Keywords: chloride removal, drinking water, reverse osmosis, optimization, superstructure.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El agua potable es uno de los recursos naturales más importantes para el desarrollo de una determinada población. Las diferentes dependencias gubernamentales de cada país dedicadas a la regulación del agua potable han impuesto normas donde se especifican los límites permitidos para para el consumo humano. La ciudad de Riohacha en La Guajira-Colombia se encuentra en una zona semi-desértica a orillas del Mar Caribe por lo que las concentraciones altas de cloruros del agua existente en el subsuelo son un factor natural. Uno de los principales problemas de salud existentes en el Departamento de la Guajira es la falta de agua potable con la calidad suficiente para el consumo humano (LGH, 2017).

La ciudad de Riohacha cuenta con diferentes fuentes de agua, en donde, el Río Tapias es la principal y actual fuente de abastecimiento del vital líquido, por otro lado se ha optado por construir pozos de donde se extrae el agua de los mantos freáticos. Éstos se han construido con el fin de dar respaldo al Río Tapias en temporadas de estiaje y mantener con ello el mínimo caudal ecológico en el río. Sin embargo, estos pozos no se han podido poner en funcionamiento debido a que la concentración principalmente de cloruros se encuentra fuera del límite permitido por la norma ambiental de Colombia (MAVDT y Ministerio de Protección Social, 2007). Esta situación se vuelve más complicada en las temporadas de sequía cuando el caudal del río disminuye significativamente, y con ello, se vive una situación de escases y por ende de restricción del agua potable suministrada a la ciudad de Riohacha. Cabe destacar además que en época seca -especialmente en los años donde se presenta el fenómeno de El Niño- el río Tapia no dispone de la cantidad de agua suficiente para abastecer a la ciudad de Riohacha, independientemente del respeto del caudal ecológico; esto se ha agravado con el acelerado crecimiento que ha experimentado esta ciudad la cual pasó de 178.162 habitantes en 2010 a 228.857 habitantes en el 2016, lo que indica un crecimiento de 28,45% en los últimos 6 años (DANE, 2016).

Una manera de hacer frente al problema de desalinización del agua de pozos es mediante el tratamiento con osmosis inversa, la cual es una técnica de desmineralización basada en membranas y usada para separar sólidos disueltos, tales como iones cloruro de una solución (Al-Sahali y Ettouney, 2007). Sin embargo, esta alternativa resulta muy costosa si se compara con los costos de tratar aguas superficiales (Lechuga et al., 2007). Para este caso de estudio, el costo de tratamiento por ósmosis inversa del agua de pozos es más de un orden de magnitud mayor al tratamiento del agua proveniente del rio Tapias. En el último caso se tiene como ventaja adicional de que el agua se conduce y distribuye principalmente por la acción de la gravedad lo cual disminuye el costo de bombeo. Por consiguiente, se deben buscar alternativas que permitan tratar la menor cantidad de agua posible proveniente de los pozos, satisfacer la norma colombiana y mantener el caudal mínimo ecológico durante la temporada de estiaje.

En el presente trabajo se investiga el problema de diseño de la infraestructura y de optimización del uso de los recursos para satisfacer la demanda y los umbrales de concentración de cloruros en el sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Riohacha considerando la infraestructura ya disponible en dicha localidad. Se investiga mediante el empleo de herramientas de optimización el uso de los recursos hídricos que abastecen la ciudad de Riohacha buscando la mejor mezcla de caudales entre una fuente superficial (Río Tapias, insuficiente en estiajes pronunciados) y bombeo de dos sistemas de pozos (con agua muy cargadas en cloruros). Las restricciones consideradas fueron: (1) no superar el contenido de cloruros fijado por la norma colombiana; (2) respetar un caudal mínimo ecológico en el rio Tapias; (3) satisfacer la demanda de agua de la ciudad; (4) satisfacer la demanda de agua para uso agrícola, y (5) usar como caudal máximo de dilución, la mitad del caudal que abastece a la ciudad de la fuente superficial. La superestructura contempla la actual PT de la fuente superficial, dos unidades de OI sin recirculación para el agua de pozos y sus interconexiones para permitir usar el caudal de PT para coadyuvar en la disminución de cloruros. El análisis que se realiza en este trabajo se limita únicamente a la estación seca en donde el grado de turbidez del agua proveniente del Río Tapias que alimenta la planta de tratamiento es lo suficientemente baja para permitir que dicha planta opere a su capacidad máxima.

Existen varios estudios reportados con el enfoque de programación matemática para la optimización de redes de tratamiento de aguas residuales empleando tasas de remoción constantes o variables en las unidades de tratamiento. Estos modelos de programación se desarrollaron a partir de superestructuras que permiten englobar todo el conjunto solución. Algunos de estos trabajos han sido realizados por Grossmann et al. (1999), Zamora-Mata et al. (2004), Alva et al. (2007), Jiménez et al. (2014) y López-Yañez et al. (2016). En este trabajo se utiliza un enfoque similar para el problema de tratamiento selectivo (o distribuido) de corrientes efluentes compuesto por dos unidades de tratamiento por ósmosis inversa con tasas de remoción constantes, el cual permite el tratamiento total o parcial de cada corriente proveniente de los pozos y la posibilidad de dilución usando una corriente disponible con baja concentración de cloruros. Esto con el fin de minimizar el costo de tratamiento de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Riohacha (véase Figura 1). Para ello se utiliza una superestructura básica que incluye todo el conjunto de posibilidades de tratamiento.

ISBN 978-607-8242-11-5

El modelo de PNL presentado se optimiza utilizando un código de programación implementado en el sistema GAMS (General Algebraic Modeling System, por sus siglas en inglés) y el resolvedor utilizado fue el MINOS (Brooke et al., 2012).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Fig. 1 se plantea el diseño de una red hidráulica para el abastecimiento de agua potable a la CDRH. Se cuenta con cinco fuentes de agua para dar cumplimiento al caudal mínimo F_{TU}^{U} requerido por la CDRH: (1) suministro de agua del Rio Tapias, S_1; suministro de agua del Sistema I constituido por los pozos (2) Sena, S_2, y (3) Batallón, S_3; suministro de agua del Sistema II constituido por los pozos (4) Guayacanal, S_4, y (5) La Luchita, S_5. El caudal de agua t_1 proveniente de la PT satisface las especificaciones de calidad del agua y su muy baja concentración de cloruros $cout_1 < c_{j,e}^{U}$ (i.e. 15 mg/L<250 mg/L) genera la oportunidad de dar tratamiento por medio de dilución a los flujos de agua del Sistema I ($t_{1,out}$) y Sistema II ($t_{2,out}$). Por otro lado, el caudal de agua de respaldo para la temporada de estiaje de los pozos de los Sistemas I y II, cuentan con su respectivo sistema de tratamiento por OI para la remoción de cloruros, los cuales se asume tienen una eficiencia de remoción del 95%.

A partir de la discusión anterior, se plantean dos casos de estudio para asistir en el diseño topológico de la red hidráulica por medio de un modelo de programación no lineal (PNL), (1) tratamiento de flujos de agua sin dilución en M_3 y M_4 (i.e. $t_{1,D4}$=0), utilizando únicamente las unidades de OI, y (2) tratamiento con dilución coadyuvando a las unidades de OI para la disminución de cloruros. Finalmente, la superestructura básica presentada en la Fig. 1, permite desarrollar la nomenclatura necesaria para el modelo de PNL, así como el conjunto solución de los casos de estudio abordados, por lo que ésta se utiliza también para obtener los diseños topológicos de los resultados óptimos.

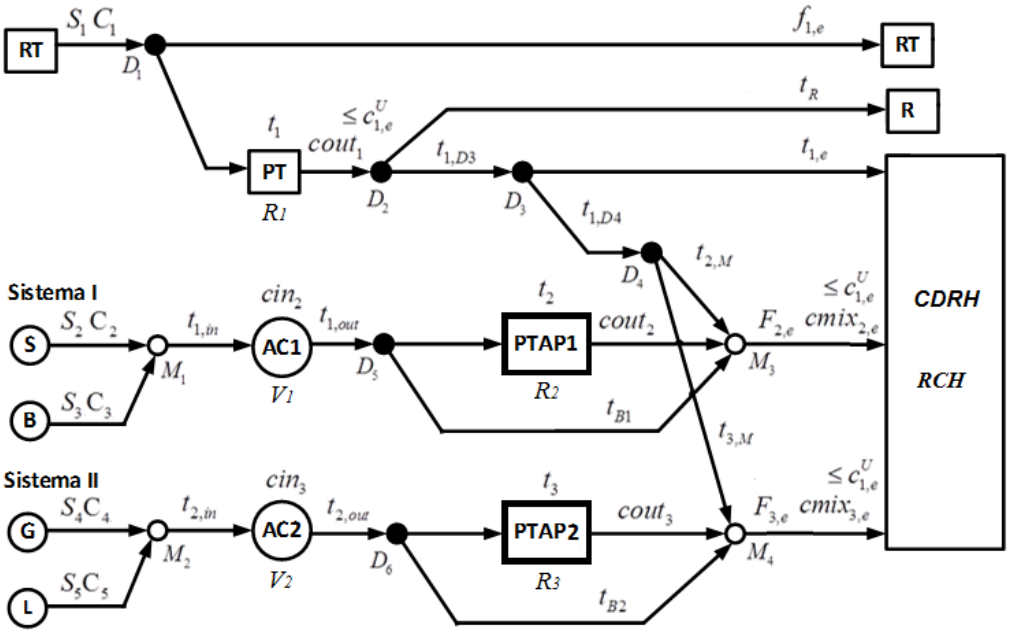


Fig. 1: Superestructura básica propuesta de la red hidráulica de abastecimiento a la CDRH.

MODELO DE PROGRAMACIÓN NO-LINEAL (PNL)

El modelo de PNL presentado en este trabajo, incluye una función objetivo que minimiza el costo anual total de tratamiento (CAT), que contempla los siguientes costos (1) bombeo, (2) tratamiento por OI, y (3) tratamiento en la PT, los cuales se suponen directamente proporcionales a los flujos. Por otro lado, las restricciones del modelo se refieren a balances globales de materia y por componente en cada unidad de proceso, así como en los mezcladores y divisores. Finalmente las variables de decisión se acotan de acuerdo a las condiciones especificadas para el flujo de la fuente superficial (RT) y de los Sistemas I y II.

ISBN 978-607-8242-11-5

Se especifica un caudal ecológico de al menos $f_{1,e}$=240 L/s y el caudal para la temporada de estiaje es de S_1=800 L/s. La PT y las unidades de tratamiento de OI, tienen la capacidad de dar tratamiento a t_1=560 L/s y t_2, t_3 = 5000 m^3/día (57.87 L/s) respectivamente, cabe mencionar que la toma de agua para riego por parte de la actividad agrícola es t_R=120 L/s, por lo que el caudal efectivo por parte de la fuente superficial de agua para abastecer CDRH es a lo más $t_{1,e}$=440 L/s. Por otro lado, los pozos S=83.86 L/s y B=78 L/s trabajan a un régimen de 12 h/día por lo que el Sistema I solo puede suministrar $t_{1,in}$=80.93 L/s, y de igual manera, los pozos G=78.84 L/s y L=80 L/s trabajan a un régimen de 12 h/día por lo que el Sistema II suministra $t_{2,in}$=79.42 L/s, lo cual sobre pasa la capacidad de las plantas de OI. Finalmente, las corrientes de agua a la llegada de la CDRH deben cumplir una cota máxima de concentración de cloruros de $c_{j,e}{}^{U}$=250 mg/L, de acuerdo a la norma colombiana. Todas estas restricciones son tomadas en cuenta en el modelo de PNL. Dicho modelo es implementado y resuelto en el sistema GAMS.

Función Objetivo de costos ($USD/año)

$$\text{Minimizar} \quad f(X) = C_{mc,A}\left[C_{PT}t_1 + \left(C_B + C_{OI}\right)\left(t_2 + t_3\right) + C_B\left(t_{B,1} + t_{B,2}\right)\right] \tag{1}$$

Sujeto a las siguientes restricciones de tipo igualdad

Balance de masa en el divisor D_1, considerando densidad constante:

$$S_1 = f_{1,e} + t_1 \tag{2}$$

Balance de cloruros en la PT

$$R_1 = \frac{C_1 - cout_1}{C_1} \tag{3}$$

Balance de masa en el divisor D_2, considerando densidad constante:

$$t_1 = t_R + t_{1,D3} \tag{4}$$

Balance de masa en el divisor D_3, considerando densidad constante:

$$t_{1,D3} = t_{1,D4} + t_{1,e} \tag{5}$$

Balance de masa en el divisor D_4, considerando densidad constante.

$$t_{1,D4} = t_{2,M} + t_{3,M} \tag{6}$$

Balance de masa en el mezclador M_1, considerando densidad constante.

$$t_{1,in} = S_2 + S_3 \tag{7}$$

Balance de cloruros en el mezclador M_1, considerando densidad constante.

$$t_{1,in}cin_2 = S_2C_2 + S_3C_3 \tag{8}$$

Balance de masa en el tanque de almacenamiento AC1.

$$t_{1,in} = t_{1,out} \tag{9}$$

Balance de masa en el divisor D_5, considerando densidad constante.

$$t_{1,out} = t_2 + t_{B,1} \tag{10}$$

Balance de cloruros en la PTAP1

$$R_2 = \frac{cin_2 - cout_2}{cin_2} \tag{11}$$

Balance de masa en PTAP1, considerando densidad constante.

$$F_{2,e} = t_{2,M} + t_2 + t_{B,1} \tag{12}$$

Balance de cloruros en PTAP1.

$$F_{2,e}cmix_{2,e} = t_{2,M}cout_1 + \left(1 - R_2\right)t_2cin_2 + t_{B,1}cin_2 \tag{13}$$

Balance de masa en el mezclador M_2, considerando densidad constante.

$$t_{2,in} = S_4 + S_5 \tag{14}$$

Balance de cloruros en el mezclador M_2, considerando densidad constante.

$$t_{2,in}cin_3 = S_4C_4 + S_5C_5 \tag{15}$$

Balance de masa en el tanque de almacenamiento AC2.

$$t_{2,in} = t_{2,out} \tag{16}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Balance de masa en el divisor D_6, considerando densidad constante.

$$t_{2,out} = t_3 + t_{B,2} \tag{17}$$

Balance de cloruros en la PTAP2

$$R_3 = \frac{cin_3 - cout_3}{cin_3} \tag{18}$$

Balance de masa en PTAP2, considerando densidad constante.

$$F_{3,e} = t_{3,M} + t_3 + t_{B,2} \tag{19}$$

Balance de cloruros en PTAP2;

$$F_{3,e}cmix_{3,e} = t_{3,M}cout_1 + (1-R_3)t_3cin_3 + t_{B,2}cin_3 \tag{20}$$

Balance de agua para los flujos originados por RT

$$S_1 = t_{2,M} + t_{3,M} + t_{1,e} + f_{1,e} + t_R \tag{21}$$

Balance de masa en la superestructura básica, (densidad constante):

$$S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 = f_{1,e} + t_R + F_{2,3} + F_{3,e} + t_{1,e} \tag{22}$$

Balance de cloruros en la superestructura básica:

$$S_1C_1 + S_2C_2 + S_3C_3 + S_4C_4 + S_5C_5 = f_{1,e}C_1 + t_Rcout_1 + F_{2,e}cmix_{2,e} + F_{3,e}cmix_{3,e} + t_{1,e}cout_1 + r_{Cl} \tag{23}$$

Total de agua alimentada a CDRH:

$$RCH = F_{2,e} + F_{3,e} + t_{1,e} \tag{24}$$

Restricciones o cotas de tipo desigualdad del modelo PNL:

$$t_{2,M},\ t_{3,M},\ t_{1,e},\ t_1,\ t_{1,D3},\ t_{1,D4} \ \le\ F_{UT}^U \tag{C-1}$$

$$cout_1,\ cout_2,\ cout_3,\ cin_2,\ cin_3,\ cmix_{2,e},\ cmix_{3,e} \ \le\ c_{j,e}^U \tag{C-2}$$

$$t_2,\ t_3 \ \le\ Q_{PTAP1}^U \tag{C-3}$$

$$t_{1,in},\ t_{1,out},\ t_{B,1} \le a \tag{C-4}$$

$$t_{2,in},\ t_{2,out},\ t_{B,2} \le b \tag{C-5}$$

$$F_{2,e} \le g \tag{C-6}$$

$$F_{3,e} \le r \tag{C-7}$$

$$f_{1,e} \ge F_{RT}^L \tag{C-8}$$

$$RCH \ge F_{RCH} \tag{C-9}$$

Tabla 1: Parámetros o datos de entrada del modelo PNL.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
S_1	*800 L/s*	C_3	*401 mg/L*	F_{RT}^L	240 L/s
REG_P	*0.5 s/s.*	C_4	*321.7 mg/L*	Q_{PTAP1}	57.87 L/s
s_2	*83.86 L/s*	C_5	*321.7 mg/L*	Q_{PTAP2}	57.87 L/s
$S_2 = REG_Ps_2$	41.93 L/s	$c_{1,e}^U$	*250 mg/L*	a	80.93 L/s
s_3	*78 L/s*	R_1	*95 %*	b	79.42 L/s
$S_3 = REG_Ps_3$	39 L/s	R_2	*95 %*	g	961.86 L/s
s_4	*78.84 L/s*	R_3	*95 %*	r	879.42 L/s
$S_4 = REG_Ps_4$	39.42 L/s	V_1	*100 m³*	C_{PT}	US$ 0.01716 /m³
s_5	*80 L/s*	V_2	*100 m³*	C_{OI}	US$ 0.295567 /m³

ISBN 978-607-8242-11-5

$S_5 = REG_P s_5$	40 L/s	t_R	*120 L/s*	C_B	US$0.005429/m^3
C_1	*15 mg/L*	F_{RCH}	*580 L/s*	$C_{mc,A}$	31536 m^3-s/ L-año
C_2	*401 mg/L*	F_{UT}^U	*560 L/s*		

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso de estudio 1: Sin el uso de flujo para la dilución de cloruros.

En las Fig. 2 se grafica el costo anual total de tratamiento ($USD/año) en función de la concentración límite permitida de cloruros por la norma colombiana (i.e., $c_{j,e}^U$ ≤ 250 mg/L) sin el uso del flujo de dilución proveniente de la PT ($t_{1,D4}$ = 0). El valor mínimo de $c_{j,e}^U$ obtenido mostrado en esta figura (120 mg/L) representa la mínima concentración que se puede alcanzar de cloruros a la salida cuando cada sistema de tratamiento por ósmosis inversa opera a su máxima capacidad (t_2=t_3≈57.8 L/s). Puede verse que a medida que la concentración de cloruros a la salida se restringe, el CAT se incrementa linealmente. Sin embargo, considerando que el costo de la OI es muy caro y el uso de corrientes de dilución podría ser benéfico en la disminución del CAT, se presentan en la siguiente sección resultados con el uso de corrientes de dilución provenientes de la PT.

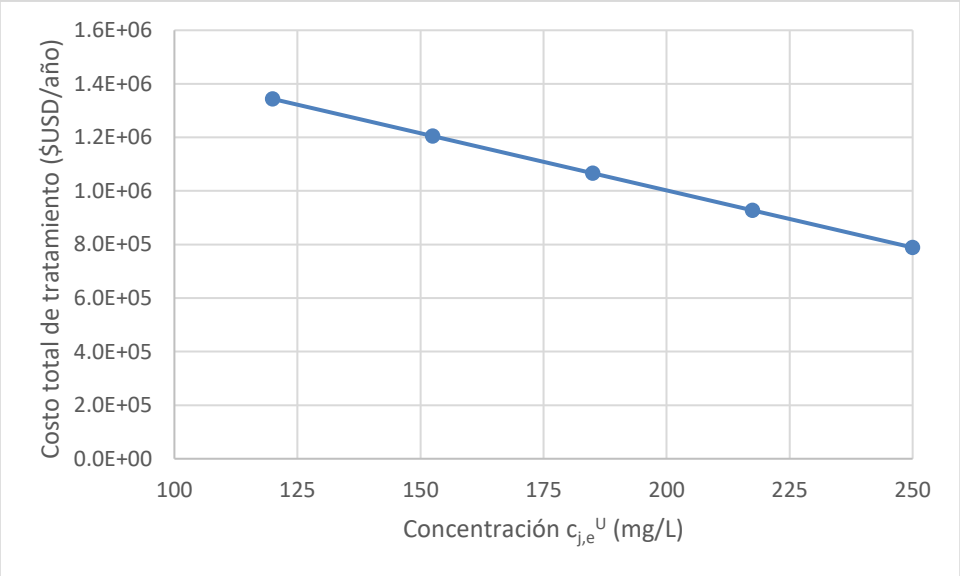


Fig. 2: Costo total de tratamiento en función de la concentración límite de cloruros ($c_{j,e}^U$) sin el uso de flujo de dilución, i.e. $t_{1,D4}$ = 0.

Caso de estudio 2: Usando el flujo para la dilución de cloruros.

En la Fig. 3 se muestra el CAT a diferentes concentraciones límite permitida de cloruros, todas por debajo de la norma colombiana ($c_{j,e}^U$ ≤ 250 mg/L), pero usando el flujo de dilución proveniente de la PT. Para este caso se considera la restricción $t_{1,D4} \leq 0.5\ t_{1,D3}$ (i.e., se usa como caudal máximo de dilución, la mitad del caudal que abastece a la ciudad de Riohacha de la fuente superficial). El valor mínimo de $c_{j,e}^U$ en esta figura representa el valor mínimo obtenido cuando cada sistema opera a su máxima capacidad de tratamiento, i.e. $t_{1,D4}$=0, t_2=t_3≈57.8 L/s y $t_{1,D4}$= 0.5 $t_{1,D3}$ = 220 L/s .

ISBN 978-607-8242-11-5

Puede observarse que a la máxima capacidad de operación, este sistema que usa un flujo para dilución tiene una mayor capacidad de disminución de cloruros que el sistema sin dilución, 55 mg/L (Fig. 3) versus 120 mg/L (Fig. 2), y su costo de tratamiento es mucho menor. Lo anterior se debe a que la dilución coadyuva en la disminución de cloruros y además el costo de este flujo que proviene de la planta de tratamiento convencional (C_{PT} =US$ 0.01716 /m^3) es menor en más de un orden de magnitud al costo del proceso por ósmosis inversa (C_{RO} =US$ 0.295567 /m^3). Por lo anterior, en el sistema con flujo de dilución de la Fig. 3, el costo de tratamiento se mantiene casi constante en el intervalo 161.1 mg/L≤ $c_{j,e}^{U}$ ≤ 250 mg/L, cuando es posible satisfacer $c_{j,e}^{U}$ utilizando únicamente flujo de la planta de tratamiento para diluir los cloruros. Por otro lado, cuando se requiere el uso del proceso por ósmosis inversa, i.e. para $c_{j,e}^{U}$ <161.1 mg/L, el costo de tratamiento se incrementa linealmente. Este incremento lineal en el costo es similar al encontrado con el sistema sin flujo de dilución de la Fig. 2.

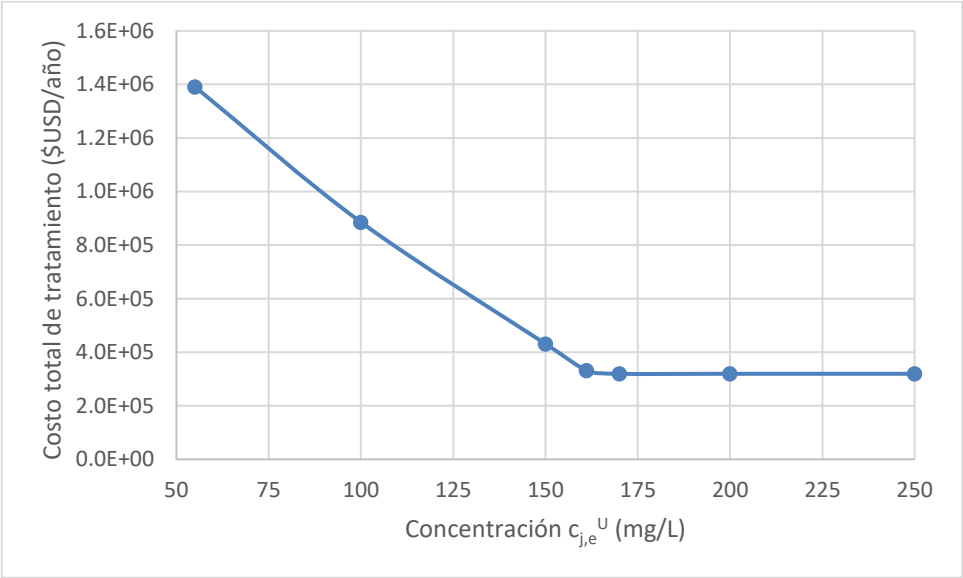


Fig. 3: Costo total de tratamiento en función de la concentración límite de cloruros ($c_{j,e}^{U}$) con un uso restringido de flujo de dilución, i.e. $t_{1,D4}$,≤ 0.5 $t_{1,D3}$.

Con el fin de conocer la máxima capacidad de tratamiento de cloruros del sistema en condiciones muy cercanas a su máxima capacidad de operación, se disminuyó sistemáticamente $c_{j,e}{}^{U}$ hasta que se alcanzaron condiciones de operación muy cercanas a las restricciones impuestas a la red hidráulica de la CDRH, i.e., t_1 = 560 L/s, $t_{1,e}$ = 0.5 $t_{1,D3}$ = 220 L/s, $f_{1,e}$ = 240 L/s, $t_{1,out}$ = $t_{1,out}$ ≈ 57.87 L/s. En la Fig.4 se muestran los resultados de este diseño topológico de red óptimo en donde puede verse que el mínimo $c_{j,e}{}^{U}$ obtenido es de 55 mg/L, lo cual está muy por debajo del especificado en la norma colombiana de 250 mg/L. Por lo que puede concluirse que la capacidad del sistema de tratamiento que se pretende construir para la Ciudad de Riohacha está muy encima de los requerimientos de la norma colombiana de contenido de cloruros en el agua potable. El flujo total a la CDRH de este diseño es de (220+212.43+167.92) L/s = 600.4 L/s, que está también por arriba del mínimo especificado de 580 L/s. El costo anual total de tratamiento óptimo de este diseño de red asciende a US$ 1,391,500/año.

ISBN 978-607-8242-11-5

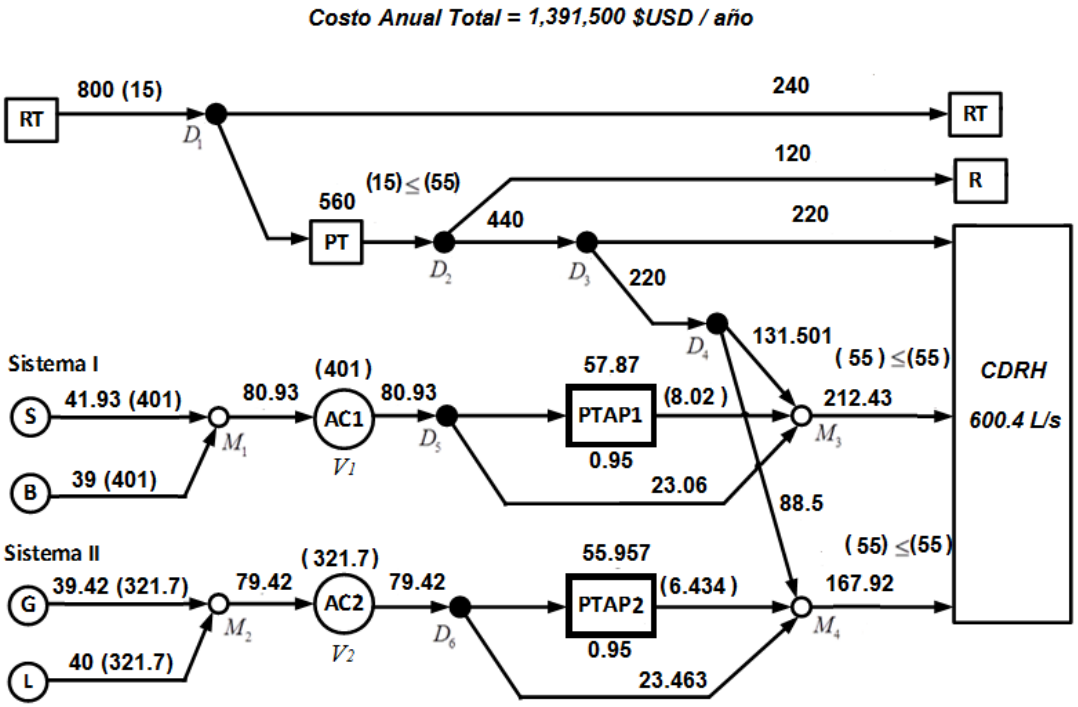


Fig. 4 Diseño topológico de la red hidráulica hacia la CDRH en condiciones cercanas a su máxima capacidad de operación ($C_{1,e}^{U}$ = 55mg/L).

En la Fig. 5 se presentan resultados del diseño topológico de red óptimo que cumple con el límite superior especificado en la norma colombiana de contenido de cloruros $c_{j,e}^{U}$ = 250 mg/L y con todas las restricciones impuestas. Notar que para este diseño aunque se permite el uso de la OI, como la dilución cumple con todas las restricciones, la mejor solución no requiere el uso de las dos unidades de ósmosis inversa PTAP1 y PTAP2. El CAT para este diseño es de $US 319,000 /año, lo cual es mucho menor al costo presentado en el diseño anterior de la Fig. 4. De acuerdo a estos resultados, para cumplir con la norma colombiana únicamente se requiere la implementación de la dilución en el sistema de tratamiento y no se necesita el uso de los procesos de tratamiento por OI.

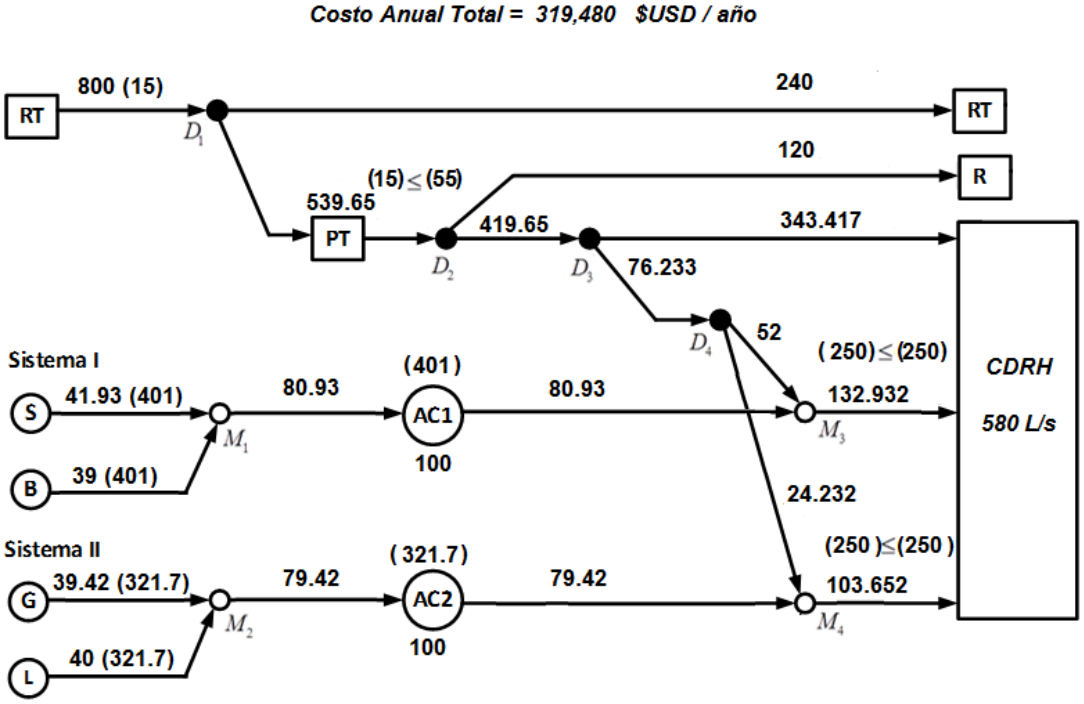


Fig. 5: Diseño topológico de la red hidráulica hacia la CDRH para la concentración de cloruros especificada en la norma colombiana ($C_{1,e}^{U}$ = 250mg/L).

ISBN 978-607-8242-11-5

Con el fin de conocer la máxima capacidad de disminución de cloruros que se podría alcanzar utilizando únicamente las corrientes de dilución, i.e., sin emplear las unidades de ósmosis inversa PTAP1 y PTAP2, se realizaron diferentes optimizaciones disminuyendo progresivamente la concentración de cloruros hacia la ciudad de Riohacha. En la Fig. 6 se presenta un diseño óptimo para el abastecimiento de agua a la CDRCH en donde se minimizan los flujos a tratar en las unidades en donde se buscó minimizar los flujos a tratar en las unidades de ósmosis inversa PTAP1 y PTAP2. En la práctica, este diseño topológico representa para este caso de estudio la mínima concentración de cloruros que es posible remover con dilución antes de que el programa decida proceder a emplear las unidades de ósmosis inversa PTAP1 y PTAP2 con el fin de satisfacer una concentración de cloruros menor a la obtenida en este diseño. Puede verse que la concentración obtenida fue de $c_{j,e}^{U}$ =161.1 mg/L y el costo de tratamiento para este diseño es de CAT=331,150 $USD/año.

En general puede observarse que a medida que el límite de concentración de cloruros hacia la ciudad de Riohacha se hace más restrictiva, el costo de tratamiento se mantiene casi constante si es posible hacer uso únicamente del flujo de dilución. Sin embargo, cuando se requiere el uso de las unidades de ósmosis inversa el costo se incrementa linealmente. Otro punto importante a notar de manera general es que debido a que la concentración de cloruros a la entrada de la unidad de tratamiento por ósmosis inversa PTAP1 es mayor que la concentración a la entrada en PTAP2, lo cual ocasiona que la tasa de remoción (Ec. (3)) de PTAP1 sea mayor, mientras que el costo de tratamiento por unidad de volumen es el mismo, por lo cual en la optimización de la función de costos se privilegia siempre mandar una mayor cantidad de flujo a PTAP1.

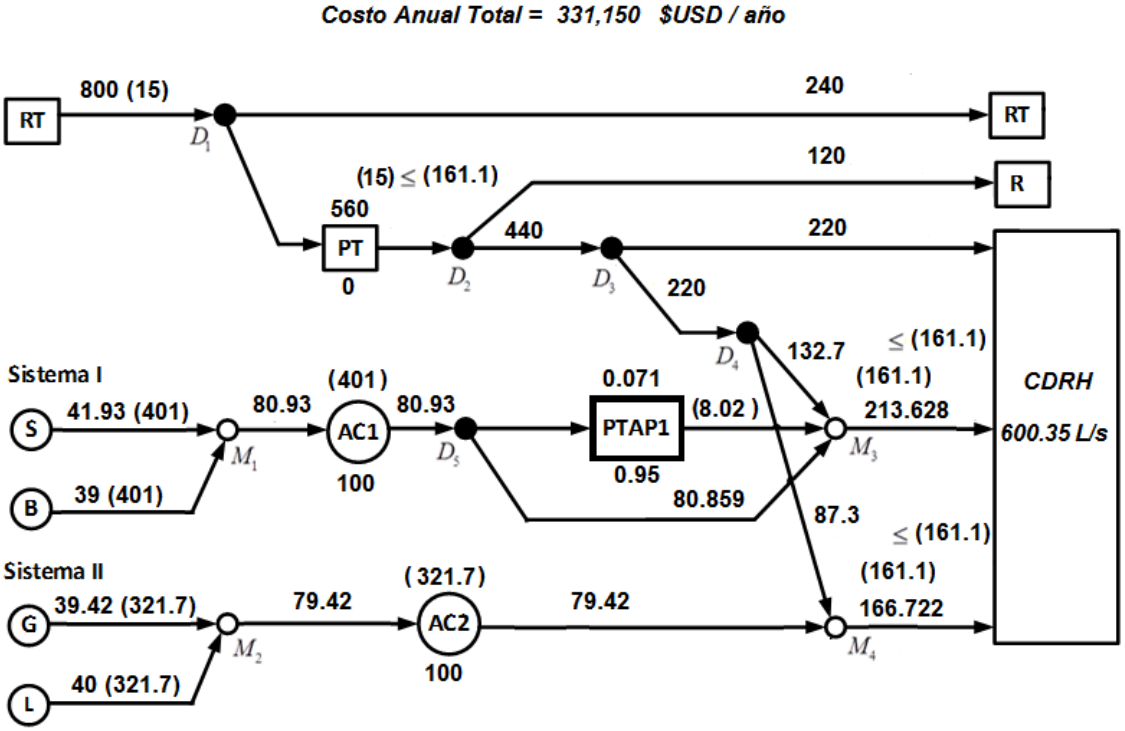


Fig. 6: Diseño topológico de la red hidráulica hacia la CDRH para la concentración mínima de cloruros a tratar ($C_{1,e}^{U}$ = 161.1 mg/L), sin requerir el uso de la unidades de ósmosis inversa.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

En este trabajo se investigó el uso de los recursos hídricos que abastecen la ciudad de Riohacha, La Guajira, Colombia buscando la mejor mezcla de caudales entre una fuente superficial y dos sistemas fuente de pozos de agua con altas concentraciones de cloruros. Los resultados obtenidos en este trabajo demuestra que mediante la implementación de un modelo de PNL es posible obtener un diseño óptimo para dicha red hidráulica mediante la minimización del costo anual total. Con esta metodología, además de reducir los niveles de cloruros presente en el agua a un límite establecido, se logra una configuración de la red de tratamiento que corresponde a la más económica encontrada. La versatilidad y uso del modelo propuesto se demostró con la solución de dos casos de estudio principales, con y sin flujos de dilución. Se encontró que es posible minimizar los costos de tratamiento y cumplir con todas las restricciones planteadas previamente con el respaldo de los pozos, esto sin requerir el uso de los procesos de OI. Considerando que a la fecha uno de los principales problemas de la implementación práctica de los procesos de ósmosis inversa es su alto costo de operación, la metodología propuesta en este trabajo podría visualizarse como una alternativa viable para coadyuvar en la implementación de estas tecnologías de tratamiento en un futuro cercano.

NOTACIÓN:

Acrónimos:

RT	Río Tapias
S	Pozo Sena
B	Pozo Batallón
G	Pozo Guayacanal
L	Pozo La Luchita
R	Flujo de agua para riego
PT	Planta de tratamiento de agua proveniente del RT
AC1	Tanque de almacenamiento de agua cruda 1 del Sistema I
AC2	Tanque de almacenamiento de agua cruda 2 del Sistema II
PTAP1	Planta de tratamiento de ósmosis inversa del Sistema I
PTAP2	Planta de tratamiento de ósmosis inversa del Sistema II
OI	Ósmosis Inversa
Sistema I	Pozos S y B
Sistema II	Pozos G y L
CDRH	Ciudad de Riohacha (La Guajira- Colombia).
CAT	Costo Anual Total ($USD/año)

Equipos:

D_1	Divisor de flujo del Rio Tapias hacia la planta de tratamiento
D_2	Divisor de flujo de la planta de tratamiento hacia riego agrícola
D_3	Divisor del flujo para ser usado como dilución
D_4	Divisor de flujo para dilución del Sistema I y Sistema II conectado con M_3 y M_4 respectivamente.
D_5	Divisor de flujo anterior al tratamiento de ósmosis inversa en el equipo PTAP1
D_6	Divisor de flujo anterior al tratamiento de ósmosis inversa en el equipo PTAP2
M_1	Mezclador de flujos de agua de los pozos S y B del Sistema I
M_2	Mezclador de flujos de agua de los pozos G y L del Sistema II
M_3	Mezclador de flujos posterior a la unidad de ósmosis inversa PTAP1
M_4	Mezclador de flujos posterior a la unidad de ósmosis inversa PTAP2

ISBN 978-607-8242-11-5

Parámetros
:

S_1	Corriente de agua del río Tapias (L/s)
s_2	Flujo de agua del pozo Sena (L/s)
S_2	Flujo de agua del pozo Sena a un régimen de 12 h/día (L/s)
s_3	Flujo de agua del pozo Batallón (L/s)
S_3	Flujo de agua del pozo Batallón a un régimen de 12 h/día (L/s)
s_4	Flujo de agua del pozo Guayacanal (L/s)
S_4	Flujo de agua del pozo Guayacanal a un régimen de 12 h/día (L/s)
s_5	Flujo de agua del pozo La Luchita (L/s)
S_5	Flujo de agua del pozo La Luchita a un régimen de 12 h/día (L/s)
C_1	Concentración de cloruros en el río Tapias (mg/L)
C_2	Concentración de cloruros del pozo Sena (mg/L)
C_3	Concentración de cloruros del pozo Batallón (mg/L)
C_4	Concentración de cloruros del pozo Guayacanal (mg/L)
C_5	Concentración de cloruros del pozo La Luchita (mg/L)
$c_{1,e}^U$	Límite superior de concentración de cloruros por debajo de la norma (mg/L)
C_B	Costo del bombeo del agua de los pozos (US$/ m^3)
C_{PT}	Costo del tratamiento del agua en la planta de tratamiento PT (US$/ m^3)
C_{OI}	Costo del tratamiento del agua en las unidades de ósmosis inversa OI (US$/ m^3)
$C_{mc,A}$	Factor de conversión de unidades (m^3-s/ L-año)
R_1	Tasa de remoción de la PT (Adimensional)
R_2	Tasa de remoción de la unidad de osmosis inversa PTAP1 (Adimensional)
R_3	Tasa de remoción de la unidad de osmosis inversa en PTAP2 (Adimensional)
V_1	Volumen del recipiente de almacenamiento AC1 (L)
V_2	Volumen del recipiente de almacenamiento AC2 (L)
t_R	Flujo de agua para riego (L/s)
F_{RCH}	Caudal mínimo de agua para abastecer a la CDRH
F_{UT}^U	Capacidad de tratamiento de agua en la PT (L/s)
F_{RT}^L	Caudal mínimo ecológico en RT (L/s)
Q_{PTAP1}	Capacidad de tratamiento de agua en la PTAP1 (L/s)
Q_{PTAP2}	Capacidad de tratamiento de agua en la PTap2 (L/s)
a	Flujo máximo de agua en el Sistema 1 (L/s)
b	Flujo máximo de agua en el Sistema 2 (L/s)
g	Descarga de agua en CDRH posterior al mezclador M_3 (L/s)
r	Descarga de agua en CDRH posterior al mezclador M_4 (L/s)

ISBN 978-607-8242-11-5

REG_P	Operación de los pozos a régimen de 12 h/día

Variables:

$cout_1$	Concentración de cloruros después de la PT (mg/L)
cin_2	Concentración de cloruros después de la M_1 (mg/L)
$cout_2$	Concentración de cloruros después de la PTAP 1 (mg/L)
cin_3	Concentración de cloruros después de la M_2 (mg/L)
$cout_3$	Concentración de cloruros después de la PTAP 2 (mg/L)
$cmix_{2,e}$	Concentración de cloruros después del M_3 (mg/L)
$cmix_{3,e}$	Concentración de cloruros después del M_4 (mg/L)
$f_{1,e}$	Flujo de agua en el río Tapias después de D_1 (L/s)
$F_{2,e}$	Flujo de agua de alimentación del M_3 a la Ciudad de Riohacha (L/s)
$F_{3,e}$	Flujo de agua de alimentación del M_4 a la Ciudad de Riohacha (L/s)
t_1	Flujo de agua en la PT (L/s)
t_2	Flujo de agua en la PTAP 1 (L/s)
t_3	Flujo de agua en la PTAP 2 (L/s)
$t_{1,D3}$	Fracción de flujo de agua de la PT al D_3 (L/s)
$t_{1,D4}$	Fracción de flujo de agua de la PT al D_4 (L/s)
$t_{1,e}$	Flujo de agua de alimentación a la Ciudad de Riohacha en D_3 (L/s)
$t_{1,in}$	Fracción de flujo de agua de M_1 a AC1(L/s)
$t_{1,out}$	Fracción de flujo de agua de AC1 a D_5 (L/s)
$t_{2,in}$	Fracción de flujo de agua de M_2 a AC2(L/s)
$t_{2,out}$	Fracción de flujo de agua de AC2 a D_6 (L/s)
$t_{2,M}$	Fracción de flujo de agua de mezcla para dilución en M_3 (L/s)
$t_{3,M}$	Fracción de flujo de agua de mezcla para dilución en M_4 (L/s)
$t_{B,1}$	Fracción de flujo de agua desviado de D_5 a M_3 (L/s)
$t_{B,2}$	Fracción de flujo de agua desviado de D_6 a M_4 (L/s)
t_R	Flujo de agua para riego después de D_2 (L/s)
RCH	Caudal total de agua alimentada a la CDRH (L/s)

Reconocimientos

A. López-Yáñez agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) por el otorgamiento de una beca para estudios de doctorado. Los autores de este trabajo agradecen a Avanzadas Soluciones de Acueducto y

 ISBN 978-607-8242-11-5

Alcantarillado (ASAA), Riohacha, La Guajira, Colombia por toda la información de campo proporcionada para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Al-Sahali, M. y H. Ettouney. "*Developments in thermal desalination processes: design, energy, and costing aspects*", Desalination, 214 (1-3), 227-240 (2007).

Alva, A., A. Kokossis y R. Smith. "*The Design of Water-Using Systems in Petroleum Refining Using a Water-pinch Decomposition"*, Chemical Engineering Journal, 128 (1), 33-46 (2007).

Brooke, A.; D. Kendrick; A. Meeraus y R. Raman, GAMS: A User's Guide. "*GAMS Development Corporation*", Estados Unidos de América (2012).

Departamento Nacional de Estadística (DANE). COLOMBIA. PROYECCIONES DE POBLACIÓN MUNICIPALES POR ÁREA 2005-2020. Consultado: octubre 11 de 2016. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/.../poblacion/...20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls.

Grossmann, I.E.; J.A. Caballero y H. Yeomans. "*Mathematical Programming Approaches to the Synthesis of Chemical Process Systems*". Korean Journal of Chemical Engineering, 16 (4), 407–426 (1999).

LGH. LaGuajiraHoy.com. Consultado: julio 6 de 2017. https://laguajirahoy.com/2016/04/el-principal-problema-que-tiene-la-guajira-es-de-agua-no-de-alimentos-directora-icbf.html.

Lechuga, J., Rodríguez, M y J. Lloveras. "*Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica*". Ingeniería 11 (3), 5-14 (2007).

López-Yáñez, A., Zamora-Mata, J. M., Alonso, A. y Ramírez-Muñoz, J. *"Modelo de Programación No Lineal para el Diseño de Sistemas de Tratamiento Electroquímico de Aguas Residuales Contaminadas con Trazas de Amoxicilina*". Información tecnológica, 27 (5), 87–98 (2016).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y Ministerio de Protección Social. RESOLUCIÓN 2115, 2007 Colombia.

Zamora Mata, J.M.; R. Hernández Suárez y J. Castellanos Fernández. "*Modelo de Programación Lineal para Asistir en el Diseño de Sistemas Distribuidos de Tratamiento de Efluentes*", Revista Mexicana de Ingeniería Química, 3 (1), 121–134 (2004).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Caracterización de la Calidad Sensorial de Aceitunas Negras Naturales Mediante ANFIS

Dolores M. Álvarez[1], Micaela Francesconi[1], Luis E. Kliger[1] y Mario R. Modesti[2]
(1) Centro de Investigación y Tecnología Química, Univ. Tecnológica Nacional
(2)Centro de Investigación en Informática para Ingeniería, Univ. Tecnológica Nacional
Facultad Regional Córdoba, Ciudad Universitaria, Córdoba-Argentina
e-mail: dalvarez@frc.utn.edu.ar

Resumen

La calidad nutricional de las aceitunas de mesa es importante pero no prioritaria en la elección del consumidor. En cambio, la calidad sensorial, determinada por los órganos de los sentidos, es tenida muy en cuenta por ellos. El objetivo de este trabajo es considerar la aplicación de la lógica difusa en la evaluación sensorial de aceitunas negras naturales, a través del desarrollo de un modelo que vincule la valoración realizada por jueces consumidores en relación a los atributos de color, textura y sabor, con la calidad sensorial del alimento. Para la evaluación sensorial se realizaron pruebas de diagnóstico por atributos con 30 jueces consumidores. El modelo se desarrolló mediante el Sistema de inferencias difuso basado en redes adaptativas – ANFIS. Como variables de entrada se tomó el arreglo matricial de datos compuesto por la calificación de los jueces sobre cada uno de los atributos y como variables de salida, el valor asignado por ellos en las pruebas de aceptación general. Se definió la ponderación de cada uno de los atributos evaluados sobre el perfil general de la muestra, lo que fue delimitado por medio de tres funciones de membresía de tipo campana generalizada. La red ANFIS creada demostró un desempeño aceptable, considerando el reducido número de neuronas empleados para su desarrollo. En este sentido, se puede afirmar que el sistema ANFIS se constituye en una herramienta de interés a la hora de vincular los atributos valorados por el consumidor en las aceitunas negras naturales y determinar su potencial aceptación.

Characterization of sensory Quality of natural black olives using ANFIS

Abstract

The nutritional quality of table olives is important but not a priority in the choice of the consumer. The sensorial quality, determined by the organs of the senses, instead, is very appreciate for them. The objective of this work is to show the application of diffuse logic in the sensorial evaluation of natural black olives, through the development of a model that links the valuation made by consumer judges in relation to attributes of color, texture and flavor, with the sensory quality of the food. Diagnostic tests for sensory evaluation were developed with 30 consumer judges. The model was generated using the diffuse inference system based on adaptive networks - ANFIS. The data matrix composed of the judges qualification for each attribute was considered as input. The values assigned by them in the general acceptance tests was considered as output matrix. The weighting of each of the attributes evaluated on the general profile of the sample was defined, which was delimited by means of three generalized bell-type membership functions. The ANFIS network created showed an acceptable performance, even using the reduced number of neurons used for its development.
In this sense, it can be affirmed that the ANFIS system constitutes an interesting tool in order to link the attributes valued by the consumer in the natural black olives and determining their potential acceptance.

Keywords: diffuse inference system based on adaptive networks – ANFIS, sensory quality, natural black olives, color, texture, flavor

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El olivo, *Olea europea* L., pertenece a la familia botánica *Oleaceae*, con especies distribuidas en las regiones tropicales y templadas del mundo. El género Olea comprende a unas treinta y cinco especies, siendo O. europea L. la única de la familia con fruto comestible (Alvarez, 2013).

En el mundo hay más de 800 millones de olivos en producción (Mehmet y Anıl, 2016), de los cuales el 90% se destinan a la obtención de aceite y el 10% restante a frutos en conserva.

En Argentina, el sector olivícola ha evolucionado notablemente en las últimas décadas, como consecuencia de la aplicación de la ley de diferimientos impositivos (Ley Nacional 21.021). En este sentido, las exportaciones de aceitunas realizadas durante el año 2016 ascienden a 65.681 toneladas (Nimo y Garciarena, 2017), por lo que, en el contexto internacional, Argentina se encuentra en el octavo lugar en cuanto a la producción de este alimento (Consejo Oleícola Internacional [COI], 2017).

Las aceitunas negras naturales se obtienen a partir de frutos cosechados antes de la madurez, que luego son incorporadas en la salmuera de fermentación. Dicho proceso es llevado a cabo a expensas de la flora microbiana proveniente de la drupa (Alvarez, 2013).

La calidad nutricional de las aceitunas de mesa, determinada por las características dietéticas que la distinguen, es importante pero no prioritaria en la elección del consumidor, debido a que generalmente se utilizan como complemento de otros alimentos. En cambio, la calidad sensorial, basada en criterios de valoración de la apariencia, olor, sabor y textura, y determinada por los órganos de los sentidos, es tenida muy en cuenta por los consumidores.

Dentro de los descriptores de apariencia, el más importante es el color, por cuanto interfiere en el juicio sobre los demás atributos de calidad y en la preferencia del consumidor en términos cualitativos (Marsilio, 2002). El color superficial de las aceitunas negras naturales, en particular, se relaciona con las condiciones de fermentación y características del fruto, en cuanto a su variedad e índice de maduración al momento de la cosecha (Romero et al., 2001; Romero et al., 2004; Othman et al., 2009).

La textura, por otra parte, es la característica organoléptica que más se relaciona con la pérdida de productos en la industria y una de las razones más importantes de rechazo de los consumidores (Jiménez et al., 1997). En las aceitunas, está asociada a distintos factores, como la variedad, estado de maduración, tecnologías de transformación, condiciones de procesado y conservación (Marsilio, 2002). Es un atributo de calidad cuyas características se aprecian por el sentido del tacto y se reflejan en las sensaciones percibidas por los dedos y muy especialmente por la boca.

El sabor de las aceitunas complementa a los atributos de color y textura y, al igual que estos, es muy considerado por los consumidores.

Si bien la calidad sensorial constituye un elemento de evaluación de sumo interés, posee como desventajas el tiempo y costo que demandan los ensayos y la dificultosa cuantificación de la percepción de los atributos. En este sentido, el Sistema de inferencias difuso basado en redes adaptativas (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System-ANFIS) puede contribuir a la minimización de tales limitantes haciendo uso de valoraciones acumuladas en el tiempo para mejorar el entrenamiento del sistema y obtener un modelo más eficiente.

ANFIS es la conjunción, y posee las ventajas, tanto de las redes neuronales como de la lógica difusa (Buragohain y Mahanta, 2008; Arkhipov et al., 2008). Ésta es capaz de capturar informaciones vagas, en lenguaje natural, permitiendo una representación simple de los procesos en términos de reglas *If –Then* (Adelkhani et al., 2013). El modelo ANFIS puede entenderse como una red neuronal con reglas difusas, cuyos parámetros son obtenidos por medio de entrenamiento. Así, es ideal para la interpretación de sistemas no lineales de entrada y salida definidas de modo poco claro o difuso (Arkhipov et al., 2008; Cheng et al., 2002; Naderloo et al., 2012).

La regla que caracteriza a los modelos difusos Sugeno tiene la forma “If input 1 = x and Input 2 = y, then output is z = ax + by + c”. El aporte de cada regla (z_i) en relación a la salida del sistema es ponderado por el peso (w_i) de la regla y el resultado final del sistema es el promedio ponderado de todas las salidas de reglas (ecuación 1):

$$\text{Salida del sistema} = \sum_{i=1}^{N} w_i z_i \,/\, \sum_{i=1}^{N} w_i \qquad (1)$$

Donde *N* es el número de reglas.

 ISBN 978-607-8242-11-5

El objetivo de este trabajo es obtener un modelo relativo a la percepción sensorial de aceitunas negras naturales aplicando la técnica descripta, a través de la vinculación de los atributos valorados por el consumidor con la calidad sensorial del alimento, y así determinar su potencial aceptación.

MÉTODOLOGÍA

Se realizó la evaluación sensorial de las aceitunas negras naturales de variedad Manzanilla, fermentadas de manera aeróbica. Para esto, se realizaron pruebas de diagnóstico por atributos (González et al., 2007). Dichas pruebas se llevaron a cabo con 30 jueces consumidores que no contaban con conocimientos previos sobre análisis sensorial de alimentos.

Asimismo, se constató que los jueces fueran no fumadores, sin patologías bucales y consumidores de aceitunas con frecuencia de, al menos, una vez al mes. Los análisis se llevaron a cabo entre las 10:00 y 11:00 h, para evitar sensaciones de inapetencia o de excesivo apetito, que pudieran influir en la objetividad del catador (González et al., 2007).

Para las pruebas de aceptabilidad las muestras de aceitunas fueron codificadas y distribuidas de manera aleatoria. Se les requirió a los jueces consumidores, en una primera instancia, expresar su opinión sobre el producto a través de una escala hedónica. Luego, se les solicitó que manifestaran su percepción sobre los atributos de color, textura y sabor de las aceitunas probadas. Con ese propósito se utilizó una escala gráfica estructurada en 9 puntos coincidentes con los niveles de intensidad representados (1-me disgusta muchísimo, 2-me disgusta mucho, 3-me disgusta bastante, 4-me disgusta ligeramente, 5-ni me gusta ni me disgusta, 6-me gusta ligeramente, 7-me gusta bastante, 8-me gusta mucho, me gusta muchísimo). Para todas las pruebas realizadas se emplearon los formularios estándar recogidos en Anzaldúa Morales (1994).

Para el desarrollo del modelo ANFIS se tomó, como variables de entrada de la red, el arreglo matricial (151 x 3 elementos) de datos compuesto por la calificación de los jueces sobre cada uno de los atributos (color, textura y sabor). Como variables de salida, en tanto, se tomó el valor asignado por ellos en las pruebas de aceptación, denominada “aceptación general” (151 x 1 elemento).

Posteriormente, se definió la ponderación de cada uno de los atributos evaluados sobre el perfil general de la muestra, lo que fue delimitado por medio de tres funciones de membresía de tipo campana generalizada. Se definieron tres rangos de la valoración; a saber: “disgusta”, “ni gusta ni disgusta” y “gusta”, entre las posibles respuestas a las pruebas de aceptación.

El entrenamiento propiamente dicho se llevó a cabo mediante sucesivas iteraciones, a través de la regla de aprendizaje híbrida, la cual combina el método gradiente descendiente con el estimador de mínimos cuadrados. Para la evaluación de los resultados se consideró como indicador el menor error cuadrático medio en función de las pruebas realizadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observa la estructura de la red desarrollada. La arquitectura con salida “aceptación general” posee 9 neuronas de entrada difusa, con función de membresía campana generalizada, agrupadas de a tres por cada entrada y 27 neuronas de salida, que resuelven el algoritmo Sugeno propuesto por las reglas asociadas, por medio de la operación lógica “AND”. Los resultados de todas ellas se suman para obtener la salida denominada “aceptación general”.

Las reglas aplicadas combinan las puntuaciones relativas a las valoraciones de los atributos juzgados por los evaluadores. Para el establecimiento de las reglas se consideró la siguiente agrupación de las puntuaciones relativas a los niveles de intensidad representados en la escala gráfica estructurada: 1, 2 y 3: disgusta; 4, 5 y 6: ni gusta ni disgusta; 7, 8, y 9: gusta. Mediante dicha agrupación se definieron las funciones de membresia utilizadas para el modelo. Estas definen el grado de pertenencia de cada una de las puntuaciones asignadas por los evaluadores, a los respectivos grupos difusos.

ISBN 978-607-8242-11-5

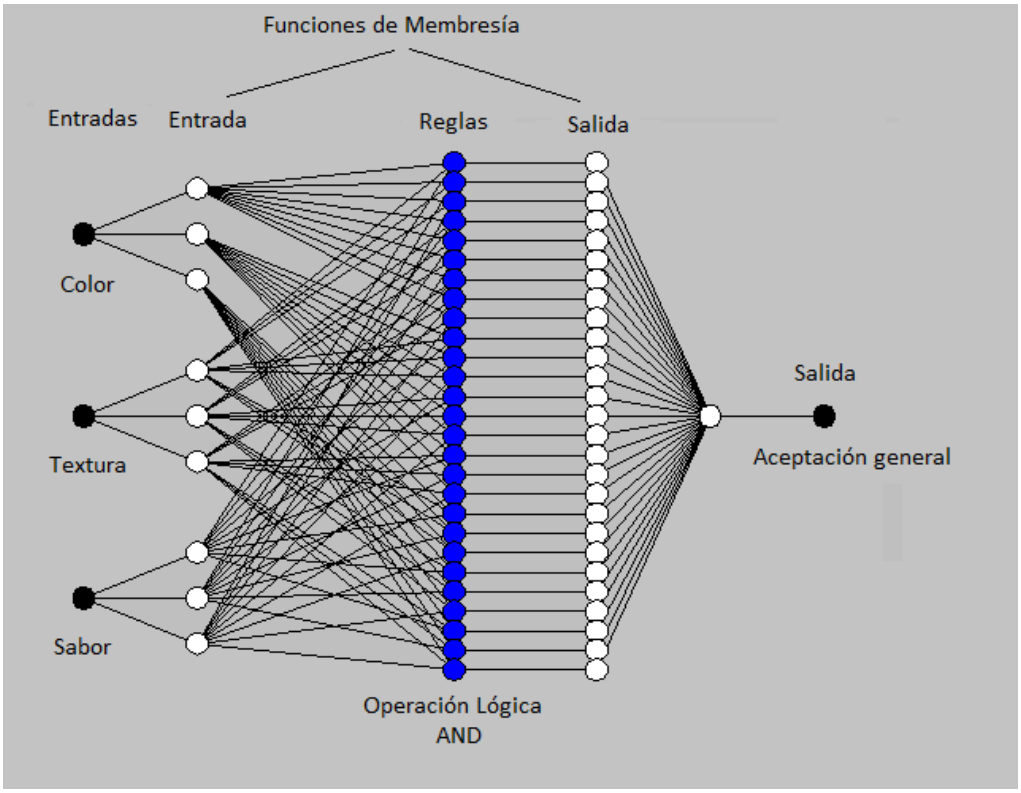


Fig. 1. Estructura general del modelo ANFIS desarrollado

Para obtener la salida “aceptacion general” se aplicaron reglas que se definieron en base a la puntuación asociada a la escala gráfica empleada por los evaluadores.

A continuacion se presenta un ejemplo de regla vinculante de las variables de entrada, ponderado por la funcion de membresia correspondiente con la salida:

If color is “disgusta” AND textura is “disgusta” AND sabor is “disgusta”, THEN aceptacion general is: “resultado proveniente del entrenamiento de la red ANFIS con el criterio descripto”.

En la fig. 2 se representa el modelo ANFIS desarrollado. Para el eje de las abcsisas se consideró la escala empleada para la evaluación sensorial (1-me disgusta muchísimo, 2-me disgusta mucho, 3-me disgusta bastante, 4-me disgusta ligeramente, 5-ni me gusta ni me disgusta, 6-me gusta ligeramente, 7-me gusta bastante, 8-me gusta mucho, me gusta muchísimo), mientras que, en el eje de las ordenadas se observa el grado de membresía (0 - 1), para cada uno de los atributos valorados; a) color, b) textura y c) sabor, en relación a la aceptación general de las aceitunas.

El entrenamiento del sistema ANFIS obtuvo los parámetros para sus respectivas funciones de membresía, en la Figura 3. Donde se puede apreciar también el resultado obtenido para una valoración de las variables de entrada arbitraria, con el respectivo resultado de la red entrenada.

ISBN 978-607-8242-11-5

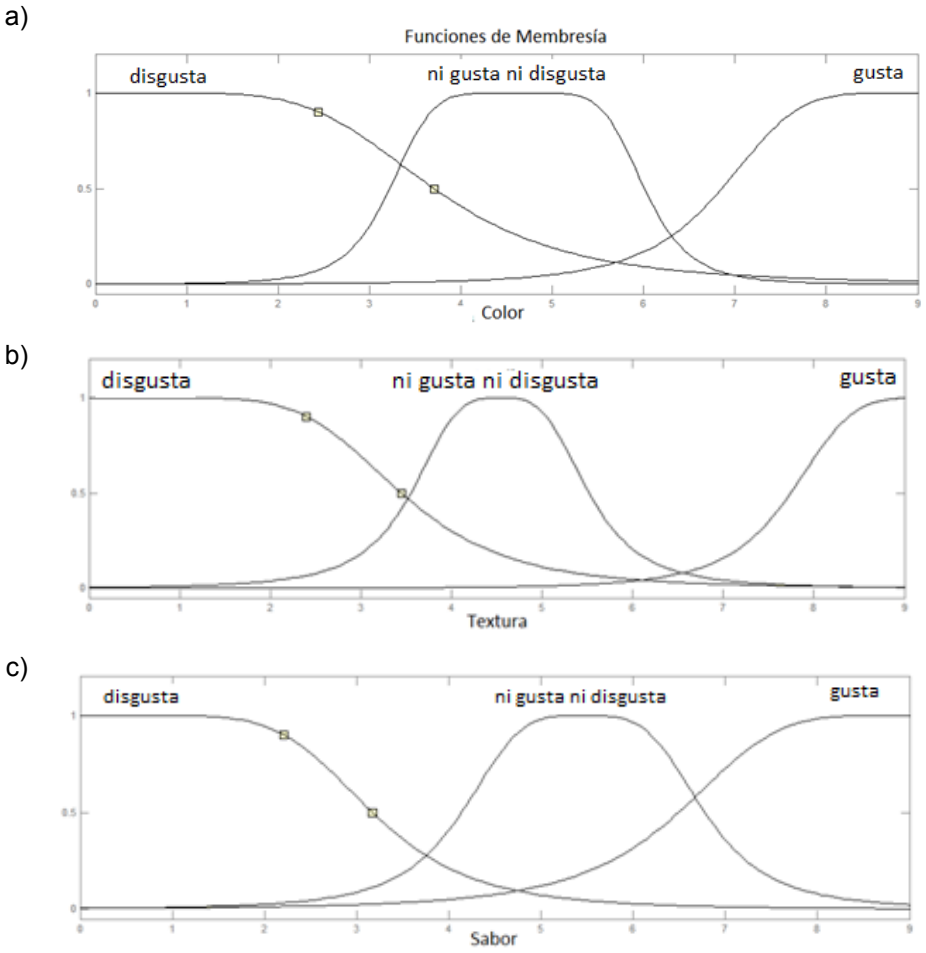


Fig. 2. Variables de entrada / salida correspondientes al modelo ANFIS para a) color, b) textura y c) sabor

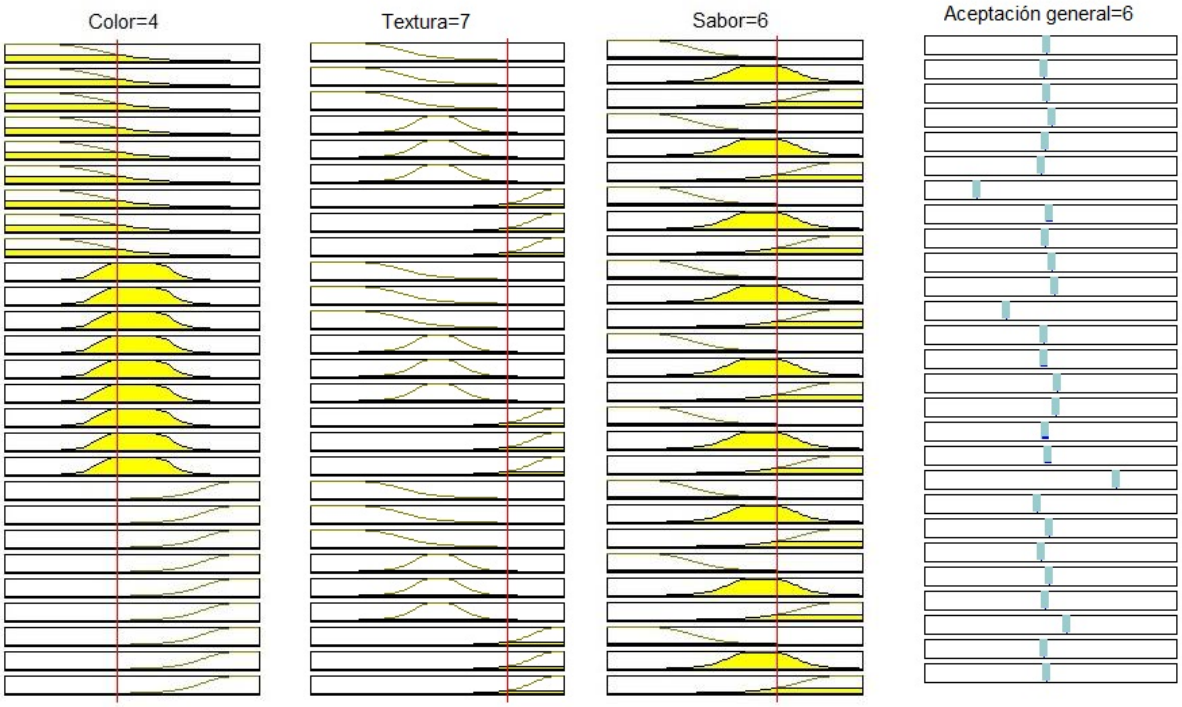


Fig. 3. Parametrizaciones del modelo ANFIS entrenado para la aceptación general

ISBN 978-607-8242-11-5

La red ANFIS creada demostró un desempeño aceptable, aun el reducido número de neuronas empleados para su desarrollo. Asimismo, dicha red manifestó una capacidad de acierto cuyo error no supera la unidad, tanto por defecto como por exceso, en el 99% de las 151 evaluaciones realizadas (Fig. 4). En este sentido, es de considerar que el resultado obtenido a partir del modelo es un escalar real y que la escala propuesta es de enteros, de manera que los valores intermedios carecen de informacion.

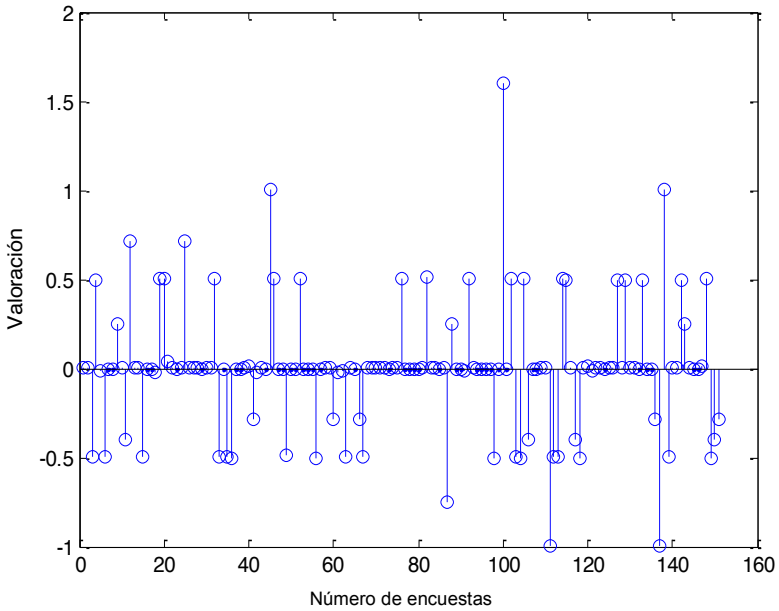


Fig. 4. Comparación relativa a la valoración de los jueces (151 encuestas) y el resultado obtenido de la red ANFIS propuesta

CONCLUSIONES

Se han desarrollado estructuras ANFIS con funciones de membresía específicas y basadas en el algoritmo Sugeno, que caracterizan la relación multifactorial entre la valoración sensorial de jueces consumidores en relación al color, textura y sabor de las aceitunas negras naturales y sus respectivas apreciaciones en cuanto a la aceptación general de dicho alimento.

Los modelos logrados demostraron habilidad para predecir la valoración general de las aceitunas a partir de la interrelación entre las valoraciones específicas sobre cada uno de los atributos considerados, por lo que los modelos obtenidos se consideran satisfactorios.

A fin de continuar con el entrenamiento e incrementar la aptitud de las arquitecturas creadas sería conveniente incrementar el número de encuestas realizadas por los jueces, de manera tal que se disponga de mayor cantidad de datos para enriquecer el entrenamiento, lo que contribuiría a una aproximación más precisa de los modelos.

En este sentido, se puede afirmar que el Sistema de inferencias difuso basado en redes adaptativas –ANFIS- se constituye en una herramienta de interés a la hora de vincular los atributos valorados por el consumidor con la calidad sensorial del alimento, y determinar su potencial aceptación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

Adelkhani, A., B. Beheshti, S. Minaei, P. Javadikia y M. Ghasemi-Varnamkhasti, *"Taste characterization of orange using image processing combined with ANFIS"*, Measurement, 46, 3573–3580 (2013).

Alvarez D.M.E., *"Obtención de aceitunas negras naturales. Estudios de procesos fermentativos que optimicen la calidad del producto"*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (2013).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Anzaldúa Morales A., "*La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica"*, Acribia, España (1994).

Arkhipov, M., E. Krueger y D. Kurtener, "*Evaluation of ecological conditions using bioindicators, application of fuzzy modeling"*, Lecture Notes in Computer Science, 5072, 491–500 (2008).

Buragohain, M. y C. Mahanta, *"A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design"*, Appl. Soft Comput, 8 (1), 609-625 (2008).

Cheng, C. y E. Lee, *"Neuro-fuzzy and genetic algorithm in multiple response optimization"*, Comput. Math. App., 44, 1503–1514 (2002).

Consejo Oleícola Internacional (COI), *"Boletín del Mercado"*, [en línea], (2017), [citado el 6 de julio de 2017]. Disponible en internet:
http://www.internationaloliveoil.org/news/view/697-year-2017-news/837-market-newsletter-may-2017?lang=es_ES

González M., T. Navarro, G. Gómez, R. A. Pérez y C. de Lorenzo, *"Sensory assessment of table olives I: Set up of a panel test and use of standardized scales"*, Grasas y Aceites, 58, 225-230 (2007).

Marsilio V., *"Análisis sensorial de las aceitunas de mesa"*, Olivae, 90, 32-41 (2002).

Mehmet Ş. y Y. Anıl, Olivae, "*Cero vertidos: uso de los residuos del sector olivícola como energía limpia*", 123, 37-42 (2016).

Naderloo, L., R. Alimardani, M. Omid, F. Sarmadian, P. Javadikia, M. Torabi y F. Alimardani, *"Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs"*, Measurement, 45, 1406–1413 (2012).

Nimo M. e I. Garciarena, Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación Argentina, *"I reunión Comisión Regional cuyo 2017"*, [en línea], (2017), [citado el 2 de julio de 2017]. Disponible en internet:
http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss_alimentos_y_bebidas/

Othman N.B., D. Roblain, N. Chammen, P. Thonart y M. Hamdi, *"Antioxidant phenolic compounds loss during the fermentation of Chétoui olives"*, F. Chem., 116, 662-669 (2009).

Romero C., M. Brenes, K. Yousfi, García P., García A. y A. Garrido, *"Effect of cultivar and processing method on the contents of polyphenols in table olives"*, J. Agric. Food Chem., 52, 479-484 (2004).

Romero C., P.García, M. Brenes y A. Garrido, *"Colour improvement in ripe olive processing by manganese cations: industrial performance"*, J. Food Eng., 48, 75-81 (2001).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Selección de rutas terrestres para personas con discapacidad visual con apoyo de dispositivos móviles y realidad aumentada

Mauro Callejas-Cuervo[1], Edgar H. Medina Sánchez y Andrea C. Alarcon-Aldana[1]
(1) Fac. De Ingeniería, Grupo de Investigaciòn en Software, Univ.Pedagògica y Tecnológica ce Colombia, Avenida Central del norte, Tunja, Boyacá, Colombia
e-mail: mauro.callejas@uptc.edu.co

Resumen

Para comprender mejor la forma en qué se desplazan las personas con discapacidad visual, se deben describir los sitios por donde ellos se movilizaran siendo estos los espacios abiertos y cerrados (Sanchez y Saenz, 2008). Si es un espacio abierto se debe tener en cuenta que los objetos pueden variar de posición, tamaño, textura. Además, existen factores involucrados en los espacios abiertos como son los obstáculos, los cuales pueden presentar inconvenientes en sus rutas debido a que ocasionan accidentes por falta de reconocimiento. Así mismo, en un espacio cerrado los objetos tienden a permanecer estáticos conservando su tamaño, textura y posición (hasta que sea removido o cambiado). Existen algunas aplicaciones móviles que ayudan a mejorar la ubicación y orientación de la persona invidentes. Estas aplicaciones nacen por la necesidad de mejorar sus rutinas diarias, como puede ser tomar un autobús de servicio público (Balaji et al, 2003), en donde debe tener conocimiento del paradero, el cual puede variar según el lugar en donde se encuentre, y saber cuál es la ruta a tomar para dirigirse el autobús.

Para dar soporte a la necesidad de ubicación y movilización de la población con discapacidad visual (Vermeersch y Heylighen, 2015), se propone en este trabajo el desarrollo de una aplicación en la cual estas personas puedan gestionar las rutas por las que suelen transitar, identificando los puntos de referencia, el nivel de tránsito de personas y vehículos, tiempos y coordenadas de posicionamiento. De esta manera, contar con conocimiento del segmento en el que se encuentra y sobre la ruta demarcada. Por medio de Realidad Aumentada se pude tener una mayor identificación de los puntos referentes a la ruta escogida por el usuario.

Para el desarrollo de esta investigación se abordaron cinco fases: en la primera se identificaron las técnicas para el levantamiento de información de las rutas en la Ciudad de Tunja, Boyacá, Colombia; la segunda fase se orienta a la georeferenciación de las rutas que integran la zona centro de la ciudad de Tunja, con ayuda de mapas digitales y Apis de Google Maps; en la tercera, se desarrolla una aplicación móvil en sistema operativo Android, que permite gestionar la información relacionada con rutas; en la cuarta fase se implementó realidad aumentada en la aplicación móvil para ayudar a la ubicación y movilización de personas no videntes en las rutas identificadas y finalmente en la fase quinta se aplican las pruebas de funcionalidad con una muestra poblacional de 5 personas con discapacidad visual.

Como principal resultado de este trabajo se obtiene un sistema para dispositivos móviles basado en plataforma Android denominado BlingNavig, que cuenta con características que permite que sea usado por todo tipo de personas (sanos y con discapacidad visual), a través del uso de datos para la adaptabilidad del sistema. BlingNavig es administrable y totalmente personalizable según criterio de cada uno de los usuarios. Además, permite que se vea reflejada la realidad aumentada como medio indicador de lugares cercanos con su respectiva descripción, para que los usuarios puedan tener mayor reconocimiento de los lugares por donde se están desplazando, sugiriendo cuáles son las rutas óptimas para tomar la decisión sobre una movilidad segura y de fácil tránsito.

Referencias

Sánchez J. y M. Sáenz, *Orientación y movilidad en espacios exteriores para aprendices ciegos con el uso de dispositivos móviles*, An. la Univ. Metrop., vol. 8, pp. 47–66 (2008).
Balaji, D., S. Suresh y P. Ganesh, *Public Transport Information System for Chennai city using GIS–A Pilot Project*, line Proceeding Map India, 2003.
Vermeersch P.W. y A. Heylighen, *Mobilizing Disability Experience to Inform Architectural Practice: Lessons Learned from a Field Study*, Journal of Research Practice, Vol 11 (2), pp. 1-27 (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Aplicación de la ISO 22301 al centro de datos del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair

Daisy E. Imbaquingo[1], Cathy P. Guevara[1], José G. Jácome[2], Jherry F. Cevallos[3]
(1) Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Universidad Técnica del Norte, Av. 17 de Julio 5-21, Ibarra-Ecuador E-mail: cguevara@utn.edu.ec; deimbaquingo@utn.edu.ec
(2) Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas, Carrera de Contabilidad y Auditoría, Universidad Técnica del Norte, Av. 17 de Julio 5-21, Ibarra-Ecuador E-mail: jgjacome@utn.edu.ec
(3) Dirección de Posgrado, Universidad de las Fuerzas Armas - ESPE, Av. General Rumiñahui S/N y Paseo Escénico Santa Clara, Sangolquí-Ecuador E-mail: j_herryc@hotmail.com

Resumen

Este artículo presenta una implementación de la norma ISO 22301 para el centro de datos de la Fiscalización del proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (López, 2008), con el objetivo de asegurar la continuidad de los servicios y procesos tecnológicos. Para esto se elaboró un plan de continuidad de negocios basado en la norma ISO 22301; 2012 (Norma ISO 22301, 2012), Seguridad de la Sociedad, Sistema de Gestión de Continuidad de Negocio y el Estándar BCLS 2000 de la organización DRI International (Disaster Recovery Institute, 2000), para mejorar la toma de decisiones al momento de sufrir un desastre de tipo natural o algún imprevisto. La metodología inició con un diagnóstico situacional de la organización, y un análisis respecto a la seguridad de la información del centro de datos. Se realizó una evaluación de criterios como: planificación, apoyo, funcionamiento y planeación estratégica. Se identifica lo riesgos naturales y amenazas existentes. Con base en los resultados obtenidos de los análisis y evaluaciones, se plantea el modelo de continuidad de negocios. A partir de un conocimiento anterior sobre el proyecto, se establece la planificación, liderazgo, apoyo, políticas, estrategia y procedimientos de continuidad.

Palabras clave: plan de continuidad de negocios; sistema de gestión; centro de datos; seguridad de la sociedad; ISO 22301

ISO 22301 application to the data center of the Coca Codo Sinclair hydroelectric project

Abstract

This paper presents an implementation of the norm ISO 22301 to the Data Center audit of the project Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (López, 2008), with the objective of ensuring the continuity of services and technological processes. For this was elaborate a business continuity plan basing on the norm ISO 22301; 2012 (Norma ISO 22301, 2012), Society Security, Management System of Business Continuity and Standard BCLS 2000 of DRI International (Disaster Recovery Institute, 2000), to improve the decision making in the moment of occurring a natural disaster or some unforeseen. The methodologically began with a situational analysis of the organization and an analysis regarding information security data center. An evaluation of criteria such as: planning, support, operation and strategic planning was carried out. It identifies the natural hazards and existing threats. Based on the results obtained from the analyzes and evaluations, the business continuity model is proposed. Based on prior knowledge about the project, planning, leadership, support, policies, strategy and continuity procedures are established.

Keywords: business continuity plan; management system; data center; society security; ISO 22301

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La Continuidad de Negocio según (Veritas Bureau, 2012), es un proceso de gestión holístico que identifica las amenazas potenciales de una organización y los impactos que pueden causar en las operaciones del negocio si esas amenazas se materializan, además, proporciona un marco de trabajo para construir una organización más resistente con capacidad para responder de forma efectiva y proteger los intereses de las partes interesadas clave, su reputación, imagen de marca y actividades de valor añadido.

(Norma ISO 22301, 2012) Mejora la organización pro activa de resistencia contra la interrupción de su capacidad de lograr sus objetivos clave, además proporciona un método ensayado para restaurar la capacidad de una organización para garantizar el suministro de sus productos y servicios después de una interrupción, proporcionando una capacidad demostrada para gestionar una interrupción del negocio y proteger la reputación de la organización en conformidad con las necesidades y los requisitos de las partes interesadas.

En la actualidad es inaceptable que una organización no cuente con un sistema de información, por pequeño que sea, por lo tanto, deben existir métodos que lo resguarden de manera física y lógica (Alexander, 2012). Los sistemas almacenan gran cantidad de datos siendo vulnerables a una variedad de tumultos, que parten desde leves interrupciones como: falta de dispositivos de almacenamiento, cortes al suministro eléctrico, etc. La pérdida total que puede proceder de diferentes fuentes como acciones violentas o desastres naturales. Analizado esto, un Plan de Continuidad de Negocio (BCP), está orientado en priorizar las operaciones críticas del negocio, viéndose como una herramienta de mitigación de riesgos para garantizar el funcionamiento de la organización y su continuidad.

El presente Artículo está enfocado en del desarrollo de un Plan de Continuidad de Negocios que contenga políticas, controles preventivos, estrategias de continuidad y recuperación que servirá de guía para la implementación en actividades de Fiscalización y Gerenciamiento de grandes proyectos Hidroeléctricos.

MÉTODO

Para la realización de este trabajo se partió de una investigación proyectiva, en este sentido (Hurtado de Barrera, 2000) indica, “La investigación proyectiva consiste en la elaboración de una propuesta o un modelo como solución a un problema o una necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social o una institución de una área particular del conocimiento a partir de un diagnóstico preciso de una necesidad del momento, los procesos explicativos y generadores involucrados y las tendencias futuras” (p.325).

Se empleó técnicas de recolección de información como la entrevista, la encuesta y la observación directa, para identificar y conocer los procesos que deben ser considerados dentro del Plan, así como la información complementaria para los diagnósticos y respectivos análisis.

Para el desarrollo de la Encuesta de acuerdo a la homogeneidad de la población y los objetivos del estudio y por ser la población finita fue necesario aplicar la técnica de muestreo, y se considera que estudiados los miembros representativos de la población los resultados observados y obtenidos describen el verdadero comportamiento de la misma, y se concluyó con el procesamiento y análisis de los resultados.

Selección de la Normativa

Los estándares, normas y buenas prácticas implementadas en diversas organizaciones a nivel mundial, surgen ante la necesidad de gestionar los riesgos y estandarizar las políticas de seguridad en las organizaciones.

Para el presente trabajo se seleccionó la (Norma ISO 22301, 2012) para Sistemas de Gestión de la Continuidad del Negocio. Seguridad de la sociedad, es la primera norma internacional para la Gestión de la Continuidad del Negocio y ha sido desarrollada para ayudar a las organizaciones a minimizar el riesgo de interrupciones, normativa que mejor se ajusta a la realidad del centro de datos de la Asociación, con el fin de desarrollar un modelo que genere los mejores resultados para su posterior implementación para garantizar la continuidad.

Fases de la normativa para el desarrollo del Plan:

- Comprensión de la Organización y su contexto: Se determina las funciones, servicios y actividades de la empresa, vincula los objetivos, las políticas, las estrategias para definir el propósito y el alcance de la gestión de continuidad de negocios (del Pino Jiménez, 2007).
- Análisis de impacto en el negocio: Esta actividad permite identificar procesos críticos que apoyan a los productos y servicios claves (del Pino Jiménez, 2007).

 ISBN 978-607-8242-11-5

- Evaluación de riesgos: Permite establecer, implantar y mantener un proceso formal documentado de valoración de riesgos que identifique, analice y evalúe sistemáticamente el riesgo de incidentes (del Pino Jiménez, 2007).
- Estrategia de continuidad de negocio: Las estrategias son desarrolladas para identificar disposiciones que permitan que la organización proteja y recupere actividades críticas, basadas en la tolerancia de riesgo organizacional y dentro de objetivos de tiempo de recuperación definidos (del Pino Jiménez, 2007).
- Procedimientos de continuidad de negocio: La organización debe documentar los procedimientos para asegurar la continuidad de las actividades y un protocolo adecuado de comunicaciones internas y externas para responder a amenazas no anticipadas (del Pino Jiménez, 2007).

RESULTADOS

Documentación del Plan

En base a la normativa seleccionada se desarrolló el Plan de Continuidad de Negocios aplicado al Centro de datos de la Asociación Fiscalizadora del proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, cuyo contenido documental se enlista a continuación:

- Política de Continuidad de Negocio.
- Material de los términos de referencia para identificar los términos claves.
- Análisis de riesgos de la Asociación.
- Análisis de Impacto al Negocio.
- Programa de Capacitación para que cada persona tenga perfectamente definidas las tareas que debe realizar una vez declarada la contingencia.
- Plan de Evacuación, el cual debe tener los detalles sobre la forma en que los equipos deben trasladarse al sitio alterno. Los números de contacto de las instituciones que se necesite contactar en un escenario de contingencia.
- Plan de Recuperación de Tecnología en caso de Desastre (DRP por sus siglas en inglés). Para la Continuidad de Negocio es importante contar con un Plan para la recuperación de tecnología actualizado al día, pues es el soporte principal del BCP.
- Plan de vuelta a la normalidad.

Liderazgo

Se refiere al compromiso de la alta dirección de las obligaciones y responsabilidades que adquiere en la implementación del Plan. En la tabla 1, se detalla los compromisos.

Tabla 1: Detalle de los compromisos de la alta dirección.

Compromisos	*Coordinación del Plan*
Asegurarse que las políticas y objetivos son establecidos.	Habilidades de Liderazgo, para desarrollar un ambiente participativo y cooperativo.
Asegurar la integración del Plan con los procesos de negocio.	Buenas relaciones interpersonales.
Asegurar que los recursos necesarios para el Plan estén disponibles.	Capacidad analítica.
Comunicar la importancia del Plan.	Buena comunicación verbal y escrita.
Asegurar que se logre el resultado esperado.	Orientación al logro.
Nombrar las personas competentes para ser responsables de la implementación del Plan y dotarlas de la autoridad apropiada.	Trabajo en equipo.
Direccionar y dar soporte a las personas que contribuyen a la efectividad del Plan.	Capacidad de delegar autoridad y toma de decisiones.
Promover la mejora continua.	Capacidad de autogestión.

ISBN 978-607-8242-11-5

Definir los criterios de aceptación del riesgo y los niveles aceptables de riesgo.	
Participar activamente en los ejercicios y pruebas.	
Asegurar que las auditorías internas del BCP son realizadas.	
Conducir las revisiones administrativas del BCP.	

Política de Continuidad de Negocio

El objetivo global de la Continuidad de Negocio de la Asociación es realizar los preparativos necesarios y planificar un conjunto suficiente de procedimientos para responder de forma adecuada ante un incidente, desde el momento en que se declare el desastre hasta la vuelta a la normalidad, de forma que se reduzca al mínimo su impacto. Se detalla su contenido en la tabla 2.

Tabla 2. Detalle de los componentes de la Política de Continuidad.

Política de Continuidad de Negocio	
Alcance	Aplicar para todo el personal que labore dentro del área de software y control del proyecto para la Asociación.
Objetivo	Evitar interrupciones a los procesos críticos del negocio como consecuencia de fallas o desastres.
Enunciado	Es responsabilidad de las directivas de la organización aprobar un plan de continuidad de negocio (BCP).
Elementos	Protección y seguridad del personal, la Asociación se responsabiliza y garantiza la gestión de continuidad, su actualización, mejora, cambios, socialización y capacitación al personal sobre el plan.
Roles y responsabilidades	Ser aprobada por los directivos de la Asociación, luego de un estudio previo y detallado de sus posibles consecuencias.
Violaciones	Compromiso de desarrollar este Plan.
Revisión	Realizar cambios, de no haber cambios, se debe realizar su revisión anualmente.

Estrategia de continuidad

De las alternativas existentes y dado que la opción de subcontratar espacios y soporte a terceros resultaría muy cara para la Asociación, la estrategia para la continuidad del negocio sería adecuar un centro de datos en las oficinas centrales de la Asociación Quito como alternativa en caso de incidencia grave, de esta forma la Asociación podría seguir dando servicio, sin que el impacto de un incidente tuviera consecuencias catastróficas. Para ello, se requiere:

- Espacio físico para 3 servidores, los mismos se ubicarán dentro de un rack, además instalaciones de energía, puntos de red, detector de humo y señales de seguridad.
- Licencias de sistemas operativos de acorde a la necesidad de cada servidor.

Adicional es necesario que:

ISBN 978-607-8242-11-5

- Los respaldos que se generen sean más periódicos.
- Que los discos duros sean transportados a las oficinas de la ciudad de Quito en el departamento de TI, para su alojamiento y resguardo físico.
- Los respaldos de información deberán ser transportados por una persona ajena a la Asociación, puede ser una empresa de servicios de seguridad.
- Se deberá realizar acuerdos de Nivel de Servicios con la empresa que transporta los respaldos, además asegurarse que reciban un salario digno.
- Los respaldos pueden resguardarse en una bóveda especial.

Se considera también los siguientes recursos para la continuidad:

- El personal: con el fin de mantener el conocimiento y las capacidades del personal con funciones y responsabilidades en actividades críticas, se ejecutará un plan de capacitación y formación, que determina las tareas claves a realizarse por el personal a cargo con el objetivo de poner en funcionamiento el sitio alterno, y pruebas de los servicios.
- Información: se verificará que la información necesaria para dar continuidad a las operaciones del negocio, deben estar integras, disponibles y confidenciales, aunque se esté en las instalaciones alternas.
- Recursos para la implementación del plan: es necesario determinar los recursos económicos que se requiere para adaptar los aspectos que describe la misma, tomando en cuenta que la información es un activo que equivale al patrimonio de la empresa.

En la tabla 3, se detalla los recursos necesarios para la implementación del sitio alterno para el centro de datos.

Tabla 3. Recursos para implementar estrategia de continuidad.

Cantidad	*Equipos*	*Detalle*	*Valor unitario*	*Valor total*
3	Servidores Proliant HP	• Un servidor para el SISOC. • Un servidor para la primavera. • Un servidor para unidades de red.	$ 3.500.00	$ 10.500.00
1	Varios	• Instalaciones • (Rack, patch panel, switch capa 3 de 24 puertos y cableado.)	$ 7.000.00	$ 7.000.00
Total				$ 17.500.00

Procedimientos de continuidad de negocio

De suscitarse algún desastre o imprevisto para la continuidad del negocio se proseguirá de acuerdo a los siguientes procedimientos:

- Procedimiento de notificación del desastre: personal de la asociación que sea consciente de un incidente grave que puede afectar a la empresa, debe comunicar a su jefe inmediato y este a su vez al comité de crisis para su respectiva evaluación, ver tabla 4.

Tabla 4. Proceso de notificación.

Evento	*Acción*
Situación de contingencia/incidente detectado por algún empleado de la compañía.	Aviso inmediato con el máximo detalle posible a su jefe inmediato
El jefe conoce que ha sucedido una contingencia.	Aviso a la persona de contacto del Comité de Crisis

ISBN 978-607-8242-11-5

- Procedimiento de ejecución del plan: Una vez notificado del incidente el Comité de crisis se reunirá en el punto de encuentro definido, se evaluará el grado del incidente y decidirá si el Plan de Continuidad del Negocio es puesto en marcha la alarma de recuperación a desastre estará a cargo del Director de Gerenciamiento.
- Procedimientos para incidentes: Los incidentes relacionados con tecnología de la información y de la comunicación son informados telefónicamente al coordinador de continuidad de negocios que será parte del comité para funcionamiento de sitio alterno, los mismos serán del personal de Software de Control de Proyectos. El Jefe de control de Software será el encargado de dar declaraciones sobre los sucesos, basándose en hechos reales.

Comité de crisis

El objetivo de este comité es reducir al máximo el riesgo y la incertidumbre en la dirección de la situación. Este Comité debe tomar las decisiones "clave" durante los incidentes, además de hacer de enlace con la dirección de la compañía, manteniéndoles informados de la situación regularmente, ver tabla 5.

Tabla 5. Comité de crisis.

Responsable del Comité	Jefe de departamento de software de control de proyectos que actúa como coordinador.
Miembros del comité	La Asociación seleccionará los integrantes del comité de acuerdo a sus requerimientos y serán tres personas como mínimo dependiendo del incidente que se vaya a contrarrestar.

Plan de recuperación

Una vez que hemos establecido las bases para comenzar la recuperación, se procederá a la carga de datos y a la restauración de los servicios críticos.
Lo dividiremos en dos fases:

- Procedimientos de Restauración: Estos procedimientos se refieren a las acciones que se llevan a cabo para restaurar los sistemas críticos. El orden de recuperación de las funciones se realizará según la criticidad los sistemas: SISOC, primavera, los dos primeros sistemas deben recuperarse lo antes posible, en las 48 horas siguientes. Los demás sistemas pueden esperar a recuperarse después Filezilla, ofimática, Exchange y aplicativos de seguridad.
- Procedimientos de soporte y gestión: Una vez restaurados los sistemas hay que comprobar su funcionamiento, realizar un mantenimiento sobre los mismos y protegerlos, de manera que se reanude el servicio con las máximas garantías de éxito. Los integrantes del área de control de software del proyecto serán los encargados de comprobar y verificar el correcto funcionamiento de los procesos.

Plan de vuelta a la normalidad

Luego de solventada la contingencia y con los procesos críticos en marcha se planteará las diferentes estrategias y acciones para recuperar la normalidad total de funcionamiento. Para ello se divide esta fase en diferentes procedimientos:

- Análisis del impacto: es el momento de realizar una valoración detallada de los equipos e instalaciones dañadas para definir la estrategia de vuelta a la normalidad. Para ello, el comité de coordinación, realizará un listado de los elementos que han sido dañados gravemente y son irrecuperables, así como de todo el material que se puede volver a utilizar para que determinar las acciones necesarias que lleven a la operación habitual lo antes posible.
- Procedimientos de vuelta a la normalidad: una vez determinado el impacto deben establecerse los mecanismos que en la medida de lo posible lleven a recuperar la normalidad total de funcionamiento. Estas acciones incluyen las necesidades de compra de nuevos equipos, mobiliario, material, según los resultados del impacto causado.

 ISBN 978-607-8242-11-5

El Comité de Crisis contactará con el seguro de la compañía para conocer qué parte cubre el seguro (dependiendo del tipo de póliza contratada por la Asociación y qué inversión tendrá que hacer la compañía en el material que no se pueda recuperar. Contactar con los proveedores para que en el menor tiempo posible reponga todos los elementos dañados.

DISCUSIÓN

En el Ecuador este fenómeno se presenta en mayor cantidad en el sector privado, que buscan continuar con su funcionamiento y enfrentar a las posibles interrupciones que afecten su inversión, además la mayoría de las organizaciones no cuentan con planes de continuidad de negocios y como es consecuente no cuentan con la certificación ISO 22301- 2012.
Después del análisis realizado en el presente trabajo, se conoce los riesgos y las debilidades existentes dentro del centro de datos de la Asociación y considerando los beneficios motiva a implementar el plan de continuidad dentro de esta área bajo la norma ISO 22301 – 2012, que se ajusta a las necesidades, lo cual permite realizar con éxito dicho plan.
El presente artículo pretende difundir esta herramienta de continuidad de negocios, para que sean aplicadas por demás empresas fiscalizadoras de proyectos Hidroeléctricos de gran magnitud, a fin de que sirva como medida para salvaguardar la información generada y por ende la inversión realizada, dichos proyectos son de interés nacional ya que preveen riesgos y mitigan desastres (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014).
Como trabajo futuro se recomienda implementar el plan de continuidad desarrollado para el centro de datos y ampliarse a las demás áreas de la Asociación, para asegurar la información y continuidad de los procesos de los servicios que presta este departamento, además adoptar y certificarse con la norma ISO 22301.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones: 1) El estándar ISO 22301 – 2012, se ajusta a las necesidades de la Asociación Fiscalizadora del proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, lo cual dio lugar a realizar con éxito el plan de continuidad del negocio; 2) Después del análisis realizado se conoce los riesgos y las debilidades existentes dentro del centro de datos de la asociación para que sean considerados y atendidos por el plan de continuidad del negocio; 3) La aplicación del plan de continuidad del negocio permitió enfrentar los riesgos y minimizar los impactos, garantizando la ejecución de las actividades fundamentales basado en la seguridad de la información del centro de datos del proyecto; y 4) Para la implementación del BCP se requiere del apoyo y compromiso de la alta dirección para gestionar los procesos críticos y operativos de la asociación.

REFERENCIAS

Alexander, A. (2012). NUEVO ESTÁNDAR INTERNACIONAL EN CONTINUIDAD DEL NEGOCIO ISO 22301:2012, 2–6. Retrieved from http://gestion.com.do/pdf/018/018-nuevo-estandar-internacional.pdf

Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). Constitución del ecuador.

del Pino Jiménez, L. (2007). Guía de Desarrollo de un Plan de Continuidad de Negocio. Retrieved from http://www.criptored.upm.es/guiateoria/gt_m001r.htm

Hurtado de Barrera, J. (2000). Metodología de la Investigación Guía para la comprensión holística de la ciencia (Cuarta). Caracas - Venezuela. Retrieved from https://psicologiaexperimental.files.wordpress.com/2011/03/hurtado-cap-1.pdf

Norma ISO 22301. (2012). Norma ISO 22301:2012.

Veritas Bureau. (2012). ISO 22301 – Continuidad del Negocio, pág.11. Retrieved from https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/87942/Continuidad_Negocio-ISO-22301.pdf

 ISBN 978-607-8242-11-5

Modelo Matemático para Determinar el Esfuerzo Máximo en Carcasas Soldadas de Cajas Reductoras a partir de Métodos Analíticos y Resultados de Simulación FEM

Michael Blas[1], Rosendo Franco[1]
(1) Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú
E-mail: michael.blas@pucp.pe; rofranco@pucp.edu.pe

Resumen

Entre los principales componentes de las cajas reductoras de velocidad se encuentra la carcasa, la cual aloja a los demás componentes de la caja y también soporta y disipa las fuerzas generadas entre estos. Sin embargo, a pesar de su importancia, no existen procedimientos claros para su diseño ni herramientas computacionales específicas que permitan mejorar la eficiencia del proceso de diseño. Este artículo describe el desarrollo de modelos matemáticos que permiten determinar los esfuerzos máximos en carcasas soldadas de cajas reductoras de engranajes cilíndricos con ejes paralelos horizontales. Los modelos son utilizados para completar el dimensionamiento de la carcasa. Para lograr este objetivo los autores desarrollaron una serie de análisis paramétricos, considerando las dimensiones internas de la carcasa y las cargas actuantes en los apoyos de los árboles. Se observó que la zona bajo el apoyo del árbol de salida presenta los mayores esfuerzos. Inicialmente se calcula el esfuerzo en esta zona mediante métodos analíticos, modelándola como una columna empotrada bajo carga combinada en el extremo. Para corregir los resultados se realizaron simulaciones numéricas de la carcasa completa, considerando el efecto del ancho de la carcasa y de la distancia entre los dos últimos apoyos. Usando los modelos desarrollados es posible seleccionar el espesor de la pared lateral de la carcasa, considerando espesores de planchas comerciales, con un factor de seguridad entre dos y tres.

Palabras clave: carcasa; caja reductora; diseño mecánico; elementos finitos

Mathematical Model to Determine the Maximum Stress in Gearbox Welded Housings through Analytical Methods and Results of FEM Simulation

Abstract

Among the main components of gearboxes is the housing, which hold the other gearbox's components and supports and dissipates the loads generate between them. However, despite its importance, there are no clear procedures for its design, not even specific computational tools, which could improve the efficiency of the design process. This article describes the development of mathematical models that permit to determine the highest stress in welded housings of gearboxes with cylindrical gears and horizontal parallel shafts. The models are used to complete the housing dimensioning. To reach this objective, several parametrical analyses were developed by the authors, considering the internal housing dimensions and the bearing loads. It was observed that the zone below the bearing of the output shaft presents the highest stresses. Initially the stress in this zone was estimated by means of analytical methods, modeling it as a one end fixed column with combined load in the other end. To correct the results, numerical simulations of the whole housing were made, considering the effect of the housing width and the distance between the two last bearings. Using the developed models, it is possible to find the lateral wall thickness of the housing, considering commercial plate thickness, with a safety factor between two and three.

Keywords: housing; gearbox; mechanical design; finite elements

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la gran mayoría de los equipos empleados en el sector industrial del Perú son importados. Entre estos equipos resaltan las cajas reductoras de velocidad, las cuales son empleadas en una gran cantidad de equipos, tales como bandas transportadoras, trituradoras, espesadores, molinos, bombas, entre muchos otros. Las cajas reductoras de velocidad constan de varios elementos de máquinas típicos, como son los engranajes, árboles, rodamientos, tornillería y accesorios. Debido al gran uso de estos, existe una variedad de procedimientos normalizados y herramientas computacionales para sus procesos de diseño. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el diseño de las carcasas, a pesar de que estas son componentes muy importantes de la caja reductora, ya que soportan y disipan las fuerzas transmitidas desde los engranajes.

En la literatura especializada se encuentran dos métodos para la fabricación de las carcasas: mediante fundición y mediante soldadura. Este trabajo está orientado a carcasas soldadas, que presentan algunas ventajas sobre las carcasas fundidas, considerando una producción a baja escala, ya que las carcasas soldadas pueden ser diseñadas y fabricadas para requerimientos específicos de aplicación [1, 2]. Debido a la gran variedad de cajas reductoras que existen, se considerará el diseño de carcasas soldadas para cajas reductoras de engranajes cilíndricos y con ejes horizontales, como se muestra en la Fig. 1, que son las más empleadas en las industrias pesadas: minería, siderurgia, petrolera, etc.

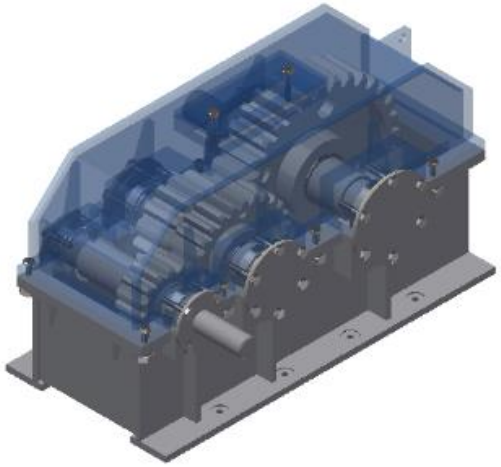


Fig. 1: Caja reductora de dos etapas.

Descripción de la carcasa soldada

La carcasa tiene dos partes principales: la base y la tapa superior. En la Fig. 2 se pueden apreciar ambas partes ensambladas. Antes de realizar algún cálculo analítico y analizar los esfuerzos en la carcasa, es necesario describir el modelo de la carcasa empleada. Los modelos han sido desarrollados a través de un programa de diseño paramétrico en 3D. Primero se determinan las dimensiones internas de la carcasa, a partir de las dimensiones de los componentes que aloja (engranajes, árboles, rodamientos). Luego, se emplean recomendaciones constructivas y reglas empíricas para determinar los espesores de las paredes, nervios y partes de la carcasa que están en función del espesor de la pared lateral [3, 4].

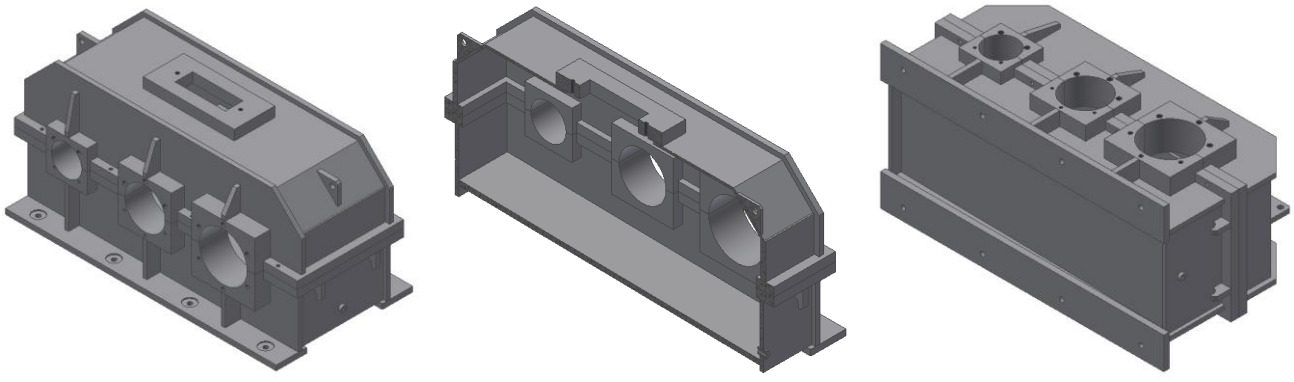


Fig. 2: Vistas del modelo geométrico de la carcasa soldada a ser estudiada.

ISBN 978-607-8242-11-5

Las carcasas soldadas que se han tipificado y modelado de forma paramétrica presentan distintos tipos de nervios rigidizadores. Si bien los nervios rigidizadores no afectan las dimensiones geométricas principales de la carcasa (largo, ancho y altura), sí son importantes para determinar el espesor de las paredes laterales de la carcasa. Cada combinación de espesor de pared lateral y tipo de nervio le dará a la carcasa un valor de rigidez diferente, por lo que se debe establecer un método que permita determinar el espesor de la pared lateral de la carcasa y el tipo de nervio a utilizar según las cargas que debe soportar.

Métodos para calcular la carcasa

Los métodos clásicos para determinar la rigidez y resistencia son muy eficientes para elementos simples, tales como ejes, vigas o columnas. Sin embargo, no es así cuando se trata de componentes de mayor complejidad, como lo son las carcasas que se desean diseñar. La simulación numérica por el Método de Elementos Finitos (MEF) aparece como una solución a este problema, debido a que permite realizar este tipo de análisis para cualquier geometría y conocer el valor de los esfuerzos en cualquier punto con buena aproximación. Asimismo, permite aplicar condiciones de borde y cargas semejantes a la realidad [5].

Se han encontrado aplicaciones de la simulación numérica en el análisis de carcasas, como el realizado por Cojocaru y Miclosina [6]. Sus resultados muestran que los esfuerzos más elevados de la carcasa, sometida a cargas reales de trabajo, se encuentran en la zona del nervio rigidizador del apoyo que soportará al árbol de mayor diámetro (en el presente estudio corresponde al árbol de salida), como se aprecia en la Fig. 3.

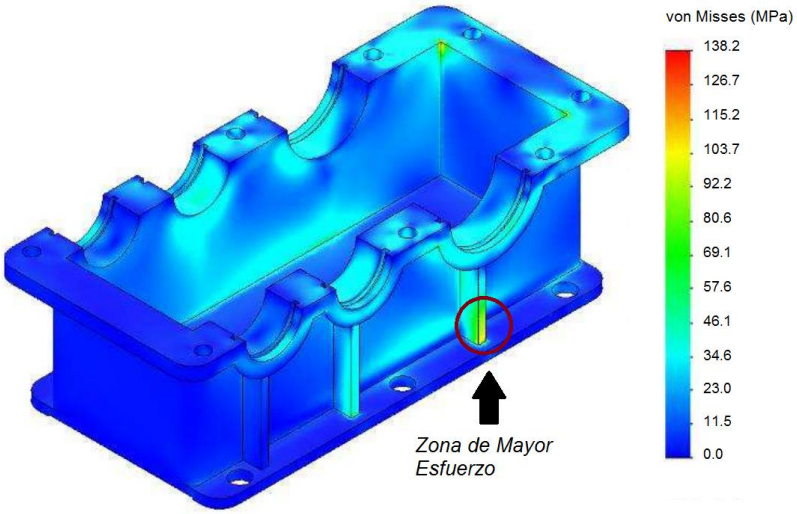


Fig. 3: Base de una carcasa de caja reductora analizada por el MEF [6].

El inconveniente de utilizar la simulación numérica como método para el cálculo de esfuerzos es que se tendría que realizar el análisis para cada diseño diferente, dependiendo del uso de un software especializado, lo que no sería práctico si se desea automatizar este proceso. Por esta razón se considera que combinar los resultados obtenidos por métodos analíticos de Resistencia de Materiales con los obtenidos mediante simulación numérica, permitirá establecer cierta correlación entre dichos resultados y obtener ecuaciones para determinar el esfuerzo máximo que soportará la carcasa.

CÁLCULO DE ESFUERZOS POR MÉTODO ANALÍTICO

En este análisis se modela la zona rigidizada por el nervio como una columna, considerando un ancho de pared igual al diámetro del rodamiento del apoyo correspondiente. En cada apoyo actúan cargas en las direcciones X, Y, Z, en el caso de engranajes helicoidales; o sólo en las direcciones X, Z, en el caso de engranajes con dientes rectos, lo cual puede observarse en la Fig. 4. Como la pared lateral de la carcasa y el nervio están soldados a la plancha de la base, la columna se considera empotrada, es por ello que la sección más cargada se encuentra cercana a la base, pues en esta zona se tendrá el mayor valor del momento flector.

ISBN 978-607-8242-11-5

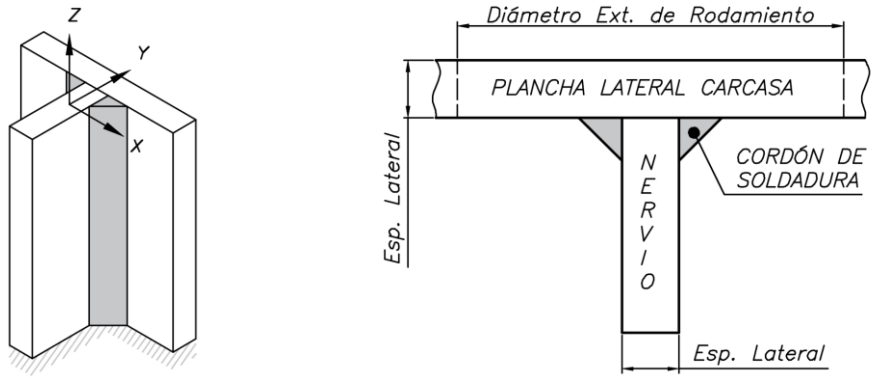


Fig. 4: Modelo de la columna, a) vista isométrica, b) detalle de la sección.

Para realizar el cálculo del esfuerzo actuante se considera el efecto de cada componente de la fuerza aplicada por separado y luego se utiliza el principio de superposición para determinar el esfuerzo resultante. Se debe tener en cuenta si la componente del esfuerzo del punto analizado es de tracción (positiva) o de compresión (negativa). Los signos se toman según el sistema de coordenadas mostrado en la Fig. 4. Un esfuerzo de tracción indicará que está en la dirección $Z+$ por lo que tendrá un valor positivo. Como se mencionó, la sección crítica se ubicará en la zona cercana al empotramiento, por lo que las ecuaciones (1) a la (7) que se presentan a continuación permiten calcular los esfuerzos en esta sección [7, 8].

Para la fuerza en la dirección X:

Esta fuerza produce un momento flector sobre la base, generando un esfuerzo normal en la dirección Z y un esfuerzo cortante en la dirección X.

$$\sigma_Z = \frac{-F_x \cdot l \cdot x}{I_{yy}} \tag{1}$$

$$\tau_{zx} = \frac{-F_x \cdot Q}{I_{yy} \cdot t} \tag{2}$$

Donde: σ_Z es el esfuerzo normal en la dirección Z, F_x es la fuerza en el apoyo en la dirección X, l es el alto de la columna empotrada, x es la coordenada correspondiente del punto a analizar, I_{yy} es el momento de inercia respecto al eje Y, τ_{zx} es el esfuerzo cortante en la dirección X correspondiente a la cara perpendicular al eje Z, Q es el momento de área, t es el espesor de la sección a analizar.

Para la fuerza en la dirección Y:

Se procede de forma análoga a la fuerza en la dirección X.

$$\sigma_Z = \frac{-F_y \cdot l \cdot y}{I_{xx}} \tag{3}$$

$$\tau_{zy} = \frac{-F_y \cdot Q}{I_{xx} \cdot t} \tag{4}$$

Donde: F_y es la fuerza en el apoyo en la dirección Y, y es la coordenada correspondiente del punto a analizar, I_{xx} es el momento de inercia respecto al eje X, τ_{zy} es el esfuerzo cortante en la dirección Y correspondiente a la cara perpendicular al eje Z.

Para la fuerza en la dirección Z:

La fuerza en la dirección Z está aplicada en la mitad del ancho del apoyo, sin embargo, el cálculo de esfuerzos se realiza respecto al centroide. Debido a que se trata de una sección no uniforme (nervio simple y doble) se deberá trasladar la fuerza al centroide, lo cual genera un momento flector adicional. Entonces, se tendrá un esfuerzo normal por tracción (fuerza en Z) y un esfuerzo normal por flexión (momento flector).

 ISBN 978-607-8242-11-5

$$\sigma_Z = \frac{F_z}{A_n} \tag{5}$$

$$\sigma_z = \frac{-F_z \cdot (\bar{x} - 0.5(A + e)) \cdot x}{I_{xx}} \tag{6}$$

Donde: F_Z es la fuerza en el apoyo en la dirección Z, A_n es el área de la sección analizada, $\bar{x}$ es la distancia del punto de aplicación de la carga al centroide de la sección, A es el ancho del apoyo, e es el espesor de la pared lateral.

A partir de las expresiones desarrolladas se procede a emplear la teoría de Von Misses [7, 8], para obtener el esfuerzo equivalente en cada uno de los puntos significativos, y así determinar cuál es el punto más cargado, ya que este método presenta un resultado más preciso cuando se trata de materiales dúctiles. El esfuerzo normal en la dirección Z se obtiene luego de superponer cada uno de los esfuerzos originados en esta dirección. Se puede calcular el esfuerzo equivalente de Von Misses, σ_{eq}, empleando la ecuación (7).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{{\sigma_Z}^2 + 3 \cdot ({\tau_{zx}}^2 + {\tau_{zy}}^2)} \tag{7}$$

El valor del esfuerzo equivalente será diferente en cada punto de la sección, entonces se debe realizar el análisis en el punto sometido a mayor esfuerzo. De las ecuaciones ya presentadas se puede deducir que los puntos más alejados de la sección serán los más esforzados, tal como se ilustra en la Fig. 5, por tanto se realiza el análisis en dichos puntos.

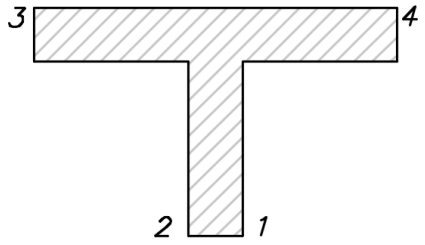


Fig. 5: Puntos a analizar en la sección.

Los momentos de inercia mencionados en las ecuaciones mostradas para el caso en el que se usa nervio simple pueden obtenerse considerando estas ecuaciones:

$$I_{xx} = \frac{D \cdot e^3}{12} + \frac{e \cdot A^3}{12} + e \cdot A \cdot \left(\frac{D \cdot A + D \cdot e}{2D + 2A}\right)^2 + e \cdot D \cdot \left(\frac{A^2 + A \cdot e}{2D + 2A}\right)^2 \tag{8}$$

$$I_{yy} = \frac{e \cdot D^3}{12} + \frac{A \cdot e^3}{12} \tag{9}$$

$$A_n = A \cdot e + D \cdot e \tag{10}$$

Donde: D es el diámetro exterior del rodamiento.

El momento del área (Q) respecto al eje neutro depende de la posición geométrica del punto que se quiera analizar. Este se calcula mediante el producto del área que está encima del punto a analizar en la dirección de la fuerza (A_o) y la distancia de su centroide al eje neutro $(\bar{y}')$, según la ecuación (11).

$$Q = \bar{y}' \cdot A_o \tag{11}$$

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

El objetivo de este análisis por simulación numérica es obtener el comportamiento que tendrá la carcasa completa bajo las cargas actuantes, mediante un modelo que represente mejor la realidad. Luego se pueden comparar y correlacionar estos resultados con los obtenidos mediante el método analítico, para finalmente obtener los modelos matemáticos objetivo del presente trabajo.

ISBN 978-607-8242-11-5

Consideraciones para la simulación

Para obtener resultados adecuados se debe intentar asemejar el modelo a la realidad con el fin de obtener resultados con una mayor precisión. Se optó por no modelar los cordones de soldadura para estar del lado seguro, ya que estos aumentan la rigidez y resistencia de la carcasa, entonces aumentan el factor de seguridad de la misma.

Se utiliza la restricción en la base como fija (*Fixed Support*), ya que esta parte estará anclada a la cimentación donde operará la caja reductora. Todos los contactos entre las partes que conforman la carcasa se consideran como continuos (*Bounded*). Asimismo, se utilizarán tres cargas sobre el apoyo, cada una representa la componente de la carga total en cada una de las direcciones. Esto se puede observar en la Fig. 6.

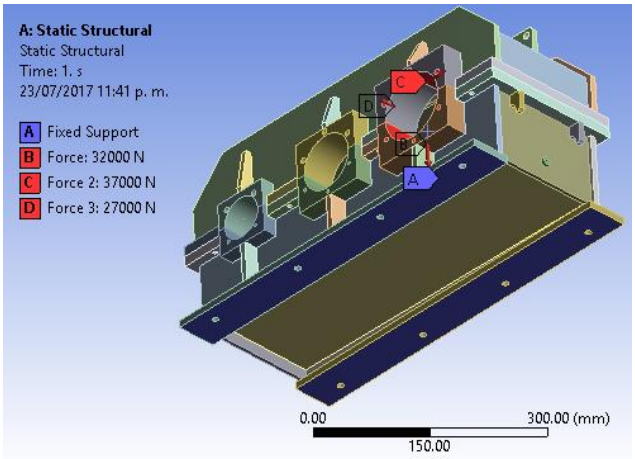
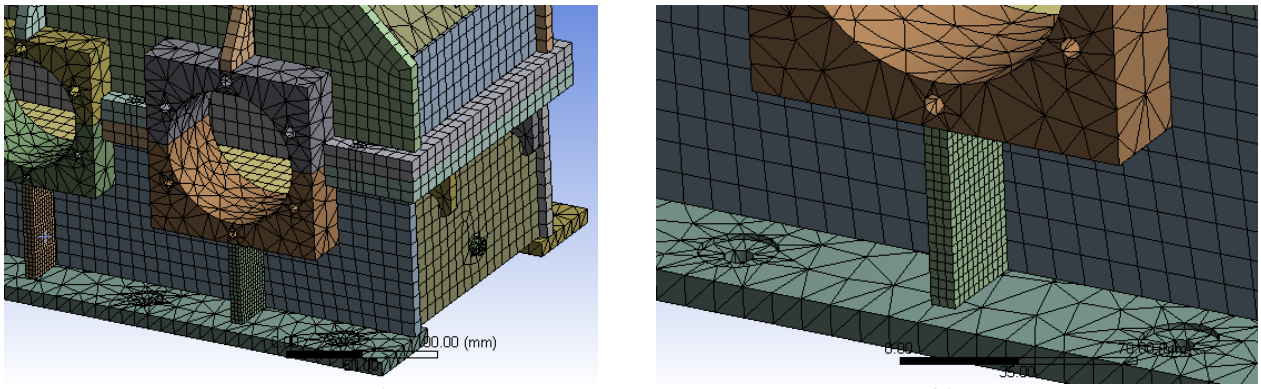


Fig. 6: Condiciones de borde y de carga en el modelo de la carcasa.

Mallado

En este caso el mallado es un aspecto muy importante, ya que, al ser un componente de considerables dimensiones, un mallado muy fino puede ser costoso computacionalmente. Por lo que es importante afinar la malla en las zonas donde se desea captar el esfuerzo y en otras considerar una malla más gruesa. En la Fig. 7 se muestra el resultado de la malla luego de un análisis de sensibilidad, la cual garantiza resultados de adecuada precisión.



a) b)

Fig. 7: (a) Mallado en la zona del apoyo y (b) en la base del mismo.

ESTUDIO PARAMÉTRICO

Se realiza una serie de análisis para conocer cuáles son las dimensiones geométricas de la carcasa soldada que tienen mayor influencia sobre el esfuerzo calculado. Una de las variables que tendrá gran influencia sobre el esfuerzo es la distancia entre las paredes laterales, es decir, el ancho de la carcasa. Se debe tener en cuenta que la carcasa es simétrica. El ancho de la carcasa depende de la longitud de los árboles de transmisión y debe independizarse de las otras dimensiones de la carcasa. Otra variable que se

ISBN 978-607-8242-11-5

espera que sea influyente es la distancia entre los dos últimos apoyos, debido a que un incremento en esta distancia varía la inercia resistente.

Resultados obtenidos

En la Fig. 8 se puede observar la variación del esfuerzo con respecto al ancho de la carcasa, manteniendo constante las demás dimensiones. Es importante analizar la tendencia de la variación del esfuerzo. Como se aprecia, existe una variación considerable para anchos "pequeños", asimismo, esta tendencia tiende a un valor constante de esfuerzo al aumentar esta dimensión.

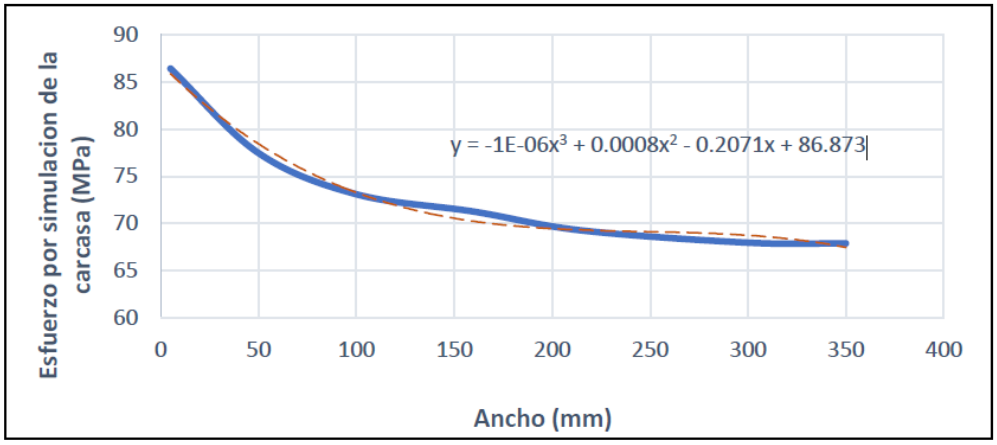


Fig. 8: Gráfica "Esfuerzo de la carcasa vs Ancho carcasa.".

En la Fig. 9 se aprecia que el esfuerzo en la carcasa también está en función de la distancia entre los últimos apoyos. Esta variación es de tendencia lineal.

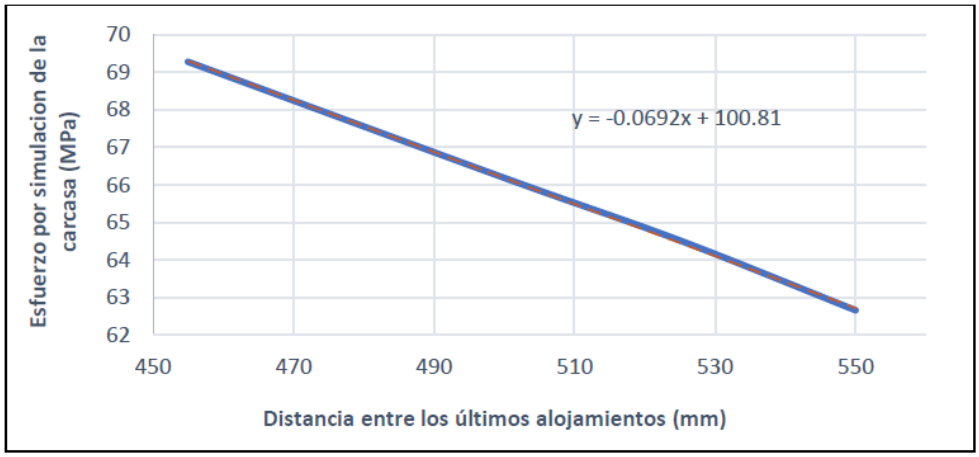


Fig. 9: Gráfica "Esfuerzo de la carcasa vs Distancia entre los últimos apoyos".

Análogamente, se realiza un análisis variando la distancia entre el centro del penúltimo y el antepenúltimo apoyo, el cual puede ser observado en la Fig. 10. En esta se puede apreciar que no se tiene una variación sensible del esfuerzo, por lo que no se tendrá en cuenta esta variable. Con este análisis también se puede concluir que el largo de la carcasa no es una variable a considerar, ya que el esfuerzo depende de la distancia entre los centros del último y penúltimo apoyo, que a su vez es la distancia entre los centros de los engranajes de la última etapa.

ISBN 978-607-8242-11-5

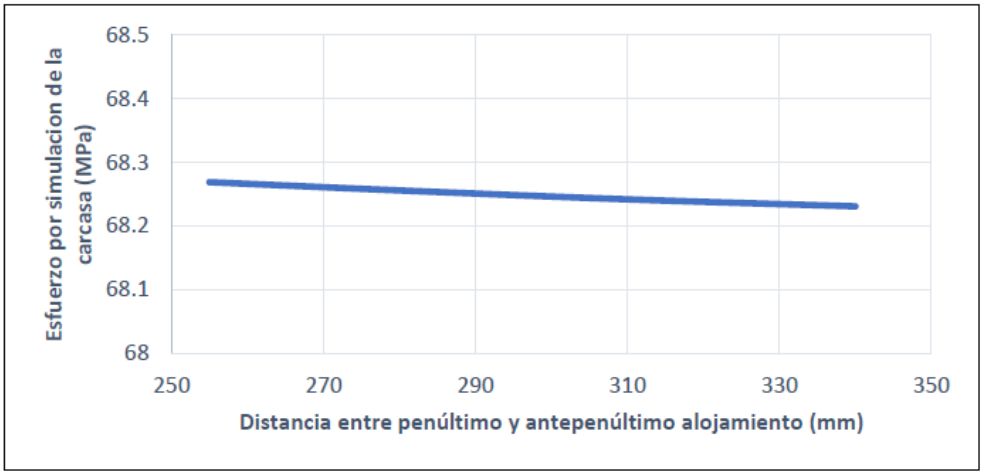


Fig. 10: Gráfica ". Esfuerzo de la carcasa vs Distancia entre los penúltimos apoyos".

El ejemplo que se muestra a continuación se realizó considerando un apoyo individual con $275\ mm$ de alto, $51\ mm$ de ancho, $10\ mm$ de espesor, $131\ mm$ de diámetro exterior del rodamiento, en una carcasa de dos etapas y nervio simple. Asimismo, se aplicó una carga de $27\,000\ N$ en X, $-37\,000\ N$ en Y, $-32\,000\ N$ en Z. El análisis del apoyo por método analítico indica que el esfuerzo equivalente es de $232.1\ MPa$. Mientras que la simulación numérica de la carcasa completa mostró un valor de $69.31\ MPa$, como se ilustra en la Fig. 11, donde se consideró una distancia entre los últimos alojamientos de $455\ mm$ y un ancho de $215\ mm$.

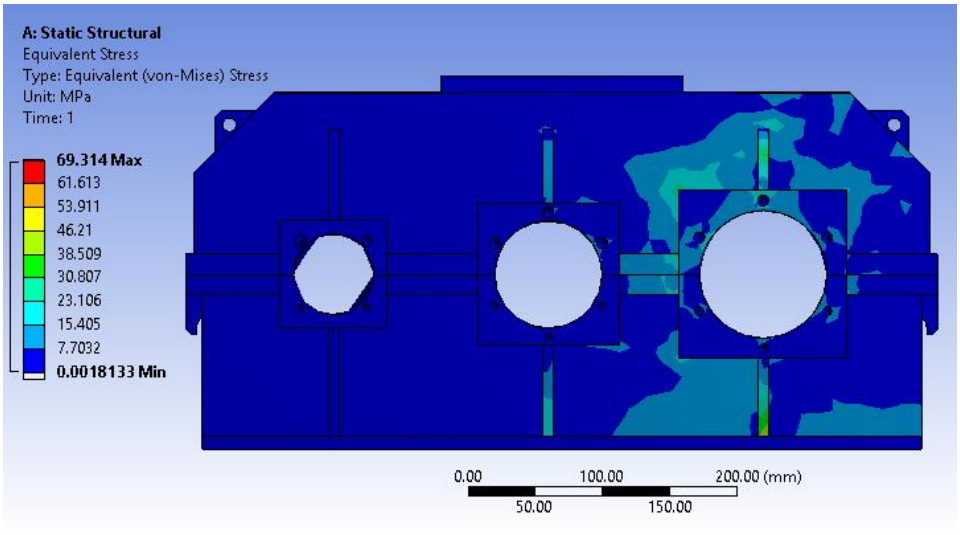


Fig. 11: Simulación de la carcasa soldada.

Ecuaciones de correlación

De acuerdo con los resultados analizados, es necesario ajustar los valores de esfuerzo obtenidos por métodos analíticos para obtener resultados más cercanos a la realidad, como los ofrecidos por la simulación numérica. Se plantea entonces la siguiente hipótesis: el valor del esfuerzo obtenido por simulación se puede obtener si se afecta con dos factores el resultado del esfuerzo obtenido por métodos analíticos. Como se mencionó, la diferencia se debe principalmente al incremento de la rigidez de la carcasa soldada cuando se considera la carcasa completa. Se propone el siguiente modelo:

$$\sigma_{máx} = k_w \cdot k_d \cdot \sigma_{eq} \tag{11}$$

Donde: k_d es el factor que se obtiene en función de la distancia entre los centros de los dos últimos apoyos, el cual variará según el tipo de nervio a emplear. Asimismo, k_w será el factor que se obtiene en función del ancho de la carcasa, y $\sigma_{máx}$, el esfuerzo que se obtiene mediante simulación numérica (esfuerzo real).

Los factores no pueden obtenerse directamente de las curvas mostradas en las Fig. 8 y Fig. 9. Por ejemplo, la gráfica "Esfuerzo de la carcasa vs Ancho carcasa", muestra el esfuerzo en función del ancho de la

ISBN 978-607-8242-11-5

carcasa, considerando una distancia entre alojamientos constante igual a $455\ mm$. Es decir, esta curva está siendo afectada por el factor debido a la distancia entre apoyos. Según la Fig. 8, se puede señalar que para un ancho en la carcasa igual a cero, el esfuerzo tendrá un valor de $86.5\ MPa$. Para este valor de ancho las dos paredes laterales están juntas, entonces si se tuviese sólo una pared lateral el esfuerzo tendría un valor de $173\ MPa$. Por lo que el factor debido al ancho de la carcasa es:

$$k_d\,(d = 455\ mm) = \frac{69.31\ MPa}{173\ MPa} = 0.4$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación 11 se puede conocer el factor k_w en función del ancho de la carcasa, lo cual se puede observar en la Fig. 12.

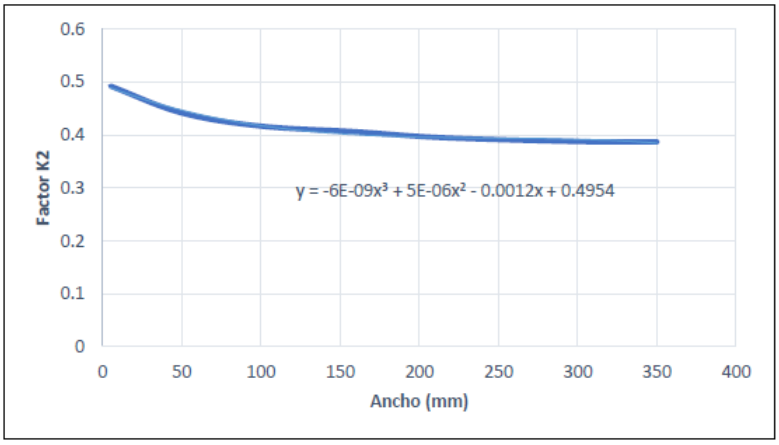


Fig. 12: Relación entre el factor k_w y el ancho.

$$k_w = -1.2 \cdot 10^{-3} \cdot w + 0.4954 \qquad (12)$$

De forma similar se obtiene la relación entre el factor de reducción k_d y la distancia entre apoyos, como se presenta en la Fig. 13.

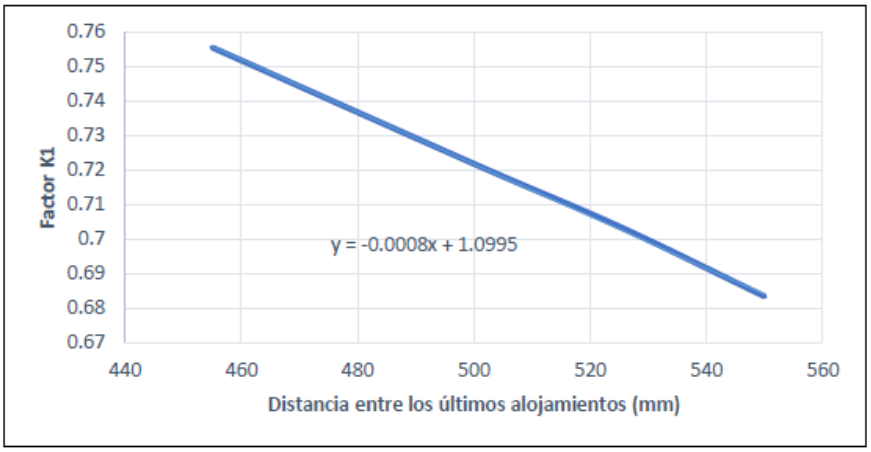


Fig. 13: Relación entre el factor k_d y distancia de los últimos apoyos.

$$k_d = -8 \cdot 10^{-4} \cdot d + 1.0995 \qquad (13)$$

Como se mencionó, el factor k_w es producto de la simetría de la carcasa, entonces este no variará si se emplea otro tipo de nervio rigidizador u otro número de etapas. En tal sentido, se deben analizar las diferentes configuraciones de paredes laterales que se tendrán con el fin de hallar sus respectivas ecuaciones de correlación.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

Se desarrolló un procedimiento mediante el cual se puede calcular el esfuerzo actuante en las paredes de la carcasa bajo los apoyos, empleando métodos analíticos y simulación numérica, lo que permite conocer el esfuerzo actuante con una precisión aceptable. Este procedimiento involucra un total de dos ecuaciones que se obtuvieron mediante regresión lineal a partir de una serie de ensayos realizados. Estas ecuaciones dependen del tipo de nervio rigidizador y del número de etapas en la carcasa.

Se recomienda realizar un estudio que permita optimizar el espesor de las paredes de la carcasa según el esfuerzo al que están sometidos, ya que se observó en los análisis realizados que los esfuerzos en las paredes complementarias a la pared lateral están soportando esfuerzos relativamente bajos, lo cual indica un sobredimensionamiento de estas.

Se recomienda realizar el mismo procedimiento planteado para determinar las ecuaciones que permitan determinar el esfuerzo actuante en carcasas de configuración similar a las presentadas, entre estas, carcasas fabricadas por fundición. Las ecuaciones obtenidas en el presente trabajo solo serán válidas para las carcasas que se tipificaron en este estudio.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Gestión de la Investigación (DGI) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por haber financiado la investigación a través del proyecto DGI-2015-197 “Desarrollo de un sistema inteligente de diseño mecánico para mejorar la competitividad de la empresa metalmecánica nacional aplicado a cajas reductoras de engranajes cilíndricos con carcasa soldada de uso en la industria minera”.

REFERENCIAS

[1] Ehrlenspiel, K., kiewert, A., lindemann, U., “*Cost-Efficient Design”*. Springer. Berlin (2007)

[2] Keblanov, B, “*Machine Elements: Life and Design”*, CRC Press, Estados Unidos (2008)

[3] Beliáev V. N, “*Atlas de elementos de máquinas y mecanismos”*, Tercera edición, CEAC (1981)

[4] Reghellin, G. F., “*Procedimiento para el diseño de carcasas soldadas para cajas reductoras de media y alta potencia con optimización de los parámetros geométricos principales*.” Tesis presentada para optar el título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima, Perú (2015)

[5] Budynas, R. y Nisbett, J.; “*Shigley’s Mechanical Engineering Design”*, Décima Edición, McGraw Hill Education, Estados Unidos (2015)

[6] Cojocaru V., Korka Z., y Miclosina C.; “*Influence of the Mesh Parameters on Stresses and Strains in FEM Analysis of a Gear Housing”*, Analele Universitaii Eftimie Murgu, Anul XX, Nro. 2, 2013, ISSN 1453 – 7397, pp. 47-52 (2013)

[7] Hibbeler R., *“Mecánica de Materiales”,* Octava Edición, Pearson Education, México (2011)

[8] Beer F. P., *“Mecánica de Materiales”*, Sexta Edición, McGraw-Hill Interamericana, México, D.F (2013)

[9] Blodgett, Omer W., “*Design of Weldments Handbook”*. Segunda edición. Cleveland, Oho: James F. Lincoln Arc Welding Foundation (1963)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Evaluación de la Integridad Estructural de un Tanque de GNV Bajo el Estándar API 579 Utilizando Simulación Numérica

Herbert Yépez[1], Rosendo Franco[1] y Luis Mechán[1]
(1) Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú
E-mail: hyepez@pucp.pe; rofranco@pucp.pe; mechan.luis@pucp.pe

Resumen

En el presente trabajo se evalúa la integridad estructural de un tanque vehicular de GNV tipo 1 – cilindro de acero sin recubrimiento – y su relativa tolerancia ante la presencia de una probable fase activa de crecimiento de una fisura inicial de forma semi-elíptica, ubicada sobre la superficie cilíndrica del tanque en dos posibles direcciones: circunferencial y longitudinal. La evaluación de integridad emplea el procedimiento Nivel 3 y el Diagrama de Falla FAD recomendados por estándar API 579 (FFS) que evalúa la idoneidad de componentes presurizados en servicio. Mediante el Diagrama FAD se realiza un análisis gráfico del comportamiento de la fisura que va cambiando de tamaño y se determina en qué medida se ve comprometida la integridad del tanque a través del cálculo de ratios, que dependen de la carga (presión interna) y del Factor de Intensidad de Tensiones (FIT). Asimismo, el FIT, parámetro de la mecánica de la fractura que caracteriza el comportamiento de la fisura, es determinado mediante simulación numérica para los diferentes tamaños de propagación. Finalmente, los resultados obtenidos confirman que, bajo las condiciones de servicio del tanque analizado, el crecimiento de una fisura debido a una carga de presión fluctuante alcanza la condición de fuga antes que la condición de falla del tanque, en un tiempo superior al periodo establecido por la normativa peruana para la revisión técnica de estos equipos.

Palabras clave: tanque GNV; API 579; elementos finitos; mecánica de fractura; factor de intensidad de tensiones

Evaluation of the Structural Integrity of a NGV Tank Under the API 579 Standard Using Numerical Simulation

Abstract

In the present work, the structural integrity of a NGV tank type 1 - uncoated steel cylinder - and its relative tolerance to the presence of a probable active phase of growth of an initial semi-elliptical fissure located on the Cylindrical surface of the tank in two possible directions: circumferential and longitudinal is evaluated. The integrity evaluation employs the Level 3 procedure and the FAD Fault Diagram recommended by the API 579 (FFS) standard that evaluates the suitability of pressurized components in service. By means of the FAD Diagram, a graphical analysis of the behavior of the crack is carried out, which changes in size and determines the extent to which the integrity of the tank is compromised through the calculation of ratios, which depend on the load (internal pressure) and the Stress Intensity Factor (FIT). Also, the FIT, parameter of the fracture mechanics that characterizes the crack behavior, is determined by numerical simulation for the different sizes of propagation. Finally, the results confirm that under the operating conditions of the analyzed tank the growth of a crack due to a fluctuating pressure load reaches the leakage condition before the tank failure condition, in a time greater than the established period By Peruvian regulations for the technical review of these equipment.

Keywords: NGV tank; API 579; finite elements; fracture mechanics; stress intensity factor

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Todo componente en servicio es susceptible de experimentar fenómenos de degradación y daño debido a las condiciones de trabajo y la interacción con el medio. Fenómenos como la fatiga, corrosión, degaste, entre otros; pueden generar la formación de discontinuidades, lo que a su vez produce la disminución de la resistencia mecánica, pérdida de material e inclusive la falla del componente. Asimismo, en las últimas décadas, ha surgido el concepto de evaluación de la integridad estructural, que consiste en determinar la idoneidad de un componente para continuar prestando servicio, lo cual se constituye en un aspecto importante en la toma de decisiones y contribuye de forma decisiva en la programación de reparaciones absolutamente necesarias, logrando un equilibrio entre economía y seguridad (Cicero, Lacalle, Álvarez, Cicero, y Gutiérrez-Solana, 2010).

En el 2007, el American Petroleum Institute presentó el estándar API 579 - Fitness For Service (FFS), el cual provee de recomendaciones para la evaluación de la integridad estructural empleando procedimientos específicos para diferentes equipos de la industria petroquímica (API 579, 2007). Los procedimientos de evaluación contenidos en el estándar son actualmente reconocidos y referenciados por otros códigos y estándares, como medios adecuados para la evaluación de recipientes bajo presión, sistemas de tuberías y tanques de almacenamiento donde la inspección ha revelado el deterioro o la presencia de algún defecto en el equipo. El estándar cuenta con tres niveles de confiabilidad, que dependen de la información técnica disponible, de las capacidades del personal evaluador y de la complejidad del estudio. El Nivel 1 consiste en una evaluación del tipo conservador que requiere un mínimo de información sin mayor conocimiento técnico del tema. En el Nivel 2, la evaluación requiere de métodos y técnicas analíticas basados en la mecánica de la fractura y la resistencia de materiales. Finalmente, el Nivel 3 exige información detallada del caso a analizar y se recomienda que ingenieros especialistas empleen técnicas avanzadas para el cálculo de esfuerzos, las cuales pueden estar basadas en métodos numéricos, como el Método de los Elementos Finitos (FEM). Adicionalmente, a diferencia de los otros niveles, el Nivel 3 evalúa fisuras en una fase activa de crecimiento o que presenten señales de una potencial activación debido a las condiciones de cargas dinámicas. Esta evaluación se realiza mediante cinco métodos diferentes (A, B, C, D y E), cada uno de los cuales poseen sus propios requerimientos y particularidades, como por ejemplo el Método B que consiste en el empleo del Diagrama de Falla - Failure Assessment Diagram (FAD), el cual define una curva límite de falla (Alegre, Bravo, & Cuesta, 2011) y se determina a partir del ensayo de tracción (curva esfuerzo-deformación) del material evaluado.

Por otro lado, en el Perú la introducción de vehículos a gas natural (GNV) se ha constituido en una alternativa atractiva, produciendo un favorable impacto ambiental y económico en la población. En los últimos años, el consumo de GNV viene incrementándose y en la actualidad ya se ha superado las 200 mil unidades activas que utilizan este combustible, pero por ahora es un número que está muy por debajo de los casos exitosos de Argentina y Brasil, quienes bordean los dos millones de unidades vehiculares de GNV. El cambio de combustible se viene realizando de forma gradual, pues se conoce que el equipamiento de GNV trabaja a altas presiones, alrededor de 200 bar, lo que implica que de no tener un adecuado manejo de los equipos se corre un alto riesgo con posibles graves consecuencias. Los gobiernos entienden este riesgo y actúan en coordinación con órganos reguladores para evitar incidentes con consecuencias lamentables. Hasta la fecha, en el Perú solo fueron reportados incidentes debido a fallas del sistema de transporte de hidrocarburos y aún no se han registrado accidentes provocados por fallas de tanques de GNV, sin embargo está situación podría cambiar dentro de algunos años, ya que se cuenta con un joven parque automotriz que emplea este combustible. Los requerimientos mínimos de diseño y mantenimiento de los tanques vehiculares de almacenamiento de gas natural están establecidos por las normas técnicas peruanas; sin embargo las mismas no contemplan criterios de evaluación en caso estos equipos presenten algún tipo de defecto durante el periodo de servicio, por ello es de interés estudiar la integridad estructural de un tanque vehicular de GNV mediante procedimientos de evaluación específicos basados en recomendaciones de un estándar reconocido.

Asimismo, la simulación numérica, largamente utilizada por diferentes disciplinas de la ingeniería y considerada como una herramienta eficaz para el análisis de diversos problemas sin recurrir a la experimentación (Millán, De La Torre, Oliva, y Berenguer, 2011), ha sido ampliamente empleada en la mecánica de la fractura, disciplina que estudia el comportamiento de las fisura mediante expresiones analíticas que relacionan el tamaño y forma de la fisura, la geometría del componente fisurado y las cargas aplicadas (González, 2004). En las últimas décadas es posible encontrar investigaciones donde emplean el Método de los Elementos Finitos para determinar el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT), parámetro que caracteriza el comportamiento de la fisura en la mecánica de la fractura (Anderson, 2005), como por ejemplo Q. Han, quien realizó un trabajo donde determina el FIT en especímenes fisurados sometidos a fatiga (Han, Wang, Yin, y Wang, 2015), así también A. Boulenouar quien desarrolla un modelo de propagación mixta de fisuras y lo implementa en un código de elementos finitos (Boulenouar, 2013).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Por todo lo expuesto, el presente trabajo emplea procedimientos de evaluación de integridad estructural recomendados por el estándar API 579 y a partir de una fisura inicial de forma semi-elíptica ubicada sobre la superficie cilíndrica en dirección circunferencial y longitudinal, se determina la tolerancia del tanque ante una probable fase activa de crecimiento de la misma. La presión interna fluctuante es la principal carga y responsable de incrementar los esfuerzos en el frente de la fisura, cuyo tamaño será actualizado en ambas direcciones (profundidad y longitud) durante el estudio. Se emplea un software comercial de elementos finitos para la determinación del FIT, lo que permite actualizar el tamaño de la fisura mediante modelos geométricos con relativa facilidad y determinar los respectivos valores de FIT para cada tamaño. Asimismo, los procedimientos de evaluación de integridad empleados requieren de la elaboración del Diagrama de Falla FAD del material, el cual es obtenido por dos medios: expresiones analíticas proporcionadas por el propio estándar y a partir de información obtenida de ensayos experimentales. Cabe señalar que el diagrama FAD es un método gráfico que permite evaluar la integridad del tanque a medida que el tamaño de fisura se encuentra en una fase de propagación. Igualmente, el diagrama define una curva límite que permite determinar si para un determinado tamaño de fisura, el tanque se encuentra en una zona segura, debajo de la curva, o se encuentra en un estado crítico de inminente falla, cuando la fisura alcance un tamaño crítico y el punto de análisis se ubica sobre la curva. Acerca de la propuesta de estudio que se presenta, es posible encontrar literatura con similares intereses, como S. Lie, quien efectúa un gran despliegue experimental y emplean diagramas FAD para determinar la presión de falla de un tanque metálico que contiene gas natural comprimido (Lie & Li, 2014) y J. Alegre, quien estudia recipientes de alta presión con el objetivo de mejorar su vida útil bajo condiciones cíclicas de trabajo utilizando procedimientos del estándar API 579 (Alegre, 2009).

CASO DE ESTUDIO

Se ha sometido a estudio un tanque vehicular de GNV tipo 1, de acero y sin recubrimiento alguno, el cual es quizá uno de los más empleados en el parque automotriz peruano. Tal como muestra la Fig. 1, el cilindro posee 920 mm de longitud, 323 mm de diámetro externo y 8.25 mm de espesor de pared. Para determinar el tipo de acero del tanque, se realizaron pruebas de laboratorio donde el análisis químico revelo que material es compatible con un acero de medio carbono y baja aleación al Cr-Mo, cuyo esfuerzo de último y de fluencia son 894 y 660 MPa, respectivamente. Asimismo, el estudio considera evaluar la integridad del tanque a partir de una fisura inicial impuesta de forma semi-elíptica ubicada sobre la superficie lateral en dirección longitudinal (paralelo al eje del cilindro). Además, se ha establecido que la presión interna opera con fluctuaciones alcanzando un valor máximo y mínimo de 200 y 5 bar, respectivamente.

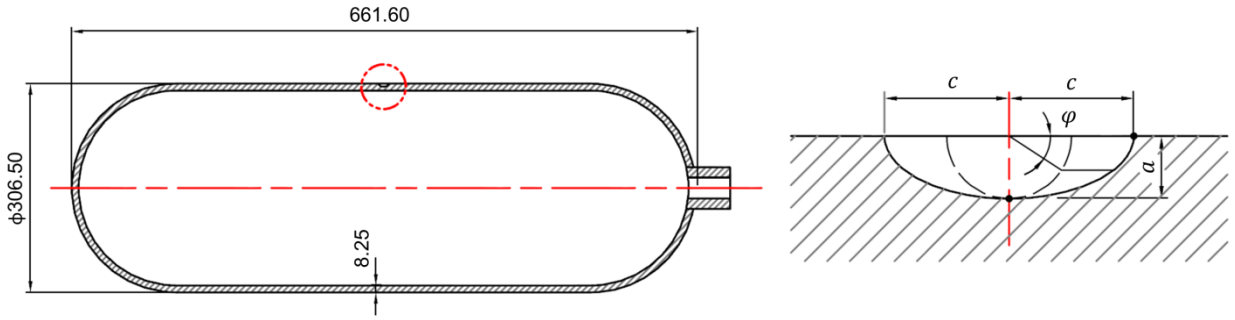


Fig. 1: Dimensiones principales del tanque de GNV tipo 1 empleado para el estudio y características geométricas de la fisura semi-elíptica.

Por otro lado, la fisura de forma semi-elíptica, como se aprecia en la Fig. 1, posee un semieje menor a (profundidad) y un semieje mayor de longitud c, presenta un frente de propagación del cual se ha tomado puntos de evaluación ubicados a $\varphi = 90°$, punto más profundo en dirección del espesor del material del tanque, y $\varphi = 0°$, puntos sobre la superficie del componente.

A partir de las recomendaciones de evaluación de alto nivel de confiabilidad del estándar, el presente trabajo emplea el procedimiento Nivel 3 – Método B para evaluar la integridad estructural de un tanque, el cual siendo el nivel más riguroso, evalúa el crecimiento de la fisura empleando el diagrama FAD obtenido a partir de valores reales de la curva esfuerzo-deformación del material extraídos de ensayos de laboratorio. A continuación se describe brevemente el procedimiento empleado.

ISBN 978-607-8242-11-5

PROCEDIMIENTO NIVEL III API 579

Las fisuras son consideradas como discontinuidades planas de radio agudo en sus extremos o en su frente de propagación y se caracterizan predominantemente por su longitud y profundidad. Las fisuras pueden ser superficiales, incrustadas y penetrantes, y en muchas ocasiones están asociadas a corrosión localizada y a la falta de fusión o penetración en uniones soldadas (API 579, 2007). Como ya se ha descrito, el estándar API 579 cuenta con procedimientos de evaluación de componentes fisurados, los cuales son empleados para estimar la relativa tolerancia a las grietas y evaluar el riesgo de fractura de un componente mediante tres niveles de evaluación que dependen de la cantidad de la información técnica, capacidades del personal evaluador y complejidad del análisis. El nivel 1 consiste en un análisis de tipo conservador con un mínimo de información técnica disponible. La evaluación se aplica para componentes simples tipo placa plana, cilindro o esfera, y la presión interna es la única carga sobre el componente que produce únicamente esfuerzos normales constantes. La evaluación nivel 2 emplea del diagrama de evaluación de falla FAD y para ello requiere la determinación de los valores de FIT obtenido del compendio de expresiones analíticas contenidas en el Anexo C del estándar.

La Fig. 2 ilustra de forma simple y esquemática el concepto del diagrama FAD, el cual es considerado como un análisis gráfico que define una curva límite de falla a través de la siguiente expresión (API 579, 2007):

$$K_r = [1 - 0.14(L_r)^2]\{0.3 + 0.7\exp[-0.65(L_r)^6]\} \quad (1)$$

Donde K_r representa el ratio de la tenacidad a la fractura y L_r el ratio de carga definidos en las expresiones (2) y (3), respectivamente.

$$K_r = \frac{(K_I^P + \phi K_I^{SR})}{K_{mat}} \quad (2)$$

Siendo K_I^P el factor de intensidad de tensiones debido a cargas principales, K_I^{SR} es el factor de intensidad de tensiones debido a cargas secundarias y esfuerzos residuales, ϕ es el factor de corrección por plasticidad, y K_{mat} la tenacidad a la fractura del material.

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} \quad (3)$$

Siendo σ_{ref} el esfuerzo de referencia y σ_{ys} representa el esfuerzo de fluencia del material. El diagrama FAD tiene una línea de corte en la zona de colapso definida mediante la resistencia a tracción del material σ_u (Alegre et al., 2011).

$$L_{r(máx)} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{\sigma_u}{\sigma_{ys}}\right) \quad (4)$$

El Nivel 3 - Método B emplea la curva esfuerzo – deformación obtenido de ensayos experimentales para construir el diagrama FAD del material. El método recomienda a partir de los valores experimentales, definir una curva empleando la relación de esfuerzo aplicado y fluencia con los siguientes valores: $\sigma/\sigma_{ys} = 0.7$, 0.8, 0.98, 1.0, 1.02, 1.1, 1.2 e intervalos de 0.1 hasta alcanzar σ_u. Posteriormente la curva obtenida es convertida a una curva esfuerzo – deformación real. Los valores de esfuerzo y deformación reales son estimados a partir de los valores experimentales, σ_{es} y ε_{es}, mediante las siguientes relaciones.

$$\sigma_t = (1 + \varepsilon_{es})\,\sigma_{es} \quad (5)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_{es}) \quad (6)$$

ISBN 978-607-8242-11-5

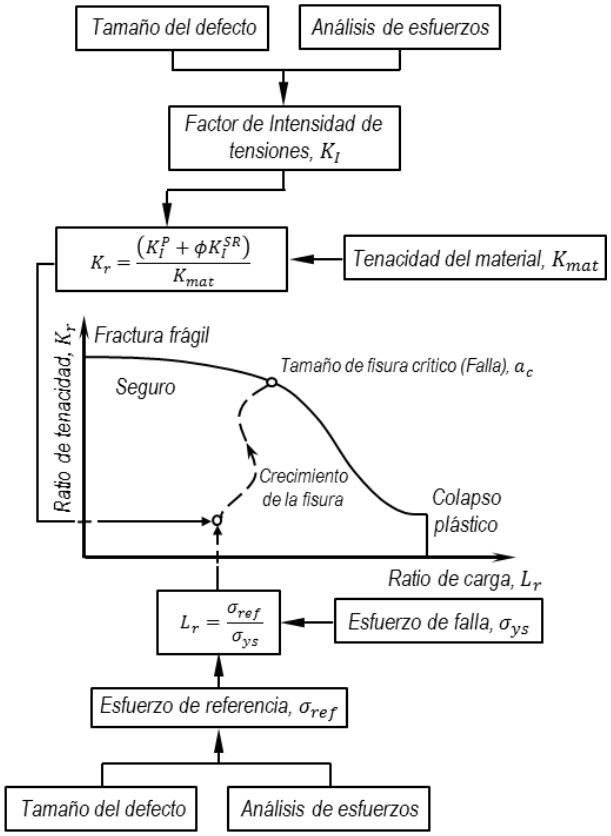


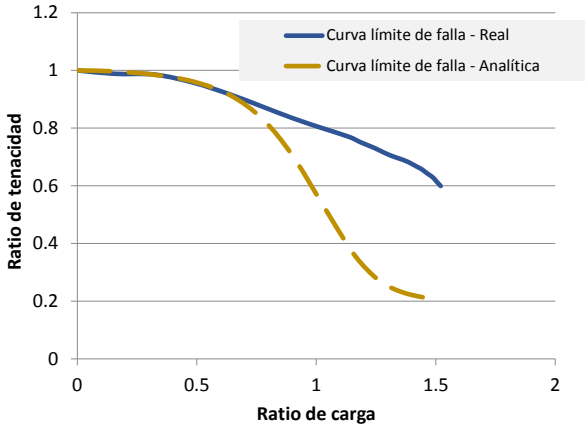
Fig. 2: Esquema para la evaluación de la integridad estructural mediante el diagrama FAD. Imagen modificada a partir de la referencia (Alegre, 2009).

Determinados los valores reales, se define el diagrama FAD del material a partir de la siguiente expresión:

$$K_r = \left(\frac{E\ \varepsilon_t}{L_r\ \sigma_{ys}} + \frac{(L_r)^3\ \sigma_{ys}}{2\ E\ \varepsilon_t} \right)^{-1/2} \qquad 0.0 < L_r \leq L_{r(máx)} \tag{7}$$

$$K_r = 1.0 \qquad L_r = 0.0$$

En la Fig. 3 presenta los diagramas FAD elaborados a partir de la expresión analítica (1) y empleando la curva esfuerzo deformación real del material bajo las recomendaciones del Nivel 3 - Método B.



Valores experimentales		Valores reales		Ratio de carga	Ratio de tenacidad	
					Ec. 1	Ec. 7
ε_{es}	σ_{es}	ε_t	σ_t	L_r	K_r	K_r
0	0	0.000	0.0	0.000	1.000	1.000
0.5	103	0.499	103.5	0.157	0.997	0.988
1	212	0.995	214.1	0.324	0.985	0.985
1.5	318	1.489	322.8	0.489	0.961	0.957
2	415	1.980	423.3	0.641	0.913	0.916
2.5	500	2.469	512.5	0.777	0.830	0.874
3	575	2.956	592.3	0.897	0.709	0.836
3.5	650	3.440	672.8	1.019	0.545	0.801
4	720	3.922	748.8	1.135	0.389	0.770
4.5	750	4.402	783.8	1.188	0.332	0.750
5	780	4.879	819.0	1.241	0.286	0.732
…	…	…	…	…	…	…
11.5	900	10.885	1003.5	1.520	0.203	0.599

Fig. 3: Diagramas FAD y tabla con sus respectivos valores determinados a partir de la expresión analítica (1) y ensayos experimentales

Ahora, la evaluación de un potencial crecimiento de la fisura impuesta por fatiga se debe a que el tanque está sometido a una presión fluctuante y que ocasiona que los esfuerzos varíen en el tiempo. La mecánica de fractura elástica lineal (LEFM) plantea la relación del crecimiento de la fisura con la amplitud de los

ISBN 978-607-8242-11-5

valores factores de intensidad de tensiones ΔK a través de un modelo de crecimiento de fisura por fatiga. La ecuación de París es un modelo sencillo y más conocido, el cual determinó que para la gran mayoría de los materiales se cumple la siguiente relación.

$$\frac{da}{dN} = C\,\Delta K^m \tag{6}$$

Donde da/dN representa la velocidad de propagación, crecimiento de la fisura entre número de ciclos, la cual es proporcional a la amplitud de los valores factores de intensidad de tensiones ΔK, mientras que C y m son constantes empíricas. Atendiendo a que el tanque opera en un ambiente no agresivo, a temperatura ambiente y que el esfuerzo de fluencia del material supera los 600 MPa, se ha designado que las variables C y m sean 1.36 (10^{-7}) y 2.25, respectivamente, de acuerdo a sugerencias que propone el estándar.

Por otro lado, el tamaño de la fisura ha sido actualizado en pequeños intervalos tomando en cuenta dos aspectos: el valor del incremento de tamaño no debe superar el 0.5% de la dimensión característica (profundidad o longitud), expresiones (7) y (8), y a partir de las dimensiones iniciales de la fisura, determinar un número mínimo de ciclos para el análisis, expresión (9). Ambas condiciones garantizan que los incrementos de la amplitud ΔK no varíen drásticamente en el tiempo y mitigar el error de cálculo en cada ciclo de evaluación. Estimar el valor de factor de intensidad de tensiones para cada incremento de la fisura podría ser una tarea tediosa si se emplea las expresiones y tablas de los anexos del estándar, es por ello que el empleo de la simulación resulta una alternativa viable y atractiva, capaz de determinar el factor de intensidad de tensiones a lo largo de todo el frente de la fisura para los diferentes tamaños con relativa facilidad.

$$\Delta a \leq 0.5\%\, a \tag{7}$$

$$\Delta c \leq 0.5\%\, c \tag{8}$$

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{1.36(10^{-7})(\Delta K)^{2.25}} \tag{9}$$

SIMULACIÓN NUMERICA

En la actualidad la simulación numérica es una herramienta muy útil para resolver diferentes tipos de problemas y uno de los métodos numérico extensamente empleado es el método de elementos finitos y a pesar de que el estándar API 579 brinda expresiones analíticas para determinar los factores de intensidad de tensiones, también sugiere el empleo de esta herramienta computacional. A continuación se describe el modelo computacional desarrollado y las consideraciones tomadas en el proceso.

Modelar un elemento con todos sus detalles constructivos ocasiona un costo computacional adicional innecesario, por ello el modelo geométrico desarrollado prescinde de la rosca de válvula y mantiene la simetría en ambos extremos del cilindro, ver Fig. 4. La discretización, que consiste en dividir el modelo continuo en pequeños elementos interconectados a través de puntos, llamados nodos, alcanza superar los 150 mil elementos, con la finalidad de garantizar una adecuada malla para obtener mejores resultados.

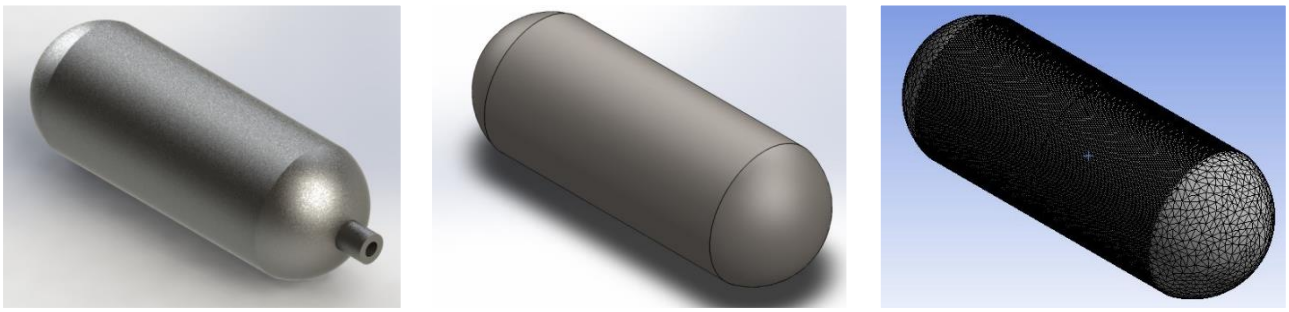


Fig. 4: Geometría real del tanque, modelo 3D idealizado y malla.

Se presta un especial interés en la malla alrededor de la fisura. La Fig. 5 muestra que sobre los extremos sobre en la superficie, la cabeza de la fisura es envuelta por elementos tetraédricos especiales bajo un arreglo circular y que el frente de la fisura es discretizado en pequeños tramos. La fisura semi-elíptica inicial para el estudio posee un semieje menor y un semieje mayor iguales a 0.4 y 0.8 mm, respectivamente, por ello el tamaño de los elementos designados que se encuentran en las proximidades de la fisura alcanzan un

ISBN 978-607-8242-11-5

valor promedio de 0.025 mm, mientras que los elementos en las zonas alejadas alcanzan aproximadamente los 5 mm.

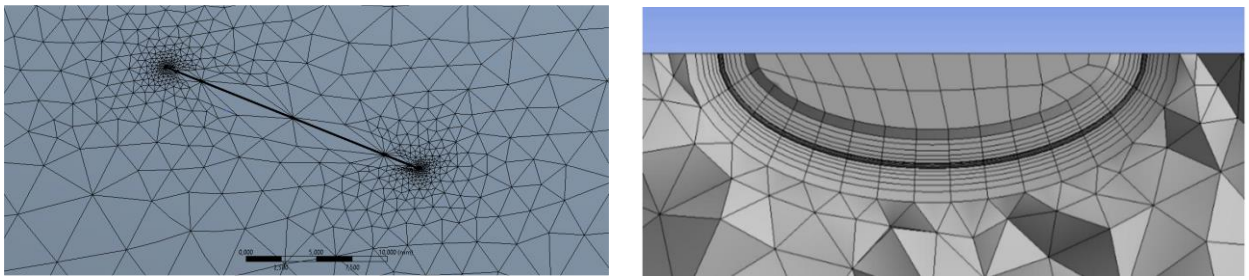


Fig. 5: Mallado alrededor de la fisura.

EVALUACION DE INTEGRIDAD DE UN TANQUE DE GNV-1

A continuación se describen el procedimiento para realizar la evaluación de integridad estructural de un tanque vehicular GNV tipo 1 mediante el diagrama FAD.

Primero se debe identificar las características del tanque y las condiciones de operación. El tanque estudiado posee un radio exterior, R_o, de 161.5 mm, un radio interior, R_i, de 153.25 mm y un espesor de pared, t, de 8.25 mm. La presión, p, máxima y mínima de operación es 20 y 0.5 MPa, respectivamente y la temperatura de operación es de 15 °C. Asimismo, se requiere reconocer el estado de esfuerzos en las inmediaciones de la fisura a través de una clasificación de tres grupos: primarios, secundarios y residuales. Los primarios son esfuerzos desarrollados por cargas controladas, los secundarios son esfuerzos desarrollados por restricciones de partes adyacentes o por restricciones del propio componente, mientras que los residuales son esfuerzos generados por procesos de fabricación como la soldadura. El caso de estudio únicamente presenta esfuerzos primarios producto de la presión interna.

Acerca del material del componente, se determina sus propiedades mecánicas: esfuerzo de fluencia σ_{ys} y tenacidad a la fractura K_{mat}. El esfuerzo de fluencia se obtiene mediante ensayos experimentales o especificaciones mínimas del material. El valor de tenacidad, también puede ser obtenido por ensayos o valores estimados contenidos en el Anexo F del estándar. Los ensayos experimentales arrojaron que σ_{ys} es 660 MPa, mientras que la tenacidad ha sido evaluada empleando el siguiente procedimiento. Cuando los datos de tenacidad a la fractura no están disponibles, el procedimiento basado en una temperatura de referencia proporciona un valor límite inferior de la tenacidad a la fractura, K_{IC}, mediante la expresión (10), la cual está contenida en el anexo F del estándar y donde T es la temperatura de operación y T_{ref} es una temperatura de referencia (Tabla 9.2M del estándar).

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084exp\left[0.036\left(T - T_{ref} + 56\right)\right] \tag{10}$$

Igualmente, se proporciona una correlación entre el valor promedio y el valor límite mínimo de tenacidad, la cual está descrita por la ecuación (11). En dicha expresión, los variables $B_0 \dashrightarrow B_5$ son coeficientes obtenidos de la Tabla 11 del anexo F del estándar. Calculado el valor límite mínimo de tenacidad y los coeficientes de la ecuación (11), se obtiene el valor de promedio de tenacidad del material el cual ha resultado ser 150.4 MPa.m$^{0.5}$.

$$\left.\frac{K_{mat}}{K_{IC}}\right|_{sigma} = \left(\frac{1.0}{B_0 + B_1\Delta T + B_2\Delta T^2 + B_3\Delta T^3 + B_4\Delta T^4 + B_5\Delta T^5}\right) \tag{11}$$

Por otro lado, el esfuerzo de referencia es una variable utilizada en la evaluación de fisuras en componentes presurizados. El Anexo D (D.5.10) del estándar proporciona soluciones de esta variable para una variedad de configuraciones geométricas. A continuación se presentan las expresiones para determinar esfuerzos de referencia para un componente cilíndrico que contienen una fisura semi-elípticas superficial en dirección longitudinal sometida a presión interna (D.5.10.1).

$$\sigma_{ref} = \frac{g\,P_b + ((g\,P_b)^2 + 9(M_s\,P_m\,(1-\alpha)^2)^2)^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \tag{12}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

Donde P_m y P_b representan los esfuerzos primarios de membrana y flexión definidos por las expresiones (13) y (14) (D.5.1.2).

$$P_m = \frac{p\,R_i}{t} \tag{13}$$

$$P_b = \frac{p.{R_o}^2}{{R_o}^2 - {R_i}^2} \cdot \left[\frac{t}{R_i} - \frac{3}{2}\left(\frac{t}{R_i}\right)^2 + \frac{9}{5}\left(\frac{t}{R_i}\right)^3\right] \tag{14}$$

α, g y M_s son coeficientes de forma definidos por las expresiones (15), (16) y (17).

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} \tag{15}$$

$$g = 1 - 20\left(\frac{a}{2c}\right)^{0.75}\alpha^3 \tag{16}$$

$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t}\left(\frac{1}{M_t}\right)} \tag{17}$$

Donde la variable M_t está definida por la siguiente expresión (D.2.3.2):

$$M_t = \left(\frac{1.02 + 0.4411\lambda^2 + 0.006124\lambda^4}{1.0 + 0.02642\lambda^2 + 1.533(10^{-6})\lambda^4}\right)^{0.5} \tag{18}$$

Donde λ es un parámetro usado para la corrección de factores de superficie, el cual está expresado por la ecuación (19).

$$\lambda = \frac{1.818\,c}{\sqrt{R_i\,a}} \tag{19}$$

Obtenido el esfuerzo referencial, σ_{ref}, se procede a determinar el ratio de carga, L_r , el cual se define como la relación entre el esfuerzo de referencia y el esfuerzo de fluencia del material, ver expresión 3. La variable L_r está asociada al eje de las abscisas del diagrama FAD y para el presente caso de estudios, está evaluado en función a la carga primaria.

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}}$$

Asimismo, el factor de tenacidad, K_r, está asociado al eje de las ordenadas del diagrama FAD y se define mediante la relación entre el factor de intensidad de tensiones producto de los esfuerzos primarios, secundarios y residuales, y la tenacidad a la fractura del material, como se aprecia en la ecuación 2. Para el presente caso, ya que hay ausencia de cargas secundarias y residuales, el factor de intensidad de tensiones queda expresado en función de la presión interna.

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_{mat}}$$

Determinados los ratios L_r y K_r de acuerdo a un tamaño de fisura y bajo las condiciones de operación, se define el estado del tanque dentro del diagrama FAD.

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de una fisura semi-elíptica inicial impuesta sobre la superficial del tanque en dirección longitudinal, cuya profundidad a (semieje menor) y longitud $2c$ (eje mayor) son 0.4 y 1.6 mm respectivamente, se evalúa la integridad del tanque GNV-1 empleando la expresión (9) y los diagramas FAD del material elaborados (ver Fig. 3). Definido un número de ciclos y determinados los factores de intensidad de tensiones máximo (presión interna máxima) y mínimo (presión interna mínima) para los dos frentes de propagación de la fisura inicial, φ=90° (punto más profundo en dirección del espesor del material) y φ=0° (puntos sobre la superficie), se evalúa la variación del tamaño de fisura en ambas dimensiones. Dicha variación es sumada a las dimensiones iniciales y de esta forma se actualiza el tamaño de fisura, posteriormente se procede a estimar los nuevos factores de intensidad de tensiones máximo y mínimo, a 0 y 90°, obteniendo una nueva variación del tamaño, el cual volverá ser actualizando y de esta forma el proceso continua. La tabla 1 muestra el número de ciclos y los tamaños de fisura actualizados, además los valores del ratio de carga y tenacidad. Estos dos últimos son las variables x e y del diagrama FAD que permiten determinar el estado del tanque para un determinado tamaño de fisura. Asimismo, el resultado de la propagación de la fisura dentro del diagrama FAD es ilustrada en la Fig. 6, donde gráficamente se aprecia su evolución a medida que el tamaño de fisura crece en ambas direcciones. La curva de color verde representa el comportamiento de la fisura que se propaga en dirección radial a través del espesor de pared del tanque, mientras que la curva roja representa la evolución del tamaño de la fisura sobre la superficie del tanque.

Tabla 1: Estado de integridad del tanque dentro del diagrama FAD para diferentes tamaños de la fisura generados a partir del número de ciclos.

Número de ciclos	Semieje menor	Semieje mayor	Ratio de carga	Ratio de tenacidad	
				90°	0°
N	$a\ (mm)$	$c\ (mm)$	L_r	K_r	K_r
0	0.4	0.8	0.8527	0.1206	0.0956
250	0.4189	0.8112	0.8527	0.1222	0.0980
500	0.4384	0.8230	0.8528	0.1238	0.1006
750	0.4584	0.8356	0.8528	0.1253	0.1032
1000	0.4790	0.8489	0.8528	0.1269	0.1059
1250	0.5002	0.8630	0.8529	0.1284	0.1086
1500	0.5219	0.8780	0.8529	0.1300	0.1112
1750	0.5443	0.8937	0.8530	0.1315	0.1136
2000	0.5673	0.9102	0.8530	0.1330	0.1160
2250	0.5908	0.9275	0.8530	0.1349	0.1191
2500	0.6151	0.9459	0.8531	0.1364	0.1216
…	…	…	…	…	…
20420	8.2	10.8	0.8742	0.3922	0.5909

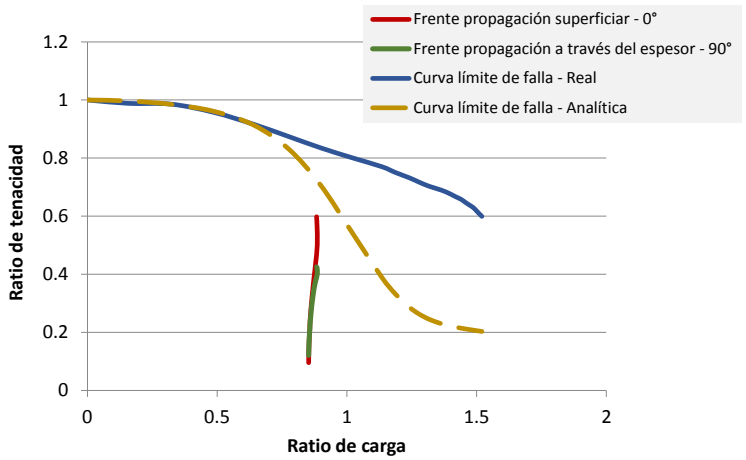


Fig. 6: Evaluación de la propagación de la fisura en el diagrama FAD.

La Fig. 7 muestra gráficamente el estado de propagación de la fisura dentro del diagrama FAD (izquierda) y la evolución del tamaño de fisura en las dos direcciones (derecha). El punto A representa el estado final de crecimiento de la fisura a través del espesor y ya que se encuentra por debajo de la curva límite del diagrama FAD, se pude afirmar que no ha alcanzado el tamaño crítico para que ocurra la falla del tanque.

ISBN 978-607-8242-11-5

Mientras que, del otro lado de la figura, el punto A´ muestra que el tamaño alcanzado es de 8.25 mm, el mismo valor del espesor de pared del tanque. Esta condición de haber alcanzado el espesor del tanque sin llegar al tamaño crítico, se conoce como fuga antes que falla. Asimismo, el punto B constituye el estado final alcanzado por la fisura sobre la superficie del tanque, cuya longitud final es de aproximadamente 22 mm, punto B´. Alcanzada la condición de fuga, el gas sería liberado por la propia fisura y la presión interna descendería y muy probablemente la propagación se detendría, sin embargo de continuar el proceso, el punto C representa el estado crítico para que ocurra una falla del tanque la cual podría ocurrir con una longitud alrededor de 13 mm (punto C´), si se evalúa con la curva limite analítica, pero si se evalúa con la curva limite obtenida con datos experimentales (punto D), el tamaño superaría los 13 mm (punto D´).

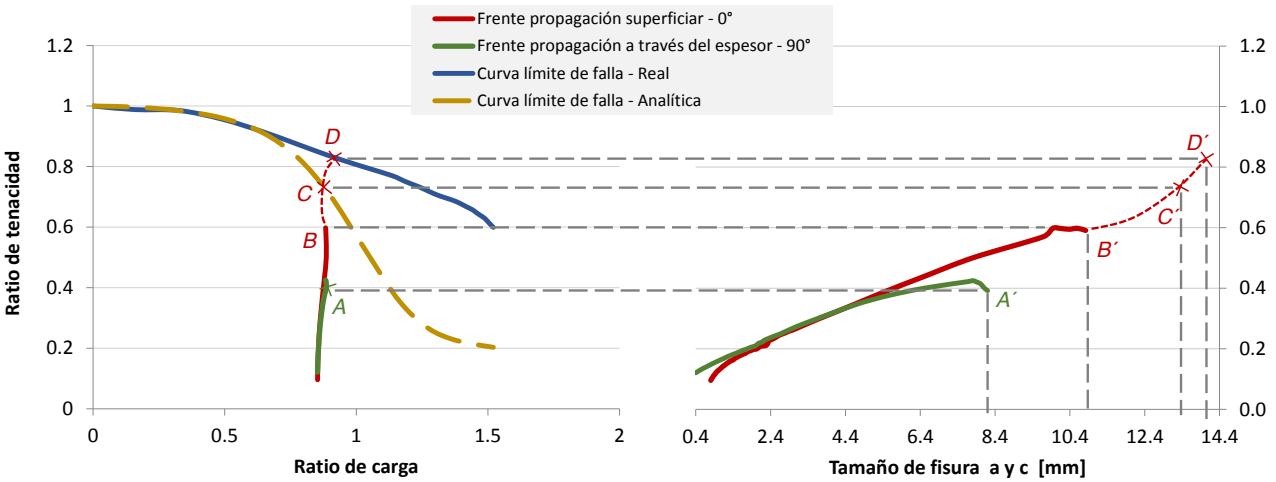


Fig. 7: Análisis gráfico del estado de propagación de la fisura dentro del diagrama FAD (izquierda) y la evolución del tamaño de fisura (derecha).

CONCLUSIONES

El estudio revela que, bajo el procedimiento de evaluación de integridad Nivel 3 – Método B propuesto por el estándar API 579, superado los 20 000 ciclos se alcanza la condición de fuga antes que la condición de falla del tanque de GNV tipo 1. El procedimiento de evaluación de alto nivel, Nivel 3 con el empleo de simulación numérica, garantiza resultados cercanos a la realidad. Se ha podido constatar que el diagrama FAD constituye una útil herramienta gráfica para la programación del retiro de tanques de GNV y cualquier otro equipo presurizado.

REFERENCIAS

Alegre, M., Bravo, P., y Cuesta, I., “Aplicación del Procedimiento ASME-API 579 para el Diseño en Fatiga de Vasijas de Alta Presión Bobinadas”. Anales de Mecánica de la Fractura 28, Vol. 1 (2011), 1, 243-248. (2011).

Anderson, T., “Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications”. USA: Taylor & Francis Group. (2005).

API 579, “Recommended Practice 579 Fitness For Service”. American Petroleum Institute. Washington, D.C. (2007)

Boulenouar, A., “Two-dimensional Numerical Estimation of Stress Intensity Factors and Crack Propagation in Linear Elastic Analysis”, 3(1), 506-510. (2013)

Cicero, S., Lacalle, R., Álvarez, J. A., Cicero, R., y Gutiérrez-Solana, F. “Evaluación de la integridad estructural en Europa : El FITNET FFS Procedure. Jornada de Análisis de Falla y Prevención”. June, 658-668. (2010)

González, J., “Mecánica de Fractura”. México, Limusa. (2004)

Han, Q., Wang, Y., Yin, Y., y Wang, D., “Determination of stress intensity factor for mode I fatigue crack based on finite element analysis”. Engineering Fracture Mechanics, 138, 118-126. (2015)

Lie, S. T., y Li, T., “Failure pressure prediction of a cracked compressed natural gas (CNG) cylinder using failure assessment diagram”. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 18, 474-483. (2014)

Millán, Z., De La Torre, L., Oliva, L., y Berenguer, M., “Numerical simulation. Diffusion equation”. 15(2), 29-38. (2011)

ISBN 978-607-8242-11-5

Estación Climatológica Autosustentable de Monitoreo Remoto basada en una Red Inalámbrica Embebida tipo Internet de las Cosas (IoT) para la predicción de Heladas

Francisco J. Ibarra-Guel[1] y Alejandro Castañeda-Miranda[2]
(1) Rector and professor of Telematics Engineering, Durango Polytechnic University, Carretera Durango-México Km. 9.5, CP 34300, Durango-México.
(2) Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Tecnologías de la Información, Universidad De-La-Salle Bajío, Av. Universidad 602, Col. Lomas del Campestre, León, CP 37150, Guanajuato-México.
E-mail: francisco.ibarra@unipolidgo.edu.mx; acastaneda@delasalle.edu.mx

Resumen

En el presente trabajo se presenta la aplicación de sistemas inteligentes para una estación meteorológica, la cual es un instrumento destinado a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas, ahora, en el sistema embebido del presente proyecto los datos generados son incorporados en un sistema neuronal para la predicción de sequías y heladas a partir de modelos numéricos que usa los registros de los estudios de comportamientos climáticos. En cuanto al sistema embebido se desarrollaron modelos de redes neuronales basados en neuronas de tipo "ADALINE", para predecir la ocurrencia de sequías y heladas, a partir de datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y radiación solar global. El entrenamiento y la validación de red neuronal se realiza comparándola con un sistema estadístico, donde se enfatiza que la principal característica de este tipo de red es que es retroalimentada usando control estocástico, por lo cual, el sistema inteligente tiende a ser un sistema experto. Se construyó una estación meteorológica con sensores especializados, que se caracterizaron por el uso de lógica difusa para su incorporación dentro del sistema embebido. Los resultados muestran un rendimiento adecuado para la región de uso y una tendencia de comportamiento no lineal para la estimación de fenómenos de heladas. Técnicamente la estación climatológica contiene un sistema de Internet de Cosas (IoT), esto permite la interconexión, la adquisición y la supervisión de información de forma remota a través del acceso a los servicios de Internet, retroalimentando al usuario con datos de campo en forma continua. El sistema es autosustentable a través del uso de células solares.

Self-powered Smart Remote Weather Monitoring Station based on The Embedding Wireless Network IoT for Frost Prediction

Abstract

The present work presents the application of intelligent systems for a weather monitoring station, which is an instrument to measure and register various meteorological variables, where the generated data are incorporated in a neural system for the frost prediction from numerical models using the studies records of climatic behavior. In the micro-processed system, the neuronal network models based on ADALINE neurons were developed to predict the frosts occurrence, based on meteorological data on temperature, relative humidity, precipitation, wind speed and direction, atmospheric pressure and global solar radiation. The training and validation of the neural network is done by comparing it with a statistical system, where it is emphasized that the main characteristic of this type of network is that it is fed using stochastic control, so that the intelligent system tends to be an expert system. A meteorological station was built with specialized sensors, which were characterized by the use of fuzzy logic for incorporation into the embedded system. The results show a suitable performance to the region of use and a tendency of nonlinear behavior for frosts phenomena estimation. Technically the climatological station contains a system of Internet of Things (IoT); this allows interconnecting, acquiring and monitoring information of remote form through access to internet services, which allows feed back to the user with field data in continuous form. The system is self-sustaining through the use of solar cells.

Keywords: Self-powered weather system, Smart Remote Station, Embedding Wireless Network, Frost Prediction, Internet of Things, climatological fuzzy-logic

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Hay muchas definiciones posibles para una Wather Smart Station (WSS). Una WSS emplea productos y servicios innovadores junto con el control inteligente, el control, la comunicación y las tecnologías de autoconexión remotas con el fin de (i) facilitar la conexión y el funcionamiento de los bloques de datos y tecnologías; (ii) permiten a los consumidores desempeñan un papel activo en la optimización de la operación del sistema; (iii) reducir significativamente el impacto en el medio ambiental; (iv) preservar o mejorar el nivel de fiabilidad del sistema, la calidad de servicio y seguridad. WSS puede ser considerada como una evolución en lugar de una revolución de las redes de datos existentes (Abido et al., 2014). Esta evolución está liderada por el intercambio simbiótico entre las tecnologías de la red de telecomunicaciones y la Información y la Comunicación (TIC). Las TIC son instrumentos, como Sensores Inteligentes (SI), para supervisar el estado de la red, la red de comunicaciones por medios inalámbricos para recoger y datos mediante sus arquitecturas computacionales para el procesamiento y transporte de datos. A SI se puede considerar como un sistema no lineal y variable en el tiempo complejo, donde elementos heterogéneos, incluyendo factores exógenos, son altamente interconectados mediante el intercambio de energía y de información. Inteligencia Computacional (IC) técnicas de modelado y ofrecen soluciones algorítmicas en el contexto SI (Li et al., 2015). Técnicas TIC conocidas adoptadas en el contexto SI incluyen la programación dinámica usando redes neuronales y sistemas de inferencia difusos para la predicción de heladas en invernaderos usando internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial e ingeniería del conocimiento (Castañeda y Castaño, 2017). La recopilación de medidas heterogéneas en los sistemas modernos de WSS es de suma importancia. Por ejemplo, las mediciones disponibles se pueden utilizar para hacer frente a diversos problemas de reconocimiento de patrones y la minería de datos importantes sobre las TIC. Sobre la base de los datos disponibles, diferentes tipos de problemas podrían ser formulados (Chavez et al., 2014). Se propone un clasificador basado en el análisis discriminante lineal (LDA). Las informaciones relativas a las condiciones meteorológicas, información-latitud y longitud, y mediciones de magnitudes físicas (por ejemplo, temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y radiación solar global) relacionadas con la producción agrícola de la entidad se han tenido en cuenta como medio de prueba y validación de la estación climatológica implementada sobre cultivos en invernadero, debido a que una tendencia tecnológica en la producción agrícola de México de los cultivos en invernaderos es utilizarlos como un medio de producción continua de productos, estas condiciones en un entorno abierto son difíciles de generar (Rodríguez et al., 2015). La mayoría de las plantas cultivadas en invernaderos son especies de estación cálida, adaptados a las temperaturas promedio en el rango de 17 a 27 grados centígrados (°C), con límites aproximados inferior y superior de 10 y 35 °C. Si la media mínima de temperatura exterior es inferior a 10 °C, el invernadero es probable que requiera calefacción, particularmente por la noche. Cuando la media máxima temperatura exterior es inferior a 27 °C, la ventilación evitará la temperatura interna excesiva durante el día; Sin embargo, si la temperatura máxima promedio es de menos de 27 o 28 °C, por lo cual, el enfriamiento artificial puede ser necesario. La temperatura máxima de efecto invernadero no debe exceder de 30 a 35 °C durante períodos prolongados (Qaryouti, 2013). El uso de dispositivos para monitorear condiciones climáticas y las variables que intervienen en el cultivo de efecto invernadero, que se realiza por diversos protocolos de comunicación telemática, donde hay que tener en cuenta que un factor crítico en el control de la humedad dentro del invernadero es el agua, tanto en términos de cantidad y calidad, es crucial para el éxito de la producción de efecto invernadero horticultura, adjuntando a ello el problema de sequías y heladas temporales (Ljung, 1999). A menudo, como los suministros de agua son limitados, es necesario el uso de agua de baja calidad para el riego. Cuando los productores se enfrentan cada vez más problemas relacionados con el agua de baja calidad, lo que es los parámetros físicos y químicos más importantes de la calidad del agua. La presencia de sales solubles con alto contenido de agua de riego es uno de los factores más limitantes en la producción de cultivos de invernadero (Chavez et al., 2014). Una vez proporcionada la calidad del agua como una variable fundamental de los canales debe ser la monitorización de parámetros principal de un invernadero es la temperatura, en este trabajo se realiza a través de un sistema integrado que se conecta a una página web, y para calcular la temperatura en el entorno de regulación del efecto invernadero se utiliza una red neuronal artificial (ANN). Con el apoyo de los sistemas borrosos, es posible aplicar la inteligencia artificial e ingeniería del conocimiento a sistemas agrícolas sustentables, los cuales permiten incrementar la rentabilidad de las cosechas mediante el aprovechamiento de la energía solar en el deshidratado de productos agrícolas se ha vuelto cada día más común debido a los altos rendimientos en los productos post-cosecha (Castañeda et al., 2014), en este sentido, los sistemas borrosos se utilizan para clasificar la información imprecisa de predicción de helada por la Red Neuronal Artificial (ANN) y genera los conjuntos borrosos de muy baja, baja, media, alta y muy alta probabilidad de ocurrencia del fenómeno meteorológico de Helada, donde se aplican algoritmos de aprendizaje de retro-propagación (BP) generando un sistema borroso adaptativo denominado neuroborroso que aprovecha la capacidad de aprendizaje para busca encontrar una solución lo más cercana a la óptima, de esta forma se elimina el problema de que las ANN operen como una caja negra (Castañeda et al., 2012).

ISBN 978-607-8242-11-5

MATERIALES Y MÉTODOS

La implementación del prototipo embebido es en Invernaderos localizados en Tulancingo del Estado de Hidalgo, el hardware del sistema embebido de acuerdo con la Fig.1 es la siguiente, los datos obtenidos por la estación meteorológica son enviados de forma remota por un protocolo inalámbrico y capturado por los protocolos de intercambiador de protocolos de intercambiador está constituido por un hardware integrado para Intel Edison (DEV-13024), una Micro Sd Card (base de datos) Bluetooth (LMR-12580) y una red GSM / GPRS (CEL-09 607) dispositivo celular consulta de datos. Los protocolos de la estación meteorológica usa energías renovables mediante celdas solares (PRT-13784), controladores de carga (CT-SOLAR1X5A-12 / A2), baterías de Ion de litio de 3.7 V a 6Ah (PRT-13856) y convertidores DC/DC de conexión a celdas solares (PRT-12885) para el uso de los dispositivos del sistema. La implementación de software de sistema integrado de acuerdo a la Fig. 1 es la siguiente, los datos generados por la estación meteorológica se concatenan y se envían mediante un protocolo serie remoto inalámbrico a 2,4 GHz. con una velocidad de transmisión de 115,200 bauds. Estos capturado por los protocolos de intercambiador de protocolos de intercambiadores, los datos son manipulados por un Intel Edison que tiene un sistema operativo android y la trama de datos se desfragmenta para Analizador Léxico Sintáctico implementado en el dispositivo, los datos adquiridos se almacena en una SD Card usando una base de datos y solicitada a través de un dispositivo celular GSM / GPRS mediante una WAP de tal manera que genera un IP local por una máquina virtual para la posterior conexión y visualización de datos a un sitio web (https://www.embeddedcastaneda.com/weather/weather.html). El esquema de la fig. 1 se implementa utilizando SparkFun Weather Shield (DEV-12081), que recoge los datos utilizando la información de tecnología inalámbrica XBee-Wifi (LMR-12570) de una estación meteorológica remota externa. La estación meteorológica que le concede el acceso a la presión barométrica, la humedad relativa, la luminosidad y la temperatura. También hay conexiones a sensores, como la velocidad del viento, dirección, pluviómetro (conectores RJ11 para sensores de lluvia y viento) y un GPS para la ubicación (módulo GPS GP635T). El prototipo utiliza los circuitos electrónicos para las siguientes variables: humedad HTU21D, presión barométrica MPL3115A2 y sensores de luz ALS-PT19. Por último, Weather Shield puede operar desde 3.3V hasta 16V y contiene reguladores de voltaje y traductores de señal para todos los dispositivos, donde se integran a las variables de la estación meteorológica con software integrado en una plataforma con embebida montado en un dispositivo de Intel Edison, que a su vez contiene un menú de operación que se accede a través de comunicación serial.

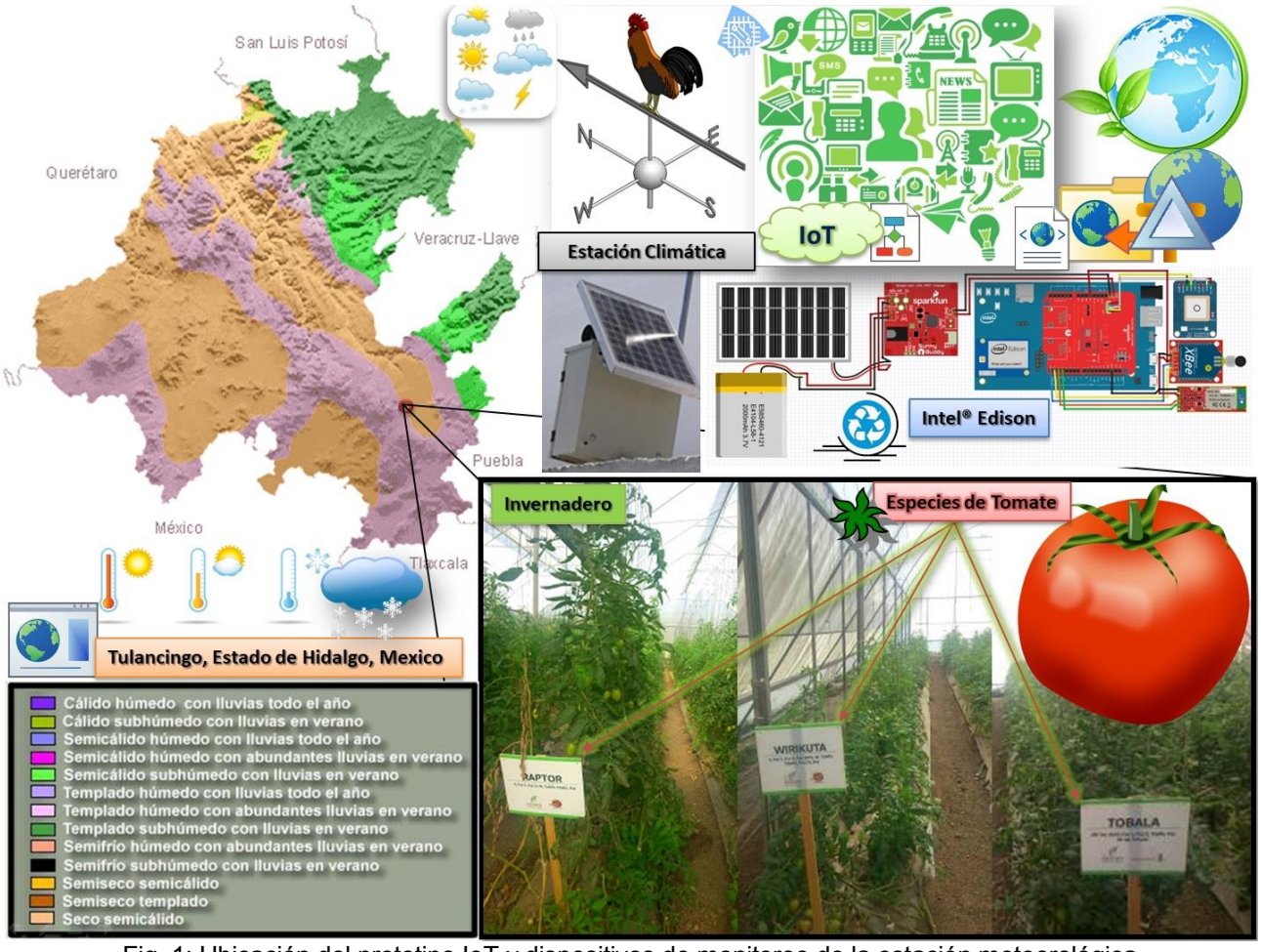


Fig. 1: Ubicación del prototipo IoT y dispositivos de monitoreo de la estación meteorológica

ISBN 978-607-8242-11-5

Para implementar el sistema es campo se requiere que los modelos matemáticos propuestos para predecir las temperaturas límites para la presencia del fenómeno climatológico de helada, por lo cual, para su predicción de presencia en este estudio se utiliza inteligencia artificial, específicamente la combinación de redes neuronales y sistemas difusos a través de una página web, por lo que su comportamiento se basa en el análisis de las siguientes variables de entrada: Temperatura del aire exterior T_0, Humedad relativa del aire exterior R_{ho}, Velocidad del viento W_s, Flujo global de la radiación solar S_r y Humedad relativa del aire interior R_{hi}; siendo la temperatura del aire dentro de la salida variable de T_i, un esquema de las variables integrados de incorporar sistema de entrada y salida se muestra en la Fig. 2, donde el algoritmo de redes neuronales y sistemas borrosos es integrado en el código fuente de la página web.

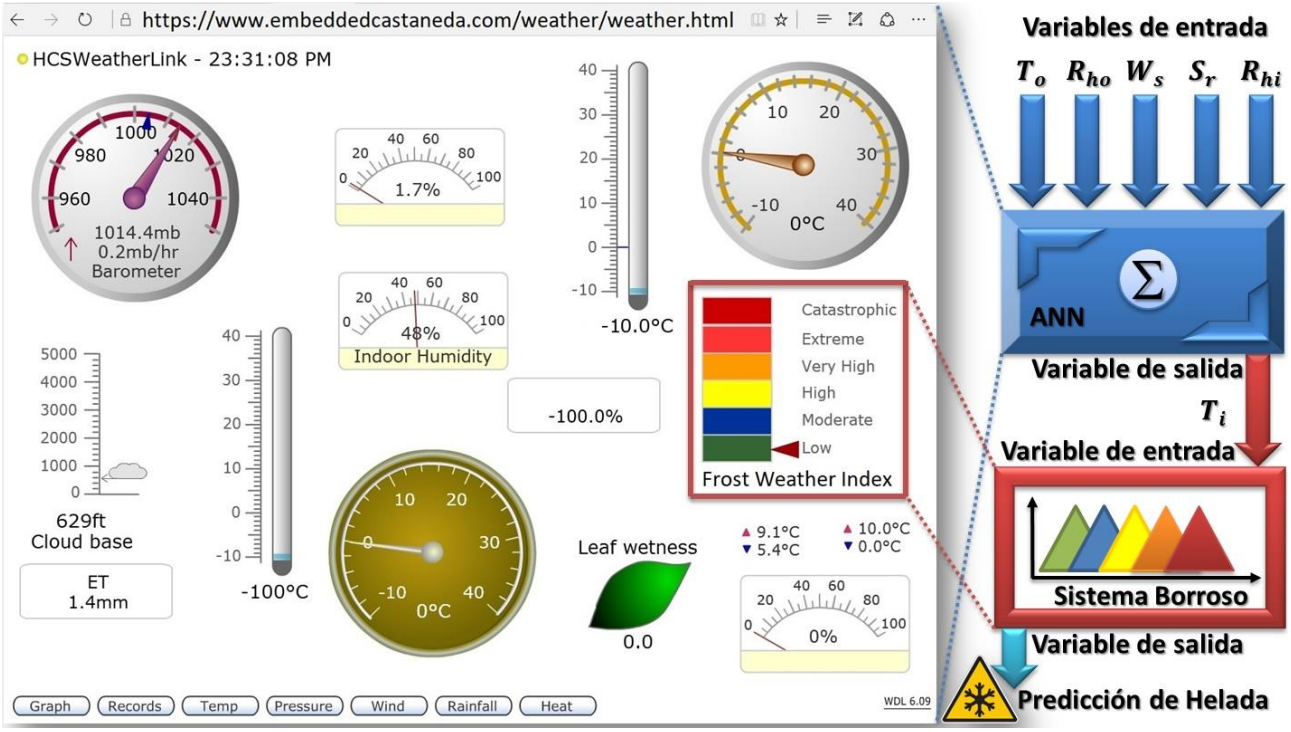


Fig. 2: Diagrama de bloques del sistema para predecir la temperatura de intemperie y presencia de heladas

EL MODELO

La metodología de redes neuronales artificiales que se utiliza en este trabajo y trata de emular circuito neuronal y se obtienen las neuronas de interconexión. Para este modelo matemático simplificado de la neurona biológica se supone una técnica del mínimo error cuadrático como un elemento lineal adaptativo (ADALINE). Este modelo aplicado a la predicción de heladas ofrece un entrenamiento supervisado tomando en cuenta el posible mínimo error cuadrático obtenido al calcular la salida de la neurona, se describe matemáticamente por la ecuación (1) y representa una generalización propuesto por Bernand Widrow y Ted Hoff en 1960:

$$I = \sum_{i=1}^{n} W_i x_i \tag{1}$$

A partir de la ecuación (1) se tiene la base para realizar las ponderaciones de la neurona y recibir un umbral por aportes de N, los cuales se asocian con un conjunto de vectores de ponderaciones sinápticas (W_i, donde i = 1 ... N). Considerando que x es el vector de entrada, una vez calculado el error se usa para ajustar las ponderaciones de W, donde para este sistema utiliza la regla delta que tiene la siguiente forma de la ecuación (2).

$$W_{nuevo} = W_{anterior} + \frac{\beta \cdot E \cdot x}{|x|^2} \tag{2}$$

A partir de la ecuación (2) se tienen los parámetros, β que es la contante de aprendizaje y puede tomar el valor entre cero y uno, E que es el error calculado, x que es el vector de entrada y w que es el vector de ponderaciones. La formación de una ANN se lleva a cabo mediante un procedimiento llamado retroalimentación (BP), el cual es un algoritmo de aprendizaje basado en que es un proceso supervisado. Este método requiere un conjunto de patrones de entrenamiento, y sus correspondientes salidas deseadas, y autónomamente ajusta los pesos de conexión entre las neuronas. La corrección de los pesos se realiza de acuerdo a las reglas de aprendizaje impuestas y por lo tanto, obtiene una metodología de obtención de datos (Uchida et al., 2003). En la versión supervisada de la ANN el ajuste de los parámetros de un modelo utilizado para representar un sistema se denomina Sistema de identificación. Métodos de identificación del

ISBN 978-607-8242-11-5

sistema a menudo se clasifican en dos grandes categorías: modelos de caja gris y negra. En comparación con el modelado directo, que se rige por las leyes físicas del sistema, estos modelos son muy adecuadas para la construcción de un modelo matemático en el mecanismo del sistema no se está claro, o cuando sus propiedades cambian de una manera impredecible (Zhang et al., 1998). El método de la caja gris es una formulación del modelo en el que los parámetros son trazables a principios físicos reales. El método de la caja negro relaciona mide matemáticamente entradas a las salidas medidos en el que los parámetros del modelo se transforman sin ningún significado físico tradicional. Los modelos de caja negra no requieren conocimientos previos del sistema, que puede ser una ventaja si la información sobre la dinámica del sistema es limitado; sin embargo, implica el problema de seleccionar una estructura adecuada para el modelo. Otra ventaja de este tipo de modelos es la posibilidad de obtener un modelo amplio con un conjunto relativamente pequeño de mediciones. El modelo puede ser mejorado como se introducen nuevos datos y aprende con respecto al tiempo, comportándose como un sistema experto. En comparación con un modelo de caja gris, el enfoque de la caja negra requiere menos tiempo y esfuerzo para desarrollarse. Por lo general, en un modelo de caja negra, los métodos no estadísticos o métodos estadísticos se utilizan para formular la relación entre entradas y salidas. El modelo de red neuronal está determinada por tres factores: 1) la estructura topológica de la red; 2) las características de las neuronas; y 3) el algoritmo de la lluvia. La ANN implementado en este estudio es un Multi-Layer (ML) que incluye una capa de entrada de 5 nodos, una capa oculta con número variable de nodos ocultos y una capa de salida que tiene un solo nodo. Las variables de entrada en la ANN son: temperatura del aire exterior T_0, Humedad relativa del aire exterior R_{ho}, Velocidad del viento W_s, S_r Flujo de radiación solar, Humedad relativa del aire en el interior R_{hi}; siendo la temperatura del aire dentro de la salida de Ti variable. La arquitectura de los modelos ANN se basa en un biológico sistema neuronal. La ANN permite la estimación de modelos posiblemente no lineales sin necesidad de especificar una forma funcional precisa. ANN de pueden ser vistos como sistemas de procesamiento paralelo y distribuido que consisten en un gran número de procesadores conectados simples y masivamente llamadas neuronas retroalimentadas (Zhang et al., 1998). Cada neurona individual consiste en un conjunto de entradas sinápticas, a través del cual se reciben las señales de entrada. Entonces, las activaciones de entrada se multiplican por los pesos sinápticos y se realiza la sumatoria de las entradas ponderadas. La activación de salida se determina por la aplicación de una función de umbral para la suma. La función de umbral puede ser un una función no lineal que decide la salida de la neurona lineal y la cual es retroalimentada como un umbral de activación mediante una entrada de control. El esquema de la Red Neural Artificial (ANN) implementa y la estructura de la neurona tipo ADALINE se muestra en la Fig. 3.

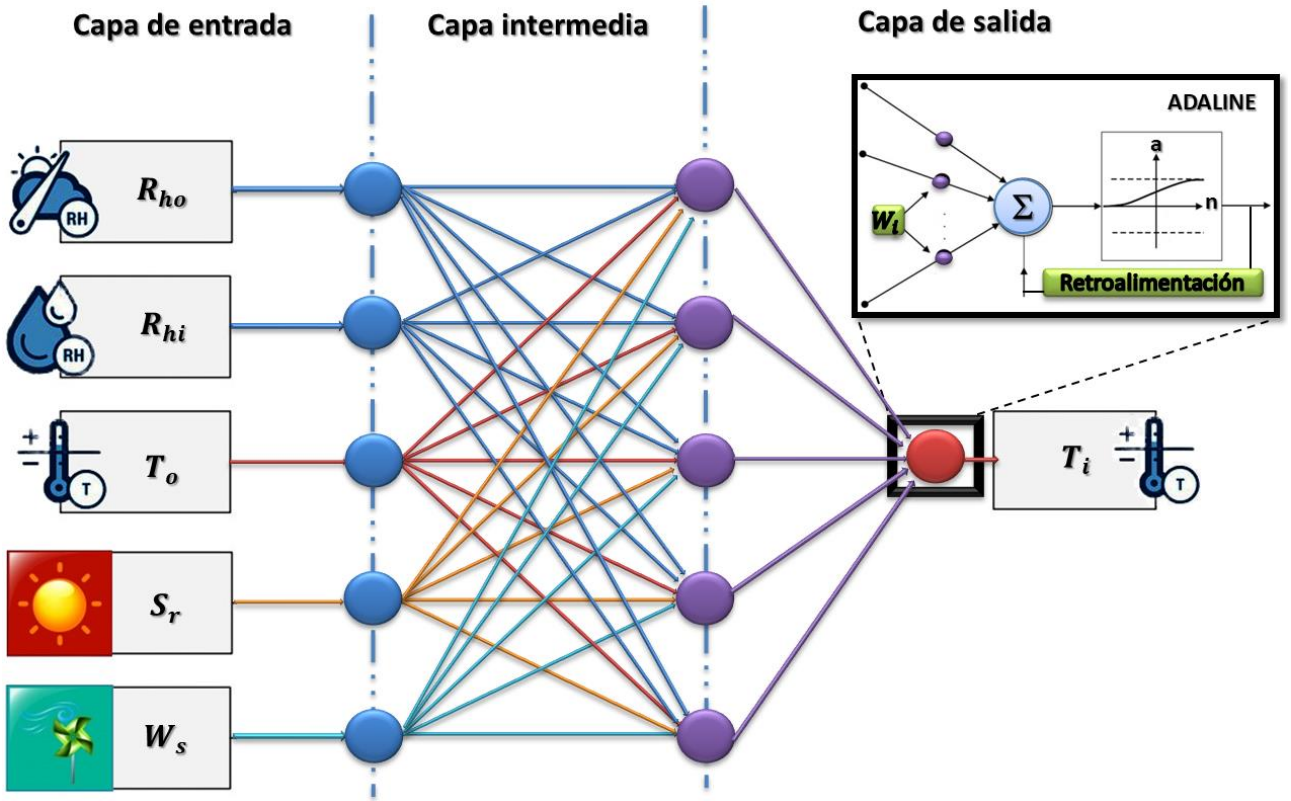


Fig. 3: Red neuronal artificial usada en el proyecto

Por otra parte, la denominada lógica borrosa permite tratar información imprecisa, como lo es la temperatura de heladas en términos de conjuntos borrosos. La teoría de conjuntos borrosos parte de la teoría clásica de conjuntos, donde se añade una función de pertenencia o inclusión ($\mu_\epsilon(x)$) al conjunto, la cual está definida

ISBN 978-607-8242-11-5

como un número real entre 0 y 1, lo cual indica en que la variable x está incluida en el concepto representado por el conjunto de la etiqueta ϵ, es decir, los conjuntos borrosos permiten agrupar objetos o sucesos por el valor de una cierta magnitud de salida de la ANN, como lo es la predicción de temperatura, para clasificarse en términos de baja, media y alta posibilidad de una helada. La función de pertenencia utilizada es la triangular, debido a que esta función es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de cero para un rango de valores estrechos y cercanos al punto c de la Fig. 4. También es factible implementar la función tipo π, la cual tiene forma de campana gaussiana y estadísticamente resulta adecuada para los conjuntos definidos en torno a un valor c como medio, normal y cero.

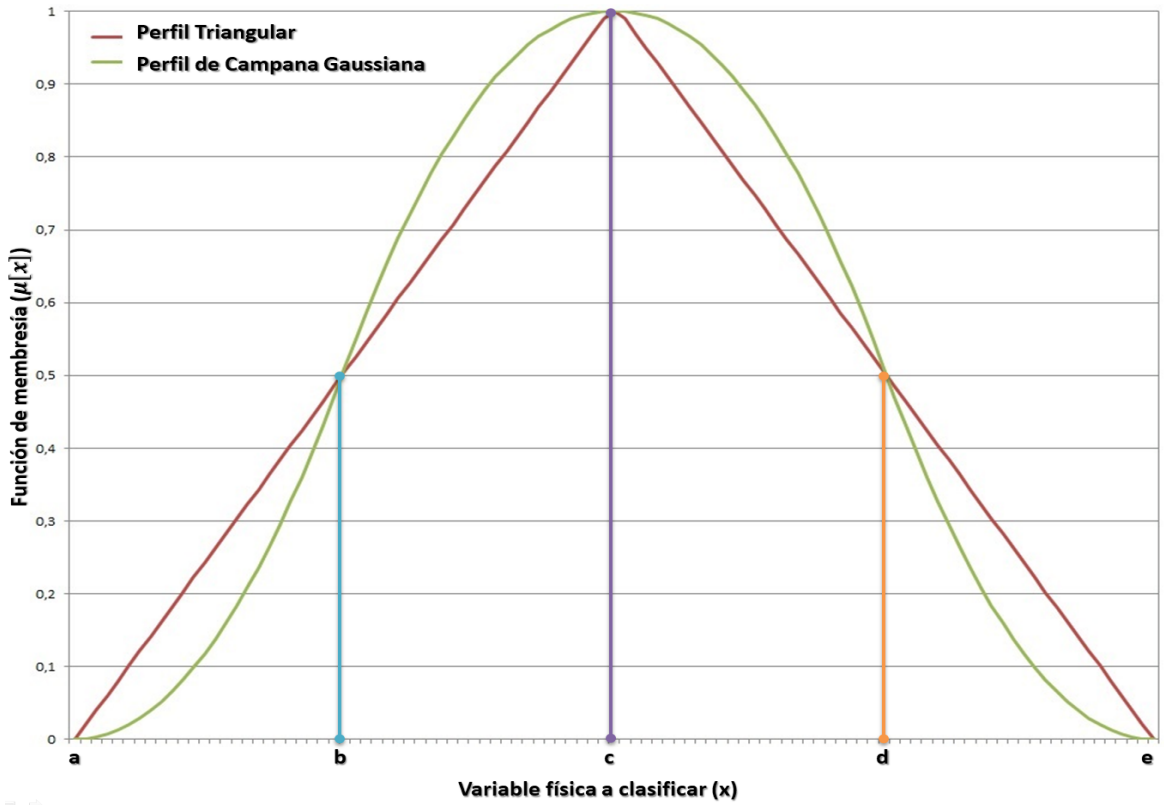


Fig. 4: Función de tipo Triangular y función de tipo π del modelo neuroborroso usado en el sistema

La Fig. 4 muestra la forma en que están dispuestos ambas funciones de membresía, matemáticamente la función triangular se define mediante la ecuación (3):

$$\mu[x]_{\Delta} = \begin{cases} 0 & x < a \\ \left[\dfrac{x-a}{c-a}\right] & a \le x \le c \\ \left[\dfrac{e-x}{e-c}\right] & c \le x \le e \\ 0 & x > e \end{cases} \tag{3}$$

De la Fig. 4, estadísticamente la función π descrita por la campana de Gauss y se representa matemáticamente mediante la ecuación (4):

$$\mu[x]_{\pi} = \begin{cases} 0 & x < a \\ \left[2 \cdot \left(\dfrac{x-a}{c-a}\right)^2\right] & a \le x \le b \\ \left[1 - 2 \cdot \left(\dfrac{x-a}{c-a}\right)^2\right] & b \le x \le c \\ \left[1 - 2 \cdot \left(\dfrac{e-x}{e-c}\right)^2\right] & c \le x \le d \\ \left[2 \cdot \left(\dfrac{e-x}{e-c}\right)^2\right] & d \le x \le e \\ 0 & x > e \end{cases} \tag{4}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del sistema embebido sobre de la estación meteorológica se muestran en la Fig. 5. Las variables trazadas son: temperatura exterior, humedad externa, velocidad del viento, la radiación solar, la temperatura interna y la humedad interna. Es de destacar que estas variables se utilizan para establecer los límites de operación temperatura ANN utilizados para predecir heladas apoyado en un sistema borroso.

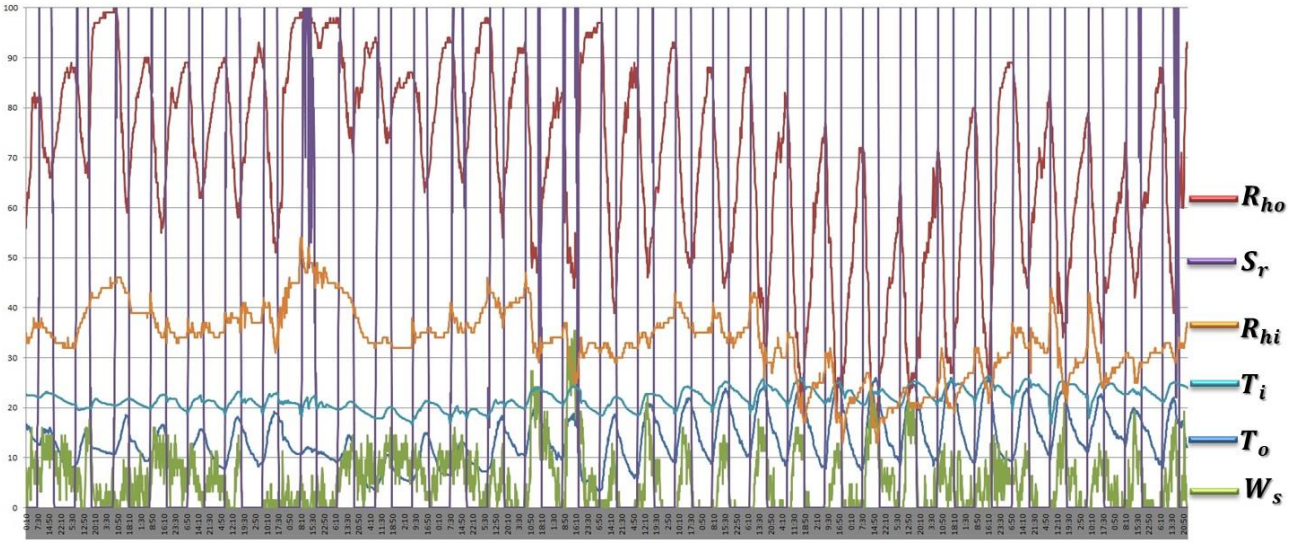


Fig. 5: Resultados obtenidos de las mediciones en línea de la estación meteorológica

De la Fig. 5, la implementación de las variables ANN obtenidos de la temperatura, implica que se realizaron y ensayaron varios modelos de RNA de acuerdo con su capacidad de predicción de temperatura en el interior. Los datos se dividió en cuatro grupos relacionados con las estaciones del año, con la participación sólo dos estaciones: verano e invierno para esta investigación. Las 144 muestras se consideran como equivalentes a un día. Se analizó la estimación de la temperatura y el error de los modelos de esa temporada de verano mediante la Fig. 6, donde se muestran la precisión del modelo ANN respecto a la temperatura de predicción de heladas.

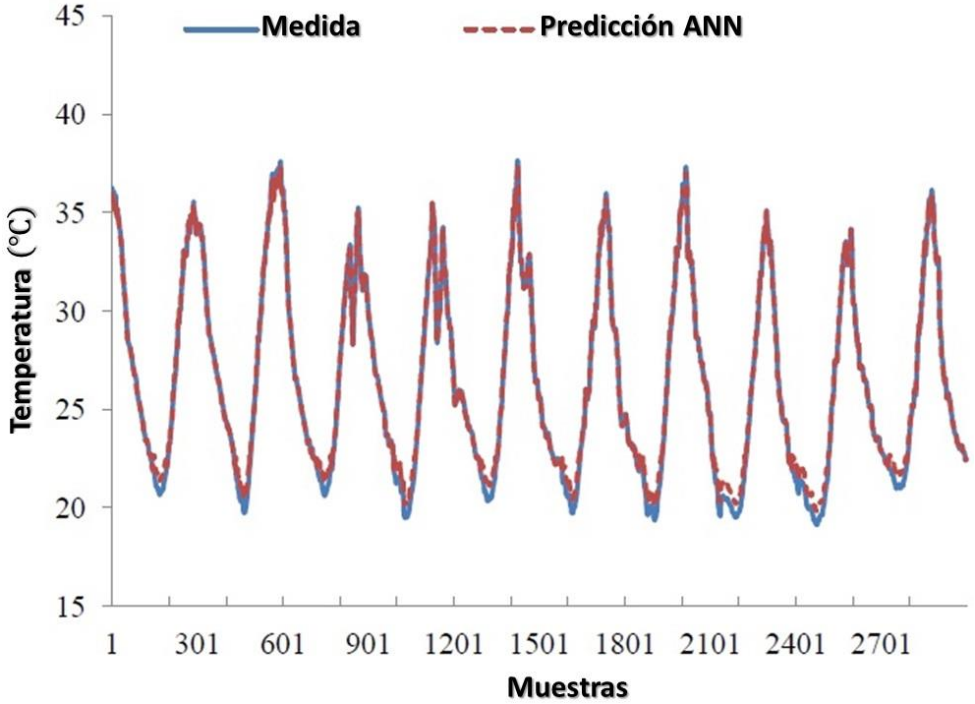


Fig. 6: Datos originales contra resultados de la ANN para predicción de temporal de heladas

Los resultados de los datos estimados se comparan con los datos medidos; se observó que el modelo ANN tiene un error mínimo en comparación a la medida. El resultado del modelo implementado para la predicción de la temperatura en la temporada de sequía, se observó que el modelo ANN tiene un error mínimo en comparación con la medida, el resultado de las mejores modelos implementados para la predicción de la temperatura en el interior del efecto invernadero; a saber, los modelos de ANN es alcanzar mejores resultados

ISBN 978-607-8242-11-5

de la predicción de la temperatura para condiciones de helada o sequía que se pretende a medir. Los resultados estadísticos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados estadísticos de la WSS.

	Dirección viento	Lluvia (mm)	Presión (mbar)	Rad. solar (wm2)	Temp. (°C)	Vel. viento (m/s)
Promedio	22.44566	0.125785	4.067893	161.6343	15.47888	65.34504
Mediana	1.010000	0.000000	4.030000	6.850000	14.29000	28.10000
Máximo	889.0000	4.466000	8.060000	974.4000	22.94400	355.2000
Mínimo	0.000000	0.000000	0.500000	0.600000	3.270000	0.000000
Deviación Estandar	123.8938	0.730367	1.485945	247.6024	3.574215	104.9733
Asimetría	5.701295	5.622666	0.108345	1.533511	-0.089841	2.266487
Curtosis	33.87947	32.61915	2.626957	4.212641	3.874858	6.401018
Jarque-Bera	10925.91	10121.16	1.876664	109.6776	8.043087	323.8240
Probabilidad	0.000000	0.000000	0.391280	0.000000	0.017925	0.000000
Suma	5431.850	30.44000	984.4300	39115.50	3745.890	15813.50
Suma Desv. Cuadrada	3699273.	128.5582	532.1360	14774978	3078.778	2655676.
Observaciones	242	242	242	242	242	242

Finalmente, se implementa un sistema difuso que considera particiones de las variables lingüísticas de entrada y salida como base de las reglas borrosas, que depende del método de borrosificación, inferencia y desborrosificación usando aspectos relativos a la eficiencia y adaptación, los resultados se mapean resultado la Fig. 7, donde se clasifica en 5 estados probables de salida dependiendo de la temperatura de externa ($\boldsymbol{T_o}$) y la temperatura interna que es predicción de la ANN, clasificándose en Helada dura (HF), Helada severa (SF), Helada suave (MF), Posible helada (PF), Sin helada (NF).

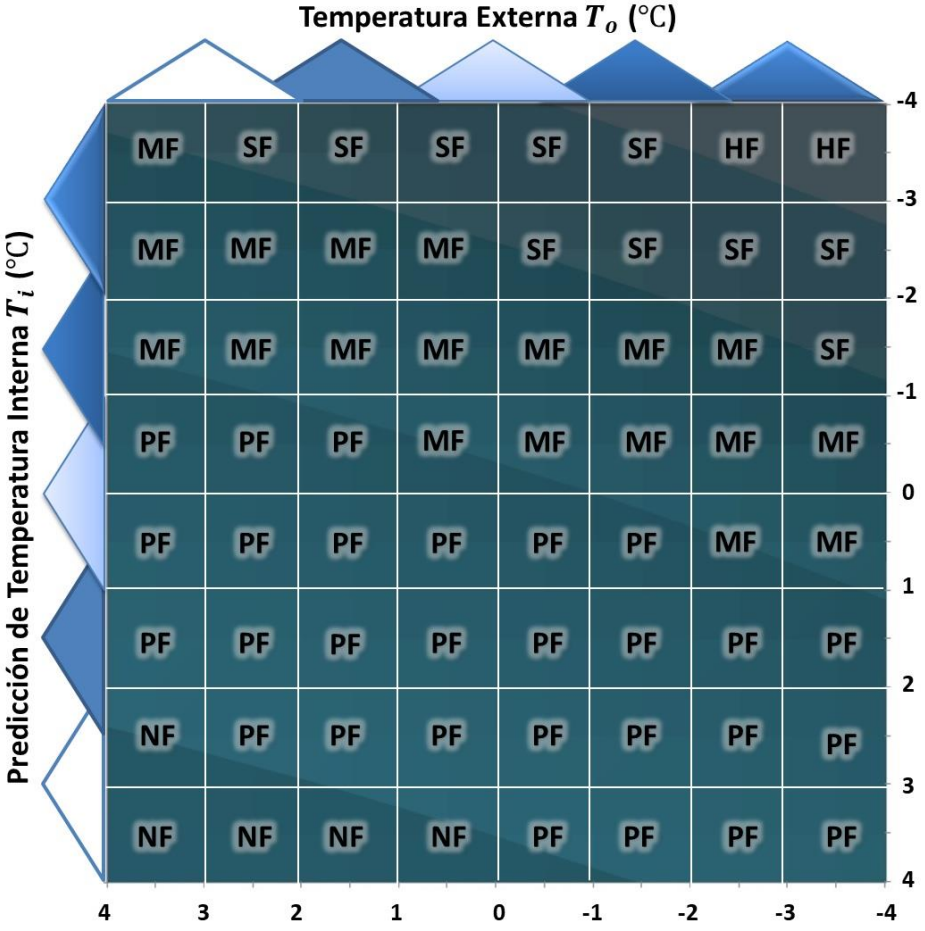


Fig. 7: Sistema borroso aplicado al sistema de predicción con ANN

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron medidas lineales autorregresivas con modelos de redes neuronales artificiales (ANN), donde se utiliza están metodologías para predecir el comportamiento dinámico de la temperatura para predecir heladas como un clima extremo. El predictor de temperatura utiliza una red neuronal artificial tipo ADALINE, que es entrenada por un algoritmo tipo backpropagation (BP), y de la validez de los datos se realizó mediante el análisis del método de la varianza (ANOVA), también en comparación con el ANN modelo. Para ello, las mediciones de temperatura exterior, la humedad relativa del aire exterior, velocidad del viento, el flujo global de la radiación solar, la humedad relativa del aire en el interior se utilizaron como las variables de entrada al sistema, y diferentes estructuras de modelo ANN fueron probados. Las variables climáticas externas proporcionadas por la estación meteorológica fueron divididos en dos secciones principales correspondientes a las temporadas de sequías y heladas, con el fin de desarrollar y evaluar el modelo y los datos de la muestra ANN. Por medio de la programación, se calcularon los índices que representaban a cada una de las estructuras, la selección de los modelos con una mejor predicción de las condiciones reales de temperatura interior. El método estadístico evapotranspiración se utilizó para analizar la variación de las temporadas que comparan la red neuronal y los resultados del modelo ANN frente a los datos real. Los mejores resultados de predicción de la temperatura interior se obtuvieron por las estructuras de modelos de RNA; con un 95% de nivel de confianza, con un coeficiente de determinación entre 0,9549 y 0,9590, para ello se implementa un sistema borroso tipo MIMO (Multiple Input Single Output) con una salida que contiene 5 particiones borrosas de función triangular, lo que permite manejar de forma adecuada el concepto vago e impreciso del fenómeno meteorológico de una helada, donde la base de reglas es mediante un mapeo de la temperatura externa contra la temperatura externa de predicción de la ANN, lo cual es implementado en invernaderos por su requerimientos mínimos de memoria usando el concepto de Internet de las Cosas (IoT).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento por parte del Fondo mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Zacatecas, Convocatoria 2009-01, con el proyecto ZAC-2009-C01-121774, el cual hizo posible la realización de este proyecto, así como el financiamiento del Fondo mixto CONACYT- Gobierno del Estado de Querétaro (QRO-2012-C01-191356) por su apoyo económico para el desarrollo de esta investigación. Los autores desean agradecer a René Preza-Cortés de FATA-UNAM por su apoyo técnico.

REFERENCIAS

Abido, M.A., El-Alfy, S.M., Sheraz, M.; "*Computational intelligence in Smart grids: case studies, in: Computational Intelligence for Decision Support in Cyber-Physical Systems*", Springer: 265–292 (2014).

Castañeda-Miranda, A., Castaño, V.M.; "*Smart frost control in greenhouses by neural networks models. Computers and Electronics in Agriculture*", 137, 102-114 (2017).

Castañeda-Miranda, A., Ríos, G.J., Meza, J., Ortega, J.A., Herrera, G., Trejo, M.; "*A continuous production roselle (Hibiscus-Sabdariffa L.) dryer using solar energy*", JFAE, 12(1), 96-104 (2014).

Castañeda-Miranda, A., González, A., Guzmán, R., Oscar G., Ibarra, O.G.; "*Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso*", Acta Universitaria, 22(3), 14-19, (2012).

Chavez, C., Fuentes, C., Brambila, F., Castañeda, A.; "*Numerical Solution of the Advection-Dispersion Equation: Application to the Agricultural Drainage*": JAST, 16(6), 1357-1388 (2014).

Li, N., Wang, K., Cheng, J.; "*A research on a following day load simulation method based on weather forecast parameters*". Energy Conversion and Management: 103, 691–704 (2015).

Ljung, L.; "*System identification, Theory for the User*", Prentice-Hall Inc. (1999).

Patil, S.L., Tantau, H.J., Salokhe, V.M.; "*Modelling of tropical greenhouse temperature by auto regressive and neural network models*", Biosystems Engineering, 99, 423-431 (2008).

Qaryouti, M.; "*Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops, Food and Agriculture*", Organization of the United Nations Inc. (2013).

Rodríguez F., Berengel, M., Guzmán, J.L., Ramírez, A.; "*Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*", Springer Inc. (2015).

Uchida, H., Pieters, G., Deltour, M.; "*Modelling greenhouse temperature by means of auto regressive models*", Biosystems Engineering, 84, 147-157 (2003).

Zhang, G., Patuwo, E., Hu, Y.; "Forecasting with artificial neural networks: The state of the art", International Journal of Forecasting, 14, 35-62 (1998).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Diseño de un calentador de agua solar basado en un seguidor de red neuronal artificial opto-difuso

Daniel Arturo Olivares-Vera[1] y Alejandro Castañeda Miranda[2]
(1) Coordinador General, Facultad de Tecnologías de la Información, Universidad De-La-Salle Bajío, Av. Universidad 602, Col. Lomas del Campestre, León, CP 37150, Guanajuato-México.
(2) Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Facultad de Tecnologías de la Información, Universidad De-La-Salle Bajío, Av. Universidad 602, Col. Lomas del Campestre, León, CP 37150, Guanajuato-México.
e-mail: dolivares@delasalle.edu.mx, acastaneda@delasalle.edu.mx

Resumen

Los sistemas actuales de calentamiento de agua tienden a usar energías limpias, por ende los calentadores que dependen de combustibles fósiles tienden a desaparecer conforme este recurso se agota, en necesidades como el uso de sistemas de calefacción de agua, es muy común utilizar gas butano, el cual tiene el inconveniente de ser fugaz, explosivo e intoxicar sin previo aviso. En la actualidad el uso de sistemas automáticos ha sido de gran utilidad para el desarrollo de la investigación en energías renovables, en el presente trabajo se desarrolla un sistema automático para colectar la máxima radiación solar usando sistemas microprocesador. Se hace una breve descripción del funcionamiento de este dispositivo y se implementa una máquina de estados finitos embebida con el apoyo de una red neuronal de tipo hebbiana, para el control de motores en base a la información colectada por sensores de radiación, mismo que rotaran el eje del sistema de espejos con una resolución de hasta 0.18 grados. Los resultados obtenidos se analizan y se discuten en términos del comportamiento de la intensidad de la radiación, la funcionalidad se evalúa en términos de la rotación del seguidor solar.

Design of a Solar Water Heater Based on a Opto-diffuse Artificial Neural Network Follower

Abstract

A present automated systems has been very useful for the research & development, in this paper consist in an automated system by collect the solar radiation with angular displacement used embedded controlled system. In this paper, describing the operation of device is an embedded finite state machine, the algorithm used is a neural networks in C used an microcontroller system, the program emulate the behavior Hebbian neuron, the neural network controlled the orientation movement by tilt motor, where the close loop mechanical displacement is controlled by the information collected for radiation sensors, the mechanical displacement rotate the axis of mirror system with a resolution of 0.18 degrees. The results obtained are analyzed and discussed in terms of the radiation intensity; the functionality is evaluated in terms of the sun tracker rotation.

Keywords: Solar Heater, Neural Networks, Solar Follower.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Los sistemas actuales de calentamiento de agua tienden a usar energías limpias, por ende, los calentadores que dependen de combustibles fósiles tienden a desaparecer conforme este recurso se agota, en necesidades como el uso de sistemas de calefacción de agua, es muy común utilizar gas butano, el cual tiene el inconveniente de ser fugaz, explosivo e intoxicar sin previo aviso (Aliman et al., 2007), por otro lado existen también los sistemas de calentamiento eléctrico de agua estos llegan a consumir hasta un 57 % de la energía eléctrica en el sector habitacional (Bejan, 1988). Una posible solución a este problema se presenta en este trabajo, donde se propone un prototipo industrial o para fraccionamientos que implique el tener agua disponible con una temperatura en general aceptable. Los costos de calentamiento de sistemas hídricos que se han logrado con energías limpias cada vez se minimizan con respecto a los actuales que dependen eléctricos o flaméales, el inconveniente de los sistemas solares es el volumen de calentamiento actual en México, por lo tanto, al ser sistemas concebidos como caseros, no está contemplada una escala industrial, por ende, se propone el sistema mostrado en la figura 1, el cual consiste en un sistema para una red hídrica automatizada que permita el uso alterno de agua caliente con el uso de radiación solar, el sistema de control contempla el transmisor, el controlador, la válvula y el sistema de posicionamiento, el transmisor convierte los valores de temperatura en señales electrónicas, el controlador mantiene la señal de entrada constante para cada punto de consigna, la válvula de control convierte la señal de entrada electrónica a posición de su vástago y, por lo tanto, gobierna el caudal, el gasto y la resistencia fluídica usando como referencia el intercambiador de calor, este proceso es gobernado por un sistema autónomo que sigue la trayectoria del sol, cabe mencionar que los canales de distribución permiten mezclar diferentes procesos y elementos de forma remota, la telemetría transforma el proceso en un canal de información en un proceso auto regulable (Biaoua et al., 2008; Changa et al., 2008; Chen et al., 1992).

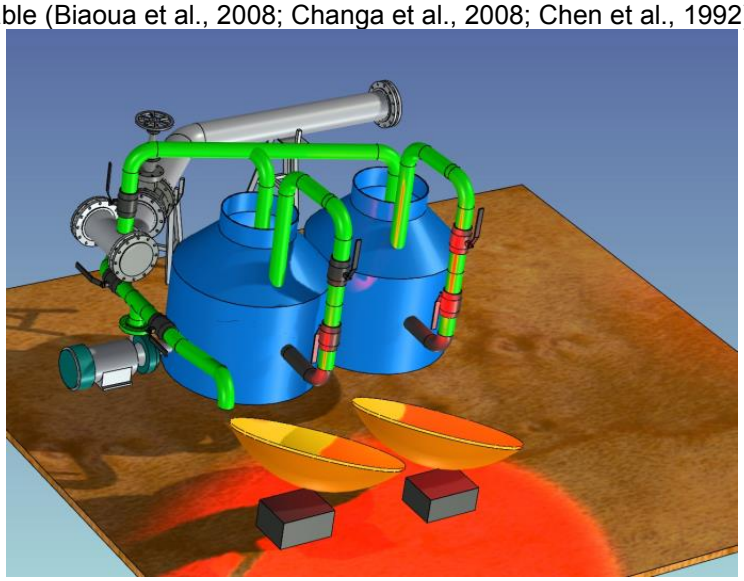


Fig. 1: Sistema para calentamiento de agua propuesto.

MATERIALES Y METODOS

El proceso térmico-hídrico propuesto, aprovecha las propiedades físicas de los líquidos a diferentes temperaturas, integrando la capacidad fluídica establecida por la ley de Boyle y la capacidad térmica propuesta por la ley de charles y Gay-Lussac , la cual es acotada mediante las propiedades de la materia y establecida por la intersección definida por el diagrama de fases del punto triple para el agua o cualquier otra substancia que se dilate al congelarse, ahora, considerando el parámetro definido por la termodinámica del proceso, la cual se muestra en la figura 2, se tiene que al usar materiales que son aislantes térmicos, la transferencia de calor se maximiza del medio externo al medio interno, según la segunda ley de la termodinámica, esto define la eficiencia de la máquina térmica con respecto al calor suministrado, dado que la variación de la temperatura causa un cambio de energía térmica del agua, a todo lo anterior hay que anexar el problema de presión hidrostática, por ende, las relaciones que debe respetar un controlador clásico debe tomar en cuenta todas las perturbaciones anteriores para generar un flujo caliente de líquido a su salida, la inteligencia artificial se ha dado a la labor de generar sistemas funcionales como cajas negras, donde se define una tabla de comportamiento que debe respetarse sin tomar en cuenta las leyes de control, esto lleva a una controversia de la funcionalidad de controladores proporcionales, integrativos derivativos (Controladores PID) con respecto a sistemas expertos, que usan inteligencia artificial, actualmente se mezclan sistemas difusos con redes neuronales que aprenden con respecto al tiempo. Cabe mencionar, que lamentablemente en México no se aprovecha el recurso natural que se tiene, como es radiación solar, la figura 3 muestra la distribución de energía solar a lo largo y ancho del país.

ISBN 978-607-8242-11-5

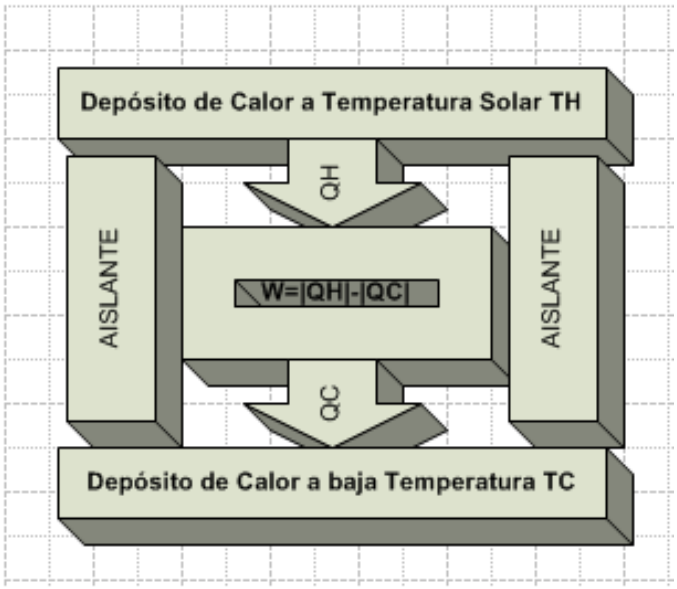


Fig. 2: Sistema de transferencia térmica usado en el prototipo.

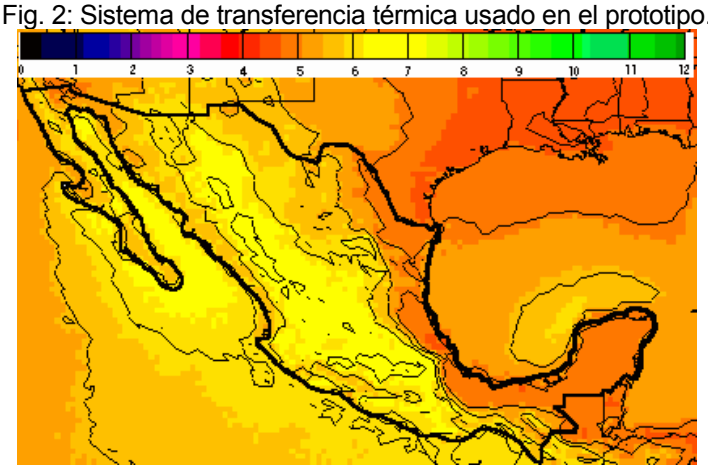


Fig. 3: Distribución de radiación solar en México.

En principio, el prototipo tiene su funcionamiento basado en un microprocesador, el cual es usado para el control de dos motores de DC que se encargan de la orientación de sistema reflector de radiación, el sistema motriz es alimentado desde una celda solar, lo que hace que el sistema sea autónomo e independiente de la estación del año en que se encuentre. , el prototipo se muestra en la figura 4. La funcionalidad del prototipo, en primera instancia, es simulada e implementada en Labview como se muestra en la figura 5, este desarrollo de debe a que, este esquema sirve como referencia para desarrollar el programa propietario, usando las interfaces, conectividad y la funcionalidad del programa de referencia, por lo cual, el programa microprocesado ocupa menos recursos del sistema embebido y transmite remotamente la información requerida.

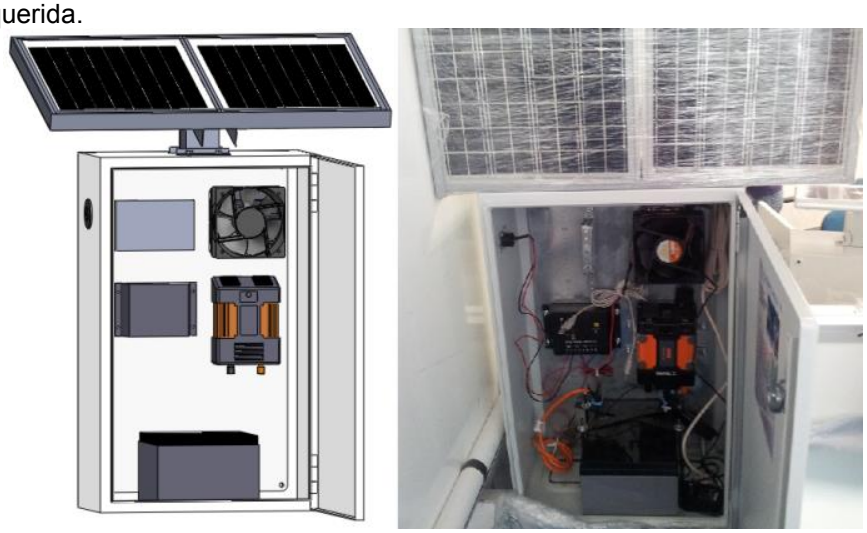


Fig. 4: Prototipo controlador para estación del boiler solar.

ISBN 978-607-8242-11-5

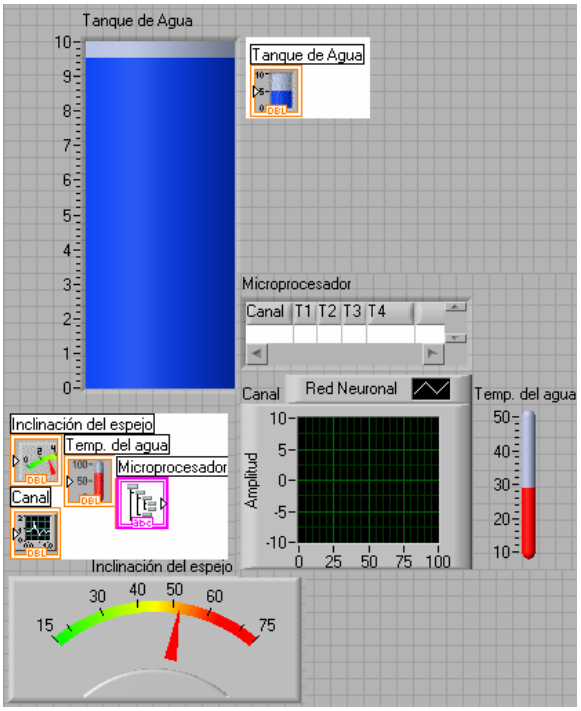


Fig. 5: Sistema embebido encargado del sistema de calefacción.

Ahora, los métodos de decisión teórica están basados en el empleo de funciones de decisión discriminantes. Esto basándose en un vector patrón, que es la descripción estructural y cuantitativa de algún objeto o cualquier otra entidad de interés en una imagen formada por un conjunto de características. Sea un vector patrón $x=\{x_1, x_2, ..., x_n\}$ y se tienen M clases de patrones $w_1, w_2, ..., w_M$. El problema de decisión teórica de patrones es encontrar M funciones de decisión, donde al sustituir x en todas estas, se produzca un valor máximo. El vector modelo que nos entrega el programa describe todos los aspectos de las partes a ser reconocidas. El proceso de igualación consiste en comparar las características extraídas de una red con otras en el modelo. Ya que las características son tratadas por medio de vectores, se analizan las longitudes con el modelo y con cierto discriminante, seleccionándose las longitudes semejantes, descrito por Castañeda y Castaño (2017). Una neurona biológica es una célula especializada en procesar información. Está compuesta por el cuerpo de la célula (soma) y dos tipos de ramificaciones: el axón y las dendritas. La neurona recibe señales (impulsos) de otras neuronas a través de sus dendritas y transmite señales generadas por el cuerpo de la célula a través del axón. El córtex cerebral humano contiene alrededor de 1011 neuronas (aproximadamente el mismo número de estrellas que hay en la Vía Láctea). Cada neurona está conectada de forma masiva a un número variable de entre 1000 y 10.000 neuronas. Por tanto, el cerebro contiene de 1014 a 1015 interconexiones. Las neuronas se comunican entre sí mediante trenes de pulsos de corta duración (del orden de milisegundos). El mensaje, está modulado en la frecuencia de transmisión de los pulsos. Esta frecuencia varía sobre los 100 Hz. Por tanto, es más de un millón de veces inferior a la velocidad de conmutación de los circuitos electrónicos típicos de nuestros días. Sin embargo, el ser humano es capaz de realizar tareas complejas en un tiempo inferior y con un porcentaje de aciertos superior al conseguido actualmente mediante ordenadores. Ello es debido a la paralelización masiva que realiza el cerebro, que está extremadamente lejos de poder ser implementada en un circuito electrónico. Las redes neuronales artificiales pretenden emular la red neuronal biológica y se obtienen interconectando neuronas. Para ello se supone un modelo matemático simplificado de la neurona biológica descrito por la siguiente ecuación:

$$y = f\left[\left(\sum_{i=1}^{N} \omega_i \bullet x(n-i)\right) - b\right] \tag{1}$$

Este modelo descrito por la ecuación anterior es una generalización del propuesto por McCulloch y Pitts en 1943. La neurona recibe del exterior un umbral b y N entradas a las que asocia un conjunto de pesos ω_i (i= 1,...., N). Aplicando el producto de los pesos por las entradas respectivas más el umbral (o desplazamiento) a una función de activación f(u), se obtiene la salida y, donde la función de activación se describe de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$u\left(\vec{x}, \vec{\omega}\right), \qquad x = \{x[n-1], ..., [n-N]\} \tag{2}$$

Esquemáticamente, representa el modelo de neurona artificial, este modelo es implementado algorítmicamente con el uso de hilos para multiprocesos adaptativos como se muestra en la figura 6.

ISBN 978-607-8242-11-5

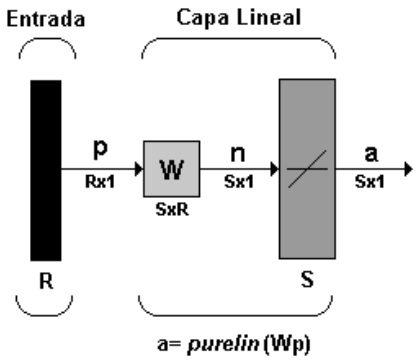


Fig. 6: Modelo de neurona artificial.

La ecuación anterior recibe el nombre de función base, donde los vectores que la definen son:

$$\omega = \{\omega_1, ..., \omega_n\} \tag{3}$$

La red neuronal correspondiente a una respuesta lineal, se ve como la salida a, es determinada por el vector de entrada p, lo cual se representa mediante la siguiente ecuación:

$$a_i = \sum_{j=1}^{R} w_{ij} P_j \tag{4}$$

Puede notarse como la conexión (sinápsis) entre la entrada p_j y la salida a_i es el peso w_{ij}. De esta forma el postulado de Hebb implica que si un valor positivo p_j produce un valor positivo a_i, el valor de w_{ij} debe incrementarse y se describe mediante la siguiente ecuación:

$$W_{ij}^{nuevo} = W_{ij}^{anterior} + \alpha(a_{iq})(p_{jq}) \tag{5}$$

La red neuronal a usarse en la aplicación se muestra en la figura 7, donde se tienen 4 pesos sinápticos por neurona junto con su umbral de activación

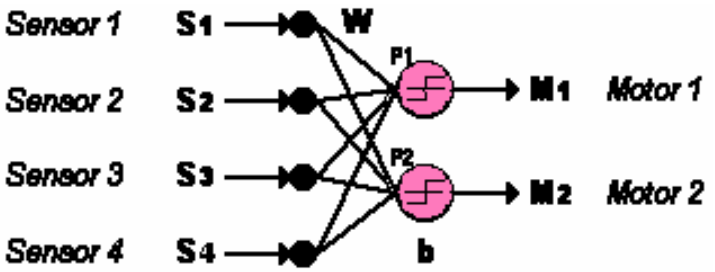


Fig. 7: Red Hebbiana para la inclinación del seguidor.

La identificación del sistema gobernado por ecuaciones diferenciales no lineales, cobra gran importancia cuando el sistema de interés es de gran complejidad, pues las técnicas clásicas de solución pretenden identificar el modelo exacto del sistema, mientras que la red neuronal, en una gran economía de trabajo captura la dinámica de la relación entrada contra salida, sin tener que conocer el sistema, por lo que el proceso de identificación es el primer paso para otras aplicación de control, la tabla 1 rige el comportamiento entre sensores y actuadores del sistema de calentamiento.

Tabla 1: Entrenamiento de la red neuronal Hebbiana.

S_1	S_2	S_3	S_4	M_1	M_2
1	1	1	1	-1	*-1*
-1	1	1	1	-1	*1*
1	1	-1	-1	1	*-1*
1	-1	-1	-1	1	*1*
1	-1	1	1	1	*-1*
1	1	-1	1	-1	*1*
1	*1*	*1*	*-1*	*1*	*-1*

El sistema propuesto tiene 4 fotosensores y dos motores (2 sensores y un motor para cada eje) como se muestra en la figura 7, el sistema óptico utilizando el OPT101 se caracterizó de acuerdo a la respuesta de la luz del día, los reflectores para el calentamiento se seleccionaron por pruebas de acuerdo a lo que se muestra en la figura 8.

ISBN 978-607-8242-11-5

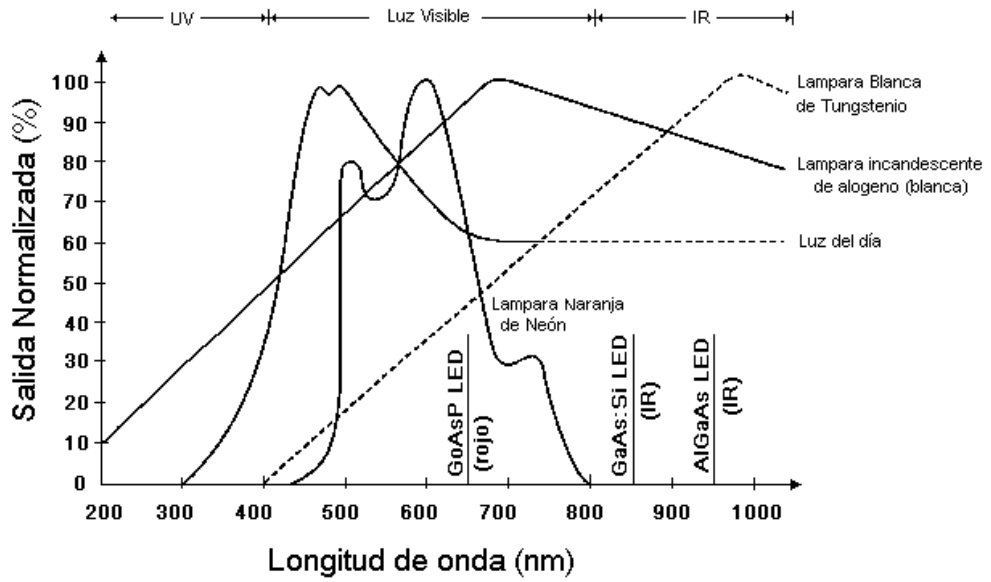


Fig. 8: Respuesta óptica del dispositivo OPT101 a diferentes fuentes de iluminación.

Por otra parte, se consideran los siguientes cálculos con las constantes de la tabla 2 para estimar el calentamiento de agua a través del tubo del prototipo que la recircula.

Tabla 2: Parámetros para el comportamiento de la temperatura del agua dentro del sistema.

Parámetro	$h_0\left(\frac{Btu}{h * pie^2 * °F}\right)$	$K\left(\frac{Btu}{libra * °F}\right)$	$\rho\left(\frac{libras}{pie^3}\right)$	T_a(°F)	T_v(°F)
Valor	670	0.48	68	86	240

Los parámetros de la tabla 2, se infieren mediante la siguiente ecuación, para determinar la transferencia de calor a lo largo del tubo con agua, la cual es generada por el sol a incidir de forma controlada mediante el seguidor solar, la ecuación que lo determina es:

$$\left(\frac{T_a - T}{T_a - T_b}\right)_{cilindro} = \frac{2}{r_m}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{J_0\left(B_n\frac{r}{r_m}\right)\left[\exp\left(-B_n^2\frac{K\theta}{\rho C_p r_m^2}\right)\right]}{\left(1+\frac{KB_n^2}{h^2 r_m^2}\right)\frac{B_n}{r_m}J_1(B_n)} \quad (7)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para verificar la absorción de radiación por el sistema de calentamiento, se tiene la distribución espectral según Villeda (2011), La radiación electromagnética solar se distribuye de acuerdo a la tabla 3.

Tabla 3: Respuesta de la radiación solar versos longitud de onda.

Longitud de onda(μm)	*Energía total recibida (%)*	*Naturaleza de la Radiación*
0.25 a 0.4	1 a 3	Ultravioleta
0.4 a 0.75	40 a 42	Visible
0.75 a 2.5	55 a 59%	Infrarrojo

En los metales se puede determinar la reflectancia mediante la ecuación de Fresnel. Considerando que el medio 1 es aire (n1 = 1) y el medio 2 es un metal el cual tiene un índice de refracción con componente compleja (m = n – ik), donde k representa el índice extinción. De acuerdo a la tabla 1 se tiene mayor energía térmica (infrarrojo) que óptica (visible), lo cual se aprovecha con la reflexión por lámina galvanizada, la figura 9 muestra el resultado de las pruebas del espectro electromagnético de diversas superficies reflejantes, donde se determinó la reflectancia especular desde el ultravioleta hasta el infrarrojo (2500 nm). Los materiales con los que se obtuvieron mejores resultados fueron el aluminio anodizado y la película reflejante Betterware. La reflectancia de los espejos se determinó la reflectancia del aluminio para los equinoccios y los solsticios en un rango de longitud de onda de 0.0041 a 32 μm., la reflectancia paralela y

ISBN 978-607-8242-11-5

perpendicular quedan expresadas mediante las siguientes ecuaciones (8 y 9 respectivamente):

$$\rho_{ll} = \frac{(p - sen\theta_1 \tan\theta_1)^2 + q^2}{(p + sen\theta_1 \tan\theta_1)^2 + q^2} \tag{8}$$

$$\rho_{\perp} = \frac{(\cos\theta_1 - p)^2 + q^2}{(\cos\theta_1 + p)^2 + q^2} \tag{9}$$

La respuesta del sensor óptico y configuración de conexión se muestra en la figura 10, donde se observa la región espectral de la radiación y la respuesta en el dominio de la frecuencia del dispositivo, su función de transferencia presentado por Castañeda (2006), se describe por la ecuación 8.

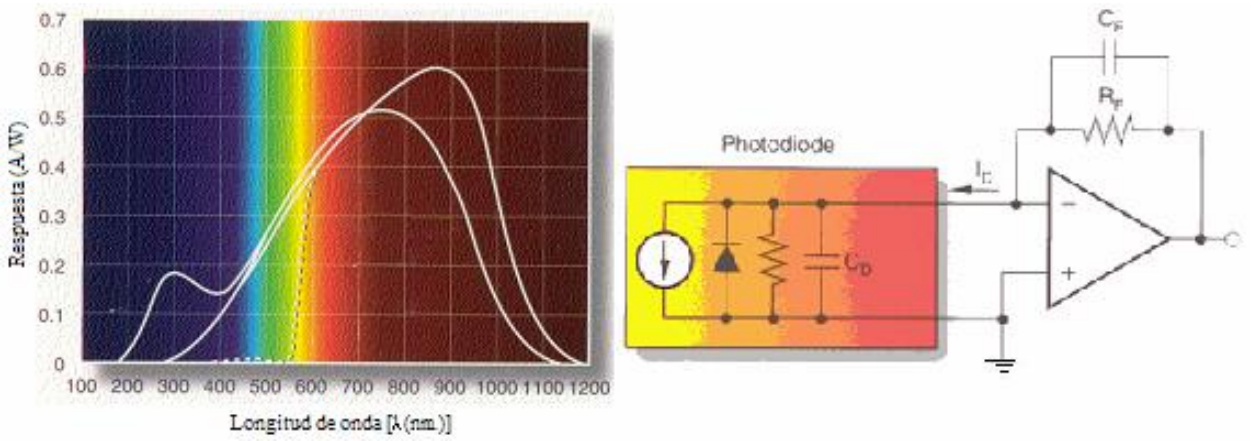


Fig. 9: Respuesta del sensor óptico OPT101 y esquemático de conexión eléctrica del mismo.

$$\frac{V_o}{I} = \frac{R_F \Delta_V}{s\left[R_F (C_d - (C_F (\Delta_V - 1)) + C_F\right] - (\Delta_V - 1)} \tag{10}$$

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema son acotadas por los márgenes de operación del sistema se muestran en la tabla 4, las cuales arrojan la respuesta del sistema neuronal del seguimiento solar a la luz del día se muestra en la figura 10.

Tabla 4: Resultados de los pesos sinápticos de red neuronal implementada.

	S_1	S_2	S_3	S_4		
M_1	0.836	-4.1627	0.0503	-3.6557	M_1	*1*
M_2	*-4.0680*	*0.6924*	*-4.5947*	*4.6762*	*M_2*	*1*

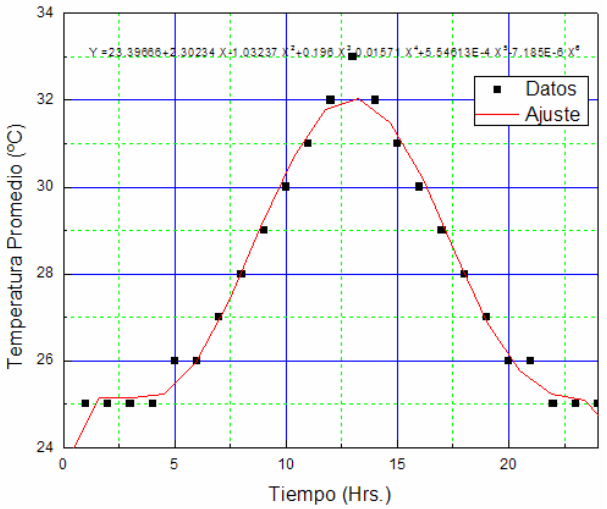


Fig. 10: Respuesta del sistema versus temperatura del líquido.

CONCLUSIONES

Como resultado del sistema, se concluye que la ventaja principal de las redes neuronales es su capacidad adaptativa e integradora para aprender de la experiencia con respecto al tiempo, incluyendo la capacidad de

ISBN 978-607-8242-11-5

agregar en tiempo real la operación optima, generada a través de generalizar de los casos anteriores con respecto a nuevos casos, así como de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan la información, por lo cual, la operación del sistema cumple con los propósitos de diseño y operación. Por lo cual, la teoría de redes neuronales en forma práctica, representa grandes ventajas con respecto a otros modelos típicos de solución de problemas de calentamiento para agua. Los modelos matemáticos en que han sido desarrollados los algoritmos pueden ser asimilados en cualquier lenguaje de programación. En la parte operativa, el sistema neuronal logra orientar las películas de aluminio paralelas a la radiación solar existente, lo cual maximiza la transferencia de calor del medio exterior al líquido, por otra parte, las láminas de aluminio resultaron además de económicas con respecto a otras películas reflejantes, útiles para el rengo del espectro electromagnético aprovechable como calor, el lazo de control se simplificó y se puede enlazar a un segundo sistema difuso encargado de embeber en sistemas microprocesados las leyes de la física Hidráulica-Térmica de los procesos para calentamiento de agua a nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento por parte del Fondo mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Zacatecas, Convocatoria 2009 -01, con el proyecto ZAC-2009-C01-121774, el cual hizo posible la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

Aliman, O., Daut, I., Isa, M., Adzman, M.R.; Simplification of Sun Tracking Mode to Gain Concentration Solar Energy. American J. Applied Sciences: 4(3), 171-175 (2007)

Bejan A. Advanced engineering Thermodynamics, (chap.9), New York: Wiley Interscience, (1988).

Biaoua, A.L., Bernierb, M.A.; Achieving total domestic hot water production with renewable energy. Building and Environment: 43, 651–660 (2008)

Castañeda-Miranda, A., del Llano, L.; A Novel System for Measuring Optical Properties in Arterial Blood of Man, Applied Bionics and Biomechanics, 3(2), 87-92 (2006).

Castañeda-Miranda, A., Castaño, V.M.; Smart frost control in greenhouses by neural networks models. Computers and Electronics in Agriculture, 137, 102-114 (2017).

Changa, W.R., Chenga, C.L.; Carbon monoxide transport in an enclosed room with sources from awater heater in the adjacent balcony. Building and Environment: 43, 861–870 (2008)

Chen, S.J., and Hwang, C.L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods an Applications Springer-Verlag, Berlin, (1992).

Chiadamrong, N., O'Brien, C.; Decision support tool for justifying alternative manufacturing and production control systems. International Journal of Productions Economics 60-61: 177-186 (1999)

Chii-Dong Ho, Wen-Yi Yang; An analytical study of heat Transfer efficiency in laminar counterflow concentric circular tubes whit external refuxes, Chemical Engineering Science: 58, 1235-1250 (2003)

Garg, Prakasch. Solar energy fundamental and application. New delhi: Tata McGraw Hill publishing C0. Ltd, (1997)

Jannot, Coulibaly; The evaporative capacity as a performance index for a solar drier- air heater. Solar Energy: 63(6), 387-91 (1998)

Kakati, M.; Strategic evaluation of advanced manufacturing technology. International Journal of Economics: 53(2), 141-156 (1997)

Kakati, M. and Dhar, U.R.; Investment justification in flexible manufacturing systems. Engineering Costs and Production Economics: 21(3), 203-209 (1991)

Ong, K.S.; Thermal performance of solar air heater: mathematical model and solution procedure. Solar Energy: 55(2), 93-109 (1995)

Parkan, C. and Wu, L.; Process Selection with Multiple Objective and Subjective Attributes. Production Planning & Control: 9(2), 189-200 (1998)

Villeda, G., Castañeda-Miranda, A., Vega, J.T., Pineda, J.; Clay-brick firing in a high-temperature solar furnace, Ingeniería Investigación y Tecnología, 7(4), 395-408 (2011).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de Vibración Inducida por Flujo Bifásico en una Tubería Horizontal Utilizando un Modelo Transitorio FSI

Rosendo Franco[1], Renatto M. Yupa[1], Herbert Yépez[1], Daniel Abarca[1]
(1) Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú
E-mail: rofranco@pucp.edu.pe, ryupa@pucp.pe, hyepez@pucp.pe, daniel.abarca@pucp.pe

Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis de vibración inducida por flujo (FIV) sobre una tubería horizontal que transporta flujo bifásico agua-aire. En el estudio se utilizó un modelo transitorio acoplado de interacción fluido-estructura (FSI), que contempla los efectos del campo de fluidos sobre el campo estructural y viceversa. Primero se analizaron diferentes modelos de turbulencia RANS y LES, con la finalidad de seleccionar el más adecuado para el estudio FIV. Se tomó como criterio de comparación el comportamiento de la presión variable sobre la pared de la tubería, pues esta es la carga que genera vibración. Los resultados obtenidos muestran que ambos modelos son capaces de representar con buena precisión el comportamiento del flujo bifásico analizado, pues captan los patrones de flujo en concordancia con resultados experimentales reportados en la literatura. Las fluctuaciones de la presión son igualmente similares, por lo que se seleccionó el modelo RANS que es computacionalmente menos costoso. En el estudio FSI se consideró una tubería de PVC de $1\ m$ de longitud, empotrada en ambos extremos. Para las condiciones de flujo analizadas se captaron vibraciones de $10\ \mu m$ de amplitud y aceleraciones de $5\ m/s$.

Palabras clave: vibración inducida por flujo; FIV; interacción fluido-estructura; FSI; RANS; LES

Two Phase Flow Induced Vibration Analysis in an Horizontal Pipe Using a FSI Transient Model

Abstract

In the present work, a flow-induced vibration analysis (FIV) is performed on a horizontal pipe that transports water-air two-phase flow. In the study, a fluid-structure interaction transient model (FSI) was used, which considers the effects of the fluid field on the structural field and vice versa. First, different turbulence models RANS and LES were analyzed, in order to select the most suitable for the FIV study. The behavior of the variable pressure on the pipe wall was taken as the comparison criterion, since this is the load that generates vibration. The results show that both models are able to represent with good precision the behavior of the analyzed two-phase flow, as they capture the flow patterns in agreement with experimental results reported in the literature. The pressure fluctuations are also similar, so the RANS model, that is computationally less expensive, was selected. A PVC pipe of $1\ m$ length, fixed at both ends, was considered in the FSI study. For the analyzed flow conditions, vibrations of $10\ \mu m$ of amplitude and accelerations of $5\ m/s$, were captured.

Keywords: flow induced vibration; FIV; fluid-structure interaction; FSI; RANS; LES

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En la industria de los hidrocarburos se presenta una serie de problemas durante el transporte de fluidos y en especial, los sistemas de tuberías no enterradas presentan vibración inducida por el flujo (FIV). El estudio FIV es de gran importancia ya que dichas vibraciones pueden provocar la falla de las tuberías ocasionando no sólo pérdidas económicas sino también un daño irremediable al medio ambiente. Las vibraciones aparecen debido a cargas dinámicas que pueden tener diferentes orígenes, por ejemplo, algunos trabajos resaltan la influencia de una trayectoria irregular de la tubería, con cambios de dirección y curvaturas, que pueden originar o incrementar las fuerzas dinámicas (Díaz, M. J. C. et al, 2013). Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se centran en las cargas dinámicas que son originadas por la turbulencia del flujo, tema bastante complejo en el que aún hay trabajo por realizar. La complejidad radica en que la turbulencia es un fenómeno dependiente del tiempo, tridimensional, no lineal y caótico, pero no aleatorio, pues contiene estructuras espaciales bien definidas que se desarrollan en el tiempo, conocidas como eddies (Pittard, M. T. 2003 y Shurtz, T. P. 2009). En tal sentido, uno de los aspectos más discutido es el enfoque de modelamiento de turbulencia a utilizar en una simulación computacional, siendo tres los más conocidos: 1) La simulación numérica directa (Direct Numerical Simulation, DNS) que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes y requiere de un enmallado fino para captar todas las escalas de turbulencia. 2) La simulación de vórtices grandes (Large Eddy Simulation, LES) que también resuelve las ecuaciones de Navier Stokes, sin exigir una malla exhaustivamente fina como el DNS, ya que realiza un filtrado de las escalas de turbulencia. 3) La simulación de las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) que emplea un promedio temporal sobre las ecuaciones de transporte e incorpora modelos que interpretan el comportamiento de la turbulencia (Fernández, 2012). Cabe mencionar que estos métodos han sido y seguirán siendo ampliamente empleados, sin embargo la aproximación DNS, que resuelve todas las escalas de turbulenta con pasos de tiempo suficientemente pequeños para captar las fluctuaciones más rápidas, demanda altísimo costo computacional haciéndola inviable en la mayoría de casos de aplicación industrial, a pesar que en la actualidad se cuenta con poderosas herramientas computacionales. Asimismo, LES, cada vez más empleado y recomendado por investigadores (Pittard, M. T. 2003, Shurtz, T. P. 2009 y Kapusuzoglu, B. 2016), requiere gran almacenamiento computacional y elevados tiempo de ejecución, mientras que el RANS, quizá sea la aproximación que se ha ajustado más a las prácticas en ingeniería.

Un punto adicional a considerar en el análisis del flujo, además del enfoque para modelar la turbulencia, es el número de fases. Como es de suponer, el problema es más sencillo cuando se trabaja con un flujo monofásico, sin embargo es poco habitual encontrar en la industria casos donde un solo fluido participa de un determinado proceso. Un gran número de aplicaciones de interés tratan flujos compuestos por diferentes fases (líquido-gas, líquido-sólido, líquido-líquido, gas sólido) y esta condición le agrega complejidad al análisis. Actualmente se señala que no hay un modelo multifásico capaz de interpretar de manera adecuada todo tipo de flujo compuesto, pero si existen modelos orientados a resolver situaciones muy específicas, tales como: de fase discreta (Dispersed Phase Model, DPM), euleriano (Eulerian), de mezcla (Mixture), de volumen de fluido (Volume Of Fluid, VOF). Un criterio general establece que el modelo VOF es empleado para fases inmiscibles, mientras los otros tres para fases interpenetradas (Fernández, 2012). Por otro lado, existen diversos patrones de flujo bifásico, líquido-gas, en tuberías horizontales dentro de los cuales se pueden mencionar: estratificado, ondulante, anular, tapón, burbujeante y disperso (Mandhane et al, 1974), siendo el patrón tapón (slug) el de mayor impacto en las vibraciones de acuerdo a la literatura (Ortiz-Vidal et al 2013).

En un análisis FIV no sólo el fluido actúa sobre la tubería, sino que los movimientos de la tubería también repercuten en el comportamiento del fluido. Es por ello que algunos autores platean la necesidad de realizar un análisis acoplado de la interacción fluido-estructura (FSI), que contemple los efectos mutuos (Li, F. et al, 2016). Por este motivo en el presente trabajo se realiza un análisis FIV sobre una tubería horizontal utilizando un modelo transitorio FSI. Ya que la turbulencia del flujo origina las fluctuaciones de la presión, siendo esta la carga variable que origina las vibraciones de la tubería, se realizan un análisis preliminar del flujo utilizando modelos de turbulencia RANS y LES. Los resultados del análisis de flujo son validados cualitativamente con resultados experimentales de la literatura y la selección del modelo de turbulencia más adecuado se realiza de forma cuantitativa, comparando los resultados de la presión en función del tiempo, en un punto ubicado en la superficie de contacto entre el flujo y la tubería.

MODELO PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO BIFÁSICO

La simulación del flujo bifásico requiere de modelos transitorios multifásicos. El modelo multifásico seleccionado es VOF, ya que es empleado en la literatura como un modelo capaz de interpretar correctamente el comportamiento de fases inmiscibles. Asimismo se emplean modelos de turbulencia RANS y LES, cuyos resultados serán analizados cualitativa y cuantitativamente. La condición de flujo para el estudio del patrón

 ISBN 978-607-8242-11-5

slug pude quedar definida mediante tres parámetros: velocidad superficial del líquido, velocidad superficial del gas y fracción volumétrica. La velocidad superficial de un flujo J, expresada en la ecuación (1), pude ser definida como la relación entre su caudal Q y el área A de la sección que atraviesa, o también, como la suma de las velocidades superficiales de los fluidos que la componen. Donde, J_L y J_G son las velocidades superficiales de líquido y gas, mientras que Q_L y Q_G son los caudales del líquido y gas, respectivamente.

$$J = \frac{Q}{A} = J_L + J_G = \frac{Q_L + Q_G}{A} \tag{1}$$

Asimismo, la fracción de volumen β, también denominada como fracción de vacío, se define como la relación entre el volumen de la fase de gas y el volumen de la mezcla (líquido-gas) en el dominio. La fracción volumétrica también pude ser definida en función de las áreas, como se aprecia en la ecuación (2). Donde, A_L y A_G representan las áreas del líquido y gas en la sección transversal, respectivamente.

$$\beta = \frac{A_G}{A_L + A_G} \tag{2}$$

Por otro lado, el modelo geométrico desarrollado para el análisis del flujo, mostrado en la Fig. 1, tiene una longitud de 2500 mm y un diámetro de 20.4 mm. El modelo geométrico se discretizó con una malla estructurada, con una adecuada distribución de elementos en la sección y a lo largo del dominio, como se puede apreciar en la Fig. 2.

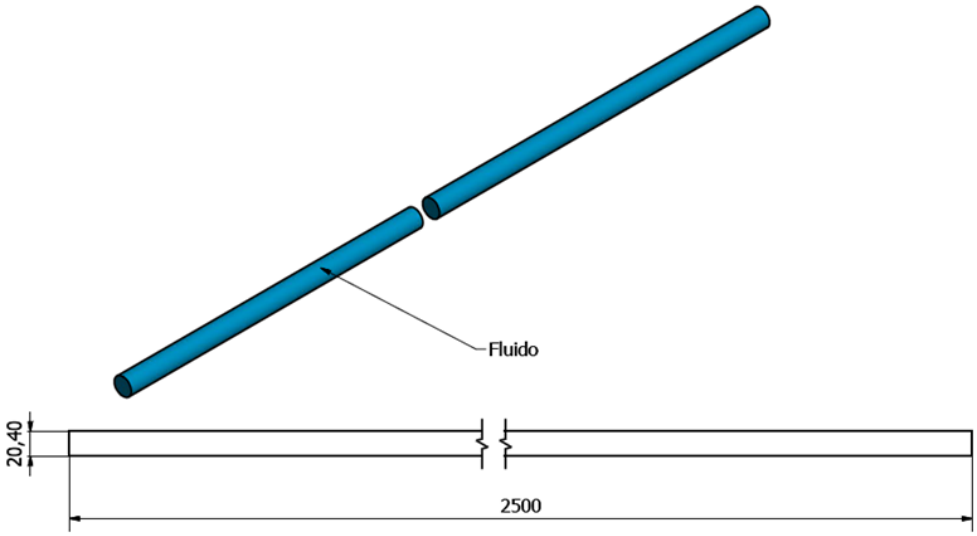


Fig. 1: Modelo geométrico del fluido.

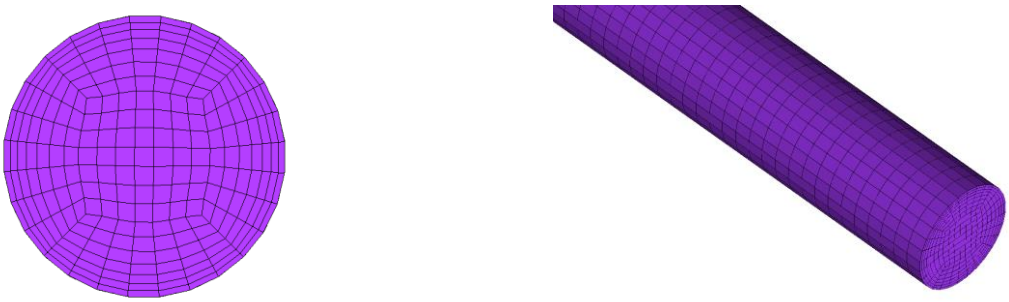


Fig. 2: Mallado del modelo geométrico del fluido.

Para definir las condiciones de contorno en el análisis del flujo, se dividió la sección de entrada en dos particiones iguales, imponiendo la velocidad de ingreso del aire en la partición superior y la velocidad de ingreso del agua en la partición inferior, tal como se muestra en la Fig. 3. Esta forma de definir las condiciones de contorno en el ingreso obedece a trabajos reportados en la literatura que ofrecen buenos resultados, los cuales son contrastados con ensayos experimentales (Pouraria H., J. K. Seu y J.K. Paik, 2016). Luego, para completar las condiciones de contorno, se impuso un valor de presión manométrica en toda la sección de salida del flujo. Otro aspecto importante, para lograr la convergencia de los resultados en

ISBN 978-607-8242-11-5

menos tiempo, es la inicialización del dominio. En el presente estudio se consideró que la tubería está llena de agua con velocidad constante, igual a la velocidad de ingreso, para iniciar el análisis.

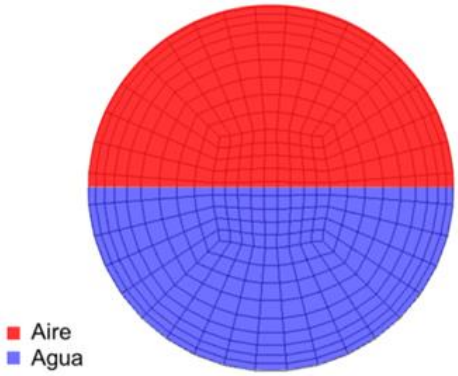


Fig.3: Condición de contorno de ingreso de aire y agua.

CASOS DE ESTUDIO DE FLUJO BIFÁSICO

En la Tabla 1 se muestran las condiciones de flujo de los casos estudios para evaluar y comparar los modelos de turbulencia RANS y LES. Estos datos son tomados de ensayos experimentales disponibles en la literatura (Ortiz-Vidal et al., 2014). Se han seleccionado tres casos que garantizan la generación del patrón slug, según lo indicado en el citado trabajo.

Tabla 1: Condiciones de flujo bifásico – patrón slug

Condición de flujo	Velocidad superficial del agua / aire		Fracción volumétrica	Presión media	Caída de presión por longitud
	J_L $[m/s]$	J_G $[m/s]$	β [%]	$[kPa]$	dP/dL_F $[kPa/m]$
1	1.49	1.50	50	117.6	3.268
2	1.25	3.80	75	121.2	4.207
3	0.75	14.27	95	125.3	5.597

Por otro lado, con el fin de identificar las condiciones necesarias que definen un determinado patrón de flujo, gran cantidad de información ha sido recopilada y cartografiada en mapas empleando modelos empíricos y semi-empíricos. Estos mapas muestran diferentes regiones de patrones de flujo divididas por líneas de transición, como se aprecia en la Fig. 4. Los tres casos de estudio del presente trabajo están ubicados en el mapa de Mandhane (Mandhane, 1974), utilizados por el autor Ortiz para sus ensayos experimentales.

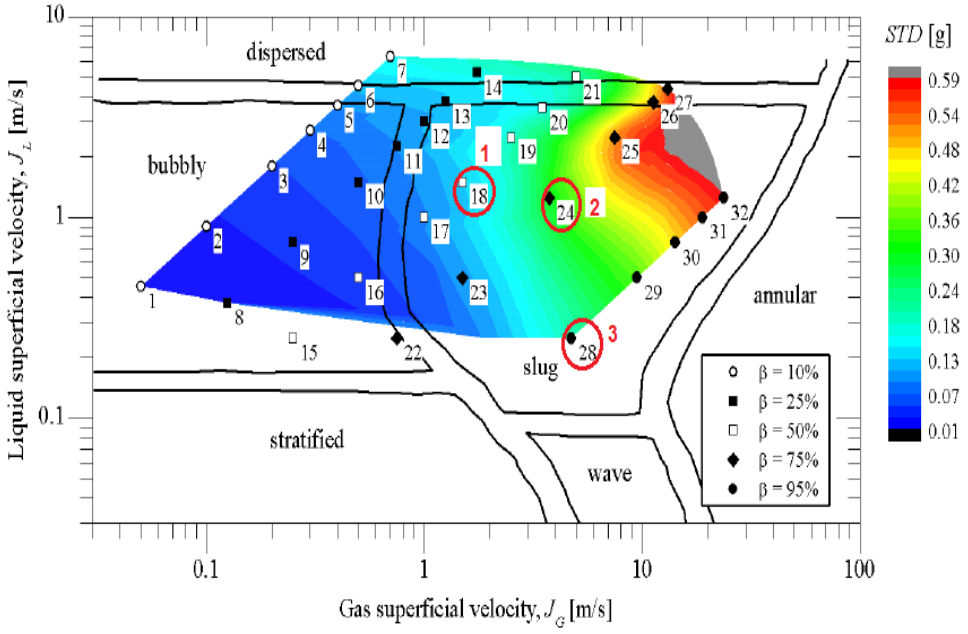


Fig. 4: Mapa de patrones de flujo de Mandhane (L. E. Ortiz Vidal et al, 2013).

ISBN 978-607-8242-11-5

La Fig. 5 muestra los resultados de las simulaciones empleando modelos RANS y LES durante los primeros 5 segundos. Se han empleado la misma geometría, malla y condiciones de contorno para ambos modelos, pudiendo apreciarse que los patrones generados son similares, aunque con ciertas diferencias y aparentemente desfasados. Cabe señalar que el costo computacional del modelo LES es muy demandante comparado con el modelo RANS, corroborando de esta forma lo indicado por la literatura sobre el tema.

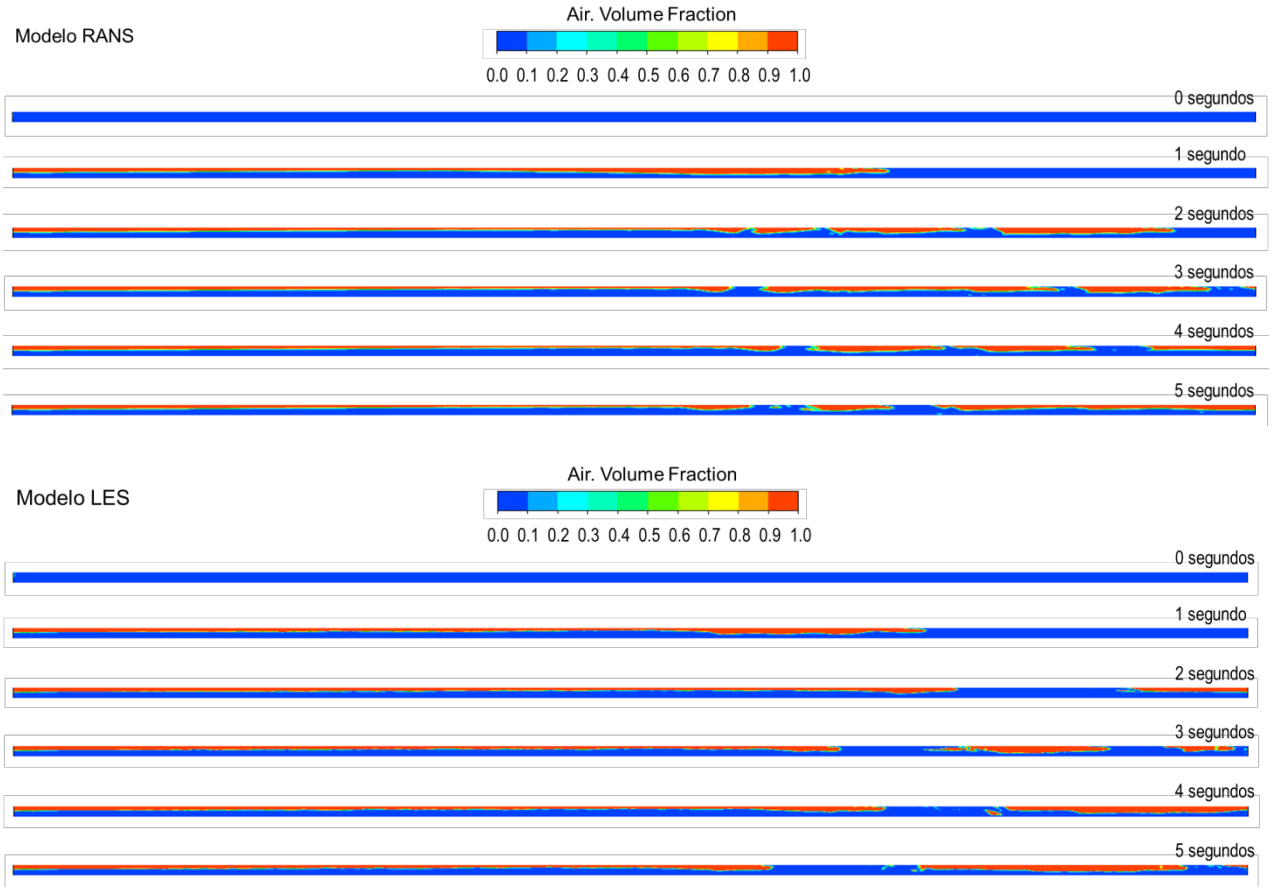
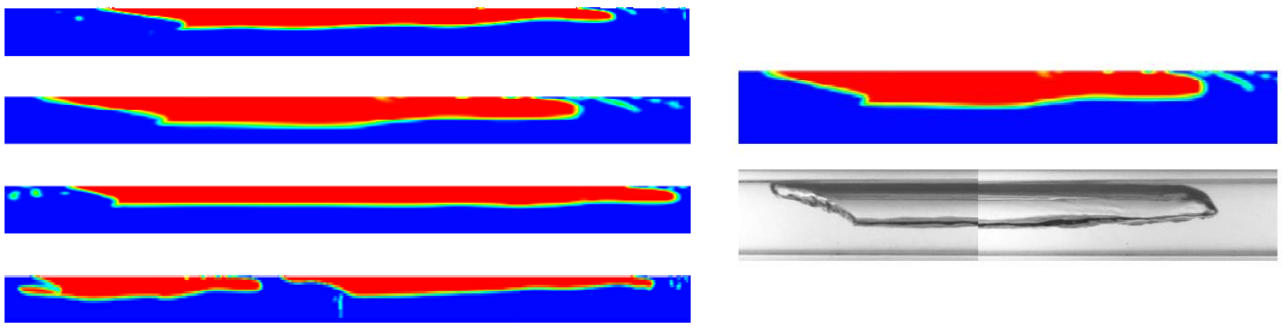


Fig. 5: Proceso de estabilización del patrón slug (0- 5 segundos) empleando modelo RANS y LES.

Imágenes ampliadas de diferentes tramos de los resultados del modelo RANS muestran que, efectivamente, se alcanza a generar el patrón slug, como se puede apreciar en la Fig. 6 a). Una comparación cualitativa entre estos resultados y los resultados experimentales del autor Deendarlianto (Deendarlianto, 2016), quien emplea una cámara de alta velocidad para capturar la forma del patrón slug, revela que existe una clara similitud entre los rasgos característicos del patrón slug obtenidos en las simulaciones del presente trabajo con los obtenidos experimentalmente, ver Fig. 6 b).



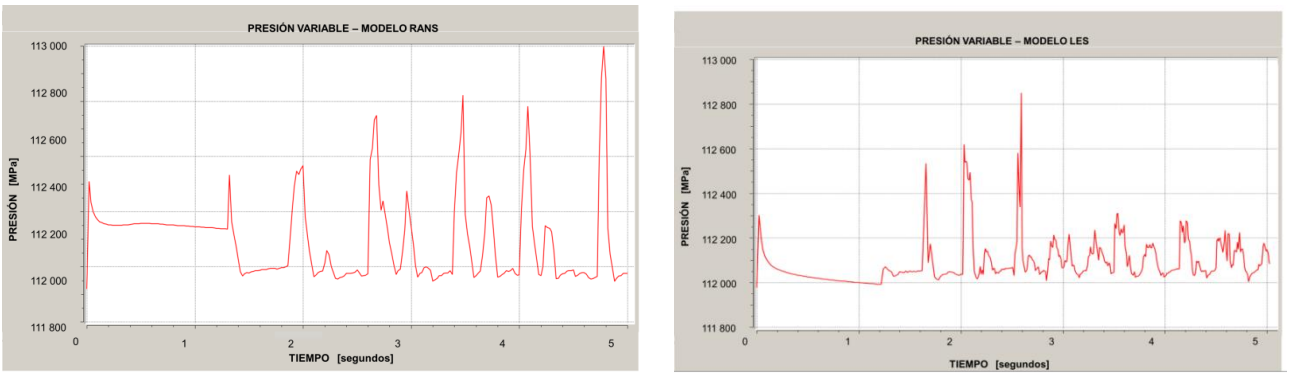
a) b)

Fig. 6: a) Captura de imágenes del patrón slug, b) Comparación cualitativa entre la simulación y resultados experimentales de la literatura

Como ya se ha mencionado, es la turbulencia del flujo la que origina las fluctuaciones de la presión, que constituye la carga variable que da lugar a las vibraciones. Por tanto, además del análisis cualitativo de la formación de los patrones de flujo, para seleccionar el modelo de turbulencia más adecuado se comparan

ISBN 978-607-8242-11-5

cuantitativamente los resultados de la presión en un punto de la superficie de contacto entre el flujo y la tubería. Las gráficas de la Fig. 7 ilustran el comportamiento de la presión en función del tiempo sobre el punto intermedio posicionado en la parte superior de la sección transversal, ubicado a 2300 mm de la entrada del flujo. Como se puede apreciar, ambos modelos permiten captar la fluctuación de la presión variable en el tiempo y sus valores están en un mismo orden de magnitud. Por todo lo mencionado anteriormente, se decide seleccionar el modelo RANS como el modelo de turbulencia más adecuado para proseguir con el análisis FSI.

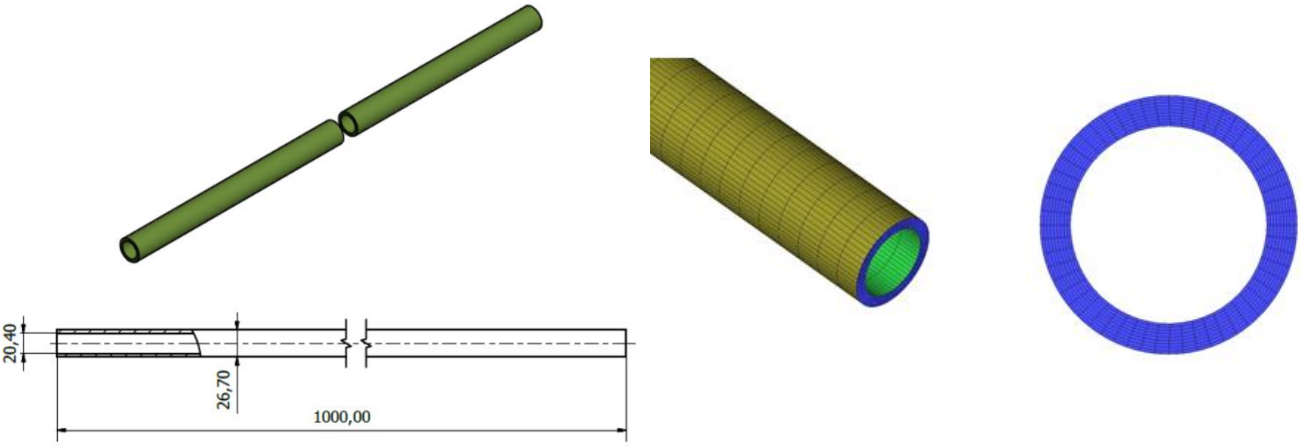


a) b)

Fig. 7: Resultados de la carga variable (presión) sobre un punto con modelo a) RANS y b) LES

MODELO DE ANALISIS ESTRUCTURAL

El modelo geométrico de la tubería se muestra en la Fig. 8a, en el que se puede apreciar que el tramo de tubería utilizado para el estudio tiene una longitud de 1000 mm, con un diámetro interior coincidente con el diámetro utilizado para el fluido igual a 20.4 mm y un diámetro exterior igual a 26.7 mm. De forma similar al dominio del fluido, la discretización del modelo geométrico de la tubería se realizó con una malla estructurada, con una adecuada distribución de elementos en la sección y a lo largo de la tubería, como se puede constatar en la Fig. 8b.



a) b)

Fig. 8: a) Modelo geométrico y b) malla de la tubería.

La condición de contorno del análisis estructural es empotrado-empotrado en los extremos de la tubería, como se aprecia en la Fig. 9. Para ello, se restringe los desplazamientos en las tres direcciones en las secciones transversales de ambos extremos.

ISBN 978-607-8242-11-5

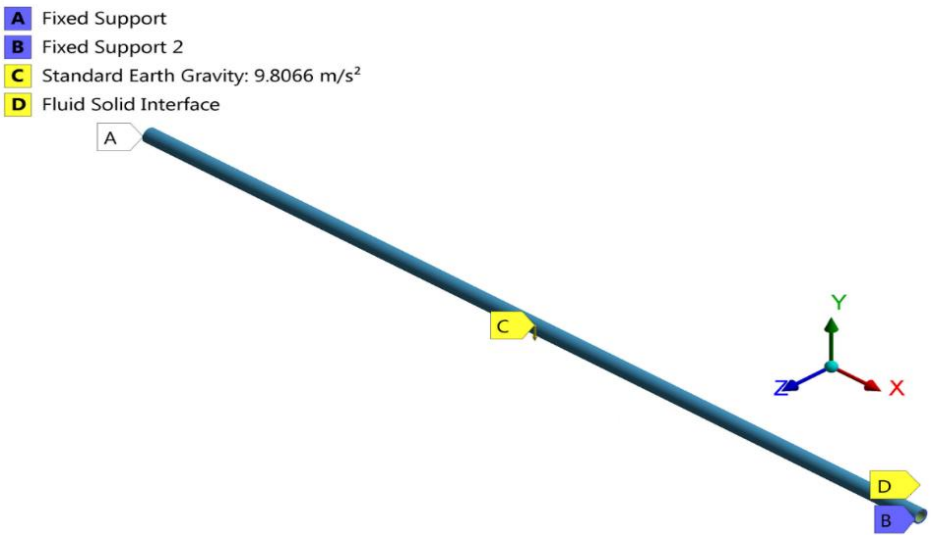


Fig. 9: Condiciones de contorno del problema estructural.

MODELO DE ANÁLISIS FSI

El análisis de interacción fluido-estructura puede ser representado como un sistema amortiguado sujeto a una configuración de fuerzas externas, como se expresa en la ecuación (3).

$$[M]\{\ddot{Q}\} + [C]\{\dot{Q}\} + [K]\{Q\} = \{G\} \tag{3}$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son la matriz de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente. $\{Q\}$ es el vector de desplazamiento estructural generalizado y $\{G\}$ es el vector de otras fuerzas de excitación, incluyendo turbulencia y acústica. La ecuación (3) puede ser expresada en su forma extendida en la que se muestra las componentes estructural (s) y de fluido (f) del sistema de matrices (L. E. Ortiz Vidal et al, 2011).

$$[M_S + M_f]\{\ddot{Q}\} + [C_S + C_f]\{\dot{Q}\} + [K_s + K_f]\{Q\} = \{G\} \tag{4}$$

La vibración inducida por flujo (FIV) es la respuesta de la tubería ante la acción turbulenta del flujo. Para estudiar este fenómeno mediante simulación numérica se recomienda realizar un análisis de interacción fluido-estructura (FSI), que no sólo tiene en cuenta la presión variable del fluido sobre las paredes de la tubería, sino que también considera la acción de la tubería sobre el fluido. Esto significa que el movimiento de la tubería puede ser captado y transmitido al comportamiento del fluido. Es decir, se realiza lo que se conoce como un análisis acoplado bidireccional, que tiene en cuenta la influencia de un campo sobre el otro y viceversa.

Para el presente estudio, el acoplamiento descrito se ha realizado en el software ANSYS, a través del módulo System Coupling, como se aprecia en la Fig. 10. Aquí se definen un análisis de fluido y un análisis estructural transitorio, que comparten el mismo paso de tiempo. El tiempo de análisis para el estudio FSI es de 2 s.

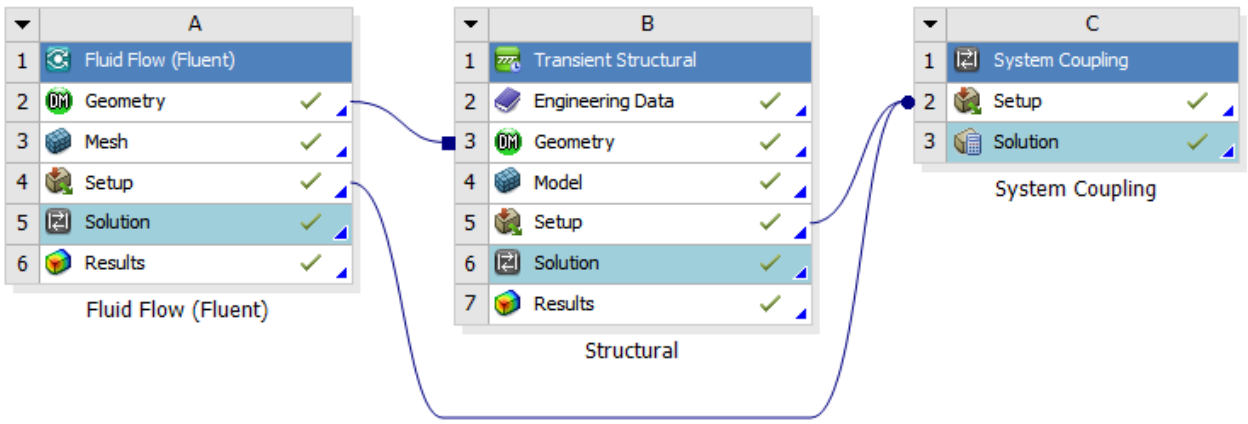


Fig. 10: Esquema del acoplamiento fluido-estructura (FSI).

ISBN 978-607-8242-11-5

El modelo geométrico para el análisis FSI es la combinación de los modelos geométricos de los modelos utilizados para los análisis de fluido y estructural, descritos anteriormente, el cual se puede apreciar en la Fig. 11. Asimismo, el mallado y las condiciones de contorno son los mimos para cada campo que los descritos en sus acápites correspondientes. Como se puede apreciar, la zona de contacto entre el fluido y la tubería es de 1000 mm, la cual se configura en el módulo System Coupling.

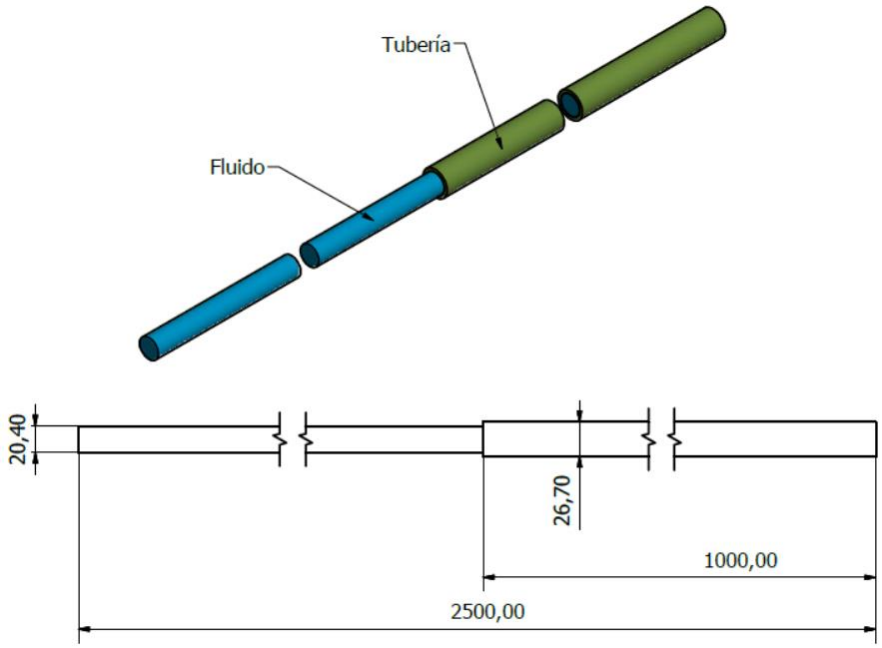


Fig. 11: Modelo geométrico del análisis FSI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del fluido coinciden, en buena medida, con los mostrados en la Fig. 5, con ligeras variaciones debido al movimiento de la tubería (estructura). Por este motivo sólo se mostrarán los resultados estructurales de la tubería, que es el objeto de estudio del presente trabajo. En la Fig. 12 se pueden apreciar los desplazamientos resultantes en la tubería para el instante 0.5 s, que es cuando se producen los máximos valores, en el rango de tiempo analizado (2 s), alcanzando las 39 micras aproximadamente.

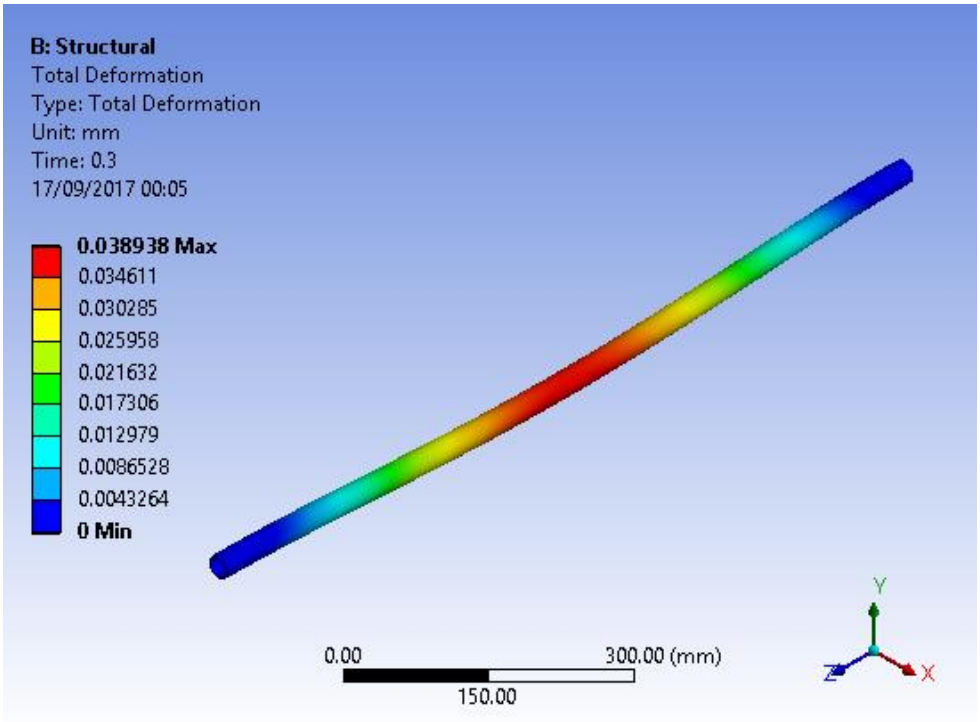


Fig. 12: Desplazamientos resultantes en la tubería.

ISBN 978-607-8242-11-5

En la Fig. 13 se muestran las aceleraciones en el instante 1.3 s, que es cuando se producen los máximos valores, alcanzando los 283 mm/s aproximadamente.

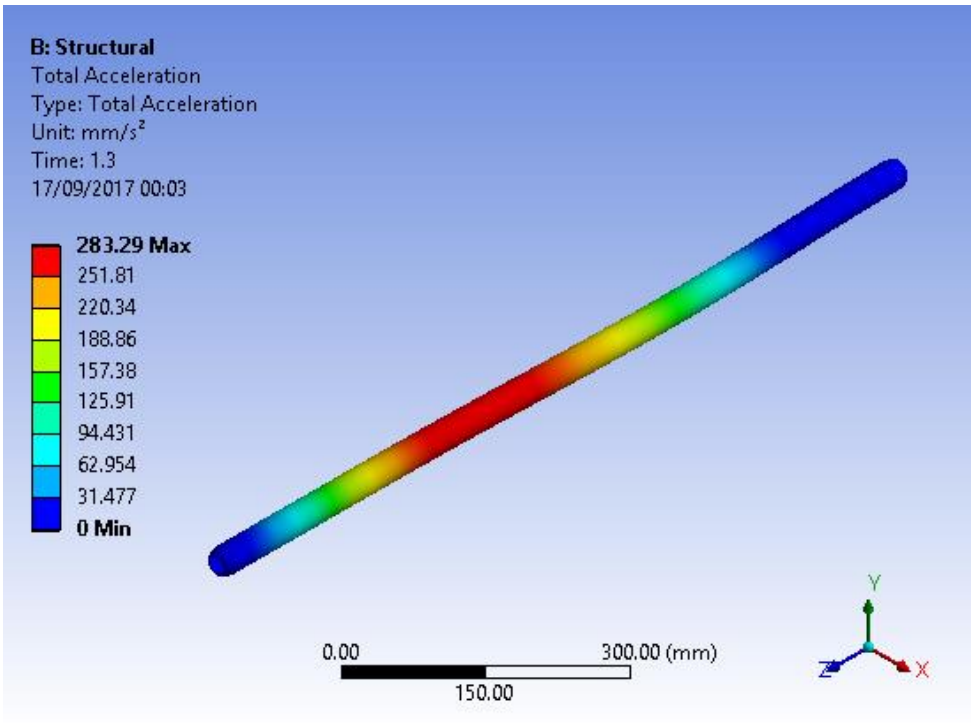


Fig. 13: Desplazamientos resultantes en la tubería.

En las Fig. 14 y Fig. 15 se muestran las curvas de desplazamientos y aceleraciones respectivamente, en las que se puede apreciar que el modelo FSI permite captar las vibraciones de la tubería.

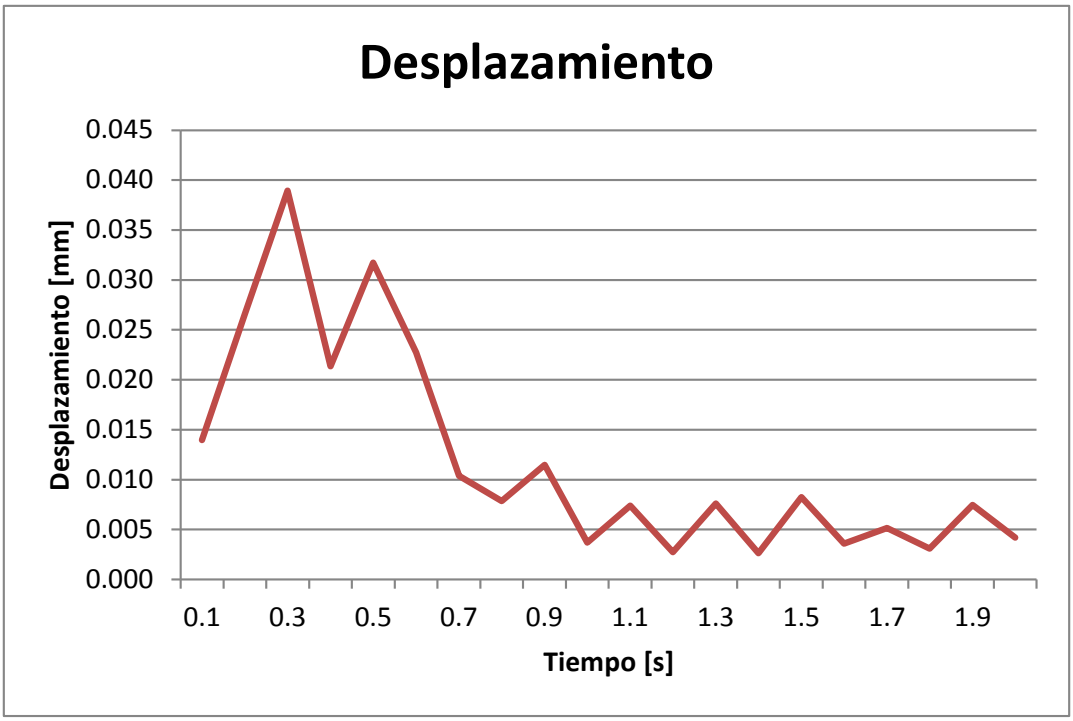


Fig. 14: Curva de desplazamientos resultantes en función del tiempo.

ISBN 978-607-8242-11-5

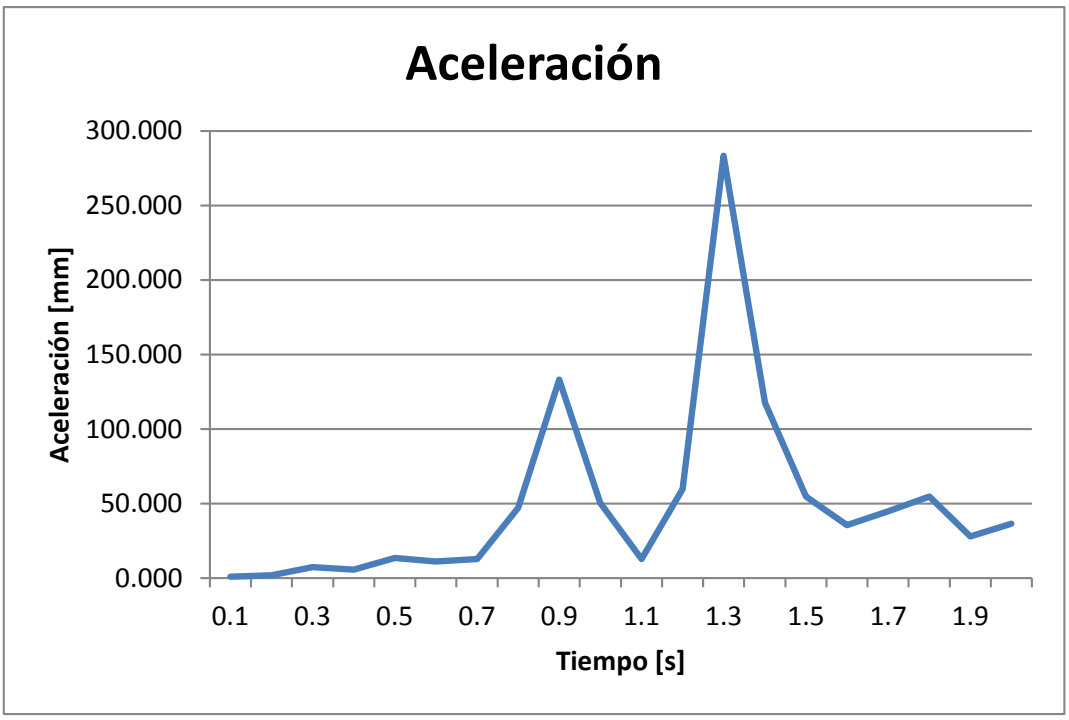


Fig. 15: Curva de aceleraciones resultantes en función del tiempo.

CONCLUSIONES

Se utilizaron y compraron los modelos de turbulencia RANS y LES para estudiar el comportamiento del flujo turbulento bifásico agua-aire, obteniéndose que el modelo RANS capta de forma adecuada los patrones del flujo y la presión variable, siendo computacionalmente menos costoso que el modelo LES. En consecuencia, el modelo RANS fue seleccionado para realizar el estudio FIV, mediante un modelo FSI. El modelo FSI implementado permitió captar adecuadamente las vibraciones en la tubería que transporta flujo bifásico, obteniéndose desplazamientos y aceleraciones oscilantes y variables en función del tiempo.

REFERENCIAS

Díaz, M. J. C., González, D., Parra, A., Casanova, E. y Asuaje, M.; "*Effect of Gas-Liquid Two Phase Flow in the Structural Behavior of Pipelines"*, 8th International Conference on Multiphase Flow, Jeju, Korea (2013)

Pittard, M. T.; "*Large Eddy Simulation Based Turbulent Flow-Induced Vibration of Fully Developed Pipe Flow"*, MS Thesis, Brigham Young University, USA (2003)

Shurtz, T. P.; "*Analysis of Induced Vibrations in Fully-Developed Turbulent Pipe Flow Using a Coupled LES and FEA Approach"*, MS Thesis, Provo, Utah: Brigham Young University (2009)

Kapusuzoglu, B.; *Literature Study for the Master's Thesis: "Modeling of Immiscible Incompressible Turbulent Two-Phase Stratified Pipe Flow"*, Delft University of Technology, Países Bajos (2016)

Ortiz-Vidal, L. E., Rodriguez, O. M. H., Mureithi, N.; "*An Exploratory Experimental Technique to Predict Two-Phase Flow Pattern From Vibration Response"*, ASME PVP Division Conference, Paris, France (2013)

Li, F., Cao, J., Duan, M., An, C., Su, J.; "*Two-phase Flow Induced Vibration of Subsea Span Pipeline"*, Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece (2016)

Fernández Oro, Jesús Manuel. *"Técnicas Numéricas En Ingeniería de Fluidos"*: Introducción a La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) Por El Método de Volúmenes Finitos. Reverté. (2012)

Deendarlianto, Andrianto, M., Widyaparaga, A., Dinaryanto, O., Indarto, K., "*CFD Studies on the gas-liquid plug two-phase flow in a horizontal pipe"*, J. Petroleum Science and Engineering. 10.1016 (2016)

Pouraria H., Seo J. K., Paik J. K., *"Numerical Modeling of two – phase oil – water flow patterns in a subsea pipeline"*. J. Ocean Engineering. 115, 135-148 (2016)

Mandhane J., Gregory G.,Aziz A., "*A Flow Pattern Map For Gas-Liquid In Horizontal Pipes".* J. Multiphase Flow, Vol 1. Pp. 537-553. (1974).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Verificación del Diseño Aerodinámico de la Hélice de un Aerogenerador de 3kW Mediante Software CFD

Renatto M. Yupa[1], Rosendo Franco[1], Quino Valverde[1], Franco Canziani[2]
(1) Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú
(2) Waira Energía S.A.C., Av. Guillermo Dansey 1685, Lima 1-Perú
E-mail: ryupa@pucp.pe; rofranco@pucp.edu.pe; qvalver@pucp.edu.pe; franco@waira.com.pe

Resumen

Se realizó la verificación del diseño aerodinámico de la hélice de un aerogenerador tripala de eje horizontal barlovento (HAWT) de 3 kW mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). La empresa Waira Energía S.A.C proporcionó el diseño al Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE para su análisis. Este estudio se realizó para determinar algunos parámetros aerodinámicos de la hélice en forma cuantitativa, tales como la fuerza de empuje axial, el torque y el coeficiente de potencia, y así compararlos con los parámetros de diseño. Además, el estudio permitió obtener otros parámetros aerodinámicos importantes para un análisis cualitativo, como son el patrón de flujo externo, el campo de presiones y el campo de velocidades. Todo el análisis se realizó para diferentes valores de la velocidad angular de la hélice, en un rango de 300 r.p.m. a 500 r.p.m., y de la velocidad de viento, en un rango de 7.5 m/s a 15 m/s. Los análisis se llevaron a cabo en el entorno del software ANSYS CFX™. Por otro lado, en forma complementaria, se utilizó un método analítico formado por la combinación de la teoría de disco actuador y elemento de pala (BEM), que incorpora fuerzas y momentos por unidad de longitud. Los coeficientes de sustentación (Cl) y arrastre (Cd) necesarios en el método BEM fueron obtenidos utilizando el software libre Qblade. Los cálculos analíticos se realizaron con el fin de compararlos con los resultados obtenidos a través de la simulación numérica y así verificar el modelo computacional. Finalmente, se construyó un prototipo del aerogenerador diseñado, en el que se midieron algunos parámetros para ser comparados con los resultados obtenidos. Las pruebas experimentales obtenidas para condiciones nominales están en correspondencia con lo obtenido por simulación numérica y el método analítico.

Palabras clave: Aerogenerador, Dinámica de fluidos computacional, Momento del elemento pala.

Verification of the Aerodynamic Design of the Wind Turbine Propeller of 3kW Trough CFD Software

Abstract

The verification of the aerodynamic design of the propeller of a horizontal axis wind turbine (HAWT) was performed by computational fluid dynamics (CFD). The company Waira Energía S.A.C provided the design to the INACOM / Aula PUCP-CIMNE Group for its analysis. This study was performed to determine some rotor aerodynamic parameters in quantitative form, such as axial thrust force, torque and power coefficient, and thus compare them with the design parameters. In addition, the study allowed to obtain other aerodynamic parameters important for a qualitative analysis, such as the external flow pattern, the field of pressures and the field of velocities. All the analysis was performed for different values of the angular velocity of the rotor, in a range between 300 r.p.m. And 500 r.p.m., and wind velocity, in a range between 10 m/s to 15 m/s. Analyzes were carried out in the ANSYS CFX™ software environment. On the other hand, in an additional way, an analytical method based on the combined Momentum and Blade Element Theory (BEM), which incorporates forces and moments per unit length. The coefficients of lift (Cl) and drag (Cd) required in the BEM method were obtained using the free software Qblade. The analytical calculations were made in order to compare them with the results obtained through the numerical simulation and thus verify the computational model. Finally, a prototype of the wind turbine was constructed, in which some parameters were measured to be compared with the obtained results. The experimental tests obtained for nominal conditions are in correspondence with the obtained by numerical simulation and the analytical method.

Keywords: Wind turbine, Computational fluid dynamics, Blade element momentum.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La energía eólica ocupa un predominante lugar en la producción de energía global. Una enorme cantidad de energía se puede aprovechar mediante la utilización de los recursos disponibles para la alta demanda de energía (Dai, 2015). El uso de la energía eólica se ha incrementado en las últimas décadas y es considerada una de las áreas más prometedoras por razones ambientales y ya que se obtiene de una fuente virtualmente inagotable (Danao, 2014).

El uso de la energía eólica es una propuesta interesante para el Perú, ya que el país cuenta con extensas áreas donde se puede aprovechar esta fuente inagotable de energía. En este contexto, uno de los proyectos de Waira Energía S.A.C consiste en el desarrollo de un aerogenerador tripala de eje horizontal de 3kW, para ser aplicado en aerobombeo directo. El grupo INACOM – PUCP/ Aula PUCP-CIMNE participó en este proyecto con el objetivo de realizar un estudio aerodinámico de la hélice y evaluar su rendimiento utilizando el software ANSYS CFX™. La generación de energía a través de un aerogenerador depende de la interacción entre la hélice y el viento, por tanto, el rendimiento del aerogenerador depende de las fuerzas aerodinámicas. El viento es caracterizado por su velocidad y dirección, que dependen a su vez del gradiente de presiones y la localización geográfica. La ecuación general que calcula la potencia disponible depende del área barrida por el rotor, densidad del fluido y velocidad del fluido en dirección normal al plano rotor (Wagner et al., 2009)

El método analítico formado por la combinación de la teoría de disco actuador y elemento de pala (BEM) permite calcular las fuerzas y momentos por unidad de longitud, siendo este último usado para determinar la potencia mecánica que sale del rotor. Este método utiliza curvas de coeficientes de sustentación (Cl) y arrastre (Cd) versus el ángulo de ataque (α), respectivamente. Estas curvas se obtienen mediante ensayos experimentales. Sin embargo, debido al costo que demanda realizar ensayos, existen programas que poseen una amplia librería de perfiles aerodinámicos. Tal es el caso del software libre Qblade, que por medio de un algoritmo extrapola la información base para obtener las curvas “Cl vs α” y “Cd vs α”, para un amplio rango de ángulos de ataque. Así mismo, es posible calcular el coeficiente de potencia del rotor mediante la ecuación descrita por (Tong, 2010), que relaciona la potencia que sale del rotor y la potencia disponible del viento, el cual debe ser menor a 59.3%, límite teórico de Betz (Hansen, 2015).

En general, la sección transversal de los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT), está formada de una serie de perfiles aerodinámicos (2D), que dan como resultado fuerzas de sustentación y arrastre, debido a la diferencia de presión a través del perfil 2D. En tal sentido, la teoría del elemento pala (BEM), es ampliamente usada para delinear un procedimiento del diseño aerodinámico de las palas de aerogeneradores HAWT (Burton et al, 2011). Las dimensiones óptimas del ángulo de ataque y la longitud de la cuerda para cada perfil aerodinámico se pueden adquirir de acuerdo con los parámetros de diseño, como el número de palas, la velocidad del viento, la velocidad de punta (TSR) y el ángulo de ataque de diseño.

En los últimos años, muchos autores han realizado estudios y predicciones acerca del rendimiento aerodinámico de aerogeneradores HAWT utilizando el método BEM. En la referencia (Lanzafame, 2007), se presentan las curvas aerodinámicas de los coeficientes de sustentación y arrastre utilizando el perfil aerodinámico S809 entre ángulos de ataque -30° y 90° a diferentes números de Reynolds. Estos resultados matemáticos se combinan con el método BEM para predecir el rendimiento de la hélice NRELPHASE VI. El caso es que no todos los perfiles aerodinámicos poseen datos experimentales de los coeficientes de sustentación y arrastre en la región de pérdida para la construcción de las gráficas de sustentación y arrastre en ángulos de ataque entre -30° y 90°. En la referencia (Vitale, 2008), también utilizó el método BEM para desarrollar una herramienta software para simulación de un HAWT. Sin embargo, el estudio está ciertamente limitado debido a que no se describen los datos aerodinámicos en la región de perdida.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para resolver problemas que involucran flujo de fluidos. Es un método óptimo para abordar los problemas sobre rendimiento aerodinámico, obteniendo diferencias menores al 10% entre resultados experimentales y numéricos (Suzuki, 2012). El laboratorio *“National Aerospace Laboratory” desarrolló* un aerogenerador HAWT 500kW utilizando el método CFD para el diseño óptimo de las palas y el análisis del rendimiento aerodinámico (Tachos, 2009). Muchos autores usan el método *Reynolds Averaged Navier*-Stokes (RANS) y el modelo de turbulencia SST k-ω a través de programas CFD para describir el flujo del fluido en estado estacionario en tres dimensiones (3D) y calcular las características aerodinámicas de la pala del aerogenerador NREL Phase (Le Pape, 2004). El uso del método CFD es altamente utilizado para predecir el comportamiento aerodinámico de perfiles aerodinámico en términos de Cl y Cd (Bhadake, 2016). Estudios de aerogeneradores HAWT mediante CFD en estado estacionario demuestran tener buena correspondencia entre resultados teóricos BEM y numéricos verificando así los diseños preliminares en términos de potencia (Cortez, 2014). Otros autores usan el método CFD como una herramienta para estudiar desplazamientos y esfuerzos en la estructura e incluso fenómenos de vibración (Yupa, 2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

El objetivo de este trabajo es verificar el diseño aerodinámico del aerogenerador de 3kW, mediante simulación numérica usando el software ANSYS CFX™. Se obtienen y se analizan las líneas de flujo, el mapa de presiones y el torque mecánico, obtenido mediante el método BEM y la simulación numérica. Finalmente, los resultados analíticos y computacionales se validan con las mediciones experimentales realizadas en el aerogenerador prototipo fabricado.

HÉLICE WAIRA 5

Consideraciones de diseño

El aerogenerador WAIRA 5 se encuentra localizado en Changuillo, región Nasca – Perú, posee una altura de 12m con una hélice de 5m de diámetro. Las condiciones de funcionamiento varían durante el año. Por tal motivo se estudia 9 casos con velocidades del viento de 10 m/s, 12.5 m/s y 15 m/s, y velocidades de rotación de la hélice de 300 r.p.m., 400 r.p.m. y 500 r.p.m. El estudio de la hélice se realiza con los datos proporcionados por la empresa Waira Energía S.A.C. Los perfiles aerodinámicos son llamados de diferentes formas de acuerdo con la geometría que presenta el intradós y el extradós del perfil. En la mayoría de casos, los perfiles más usados para máquinas eólicas pertenecen a la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics). Para el aerogenerador WAIRA 5 se utiliza el perfil NACA 4412, debido a sus buenas características aerodinámicas en términos de sustentación y arrastre (Abbott, 1945). La figura 1 muestra el perfil aerodinámico 4412.

MODELAMIENTO CFD

Ecuaciones gobernantes

El cálculo CFD se basa en las ecuaciones de continuidad de un fluido compresible y *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Considerando que el flujo es axisimétrico tridimensional, estacionario y turbulento las ecuaciones se escriben de la forma siguiente (Chen, 2014):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_i}\left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho \overline{u_i' u_j'} \right) + \rho f_1 + F_1 \tag{2}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, u_i y u_j(i, j = 1,2,3) son los vectores velocidad del fluido, μ denota el coeficiente de viscosidad dinámica, p es la presión dinámica, f_i representa las fuerzas de cuerpo, F_i es el término fuente, δ_{ij} es la función de Kronecker. El término adicional $-\rho\overline{u_i' u_j'}$ es el tensor de esfuerzos de Reynolds, donde u_i' y u_j' denotan la parte fluctuante de la velocidad. Usando la hipótesis de Boussinesq, el esfuerzo de Reynolds queda escrito de la siguiente manera:

$$\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \tag{3}$$

Donde k representa la energía cinética turbulenta, μ_t es la viscosidad de remolino. Los esfuerzos de Reynolds están relacionados a la turbulencia y el término $-\rho\overline{u_i' u_j'}$ es modelado a través de un modelo de turbulencia.

Modelamiento de turbulencia

Las bases fundamentales del modelo SST k-ω fueron desarrolladas por (Wilcox, 1988) y resuelven un modelo basado en turbulencia/frecuencia. El modelo k-ω se conoce como el modelo Wilcox. El modelo SST k-ω utiliza el modelo Wilcox en zonas cercanas a la pared y en zonas alejadas de la pared, la corriente libre, utiliza el modelo k-ε. Este cambio al modelo k-ε evita el problema que presenta el modelo k-ω de excesiva sensibilidad a los parámetros k y ω en la corriente libre (Menter, 1994). Además, el modelo SST k-ω posee un factor de mezcla (F_1) que garantiza una leve transición entre los dos modelos. El modelo SST k-ω es conocido por los buenos resultados para flujos con una gran área de separación (Menter, 2006). La formulación completa del modelo SST k-ω está dada como sigue:

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i}=\tilde{P}_k-\beta^*\rho k\omega+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] \quad (4)$$

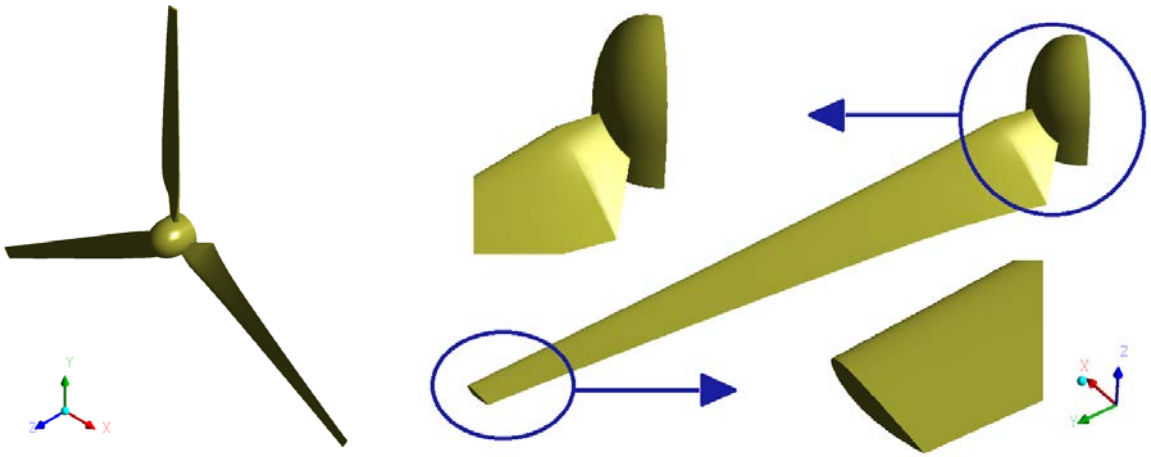
$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i\omega)}{\partial x_i}=\alpha\rho S^2-\beta\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_i}\right]+2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial\omega}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$F_1=\tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y},\frac{500\nu_\infty}{y^2\omega}\right),\frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right]\right\}^4\right\} \quad (6)$$

Donde $\mathrm{CD}=\max(2\rho\sigma_{\omega 2}\,1/\omega\cdot\partial k/\partial x_i\cdot\partial\omega/\partial x_i\,,10^{-10})$ es el término de difusión transversal, y es la distancia más cercana a la pared, μ es la viscosidad dinámica. F_1 es igual a cero en zonas lejanas a las superficies (modelo k-ε), y cambia a uno dentro de la capa límite (modelo k-ω).

Modelamiento geométrico

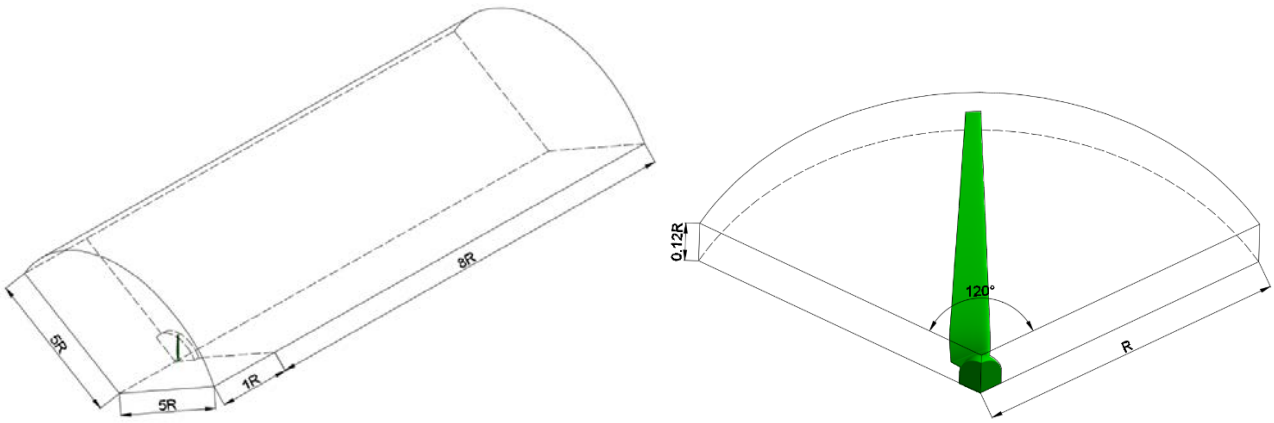
El modelo CAD 3D se obtiene por medio de operaciones de barrido a través de las estaciones que definen la pala. Para efectos de la simulación numérica y dada la periodicidad rotacional de la hélice, se puede simplificar la geometría a una tercera parte de hélice, con el fin de bajar el costo computacional. En la figura 2 se aprecia el modelo 3D simplificado de la hélice.



a) Modelo CAD 3D completo de hélice. b) Modelo CAD 3D simplificado de la hélice.

Fig. 2: Modelamiento CAD 3D.

La simulación se realiza mediante el software ANSYS CFX™ a través el método MRF (*Multiple Reference Frame*), el cual se basa en dividir el volumen total del fluido en dos dominios: un dominio rotatorio que contiene a la hélice y un dominio estacionario con el resto del fluido analizado. Además de utilizar el enfoque *Frozen rotor,* en la figura 3 se aprecian el conjunto de ambos dominios y el detalle del dominio rotatorio con sus respectivas dimensiones (Hsiao, 2013).



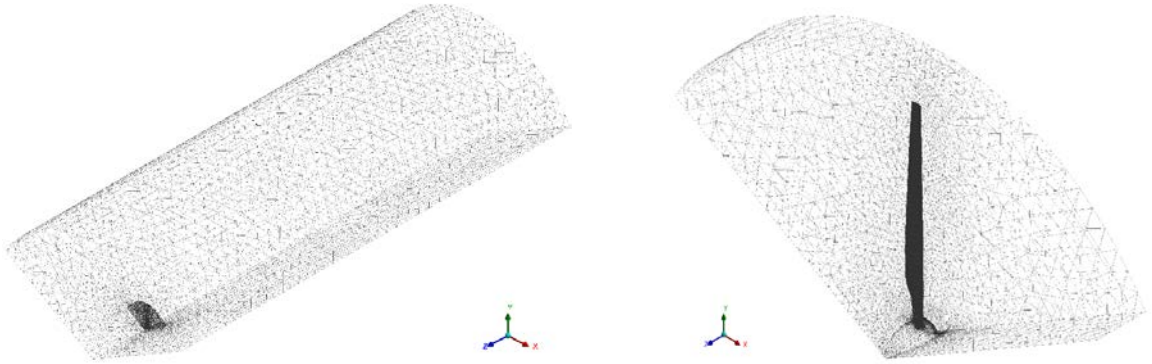
a) Dimensiones del dominio estacionario. b) Dimensiones del dominio rotatorio.

Fig. 3: Dimensiones de dominios.

ISBN 978-607-8242-11-5

Topología de malla

La malla es del tipo no estructurada utilizando elementos tetraédricos de segundo orden, debido a su facilidad de mallar geometrías complejas. El tamaño promedio de elementos en el dominio rotatorio es de 20 mm, mientras que para el dominio estacionario es de 600 mm. Además, El tamaño de los elementos en la zona de transición (Dominio estacionario y rotatorio) es de 8 mm para captar correctamente el campo de velocidades, presiones y el patrón de flujo. En la figura 4 se aprecia la discretización de los dominios analizados.



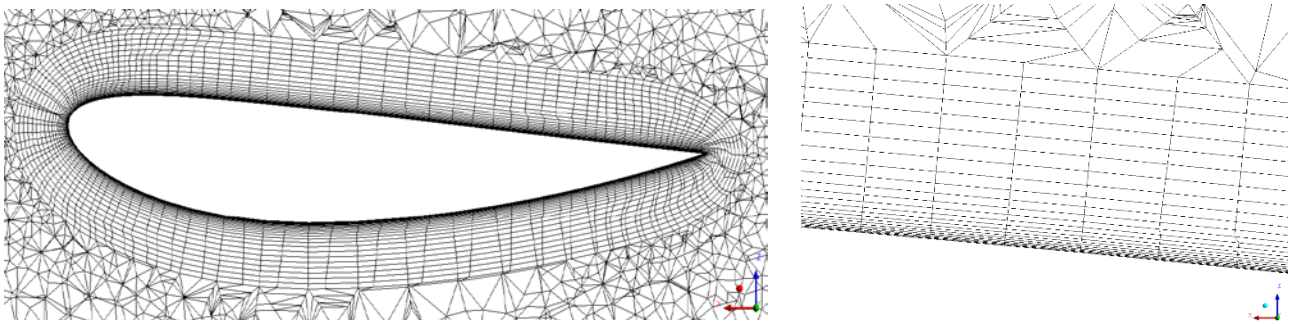
a) Discretización del dominio estacionario. b) Discretización del dominio rotatorio.

Fig. 3: Discretización del conjunto de dominios estacionario y rotatorio.

El tratamiento cercano a la pared se encarga de solucionar la zona afectada por la viscosidad de la capa límite mediante una altura adimensional y^+ y de esta manera predecir de forma correcta las fuerzas de arrastre viscosas en las zonas cercanas a la pala (Versteeg, 1995). El y^+ también es usado para describir la finesa de la malla. Además, se requiere que el y+ este por debajo de 5 en la subcapa viscosa y valores entre 5 y 30 se en la región de transición (Salim, 2009). Para un primer cálculo de y^+ se puede utilizar la ecuación 7 (Roshad, 2015).

$$\Delta y = L \cdot y^{+} \cdot \sqrt{74} \cdot (\mathrm{Re})^{-\frac{13}{14}} \tag{7}$$

Donde L representa la longitud característica y Re es el número de Reynolds del flujo. Δy es la distancia de la primera capa de la malla prismática, medida desde la pared. Se acostumbra a generar las capas de la malla según un factor de crecimiento igual a 1.2. La figura 4 muestra el refinamiento local en la superficie de la pala.



a) Discretización de la sección de la pala. b) Detalle de la malla cerca de la pared.

Fig. 4: Discretización local de las zonas cercanas a la pared.

Condiciones de contorno y casos de estudio

Durante la definición de condiciones de contorno se separan los dominios para definir la entrada, la salida, las áreas abiertas y las interfaces. Así mismo, se escoge un criterio de convergencia a través del número de iteraciones y el error residual final para el proceso iterativo. La entrada se define con velocidad del viento y perfil constante, mientras que la salida y la superficie cilíndrica del dominio estacionario se definen como áreas abiertas a presión atmosférica. Para asegurar un correcto intercambio de información entre los dominios estacionario y rotatorio se define un método de conexión de malla llamado GGI (General Grid Interface). Por otro lado, se utiliza una condición de no deslizamiento en la palas y periodicidad rotacional en ambos dominios con la finalidad de generar ahorro computacional. Finalmente, para asegurar la convergencia numérica con resultados precisos, se configura con 1000 iteraciones y un error residual RMS final de 0.01% para cada caso de simulación. La tabla 2 muestra los casos a simular numéricamente.

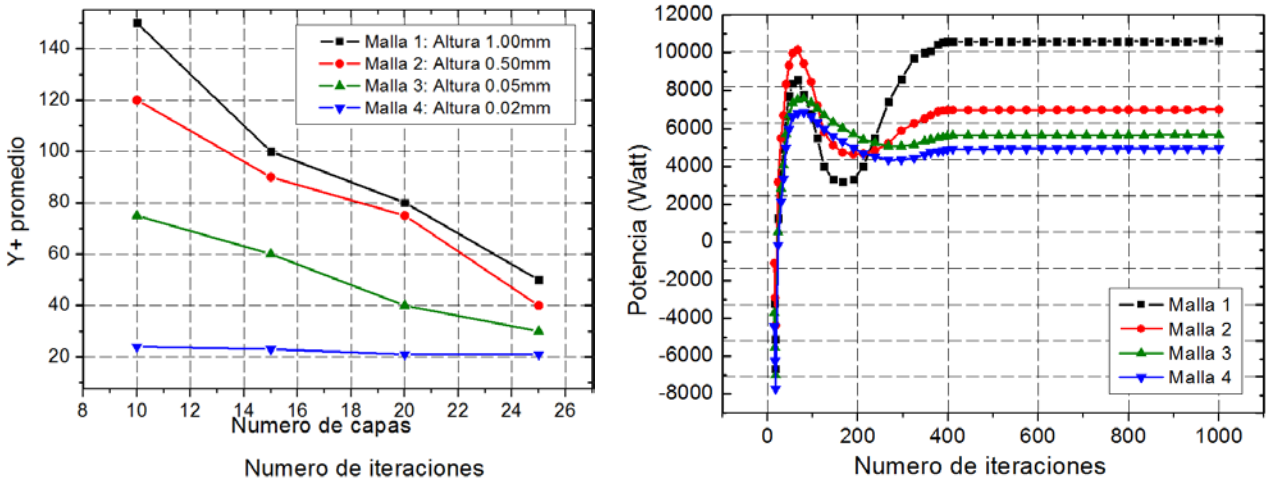
ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 2: Casos de estudio. Velocidades del viento (m/s) y velocidad de Rotación(r.p.m.).

Casos de estudio	*V Viento*	*V Rotación*
1, 2, 3	10, 12.5, 15	300
4, 5, 6	10, 12.5, 15	400
7, 8, 9	10, 12.5, 15	500

Independencia de malla y convergencia de resultados

Es importante realizar el análisis de independencia de malla. Este análisis se llevó a cabo mediante el estudio del y^+ aumentando el número de capas de elementos prismáticos y variando la altura de la primera capa. También es recomendable monitorear una variable para verificar la convergencia numérica para el error residual configurado en la simulación (10^{-4}). La figura 5 muestra las gráficas de y^+ y la potencia mecánica para el caso nominal (Velocidad de viento = 10 m/s y Velocidad de rotación de hélice = 300 r.p.m.).



a) Curvas aerodinámicas Cl vs α. b) Curvas aerodinámicas Cd vs α.

Fig. 5: Curvas aerodinámicas para el perfil NACA 4412.

MODELAMIENTO ANALÍTICO

Método BEM

La teoría *Blade Element Momemtum* (BEM) es la compilación de la teoría del momento y la teoría del elemento pala. La teoría del momento o del disco actuador es un modelo matemático que examina el equilibrio de momentos sobre un tubo de corriente anular rotatorio a través del rotor. La teoría del elemento pala calcula las fuerzas aerodinámicas en las secciones 2D (Ingram, 2011). Se tienen dos variables iterativas (Hansen, 2015), los coeficientes de inducción axial (a) y rotacional (a') y se definen como:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \cdot sen^2\phi}{(\sigma C_N)} + 1} \tag{8}$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cdot sen\phi \cdot \cos\phi}{(\sigma C_N)} - 1} \tag{9}$$

Donde, ϕ es el ángulo de incidencia, σ es la solidez que se define como la fracción de la zona del rotor que está cubierta por las palas (Hansen, 2015). C_N y C_T, los coeficientes de fuerza normal y tangencial respectivamente:

$$C_T = C_L sen\phi - C_D \cos\phi \tag{10}$$

$$C_N = C_L \cos\phi + C_D sen\phi \tag{11}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

El empuje axial y el momento resistente por unidad de longitud se calculan con las ecuaciones 12 y 13, respectivamente; donde B es el número de palas, c es la cuerda y V_0 es la velocidad del viento.

$$dE = \frac{1}{2}\rho B \frac{V_o^2 (1-a)^2}{sen^2\phi} c \cdot C_N \cdot dr \tag{12}$$

$$dM = \frac{1}{2}\rho \cdot B \frac{V_o (1-a)\omega \cdot r(a+a')}{sen\phi \cdot \cos\phi} \cdot c \cdot C_T \cdot r \cdot dr \tag{13}$$

Correcciones del método BEM

El método BEM fue desarrollado por (Glauert, 1935) sin dar resultados confiables. Por tal motivo algunos autores introdujeron correcciones al método. El factor de pérdidas en la punta de Prandtl (F), que corrige las cargas aerodinámicas, distribuyéndolas de manera azimutalmente uniforme (Hansen, 2015). Este se utiliza en las ecuaciones de momento dando resultados muy similares al caso real de tener número finito de alabes. La ecuación 14 muestra el factor de pérdidas Prandtl. Donde, $f = \frac{B}{2}\frac{R-r}{rsen\phi}$.

$$F = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1}(e^{-f}) \tag{14}$$

Cuando el factor de inducción axial es mayor que aproximadamente 0.2-0.4, la teoría clásica del momento simple no funciona (Hansen, 2015). Por lo que, Glauert introduce un ajuste al factor de inducción axial (a). Así mismo, se puede considerar a_c = 0.2 debido a los experimentos realizados por Wilson y Walker (Spera, 2009).

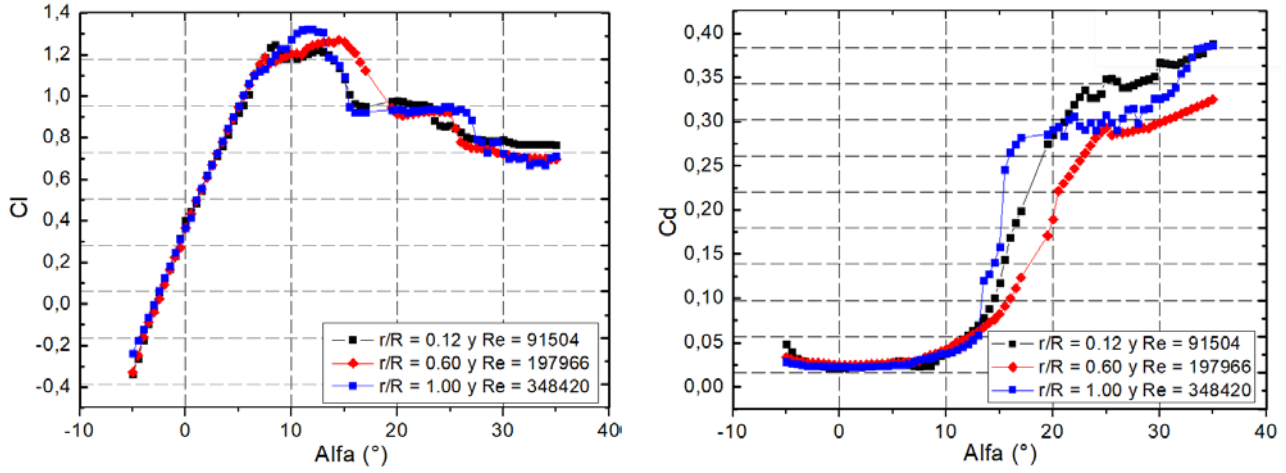
$$a = \frac{1}{2}\left[2 + K(1-2a_c) - \sqrt{(K(1-1a_c)+2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)}\right] \tag{15}$$

Curvas aerodinámicas

Los coeficientes que se requieren para el proceso iterativo se extraen del software libre Qblade, el cual posee una amplia librería de datos para extrapolar las gráficas Cl vs α y Cd vs α. El software Qblade necesita del número de Reynolds en una sección de la pala para calcular las curvas aerodinámicas. La ecuación 16 es usada para el cálculo del número de Reynolds en un perfil aerodinámico.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu} \tag{16}$$

Donde, ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido, c es la longitud de cuerda del perfil aerodinámico y μ es la viscosidad dinámica del fluido. El número de Reynolds varia a lo largo de la pala. La figura 6 muestra las curvas aerodinámicas 1) r/R = 0.12 y v = 10 m/s, 2) r/R = 0.6 y v = 12.5 m/s, 3) r/R = 0.12 y v = 15 m/s.



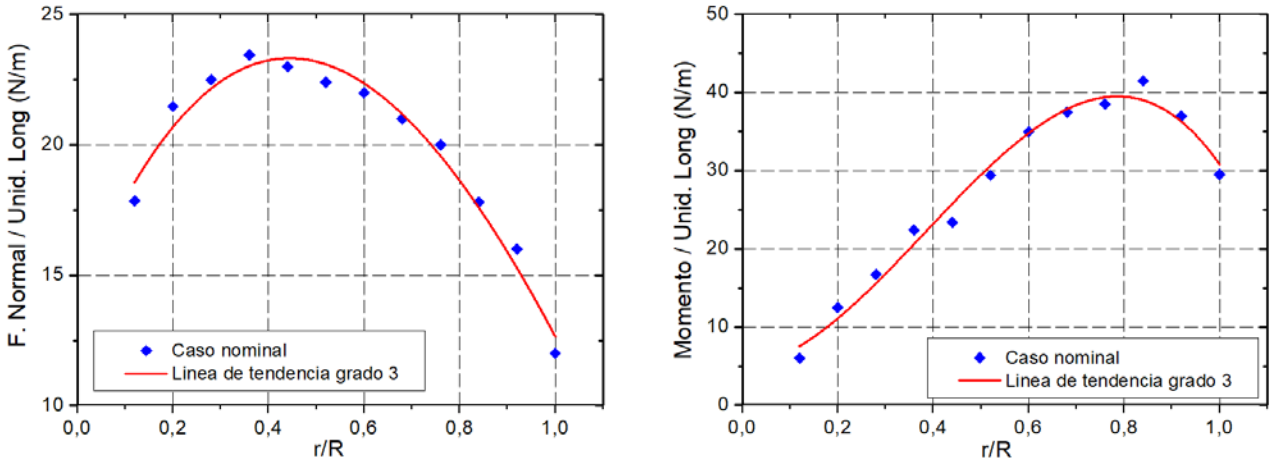
a) Curva aerodinámica Cl vs α. b) Curva aerodinámica Cd vs α.

Fig. 6: Curvas aerodinámicas para el perfil NACA 4412.

ISBN 978-607-8242-11-5

Carga aerodinámica sobre la pala

El caso nominal se entiende por las condiciones nominales de operación, es decir un viento de 10 m/s y una rotación de la hélice de 300 r.p.m. Mediante el método BEM se calcula de forma iterativa la fuerza normal y momento resistente en la pala por unidad de longitud. La figura 7 muestra los resultados para el caso nominal.



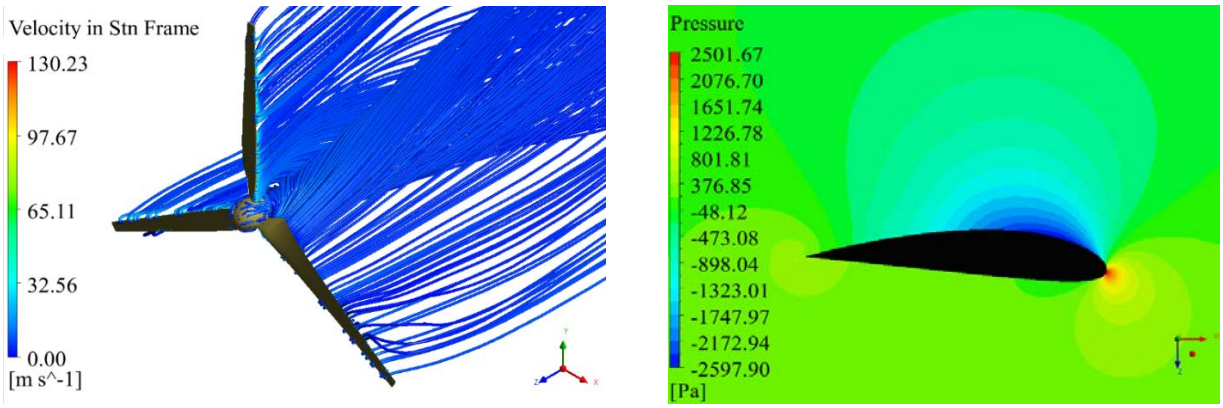
a) Fuerza por unidad de longitud vs α. b) Fuerza por unidad de longitud vs α.

Fig. 7: Carga aerodinámica por unidad de longitud a lo largo de la pala.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Resultados cualitativos

El post procesamiento cualitativo se realiza para las condiciones nominales de la hélice (caso 1). La figura 7 muestra a) el patrón de flujo externo, el cual coincide con el teórico (Hansen, 2015), presentando rotación debido al giro de la hélice con velocidades altas en algunas zonas por la cercanía a la hélice y b) el campo de presión en una sección de la pala, el cual genera el movimiento de la hélice debido a la sustentación.



a) Patrón de flujo externo. b) Campo de presiones sobre una sección de la pala.

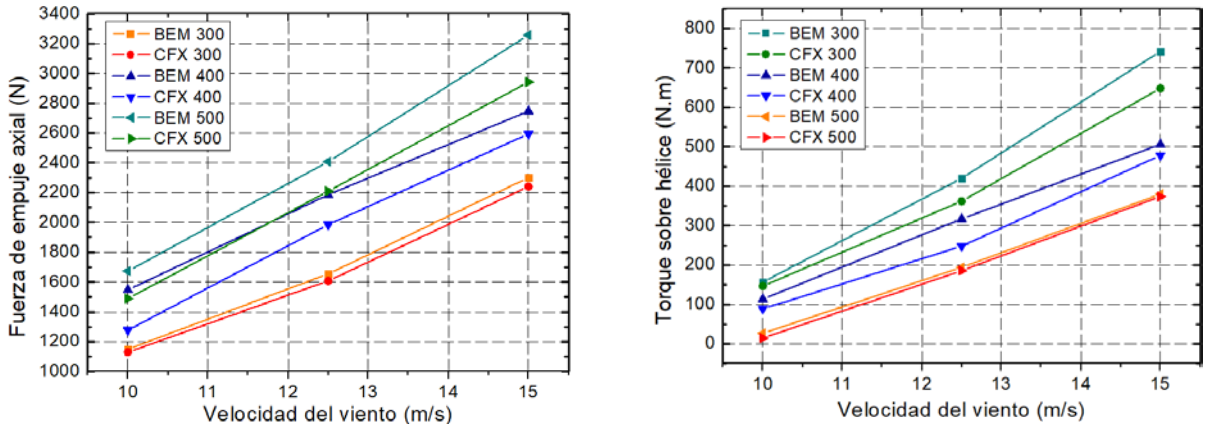
Fig.8: Post procesamiento de la simulación numérica para el caso 1 (nominal).

Empuje axial, Momento Resistente y Coeficiente de potencia

Los resultados de empuje axial utilizando el método BEM y el software ANSYS CFX™ poseen diferencias porcentuales menores al 10% en la mayoría de casos para el empuje axial, llegando como máximo a un 17% para el caso 4 (10 m/s y 400 r.p.m.). El Torque es calculado a partir de la fuerza tangencial, los resultados son tal como se esperaba con diferencias porcentuales menores al 20%, excepto el caso 7 (10 m/s y 500 r.p.m.) con 44%. La comparación de los dos métodos abordados se encuentra en correspondencia, tal como lo predijo (Hansen, 2015) al hacer un estudio del aerogenerador Nordtank NTK 500/41. El caso 7 presenta más diferencia porcentual que los demás, ya que es un caso con condiciones de velocidades críticas. Además, el método analítico BEM utiliza los coeficientes de sustentación (Cl) y arrastre (Cd) a partir de datos extrapolados del software Qblade, haciéndolo un método aproximado. La figura 9 muestra los resultados de empuje axial y torque resistente sobre la hélice. Se observa con claridad que los casos correspondientes a la velocidad de rotación nominal tienen muy buena correspondencia, sin exceder el 15% en entre los métodos BEM y CFD. Sin embargo, cuando se elevan las velocidades la diferencia entre los métodos crece. Las diferencias

ISBN 978-607-8242-11-5

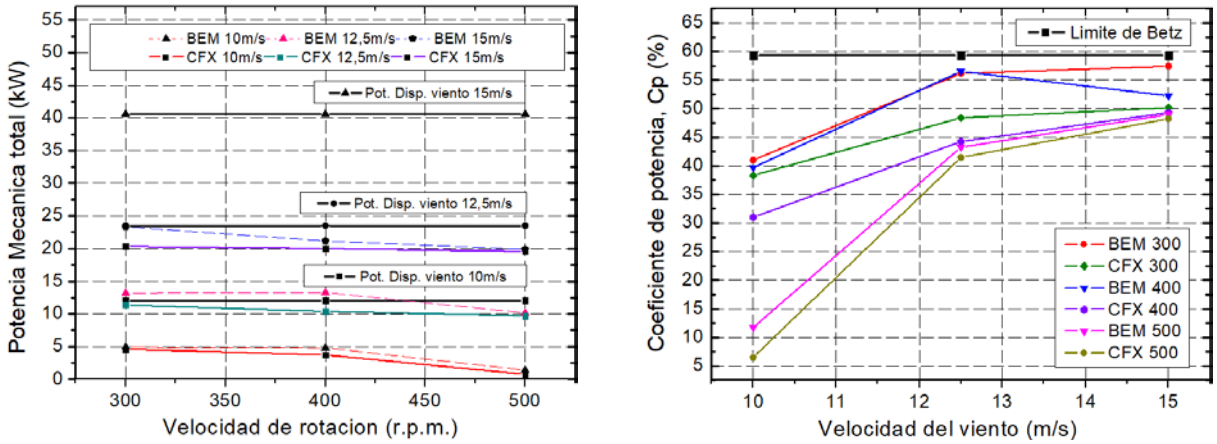
apreciadas se deben a la aproximación que utiliza el método BEM, ya que este discretiza la pala en secciones 2D para realizar los cálculos aerodinámicos.



a) Fuerza de empuje axial sobre la hélice. b) Torque resistente sobre la hélice.

Fig.9: Gráficas de fuerza de empuje y torque resistente.

Con el coeficiente de potencia (Cp) se consigue verificar que los resultados sean correctos en términos físicos, ya que este no debe exceder el límite de Betz del 59,3% (Hansen, 2015). La figura 10 muestra las gráficas de potencia vs velocidad de viento y Cp vs velocidad de viento. En condiciones nominales de operación, el Cp es de 38% y 41% utilizando el método CFD y BEM, respectivamente. Se verifican los resultados de simulación y analíticos, ya que deben ser menores al límite teórico de Betz,



a) Potencia vs velocidad de rotación de la hélice. b) Cp vs velocidad del viento.

Fig.10: Gráficas de Potencia mecánica y coeficiente de potencia de la hélice.

En condiciones nominales, con velocidad de viento de 10 m/s, la potencia mecánica determinada por el modelo numérico de la hélice mediante ANSYS CFX™ es 4,61kW, mientras que por el método analítico BEM resulta 4.93kW. Finalmente, en mediciones experimentales en un aerogenerador prototipo se obtuvo 4.00kW de potencia eléctrica; considerando la eficiencia del generador síncrono aproximadamente en 95%, la potencia mecánica se estima en 3.8kW. Por tanto, la simulación numérica del modelo presentado concuerda bastante bien con el resultado experimental y el método analítico BEM, permitiendo además predecir y analizar detalladamente el comportamiento del aerogenerador en diversos escenarios de operación, tal como se ha demostrado.

CONCLUSIONES

Se estudió el rendimiento de la turbina eólica utilizando el método analítico BEM y el método numérico CFD. Ambos métodos son muy exitosos para el diseño de palas HAWT, obteniendo diferencias porcentuales menores al 10% y 20% para el empuje axial y momento resistente, respectivamente. Estas diferencias porcentuales se atribuyen a que el software Qblade extrapola los coeficientes Cd y Cl para usarlos en el método BEM de forma iterativa. Consecuentemente, se verificó que el coeficiente de potencia por los métodos BEM y CFD son menores al límite teórico de Betz de 59,3%, obteniéndose como máximo 57,4% para el caso crítico mediante el método BEM y 50.16% utilizando el método CFD. Finalmente, el modelo computacional es verificado mediante la teoría BEM con una adecuada correspondencia entre los resultados y validado mediante las pruebas realizadas en campo del prototipo del aerogenerador.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

Abbott I.H., A.E. Von Doenhoff, L.S. Stivers, *"Summary of Airfoil Data"*, Report No. 824 National Advisory Committee for Aeronautics, USA (1945).

Bhadake, P., V.G. Gore, *"A Review on Aerodynamic Analysis of Horizontal Axis Wind Turbine Blade Using CFD Technique"*, 3(4), International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2394-3661 (2016).

Burton T., Jenkins, N., Sharpe, D. y Bossanyi, E.; *Wind Energy Handbook,* 2nd ed., John Wiley & Sons, United Kingdom (2011)

Cortez M, *"Análsis aerodinámico de la hélice de un aerogenerador tripala de eje horizontal de 3kW mediante simulación numérica"*, Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, PUCP (2014).

Danao, L., J. Edwards, O. Eboibi, R. Howell, *"A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine",* Applied Energy, 116, 11-124 (2014).

Dai, K., A. Bergot, C. Liang, W-N. Xiang, Z. Huang, *"Environmental issues associated with wind energy – A review",* Renewable Energy, 75, 911-921 (2015).

Glauert, H, Airplane propellers. In: Durand, WF (ed.), Aerodynamics Theory, 4th ed, Springer, Berlin (1935)

Hansen, M.O.L.; *Aerodynamics of Wind Turbines*, 3rd ed., Earthscan, USA (2015)

Hsiao F.B., C.J. Bai, W.T. Chong, *"The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Shapes Using Experimental and numerical Methods"*, Energies, 6, 2784-2803 (2013).

Ingram G., *"*Wind Turbine Bade Analysis sing the Blade Element Momentum Method Report*"*, Durham University, 2011.

Lanzafame R., M. Messina, *"Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory"*, Renewable Energy, 32 (14), 2991-2305 (2007).

Le Pape A., J. Lecanu, "3D Navier-Stokes Computations of Stall-regulated Wind Turbine", Wind Energy, 7, 309-324 (2004).

Martin D., J. Wendler, *Qblade Guidelines*. Manual, Berlin (2013)

Menter F. R., *"Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications"*, AIAA JOURNAL, 32(8), 1598-1605 (1994).

Menter F. R., R. Langtry, S. Völker, *"*Transition Modelling for General Purpose CFD Codes*"*, Flow Turbulence Combust, 77, 277-303 (2006).

Roshad S. Z., S. Alimirzazadeth, M. Rad, *"*RANS simulations of the stepped duct effect on the performance of ducted wind turbine*"*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aeordynamics, 145, 270-279 (2015).

Salim S. M., S. C. Cheah, *"Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-Bounded Turbulent Flows"*, International Multiconference of Engineers and Computer Scientests, Hong Kong (2009).

Spera D. A., Wind Turbine Technology Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, 2nd ed., ASME Press, New York (2009)

Suzuki M., *"Numerical Analysis of Horizontal-Axis Wind Turbine Characteristics in Yawed Conditions"*, Open Journal of Fluid Dynamics, 2, 331-336 (2012).

Tachos N.S., A.E. Filios, D.P. Margaris, J.K. Kaldellis, *"A Computational Aerodynamics Simulation of the NREL Phase II Rotor"*, Open Journal of Fluid Dynamics, 3, 9-16 (2009).

Tong, W.; *Wind Power Generation and Wind Turbine Design,* 1st ed., WIT Press, USA (2010)

Verteeg, H. K., W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics, the finite volumen method, 1st ed, Longman Group Ltd, New York (1995).

Vitale A.J., A.P. Rossi, *"Software tool for horizontal-axis wind turbine simulation"*, International Journal of Hydrogen Energy, 33(13), 3460-3465 (2008).

Wagner H., J. Mathur, *"Fluid Mechanics, Seventh Edition"*, Springer, Berlin (2009).

Wilcox D. C., *"Multiscale Model for Turbulent Flows"*, AIAA JOURNAL, 26(11), 1311-1320 (1988).

X. Chen, *"*Optimization of Wind Turbine Airfoils Blades and Wind Farm Layouts*",* Dissertation, Washington University in St. Louis (2014).

Yupa R.M., "Análisis estructural y modal de la hélice de un aerogenerador de 3kW de potencia mediante simulación numérica computacional", Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, PUCP (2016).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Determinación de Tensiones Residuales Producidas por Soldadura en una Carcasa Soldada de Caja Reductora Mediante Simulación por el Método de Elementos Finitos

W. Guillermo Loaiza[1], Rosendo Franco[1], Herbert Yépez[1]
(1) Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú
E-mail: g.loaiza@pucp.pe; rofranco@pucp.pe; hyepez@pucp.pe

Resumen

El presente trabajo trata sobre la determinación de la secuencia de soldeo más apropiada para soldar la carcasa de una caja reductora. Para este fin se evaluaron diferentes secuencias de soldeo mediante simulación numérica por Elementos Finitos. La simulación se basó en la modelación de un problema termo-estructural semi-acoplado, en el cual la solución estructural depende de la solución térmica. En el análisis térmico se usó el modelo de doble elipsoide de Goldak para simular la fuente de calor y sus dimensiones se determinaron a partir de las expresiones desarrolladas por Christensen. En el análisis estructural se usó un modelo termo-elasto-plástico para simular el comportamiento del material, considerando el criterio de fluencia de von Mises y la regla de endurecimiento cinemático bilineal. Para simular la deposición de material se utilizó la técnica *birth and death*. En el estudio se utilizaron las propiedades físicas y mecánicas termo-dependientes del acero ASTM-A36, material utilizado para construir la carcasa. Con el modelo desarrollado se evaluaron cuatro secuencias de soldeo de una sola pasada, concluyendo que los resultados más satisfactorios se obtienen cuando se usan métodos para el control de la distorsión.

Palabras clave: elementos finitos; simulación de soldadura; tensiones residuales; carcasa de caja reductora

Determination of Residual Stresses Produced by Welding on a Welded Gearbox Housing by Means of Simulation by Finite Element Method

Abstract

The present work is about the determination of the most appropriate welding sequence for welding a gearbox housing. For this purpose, different welding sequences were evaluated by means of Finite Element numerical simulation. The simulation was based on a semi-coupled thermo-structural problem modeling, in which the structural solution depends on the thermal solution. The Goldak's double ellipsoid model was used in the thermal analysis to simulate the heat source and its dimensions were determined from the expressions developed by Christensen. A thermo-elasto-plastic model was used in the structural analysis to simulate the material behavior, considering the von Mises yield criterion and the bilinear kinematic hardening rule. To simulate the material deposition, the birth and death technique was used. The thermo-dependent mechanical and physical properties of ASTM-A36 steel, the material used to construct the housing, were considered in this study. With the developed model four single pass welding sequences were evaluated, concluding that the most satisfactory results are obtained when methods for the control of the distortion are used.

Keywords: finite elements; welding simulation; residual stress; gearbox housing

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las carcasas de cajas reductoras metálicas se fabrican mediante dos métodos principales: por fundición o por soldadura. La fabricación por soldadura es muy utilizada hoy en día, debido a que no requiere de los costosos moldes utilizados en la fundición y a que pueden ofrecer soluciones específicas, aún para producciones unitarias, de manera rentable. Una desventaja de la fabricación por soldadura es que la pieza final presenta tensiones y deformaciones residuales, que normalmente se atenúan con procesos térmicos posteriores. En tal sentido, definir una secuencia de soldeo que genere las menores tensiones y deformaciones residuales, sería de gran utilidad para la fabricación de este tipo de elementos.

El proceso de soldadura por arco engloba varios fenómenos físicos acoplados, tales como, el flujo de fluidos en el charco de soldadura, el flujo de calor en la estructura, la evolución de la microestructura de los materiales y la aparición de esfuerzos y deformaciones residuales en la unión soldada. La respuesta mecánica de la unión soldada es muy dependiente de la distribución de energía térmica y de la evolución de la microestructura (Sen, 2012; Akhlaghi & Acevedo, 2011).

La mayoría de autores que han publicado sobre esta temática concuerdan en que un modelo termo-estructural semi-acoplado, en el cual la solución estructural depende de la solución térmica, es suficiente para resolver este problema. El modelo computacional utilizado en este estudio fue validado experimentalmente, tomando como referencia los desplazamientos residuales en varios puntos de una junta a tope. Se verificó que existe una buena correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales, con un error menor del 10% (Franco, 2017).

El aspecto más importante en el análisis térmico es definir una fuente de calor apropiada, mientras que en el análisis estructural lo más importante es el modelo de material utilizado. Estos puntos se describen a continuación para el caso de estudio de la carcasa soldada, conjuntamente con otras consideraciones para realizar una simulación adecuada. Luego se evalúan cuatro secuencias de soldeo y se selecciona aquella que presenta menores tensiones y deformaciones residuales.

MODELO DE LA FUENTE DE CALOR

Seleccionar adecuadamente un modelo de fuente de calor para obtener una historia térmica adecuada es de suma importancia para obtener resultados estructurales favorables, vale decir, tensiones y deformaciones residuales. Especialmente en las zonas donde la distribución de temperaturas afecta directamente al material base, la zona de fusión (FZ) y la zona afectada por el calor (HAZ) (Franco, 2017).

Las investigaciones relacionadas con los modelos de fuentes de calor datan de 1935 cuando Rosenthal comenzó sus estudios teóricos sobre los procesos de soldadura por arco. En sus trabajos, ha propuesto modelos de fuentes de calor puntuales, lineales y planos (Rosenthal, 1941). Sin embargo, las mediciones de las temperaturas en las zonas afectadas por la fusión y el calor difieren significativamente de los valores proporcionados por esas soluciones, ya que la singularidad localizada en el centro de la fuente de calor origina niveles de temperaturas muy altos (Fassani & Trevisan, 2003). En su libro Análisis Térmico de Soldaduras (Nguyen, 2004) presenta varias soluciones analíticas para modelos de fuentes de calor estacionarias y móviles, incluyendo la fuente de calor volumétrica de distribución gaussiana, (Jeyakumar, Christopher, & Rao, 2013a) utilizaron este enfoque para evaluar la tensión residual en la junta soldada a tope de placas de acero ASTM A36 y encontraron un buen acuerdo con los resultados experimentales además otros autores tales como, (Stamenković & Vasović, 2009) usaron un método simplificado suponiendo que el arco de soldadura se mantuvo en un elemento con una generación de calor de volumen específico y constante, luego se trasladó al siguiente elemento hasta el final del paso de carga cuando terminó la soldadura.

Hay una gran variedad de modelos de fuentes de calor documentados en la literatura, pero sin duda es el doble modelo elipsoidal desarrollado por Goldak y Akhlaghi, como se ilustra en la Fig. 2 (Goldak & Akhlaghi, 2005), el más utilizado por los investigadores en simulaciones de soldadura de arco; (Guimarães et al., 2013) utilizó el modelo de Goldak para determinar tensiones residuales en acero ASTM AH36 soldado por proceso TIG. El mismo modelo fue utilizado por (Malik, Qureshi, Dar, & Khan, 2008) en la soldadura de una tubería de pared delgada para estudiar las tensiones residuales. Los resultados de la simulación en este trabajo muestran una gran precisión para la distribución de temperatura transitoria y tensiones residuales en comparación con los resultados experimentales que realizaron. (Abid, Siddique & Mufti, 2005; Asserin, Loredo, Petelet & Iooss, 2011; Chand, Kim, Wu & Kang, 2014; Fu, Lourenço, Duan & Estefen, 2016; Pasternak, Launert & Krausche, 2015; Qureshi, Malik & Dar, 2009; Wang, Liu, Wang, Xiong & Fang, 2017) y muchos otros autores usaron también este modelo de fuente de calor para sus investigaciones.

 ISBN 978-607-8242-11-5

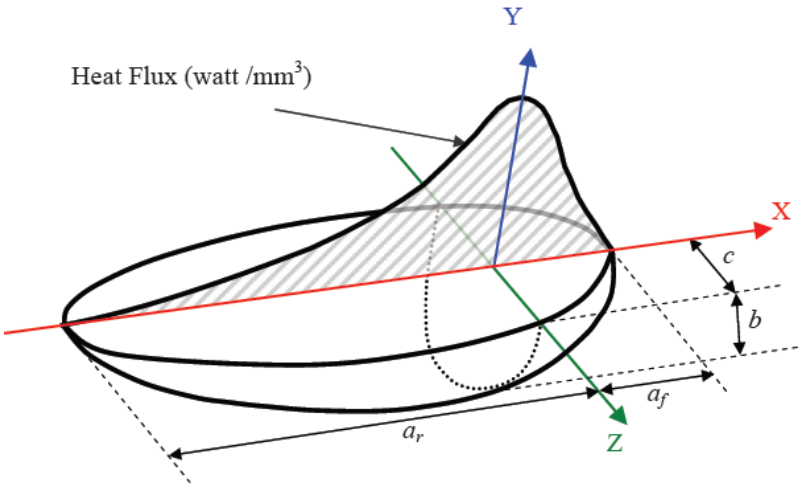


Fig. 2: Modelo de la fuente de calor de doble elipsoide de Goldak (Malik et al., 2008).

El calor de aporte q, en frente del centro del arco, se define como:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_f}{\pi\sqrt{\pi}\, a_f bc} e^{\{-3(\frac{x^2}{a_f{}^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2})\}} \quad (1)$$

Y detrás del centro del arco, como:

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_r}{\pi\sqrt{\pi}\, a_r bc} e^{\{-3(\frac{x^2}{a_r{}^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2})\}} \quad (2)$$

Donde: a_f, a_r, b, y c son los semiejes del elipsoide, asociados con las regiones sobre las que ocurre el aporte de calor; f_f distribuye el calor delante del centro del arco; f_r distribuye el calor detrás del centro del arco; Q calor total generado por el arco (Q = Voltaje × Intensidad de la corriente); η es la eficiencia de la fuente de calor.

Los parámetros del proceso de soldadura, considerados en el presente trabajo para simular todos los cordones de soldadura de la carcasa, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del proceso de soldadura

Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Eficiencia (%)
24	120	7.5	80

Los parámetros de la fuente de calor de Goldak se estimaron usando el procedimiento de Christensen (Christensen, Davies & Gjermundsen, 1965). En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos con dicho procedimiento.

Tabla 2: Parámetros de la fuente de calor de Goldak

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud del frente elipsoidal	6.5	mm
Longitud posterior elipsoidal	17	mm
Ancho de la fuente de calor	5	mm
Profundidad de la fuente de calor	7.66	mm
Fracción de calor en el frente elipsoidal	0.6	
Fracción de calor el posterior elipsoidal	1.4	

ISBN 978-607-8242-11-5

MODELO DE MATERIAL

El término inelasticidad se usa para describir cualquier comportamiento constitutivo diferente al comportamiento elástico. En general el comportamiento inelástico incluye a los comportamientos visco-elástico, visco-plástico y elasto-plástico. La teoría de la plasticidad se encarga de estudiar los sólidos que, al ser sometidos a un sistema de cargas, pueden mantener deformaciones permanentes cuando son completamente descargados. La suposición de que estas deformaciones permanentes (plásticas) no dependen de la tasa de aplicación de las cargas, conduce a la teoría de plasticidad independiente de la tasa *(rate-independent plasticity).* Los materiales que pueden ser descritos adecuadamente por esta teoría se denominan plásticos o plásticos independientes de la tasa (Manitaras, 2012). El comportamiento de los metales dúctiles, como los aceros, puede ser descrito adecuadamente por la teoría de los materiales plásticos indicada en el párrafo anterior. Al aplicar cargas sobre estos materiales se comienzan a deformar elásticamente, hasta que las tensiones alcanzan el valor de la tensión de fluencia, entonces también se deforman plásticamente. El hecho de que la deformación puede tener una componente elástica (recuperable) y otra componente plástica (permanente) hace que a estos materiales se les denomine materiales eslasto-plásticos (Kelly, 2013; Lubliner, 2008). Para el caso uniaxial el modelo constitutivo quedaría dado por la ecuación (3) y el gráfico de la Fig. 3.

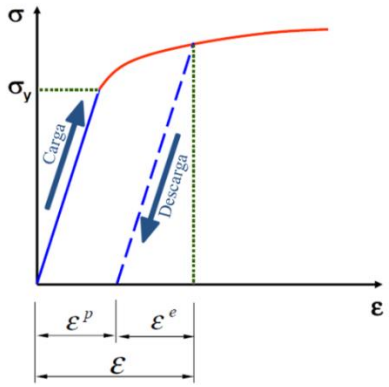


Fig. 3: Diagrama Esfuerzo – deformacion: Componentes de deformación: elástica y plástica (Qi, 2006)

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon^p \tag{3}$$

Donde: ε es la deformación total; ε^e es la deformación elástica; ε^p es la deformación plástica; σ es la tensión axial; E es el módulo de elasticidad del material.

La componente plástica de la deformación está caracterizada por el criterio de fluencia, la regla de flujo, que se toma normal a la superficie de fluencia, y la regla de endurecimiento. En este trabajo se utilizó el criterio de fluencia de von Mises, expresado en la ecuación (4) y la regla de endurecimiento cinemático, utilizando un modelo bilineal.

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = \sigma_y \tag{4}$$

Adicionalmente, el estudio del proceso de soldadura involucra un problema térmico que repercute en las deformaciones que ocurren en el material, modificando el modelo constitutivo descrito anteriormente (Mahapatra, 2006; Farfán, 2010; Asserin, 2011). Se obtiene entonces un modelo termo-elasto-plástico, dado por la ecuación (5).

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^t \tag{5}$$

Donde: ε es la deformación total; ε^e es la deformación elástica; ε^p es la deformación plástica; ε^t es la deformación por carga térmica, que se determina según la ecuación (6).

CONSIDERACIONES PARA LA SIMULACIÓN

La mayoría de los autores usan la técnica de *birth and death* en los elementos que componen el cordón de soldadura para simular la deposición de metal en el cordón de soldadura (Abid et al., 2005; Nguyen, 2004,

ISBN 978-607-8242-11-5

Ohta, Matsuoka & Suzuki, 1999; Qureshi et al., 2009; Stamenković & Vasović, 2009). Por otro lado (Fanous, Younan & Wifi, 2003) proponen un método diferente llamado técnica de movimiento de los elementos. Otros autores no consideran el efecto deposición de metal o no mencionan su consideración (Fu et al., 2016; Wang et al., 2016). Algunos investigadores reportan dificultades con la técnica de *birth and death*. (Malik et al., 2008) y (Qureshi et al., 2009) informan de la posibilidad de una distorsión excesiva en el análisis estructural.

(Malik et al., 2008, Qureshi et al., 2009 y Abid et al., 2005) describen el uso de la técnica *birth and death* y sugieren algunas recomendaciones. Todo el modelo de elementos finitos se genera en el inicio. Antes de la primera etapa se desactivan todos los elementos que representan el metal de aportación asignándoles un valor muy bajo de conductividad en el análisis térmico y un valor muy bajo de rigidez en el análisis mecánico. Durante el análisis térmico, todos los nodos de los elementos desactivados (excepto los compartidos con el metal base) también se fijan a temperatura ambiente hasta el nacimiento del elemento respectivo. Los elementos desactivados se reactivan secuencialmente cuando están bajo la influencia de la fuente de calor. Durante el análisis mecánico se produce un nacimiento secuencial de un elemento cuando el elemento alcanza la temperatura de solidificación. En este momento las tensiones iniciales en el elemento toman valor cero. Las temperaturas de fusión y ambiente se fijan como las temperaturas a las que las deformaciones térmicas son cero para los coeficientes de expansión térmica del material de aporte y del material base. (Lindgren, 2006), hace recomendaciones adicionales. Para obtener mejores resultados computacionales, se supone que la fuente de calor permanece al menos una vez en cada elemento a lo largo del cordón de soldadura, de modo que el algoritmo de entrada de calor no pierda elementos durante un incremento de paso de tiempo.

El modelo desarrollado en el presente estudio implementa la técnica de nacimiento y muerte del elemento y recoge todas las recomendaciones anteriores.

El paso de tiempo durante la soldadura se determina como el tiempo total de soldadura entre el número de elementos a lo largo del cordón, de manera que el aporte de calor de cada elemento sea gradual y uniforme. Luego de terminada la soldadura viene la etapa de enfriamiento, en la cual se pueden utilizar pasos de tiempo mayores. En todo caso se recomienda que el incremento del paso de tiempo en la etapa de enfriamiento sea gradual para evitar comportamientos incorrectos o falta de convergencia en los parámetros calculados. Como ya se indicó anteriormente, es conveniente que la malla utilizada para el problema estructural y los pasos de tiempo sean los mismos que para el problema térmico, para minimizar igualmente el costo computacional y evitar errores de interpolación.

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL MATERIAL

Cuando se realizan estudios y trabajos referidos a la modelación del proceso de soldadura, uno de los mayores retos consiste en establecer, con la mayor precisión posible, las propiedades mecánicas y físicas termo-dependientes del material en cuestión. En muchas ocasiones esta información no está disponible de forma completa. En la Tabla 3 se muestran las propiedades termo-dependientes del material utilizado desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de fusión.

Tabla 3: Propiedades del material dependientes de la temperatura (Jeyakumar, 2013)

Temp (K)	Densidad (kg/m^3)	Conductividad Termica W/(m·K)	Calor Especifico (J/(kg·K))	Modulo Elástico (GPa)	Coeficiente De Poisson	Coeficiente de Expansión Térmica $(K^{-1})\cdot 10^{-5}$	Esfuerzo de Fluencia (MPa)
298	7880	60	480	210	0.3	1.15	380
373	7880	50	500	200	0.3	1.2	340
473	7800	45	520	200	0.3	1.3	315
673	7760	38	650	170	0.3	1.42	230
873	7600	30	750	80	0.3	1.45	110
1073	7520	25	1000	35	0.3	1.45	30
1273	7390	26	1200	20	0.3	1.45	25
1473	7300	28	1400	15	0.3	1.45	20
1673	7250	37	1600	10	0.3	1.45	18
1773	7180	37	1700	10	0.3	1.45	15

ISBN 978-607-8242-11-5

MODELO GEOMÉTRICO Y MALLADO DE LA CARCASA

El modelo geométrico discretizado se aprecia en la Fig. 5. La geometría se desarrolló por medio de un algoritmo para el diseño de carcasas soldadas de cajas reductoras de engranajes cilíndricos (Blas , 2016).

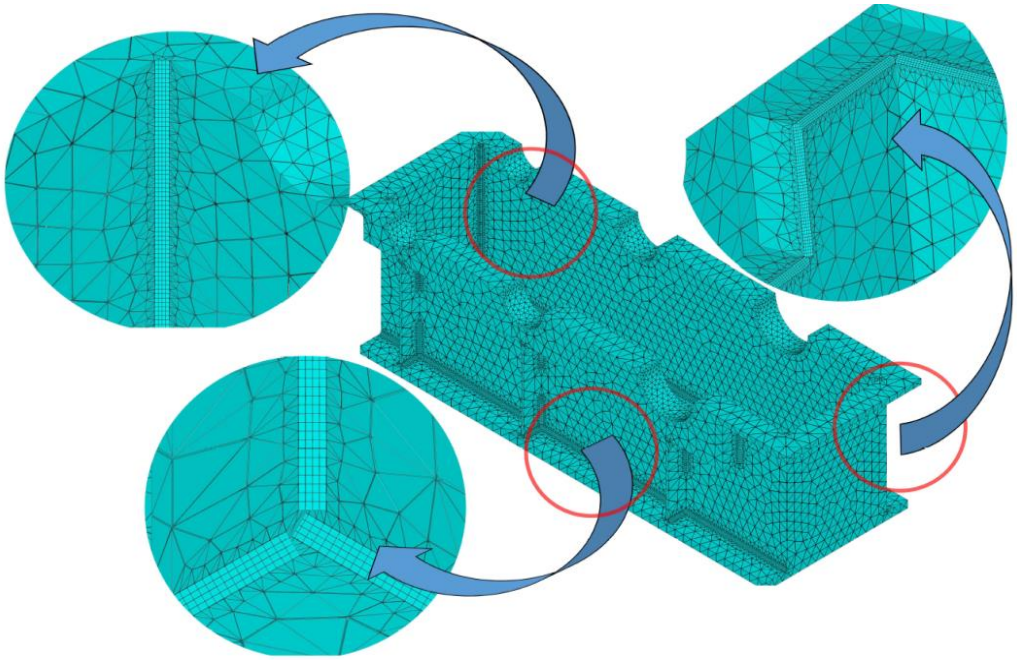
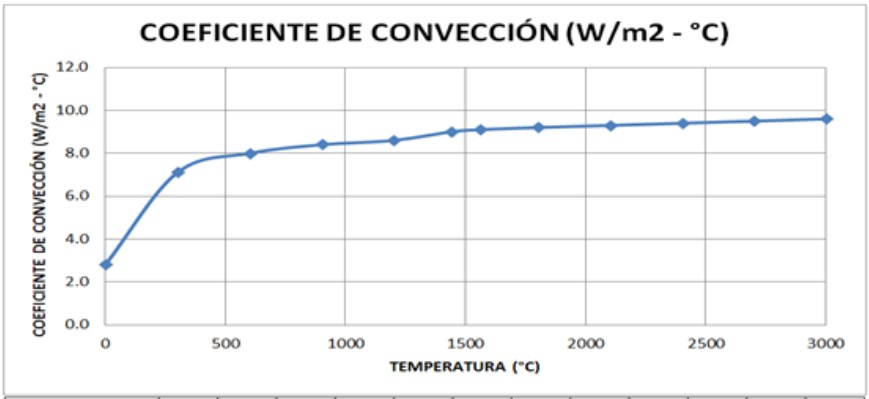


Fig. 5: Discretización del modelo geométrico de la base de la carcasa de la caja reductora.

CONDICIONES DE CONTORNO TÉRMICAS Y ESTRUCTURALES

El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) varía en función de la temperatura, los valores de este coeficiente se muestran en la Fig. 6.



TEMPERATURA (°C)	0	300	600	900	1200	1440	1560	1800	2100	2400	2700	3000
COEFICIENTE DE CONVECCIÓN (W/m2 - °C)	2.8	7.1	8.0	8.4	8.6	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6

Fig. 6: Coeficiente de convección.

En el presente análisis se utilizó el coeficiente de transferencia de calor combinado, dado por la expresión (5). El valor de este coeficiente se aplicó a todas las superficies de la carcasa.

$$h_{total} = h + \varepsilon * \sigma * (T^2 + T_{amb}^2) * (T + T_{amb}) \quad (5)$$

Desde el punto de vista estructural se restringen los desplazamientos de tres puntos de la base de la carcasa, representando que ésta está apoyada libremente sobre un plano, como se indica en la Fig. 7.

ISBN 978-607-8242-11-5

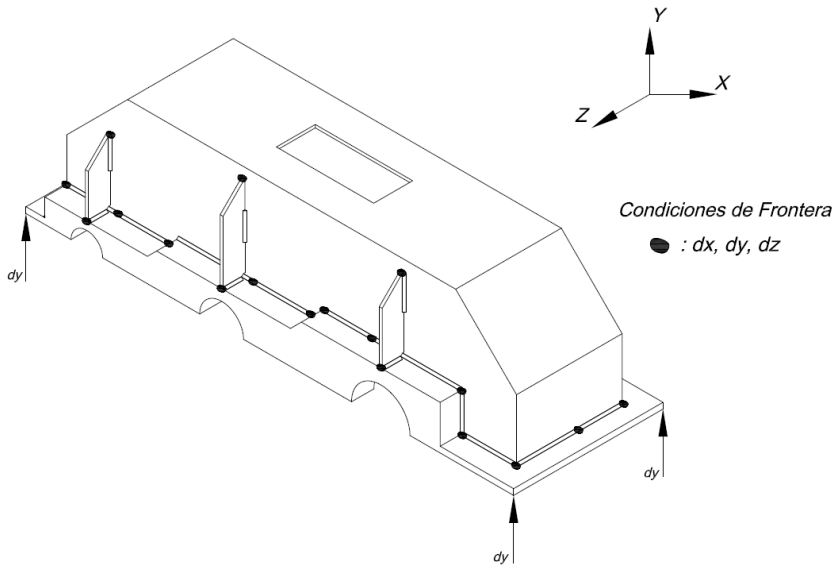


Fig. 7: Condiciones de contorno estructurales.

SECUENCIAS DE SOLDEO EVALUADAS

Las secuencias que se muestran a continuación se implementaron en base a recomendaciones de profesionales de soldadura. Se consideró estudiar cuatro secuencias de soldeo para la tapa y para la base de la carcasa soldada respectivamente. En las primeras secuencias de soldeo que se presentan se utiliza una sola fuente de calor y en las dos restantes se utilizan dos fuentes de calor para cada una de las secuencias de soldeo. Adicionalmente se utilizó recomendaciones para la ejecución del soldeo donde se presentaron técnicas para el control de distorsión, tales como: utilizar el mínimo de soldadura necesaria, reducir el aporte de calor, sub-dividir la construcción soldada (diseño) y, por último, fijar una secuencia de soldeo.

Las dos secuencias de soldeo que se presentan a continuación, utilizan una sola fuente de calor para realizar el soldeo de la base de la carcasa, tal como muestra la Fig. 8. La primera secuencia de soldeo, se limita a unir las planchas de la carcasa soldada y utiliza soldadura intermitente para ahorrar tiempo y material de aporte. En la segunda secuencia de soldeo se procura utilizar la técnica de paso peregrino a lo largo de los cordones más largos.

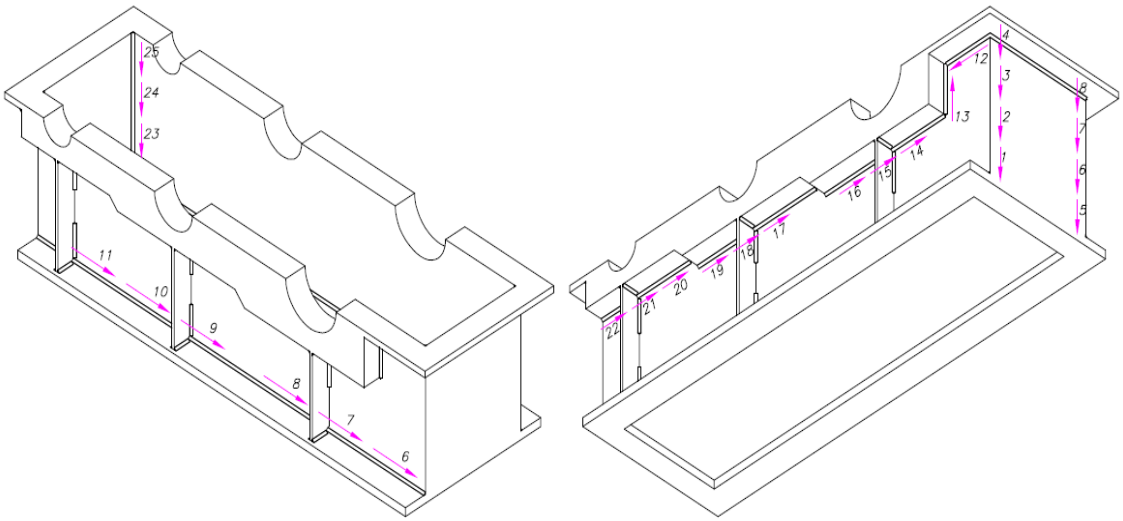


Fig. 8: Secuencia de soldeo con una fuente de calor para la base de la carcasa soldada.

Para las secuencias de soldeo con dos fuentes de calor se consideró utilizar dos fuentes de calor simétricas. De esta manera se generan distorsiones simétricas en la pieza, además se reduce el tiempo de soldeo a la mitad. Finalmente, el tiempo en el que la carcasa está sometida a cambios de temperaturas es menor, siendo este el principal factor para reducir las distorsiones residuales. La Fig. 9 ilustra la secuencia de soldeo para dos fuentes de calor, utilizada en la tapa de la carcasa de la caja reductora.

ISBN 978-607-8242-11-5

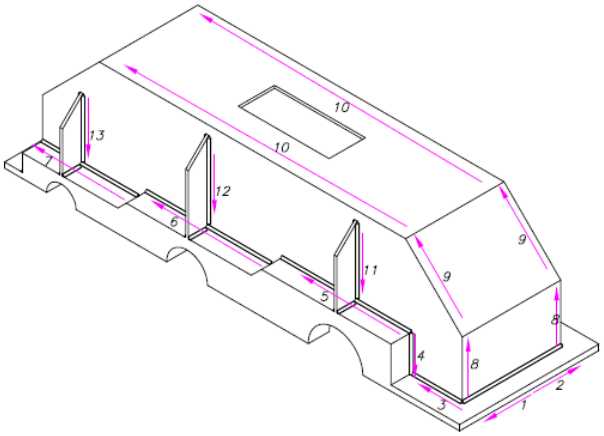
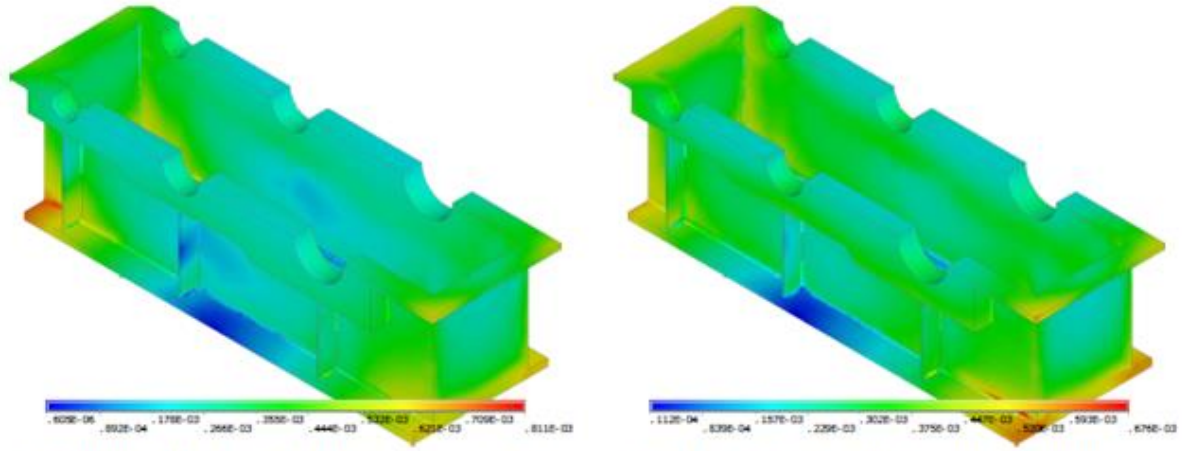


Fig. 9: Secuencia de soldeo con dos fuente de calor para la tapa de la carcasa soldada.

RESULTADOS OBTENIDOS

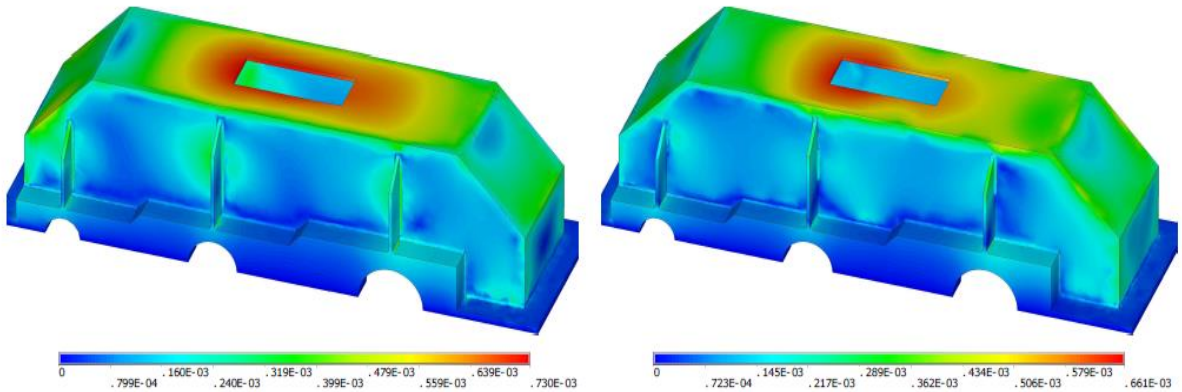
En la Fig. 10 se puede apreciar los resultados estructurales de las dos últimas secuencias de soldadura evaluadas. Estos resultados corresponden a los desplazamientos totales generados, debido a las tensiones residuales de soldadura.



(c) Final del soldeo de la tercera secuencia (d) Final del soldeo de la cuarta secuencia

Fig. 10: Deformaciones residuales totales en la base de la carcasa.

De forma similar, la Fig. 11 ilustra las deformaciones residuales totales de la tapa de la carcasa soldada para las dos últimas secuencias evaluadas.

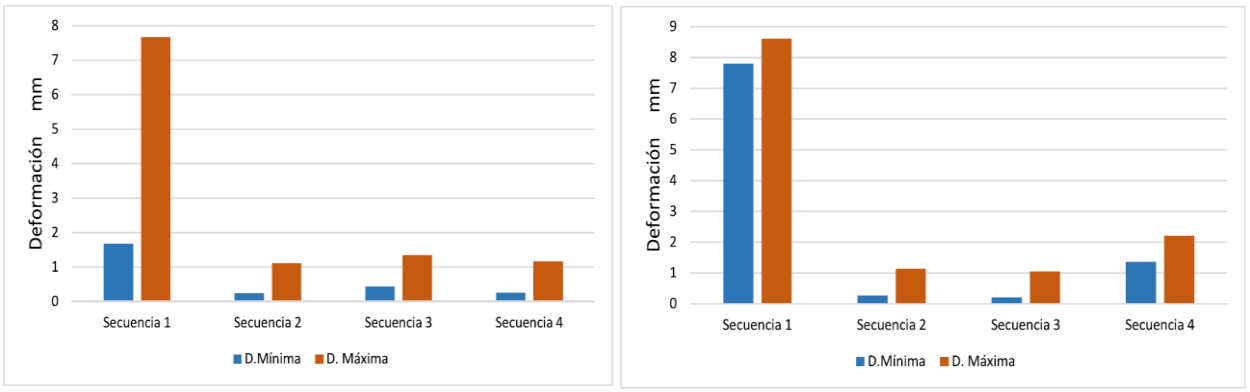


(c) Final del soldeo de la tercera secuencia (d) Final del soldeo de la cuarta secuencia

Fig.11: Deformaciones residuales totales de tapa de la carcasa.

ISBN 978-607-8242-11-5

Los resultados más favorables son de las tres últimas secuencias de soldeo, donde se hizo hincapié en las técnicas de control de distorsión. Los resultados cuantitativos se pueden apreciar en los gráficos de la Fig. 12. En la base de la carcasa se obtuvo una distorsión de 1 mm aproximadamente para la segunda y cuarta secuencia de soldeo. Un valor similar se obtuvo para la tapa de la carcasa con la segunda y tercera secuencia de soldeo.



a) b)

Fig.12: Deformaciones residuales, a) base de la carcasa, b) tapa de la carcasa.

CONCLUSIONES

Es factible utilizar el procedimiento desarrollado para determinar la secuencia de soldeo más adecuada en una carcasa soldada. Con el modelo propuesto se simularon cuatro secuencias de soldeo, considerando en tres de ellas métodos para controlar la distorsión, tales como el paso peregrino y la soldadura simétrica. Las secuencias de soldeo con control de distorsión ofrecen resultados mucho mejores que la primera secuencia, obteniéndose desplazamientos (distorsión) varias veces menores.

Realizando algunos ajustes, es posible utilizar el procedimiento propuesto para evaluar la secuencia de soldeo en carcasas con planchas de espesores mayores, es decir, que requieran cordones de varias pasadas. Es recomendable también realizar simulaciones similares, con un modelo termo-estructural semi-acoplado, para evaluar la factibilidad de procesos térmicos de alivio de tensiones.

BIBLIOGRAFÍA

Abid, M., M. Siddique, and R. A. Mufti. "*Prediction of Welding Distortions and Residual Stresses in a Pipe–flange Joint Using the Finite Element Technique*", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 13(3), 455–470 (2005).

Akhlaghi, F.Zamiri and C. Acevedo. *"Investigation of Technological Size Effects of Welding on the Residual Stresses and Fatigue Life of Tubular Joints Made of Structural Steels S355 and S690"*, Fatigue Design (2011).

Asserin, O., Loredo, A., Petelet, M., & Iooss, B. *"Global sensitivity analysis in welding simulations—What are the material data you really need?"*, Finite Elements in Analysis and Design, 47(9), 1004-1016 (2011).

Blas M. *"Desarrollo de un algoritmo para el diseño de carcasas soldadas para cajas reductoras de engranajes cilíndricos",* PUCP - Lima (2016).

Chand, RR, S.Kim III, QQ Wu, and B.yong Kang. *"Prediction of Residual Stress and Welding Deformation in Butt-Weld Joint for Different Clamped Position on the Plates"*, Int. J. Eng. Sci (2014).

Christensen, N., VL Davies, and K. Gjermundsen. *"Distribution of Temperatures in Arc Welding"*, British Welding Journal (1965).

Fanous, I. F. Z., Younan, M. Y. A. and Wifi, A. S. *"3-D finite element modeling of the welding process using element birth and element movement techniques"*, Journal of Pressure Vessel Technology, 125(2), 144-150 (2003).

Fassani, R.N.S. and Trevisan, O.V. *"Analytical modeling of multipass welding process with distributed heat source"*, Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 25(3), 302-305 (2003).

Franco, R., Loaiza, G., Lean, P. and Yépez, H. "*A One Way Coupled Thermo-Mechanical Model to Determine Residual Stresses and Deformations in Butt Welding of Two ASTM A36 Steel Plates*", 7th edition

 ISBN 978-607-8242-11-5

of the International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (2017).

Fu, G., Lourenço, M. I., Duan, M. and Estefen, S. F. *"Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures"*, Marine Structures, Elsevier (2015).

Goldak, J. A. and Akhlaghi, M. *"Computational Welding Mechanics"*, Springer Science Business Media, Inc., (2005).

Guimarães, Pablo Batista et al. *"Determination of Residual Stresses Numerically Obtained in ASTM AH36 Steel Welded by TIG Process"*, Materials Sciences and Applications 4(4), 268–74 (2013).

Jeyakumar, M., Christopher, T. and Nageswara Rao, B. *"Residual Stress Evaluation in Butt Welded Joint of ASTM A36 Steel Plates"*, International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering, 4(2), 581-587 (2013).

Kassab, RK, H. Champliaud, and VN Lê. 2012. *"Experimental and Finite Element Analysis of a T-Joint Welding"*, Journal of Mechanics Engineering and Automation, 2(7), 411-421 (2012).

Kelly, P. *"Solid mechanics part I: An introduction to solid mechanics"*, Solid mechanics lecture notes (2013).

Lindgren, LE. *"Numerical Modelling of Welding"*, Computer methods in applied mechanics and engineering, 195(48), 6710 - 6736 (2006).

Lubliner, Jacob. *"Plasticity Theory"*, Dover Publications (2008).

Mahapatra, M. M., Datta, G. L., & Pradhan, B. *"Three-dimensional finite element analysis to predict the effects of shielded metal arc welding process parameters on temperature distributions and weldment zones in butt and one-sided fillet welds"*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 220(6), 837-845 (2006).

Malik, A. M., Qureshi, E. M., Dar, N. U., & Khan, I. *"Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields"*, Thin-Walled Structures, 46(12), 1391-1401 (2008).

Masubuchi, K. *"Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences"*, Masachusetts Institue of Technology, USA. Vol. 33 (1980).

Manitaras, T. I. D. *"Elastoplastic constitutive models in finite element analysis",* Master's thesis, National Technical University Athens, School of Civil Engineering (2012).

Farfán Muñoz, Nicolás Arturo. *"Modelación del Proceso de Soldadura por Medio del Método de Elementos Finitos"*, Universidad de Chile (2010).

Nguyen, N. T., Ohta, A. and Matsuoka, K. *"Analytical solutions for transient temperature of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat sources",* Welding Journal, 78(8), 265-274 (1999).

Nguyen, N.T. *"Thermal Analysis of Welds"*, WIT Press, Southampton, UK (2004).

Pasternak, H., Launert, B. and Krausche, T. *"Welding of girders with thick plates-fabrication, measurement and simulation"*, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier (2015).

Qi, H. J., "*Solid Mechanics I. Chap. 9 - Constitutive Equations - Plasticity*". Department of Mechanical Engineering. Univ. of Colorado. Resource: http://www.colorado.edu/MCEN/MCEN5023/chap_01.pdf.

Qureshi, E. M., Malik, A. M., & Dar, N. U. *"Residual stress fields due to varying tack welds orientation in circumferentially welded thin-walled cylinders"*, Advances in Mechanical Engineering (2009).

Radaj, Dieter. *"Welding residual stresses, distortion, calculation and measurement"*, DVS-Verlag, Dusseldorf (2003).

Rosenthal, Daniel. *"Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting"*, Welding journal Vol.20(5) (1941).

Sen, D. *"Coupled Field Modeling of Gas Tungsten Arc Welding"*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University (2012).

Stamenković, Dragi, and Ivana Vasović. *"Finite element analysis of residual stress in butt welding two similar plates",* Scientific technical 59(1), 57-60 (2009).

Wang, Q., Liu, X. S., Wang, P., Xiong, X., & Fang, H. Y. *"Numerical simulation of residual stress in 10Ni5CrMoV steel weldments"*, Journal of Materials Processing Technology, 240, 77-86 (2017).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Un sistema de apoyo para la Enseñanza del Método Simplex y su Implementación en Computadora

Luis A. Moncayo-Martínez[1] y David Fernandez Muñoz[1]
(1) Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones, ITAM, Rio Hondo 1, Ciudad de México 01080, México
E-mail: luis.moncayo@itam.mx

Resumen

Los modelos de programación lineal han sido aplicados en muchos problemas prácticos como finanzas y producción con resultados positivos reportados en la literatura. Cuando se resuelven estos problemas en la práctica, se utiliza software comercial que implementan el método simplex específicamente el método de las dos fases.
Por la aplicación y los resultados obtenidos, la programación lineal es un tema en muchos programas de pre-grado. Sin embargo, la literatura que se utiliza para la enseñanza del método simplex, lo hace por medio de tablas que no es la forma más eficiente de hacerlo en términos computacionales. Esta literatura también menciona al método simplex revisado como la forma más eficiente en términos computacionales para resolver los modelos de programación lineal cuando se implementa junto con la descomposición LU.
Debido a que la implantación eficiente en computadora del método simplex es un tema importante para un estudiante de ingeniería, en esta investigación se describe un sistema de apoyo que permite enseñar al estudiante cómo implantar en computadora el método simplex revisado. El sistema de apoyo está desarrollado sobre una interfaz de Excel, y el código para la implantación del método simplex revisado está desarrollado en Visual Basic for Applications, aunque para la solución de los sistemas de ecuaciones lineales se utiliza la rutina de la descomposición LU. Este sistema de apoyo se distribuye libremente a través de la página web del autor de este artículo.

Palabras clave: Método Simplex, Efficiencia Computacional, Visual Basic

A Computational Application for Teaching the Simplex Method and its Implementation

Abstract

Linear Programming models have been applied in many practical problems such as finance and production with positive results reported in the literature. When a linear programming model is implemented to solve practical problems, commercial software that implements the two-face method is utilized.
Linear programming is a topic taught in undergraduate programs because of its applications and its results. However, the literature used to teach this topic solves the simplex methods in tables that is not the most efficient way to solve it. The literature mentions the revised simplex method as the most computationally efficient way to solve linear programming models when implemented in conjunction with LU decomposition.
Because the computer-based implementation of the simplex method is an important topic for an engineering student, this research describes a support system that allows students to learn how to implement the revised simplex method in a computer. The support system is developed on an interface of Excel, and the code for the implementation of the revised simplex method is developed in Visual Basic for Applications, although for the solution of the systems of linear equations the routine of the decomposition LU is used. This support system is distributed freely through the website of the author of this article.

Keywords: Simplex Methods, Computational Efficiency, LU Decomposition, Visual Basic

ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El método simplex, propuesto por Dantzig (1963), es un algoritmo que resuelve problemas cuando son representados como modelos de programación lineal (PL), i.e. el método simplex es un método para determinar la solución óptima de un problema (e.g. las máximas ganancias o los mínimos costos) cuando es modelado por relaciones lineales.
Matemáticamente, el método simplex es una técnica para optimizar una función objetivo lineal, sujeto a restricciones lineales de igualdad (=) y/o desigualdad ($\leq, \geq$). Los modelos de PL se pueden representar en su forma canónica de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &Maximizar && \boldsymbol{Cx} \\ &sujeto\ a && \boldsymbol{Ax} \leq \boldsymbol{b} \\ & && \boldsymbol{x} \geq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

en donde $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \dots)$ es un vector de variables denominadas "variables de decisión" que son la solución del problema, $\boldsymbol{c}$ and $\boldsymbol{b}$ son dos vectores de coeficientes conocidos y $\boldsymbol{A}$ es la matriz de coeficientes. La ecuación $\boldsymbol{c}^T\boldsymbol{x}$ es la función objetivo que se debe minimizar o maximizar sujeto a las restricciones $\boldsymbol{Ax} \leq \boldsymbol{b}$ and $\boldsymbol{x} \geq 0$.

Los modelos de PL han sido aplicados en muchos problemas prácticos como: Administración de Proyectos, Confiabilidad, Control de Calidad, Sistemas de Producción, Ingeniería Financiera, Ingeniería de la Cadena de Suministros, Sistemas de Energía, Optimización en Aerolíneas y últimamente en la Analítica de Datos (Ravindran 2009).
Durante los últimos años se han reportado grandes ahorros en empresas cuando resuelven sus problemas de optimización con modelos de PL, e.g. Procter & Gamble lo hizo rediseñando el sistema de producción y distribución, Samsung Electronics reduciendo tiempos de producción y de inventarios, Federal Express planeando los envíos en su sistema logístico, Continental Airlines reasignado la tripulación cuando hay interrupciones, etc. (Hillier and Lieberman 2010).
Por otro lado, cuando se resuelven modelos de PL, como en los ejemplos antes mencionados, se utiliza software libre (e.g. GLPK, LP_SOLVE, SoPlex) o software comercial (e.g. CPLEX, Gurubi, GAMS) (Meindl and Templ 2013). Sin importar que tipo de software se utiliza, el algoritmo mayormente implementado es el método simplex revisado (Williams 2013) debido a su eficiencia computacional.
Debido a los beneficios reportados y la aplicación de estos modelos, en casi cualquier situación, la PL (y en general la investigación de operaciones) es un tema indispensable en cursos de modelado y optimización en muchos programas de pregrado.

Para apoyar la enseñanza del método simplex existe una amplia bibliografía (e.g. Hillier and Lieberman 2010; Taha 2016; Winston 2004), que generalmente comienza por describir el algoritmo simplex por medio de tablas. En estas tablas se aplican las operaciones de renglón del método de reducción Gauss-Jordan con el objetivo de cambiar la solución básica descrita en la tabla inicial.
Si bien los principios básicos del método simplex se pueden abordar siguiendo este procedimiento (ampliamente difundido en los libros de texto), es sabido que el método simplex con tablas no es el método más eficiente para implantar en computadora, siendo más bien el método simplex revisado el método que utiliza la mayoría del software comercial disponible en el mercado para resolver problemas de PL, debido a su eficiencia computacional.

Si bien es cierto que el método simplex revisado sí se describe en los textos más difundidos para la enseñanza de la Investigación de Operaciones, éste se aborda en capítulos posteriores al que describe el método simplex con tablas, reconociendo el hecho de que el método simplex revisado es computacionalmente más eficiente, y mencionando inclusive que una implantación eficiente del método simplex revisado en computadora utilizaría la descomposición LU, que es el método reconocido como el más eficiente para resolver por computadora un sistema de ecuaciones lineales (Press et al. 2007). Por otro lado, los libros de texto disponible dan muy poca información para que el profesor de la materia pueda enseñar a sus estudiantes cómo podrían implantar eficientemente el método simplex revisado en una computadora.

La novedad en este trabajo radica en que se propone una herramienta computación basada en el método dual simplex y descomposición LU con los objetivos de apoyar la enseñanza del método simplex para resolver modelos de PL, así como implementar el algoritmo que ha demostrado ser computacionalmente más eficiente en términos de tiempo CPU. En la bibliografía que se utiliza para la enseñanza del método simplex no se reporta ninguna aplicación computacional utilizando descomposición LU, ni tampoco el código para implementarlo.

 ISBN 978-607-8242-11-5

EL MÉTODO SIMPLEX

En esta sección se describen los conceptos fundamentales del método simplex y su algoritmo fundamental para después describir el método dual simplex

La forma estándar del problema

El primer paso para resolver un modelo de PL es transformarlo a su forma estándar. Esto se hace agregando una variable de holgura (**+** x_j) a las restricciones de tipo $\leq$ y una variable de exceso (**-** x_j) a las restricciones del tipo $\geq$. Las restricciones del tipo = no se les agrega ninguna variable.

La tabla simplex y variables básica

Para ejemplificar el método simplex utilizaremos el siguiente ejemplo: Max $z = c_1x_1 + c_2x_2$ sujeto a $a_{11}x_1 + c_{12}x_2 \leq b_1$; $a_{21}x_1 + c_{22}x_2 \leq b_2$; $x_1, x_2 \geq 0$. La forma estándar del problema es: Max $z = c_1x_1 + c_2x_2 + 0x_3 + 0x_4$ sujeto a $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + x_3 \leq b_1$; $a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + x_4 \leq b_2$; $x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$.

En general un modelo de PL tiene *m* ecuaciones y *n* variables, en el ejemplo anterior *m* = 2 y *n* = 4. Para encontrar el valor máximo de *z* sujeto a las restricciones tenemos que definir una base de tamaño *m*, es decir tenemos que resolver el sistema de ecuaciones para encontrar el valor de las *m* variables básica (v.b.), al resto de las variables (*n* – *m*) se les llama no básicas y su valor es 0. En nuestro ejemplo existen *m* = 2 variables básicas y *n* – *m* = 4 – 2 = 2 variables no básica. La Tabla 1 es un ejemplo de una tabla simplex con base formada por x_3 y x_4, i.e. estas variables son básica y las variables no básicas son x_1 y x_2. Note que la función objetivo es escrita como $z - c_1x_1 - c_2x_2 = 0$.

Tabla 1. Ejemplo de una tabla simplex

z / v.b.	x_1	x_2	x_3	x_4	solución
	$-c_1$	$-c_2$	0	0	0
x_3	a_{11}	a_{12}	1	0	b_1
x_4	a_{21}	a_{22}	0	1	b_2

Cada columna de la tabla la denotamos por $\mathbf{P}_j$ (j = 1,…,*n*), para la Tabla 1 $\mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{pmatrix}$, $\mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{pmatrix}$, $\mathbf{P}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ y $\mathbf{P}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Las variables básicas son $\mathbf{x_B} = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$, las no básica son $\mathbf{x_N} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$, la base es $\mathbf{B} = (\mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, el vector de costos de las variables básicas es $\mathbf{C_B} = (c_3, c_4) = (0,0)$ y el vector de costos del problema es $\mathbf{C} = (-c_1, -c_2, 0, 0)$. La matriz de coeficientes $\mathbf{A} = (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4)$ (ver ecuación 1). Por lo tanto, para cualquier base **B** la tabla simplex resultante se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Tabla simplex para una base **B**

z / v.b.	x_j (j = 1,…,*n*)	solución
	$\mathbf{C_B B^{-1} P_j} - c_j$	$\mathbf{C_B B^{-1} b}$
$\mathbf{x_B}$	$\mathbf{B^{-1} P_j}$	$\mathbf{B^{-1} b}$

En el problema de la Tabla 1 existen 6 posibles bases, e.g. $\mathbf{B} = (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)$, $\mathbf{B} = (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_3)$, $\mathbf{B} = (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_4)$, B = $(\mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3)$, $\mathbf{B} = (\mathbf{P}_2, \mathbf{P}_4)$, $\mathbf{B} = (\mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4)$ (la base es una matriz cuadrada de tamaño *m*). Sin embargo, los vectores $\mathbf{P}_j$ en **B** deben ser independientes, i.e. los vectores $\mathbf{P}_j$ en **B** forman una base si su determinante no es cero $(\det(\boldsymbol{B}) \neq 0)$.
De acuerdo a la Tabla 2, la solución de las variables básicas es $\mathbf{x_B} = \mathbf{B^{-1}b}$; sin embargo, uno o más elementos de $\mathbf{x_B}$ pueden ser negativos. Si éste es el caso, la solución es una solución básica *no* factible por la restricción $\boldsymbol{x} \geq 0$ (ecuación 1), en el caso contrario $\mathbf{x_B} \geq 0$ es una solución básica factible.

El método simplex

La solución óptima del problema está en por lo menos una solución básica factible, y el método simplex es un algoritmo que en cada iteración cambia de base en forma sistemática hasta llegar al óptimo. En el método simplex una iteración implica hacer todas las operaciones de la Tabla 2 con la base $\mathbf{x_B}$ respectiva. El número de iteraciones no es necesariamente en número de bases factibles, cuando el método simplex llega al óptima no hay que iterar más, inclusive si el número de iteraciones hasta llegar al óptimo es menor al número de bases factibles.

ISBN 978-607-8242-11-5

Una parte importante del método simplex es la selección de la base de una iteración a otra. En cada una de ellas, se saca una y solo una variable de la base y se sustituye por una variable que no es básica. Si *l* es el número de iteración y la base de esa iteración es $\mathbf{B}^l$, la base inicial (*l* = 0) del ejemplo en la Tabla 1 es $\mathbf{B}^0$ = ($\mathbf{P}_3$, $\mathbf{P}_4$) =$\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}$. En la siguiente iteración *l* = 1 sacamos una variable básica del vector $\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{B}^0} = \begin{pmatrix}x_3\\ x_4\end{pmatrix}$ y la cambiamos por una del vector de variables no básicas del vector $\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{N}^0} = \begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix}$, por lo tanto, una base en la iteración *l* = 1 pudiera ser $\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{B}^1} = \begin{pmatrix}x_2\\ x_4\end{pmatrix}$, i.e. sacamos de la base la variable básica x_3 y metemos la variable no básica x_2 de manera que $\mathbf{B}^1$ = ($\mathbf{P}_2$, $\mathbf{P}_4$) = $\begin{pmatrix}a_{12} & 0\\ a_{22} & 1\end{pmatrix}$.
Antes de describir el criterio simplex para meter y sacar una variable a y de la base, es necesario definir el concepto de costo reducido calculado por medio de la ecuación 2 que corresponde al renglón de *z* en la Tabla 1 y 2.

$$z_j - c_j = \mathbf{C_B}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{P}_j - c_j \qquad (2)$$

La ecuación 2 representa el costo imputado por unidad de recurso o restricción del problema *i (i* = 1,..,*m*).

<u>*Condición de optimalidad*</u> (meter una variable no básica a la base). Esta condición depende de si se quiere maximizar o minimizar la función objetivo. La idea es que el incremento de una variable no básica puede aumentar el valor de *z* (en caso de maximización) con respecto a su valor actual solo si $z_j - c_j < 0$. En caso de minimizar la función objetivo, la condición es $z_j - c_j > 0$.
De acuerdo a esto, la variable no básica que entra a la base en la siguiente iteración es la que tenga el valor más negativo $z_j - c_j$ (ecuación 2) en caso de maximizar. El caso de minimización es la variable no básica con el valor más positivo $z_j - c_j$.
El algoritmo se detiene si el valor $z_j - c_j \geq 0$ para todas las variables no básicas en caso de maximizar y $z_j - c_j \leq 0$ en caso de minimizar.

<u>*Condición de factibilidad*</u> (sacar una variable básica de la base). Una vez determinada la variable entrante x_j y su $\mathbf{P}_j$, la variable básica que será no básica en la siguiente iteración será la que tenga el cociente mínimo de la ecuación 3.

$$x_j = \min_i \left\{ \frac{(\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{b})_i}{(\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{P_j})_i} \middle| (\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{P_j})_i > 0 \right\} \qquad (3)$$

La ecuación 3 implica calcular la relación del vector solución $\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{b}$ con los coeficientes de restricciones estrictamente positivos bajo la variable de entrada x_j. Esta condición no depende del tipo de función objetivo (maximizar o minimizar). En ambas condiciones los empates se rompen arbitrariamente.

Una vez que se ha determinado la variable saliente y la entrante, i.e. se tienen la nueva base, se hacen las operaciones de Gauss-Jordan. El pivote es la intersección de la columna de la variable entrante y el renglón de la variable saliente (vea Tabla 1), e.g. si pasamos de la base $\mathbf{B}^0$ = ($\mathbf{P}_3$, $\mathbf{P}_4$) =$\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}$ a la base $\mathbf{B}^1$ = ($\mathbf{P}_2$, $\mathbf{P}_4$) = $\begin{pmatrix}a_{12} & 0\\ a_{22} & 1\end{pmatrix}$ el pivote es el elemento a_{12}. De acuerdo a las reducciones gaussianas el pivote (a_{12} en nuestro ejemplo) lo tenemos que convertir en 1 y todos los elementos de la columna deben ser cero.

En la Fig. 1 se muestra el Algoritmo simplex revisado y en tablas. Este algoritmo tiene tres partes fundamentales: 1) evaluar la condición de optimalidad, si se no se cumple, se pasa a la segunda parte, de lo contrario se termina el algoritmo; 2) evaluar la condición de factibilidad para determinar la variable que saldrá de la base; y 3) se hacen las operaciones entre matrices descritas en la Tabla 2 (si se utiliza el simplex revisado) o se hacen las operaciones gaussianas sobre una tabla como la Tabla 1.

Básicamente cuando se genera una nueva base se debe de satisfacer la condición de optimalidad. Si se cumple esta condición el algoritmo se termina. Recuerde que esta condición depende de si la función objetivo es de maximizar o minimizar. Con esta condición se determina la variable básica que sale de la base.

El agoritmo descrito en la Fig. 1 sirve cuando el problema de PL tiene una función objetivo que se quiere maximizar, todas las restricciones son del tipo ≤ y el problema tiene solución factible. Los casos sin solución o solución degenerada no son ilustrados, auque la aplicación computacional si resuleve ese tipo de problemas.

ISBN 978-607-8242-11-5

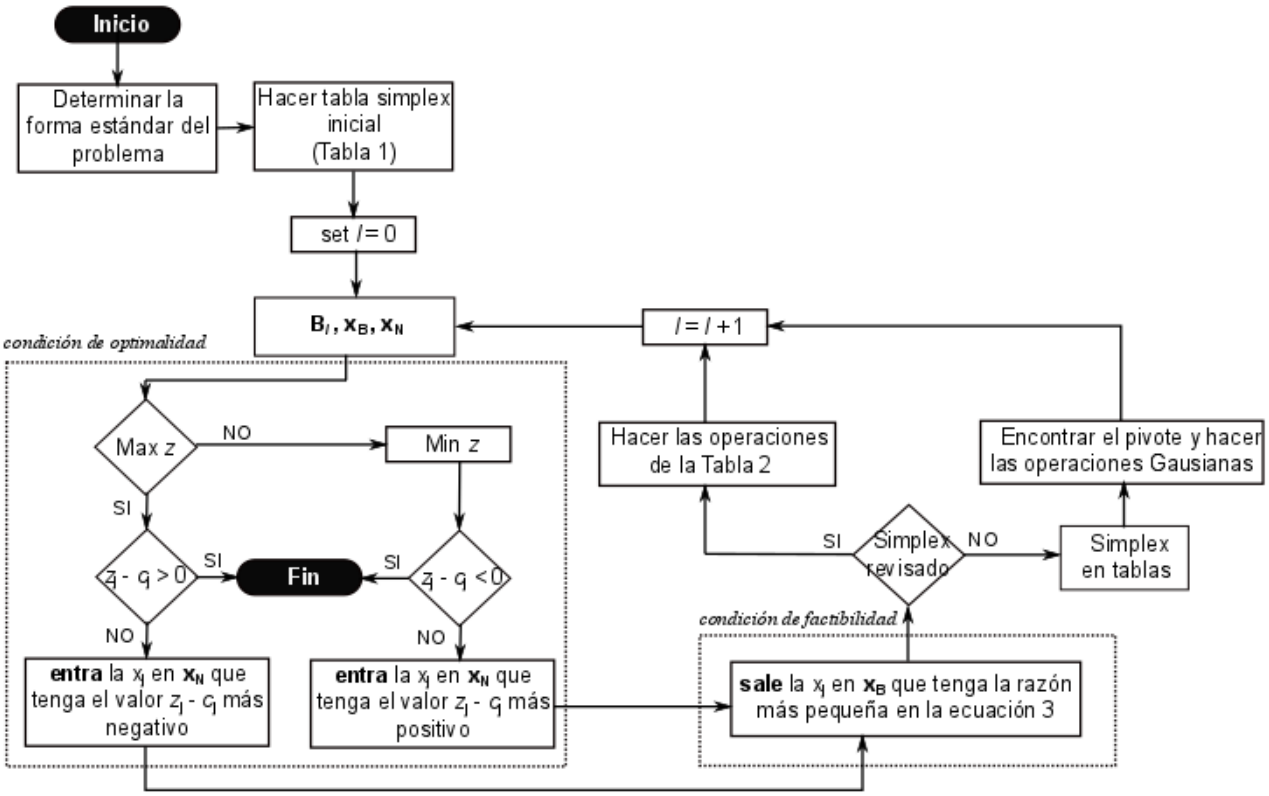


Fig. 1: Algoritmo simplex en revisado y en tablas, función objetivo de Max, restricciones ≤, y solución única.

El método de las dos fases

Cuando se requiere minimizar una función objetivo y tiene restricciones del tipo ≥ y/o = es necesario utilizar otro método, ya sea el de la gran M o el de las dos fases. El método de la gran M es de los métodos más antiguos; sin embargo, nunca se utiliza en código comercial debido a su inherente error de redondeo. En su lugar siempre se prefiere utilizar el método de las dos fases (Taha 2016).

Para ejemplificar el método de las dos fases, utilicemos el siguiente ejemplo: Minimizar $z = c_1x_1 + c_2x_2$ sujeto a $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \geq b_1$; $a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \leq b_2$; $a_{31}x_1 + a_{32}x_2 = b_3$; $x_1,x_2,x_3 \geq 0$. El primer paso es expresar el problema en su forma estándar, además se agregan variables artificiales a las restricciones del tipo ≥ e =. El problema es el siguiente: Minimizar $z = c_1x_1 + c_2x_2 – x_3 + x_4 + R_1 + R_3$ sujeto a $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 – x_3 + R_1 = b_1$; $a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + x_4 = b_2$; $a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + R_3 = b_3$; $x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,R_1,R_2 \geq 0$. A continuación se describen las dos fases:

Fase I: Se minimiza el valor de las variables artificiales. i.e. Min $r = R_1 + R_2$ sujeto a las restricciones del problema. Para generar la tabla inicial se suma la función objetivo anterior ($r – R_1 - R_2 = 0$) a las restricciones que tengan una variable artificial R. Para nuestro ejemplo es:

	x1	x2	x3	x4	R1	R2		
r	0	0	0	0	-1	-1	=	0
Restr. 1	a_{11}	a_{12}	-1	0	1	0	=	b_1
Restr. 3	a_{31}	a_{32}	0	0	0	-1	=	b_3
z	$a_{11} + a_{31}$	$a_{12} + a_{32}$	-1	0	0	0	=	$b_1 + b_3$

La Tabla 4 es la inicial en esta fase y se aplica el algoritmo en la Fig. 1 para minimizar la función objetivo. Si en la tabla final el resultado es cero se pasa a la fase II, de lo contrario el problema no tiene solución factible.

Tabla 4. Tabla inicial en la fase I.

z / v.b.	x_1	x_2	x_3	x_4	R_1	R_2	solución
	$a_{11} + a_{31}$	$a_{12} + a_{32}$	-1	0	0	0	$b_1 + b_3$
R_1	a_{11}	a_{12}	1	0	-1	0	b_1
x_4	a_{21}	a_{22}	0	1	0	0	b_2
R_2	a_{31}	a_{32}	0	0	0	-1	b_3

ISBN 978-607-8242-11-5

Fase II: La última tabla de la fase 1, i.e. la solución básica de la fase I, es la inicial de la fase dos con dos modificaciones:

a) Se borran las columnas de las variables artificiales que anexamos, en nuestro ejemplo se borran las columnas de las variables R_1 y R_2 en la Tabla 4. Suponga que el resultado del algoritmo de la Fig. 1 es aplicado a la Tabla 4.

z / v.b.	x_1	x_2	x_3	x_4	solución
	$-c_1$	$-c_2$	0	0	0
x_1	1	0	p_1	0	k_1
x_2	0	1	p_2	0	k_2
x_4	0	0	p_3	1	k_3

b) Como las variables básicas x1 y x2 tienen coeficiente diferente de cero en la fila z, deben ser sustituidos, mediante la siguiente operación (Taha 2016):

z / v.b.	x_1	x_2	x_3	x_4	solución
	$-c_1+(c_1*1+c_2*0)$	$-c_2+(c_1*0+c_2*1)$	$0+(c_1*p_1+c_2*p_2)$	$0+(c_1*0+c_2*0)$	$0+(c_1*k_1+c_2*k_2)$
x_1	1	0	p_1	0	k_1
x_2	0	1	p_2	0	k_2
x_4	0	0	p_3	1	k_3

A esta tabla se le aplica el algoritmo de la Fig. 1.

Note por favor que en la fase I la función objetivo siempre se minimiza, mientras que en la fase II la función objetivo se maximiza o minimiza según el problema original.

SISTEMA DE APOYO Y SU IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se describen el uso del sistema de apoyo y se presenta un ejemplo. La estructura esta divida en tres módulos (ver Fig. 2):

a) `EntradasSalidas`: sirve para preparar la hoja de cálculo y leer los datos del problema a resolver. El módulo necesita el tamaño del problema, i.e. el número de variables del problema en su forma estándar y el número de restricciones. Si es necesario borra todos los datos que se han introducido anteriormente.

b) `Procedimientos`: En esta parte se desarrolla el método de las dos fases. Une vez que el módulo anterior ha preparado los datos, la aplicación tiene un botón llamado "`Siguiente Iteración`" el cual enviará un mensaje cuando haya terminado la primera fase y paso a paso mostrará la tabla simplex de las siguientes iteraciones.

c) `Declaraciones`: En este módulo se declara la función `LESolve` para realizar los cálculos la declaración se escribe a continuación:

```
Declare PtrSafe Function LESolve Lib "GenVarAlea.dll" (n As Long, A As
Double, b As Double, Sol As Double) As Double
```

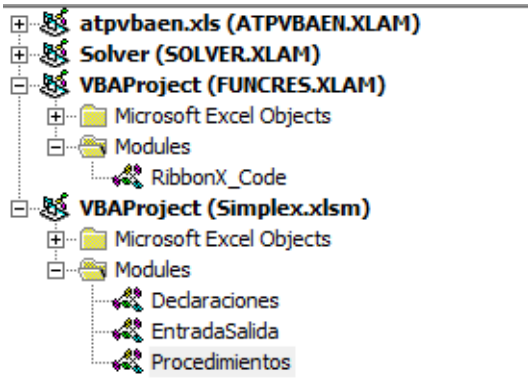


Fig. 2: Estructura del sistema de apoyo

Para ilustrar el funcionamiento del sistema de apoyo se resolverá paso a paso el siguiente ejemplo: Max $z = 3x_1 + 4x_2$ sujeto a $x_1 + 4x_2 = 20$; $2x_1 + x_2 \geq 40$; $x_1 + x_2 \geq 15$; $x_1, x_2 \geq 0$. La forma estándar del problema es Max $z = 3x_1 + 4x_2 - x_3 - x_4$ sujeto a $x_1 + 4x_2 = 20$; $2x_1 + x_2 - x_3 = 40$; $x_1 + x_2 + x_2 - x_4 = 15$; $x_1, x_2 \geq 0$.

ISBN 978-607-8242-11-5

Paso 1: escribir el número de variables en forma estándar y el número de restricciones (ver Fig. 3).

Une vez abierta la aplicación, debe ingresar el número de variables del modelo estándar, en nuestro ejemplo n = 4, y el número de restricciones, m = 3. Después de click sobre el botón “Preparar filas y columnas”. El sistema le enviará un mensaje para asegurar de que quiere empezar un nuevo modelo. Si usted afirma la petición, se le pedirá ingresar los datos.

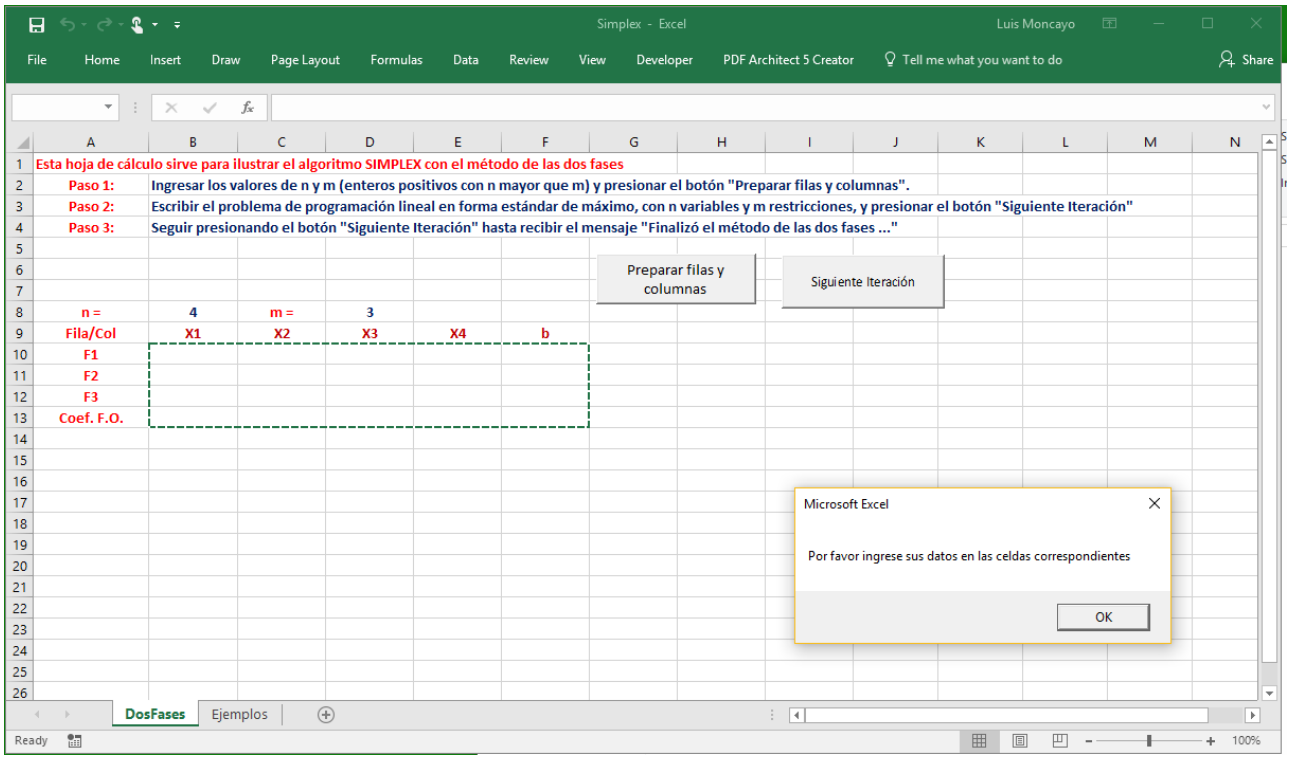


Fig. 3: Ingreso de datos y preparación del sistema.

Paso 2: Meter los datos del problema y presione el botón “Siguiente iteración” seguidamente hasta que el problema termine con la primera fase.

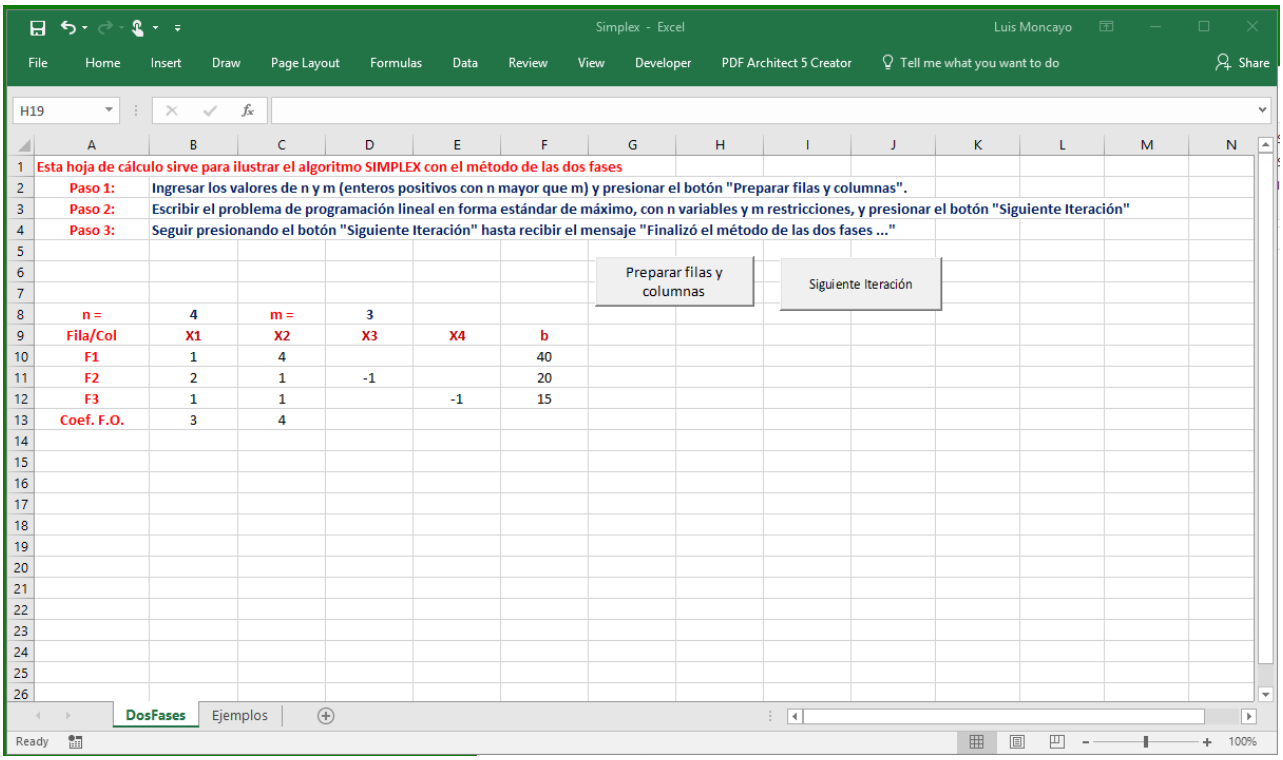


Fig. 4: Datos del ejemplo

ISBN 978-607-8242-11-5

Recuerde que el problema debe tener una función objetivo de maximizar, si el problema es de minimizar múltiple por -1 la función objetivo.
Cada que termine una iteración el sistema manda un mensaje especificando que la iteración terminó exitosamente. Específicamente, para la iteración cero el mensaje sería “Finalizó la iteración 0 con éxito”. Al terminar la fase I el sistema le hace saber que ya hemos terminado con esta fase (ver Fig. 5)

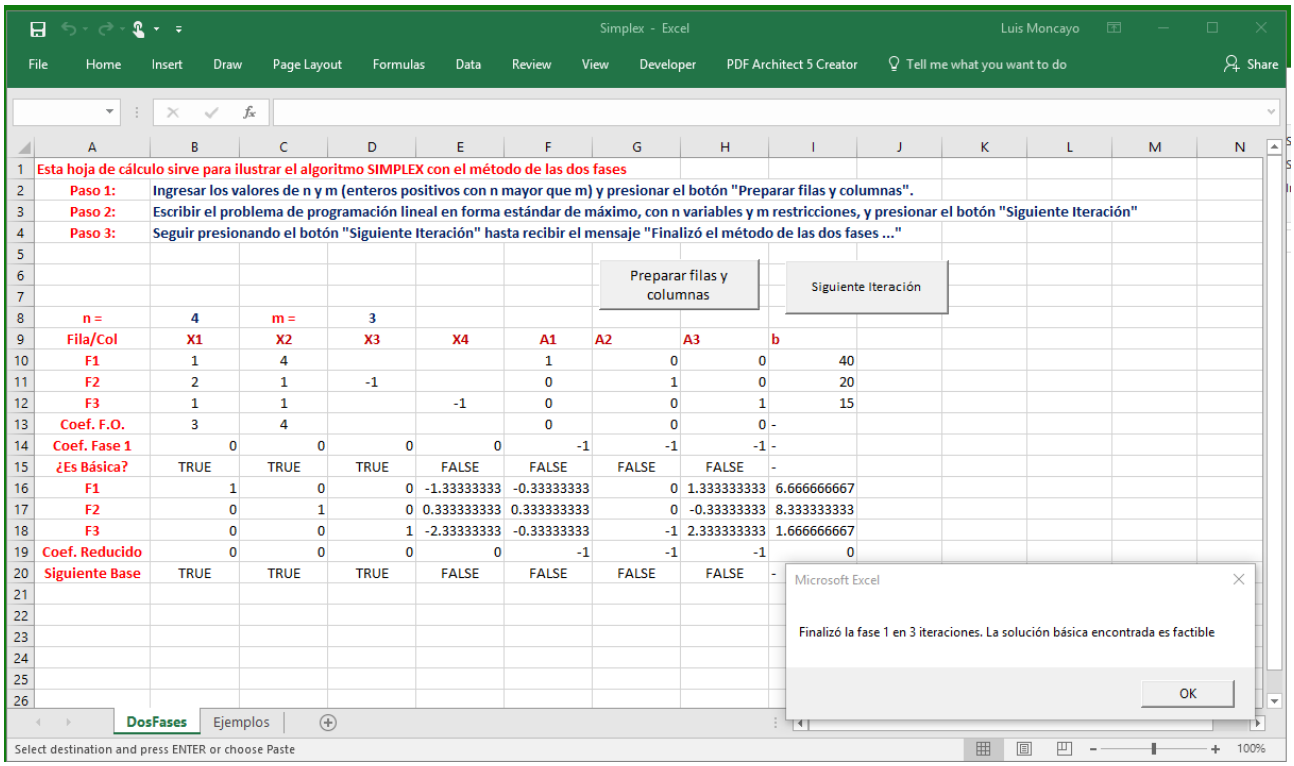


Fig. 5: El sistema termino la fase 1 en tres iteraciones.

Paso 3: Seguir dando click sobre el el botón “Siguiente iteración” hasta llegar a la solución óptima.

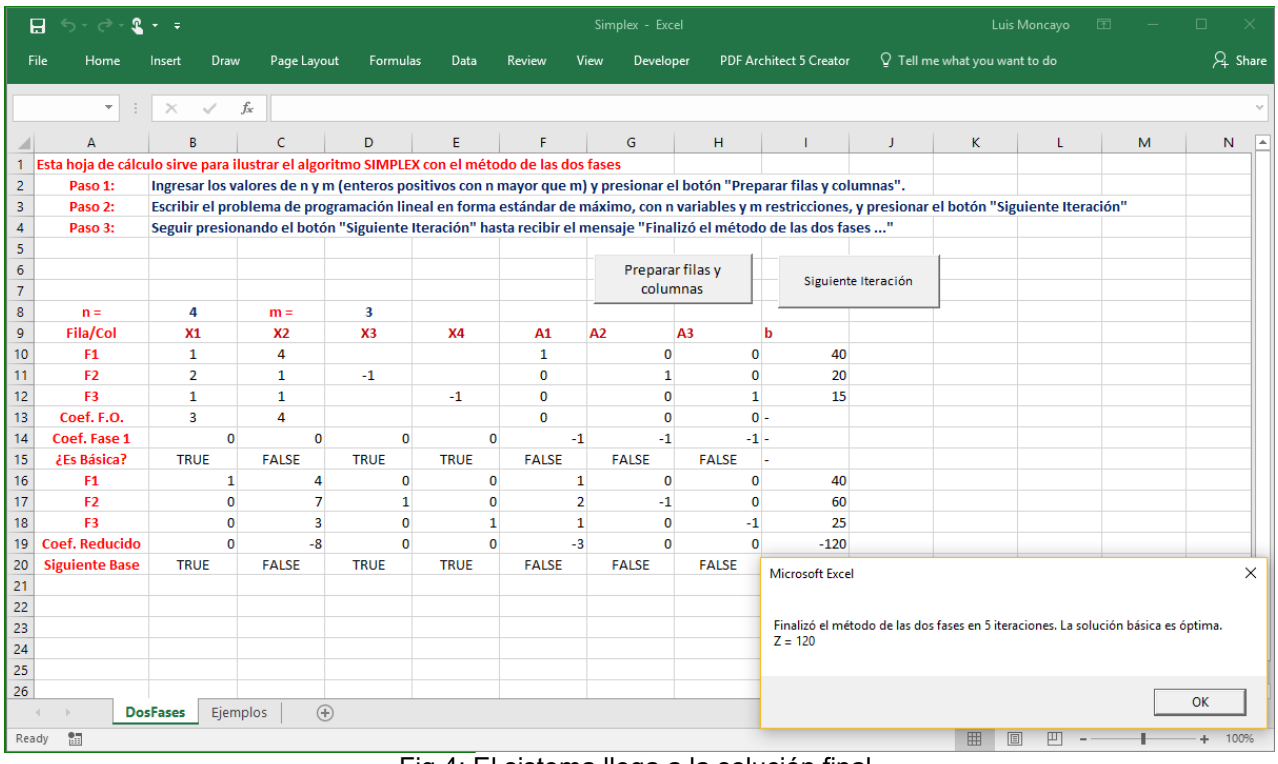


Fig 4: El sistema llega a la solución final.

ISBN 978-607-8242-11-5

El mensaje final del sistema le reporta el valor de la solución final Z = 120 y el número de iteraciones en que se alcanzó el máximo en este caso.
Note los valores en el renglón 20, en este renglón se especifica si la variable en la columna respectiva pertenece a la base. En nuestro ejemplo la variable x1, x3 y x4 forman la base que $\mathbf{B}^1 = (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4)$. La solución del problema original es Z = 120, $x_1 = 40$, $x_2 = 0$.

Note que en cada iteración aparece en el renglón 14 la base actual y en el renglón 15 la base para la siguiente iteración. El cambio de base corresponde a la aplicación de la condición de optimalidad y de factibilidad. En cada una de las iteraciones el sistema **Ax** = **b** es resuelto por la factorización LU; i.e. **Ly** = **B** y **Ux** = **y**. La solución del sistema de ecuaciones en cada iteración por medio de la factorización LU es la novedad de este trabajo.

CONLCUSIONES

En este trabajo se presentó una aplicación computacional para apoyar la enseñanza del método simplex. Además, se implementó el uso de la descomposición LU para la solución del modelo en cada iteración. El sistema le permite al alumno ver iteración por iteración la aplicación de las condiciones de optimalidad y factibilidad, i.e. el cambio de base en cada una de ellas.
El sistema desarrolla el algoritmo de las dos faces, el método que se aplica en software industrial. Junto con este método y la implementación de la descomposición LU, nuestro sistema de apoyo se encuentra en el estado del arte para la solución de modelos de PL.

REFERENCIAS

Dantzig, George B., "*Linear Programming and Extensions* Princeton, NJ: Princeton Univ. Press (1963).

Hillier, F S, and G J Lieberman, *"Introduction to Operations Research"*, 10thed. McGraw-Hill (2010).

Meindl, B., and Matthias T., *"Analysis of Commercial and Free and Open Source Solvers for the Cell Suppression Problem"*, Trans. Data Privacy, 6(2), 147-159 (2013).

Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, "*Numerical Recipes : The Art of Scientific Computing*", Cambridge University Press (2007).

Ravindran, A., "*Operations Research Applications*" 1sted. CRC Press (2009)

Taha, H A., "*Operations Research: An Introduction*" 10thed. Pearson (2016)

Williams, H. P., "*Model Building in Mathematical Programming*" Wiley (2013)

Winston, W L., "*Operations Research: Applications and Algorithms*" 4thed. Cengage (2004)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Optimización del proceso de aplicación de Quitosano para la clarificación de aguas residuales emulsionadas conteniendo petróleo

John Pérez-Calderón[1], María V. Santos[1,2] y Noemí Zaritzky[1,2]
(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, CONICET, CIC-PBA, Argentina.
(2) Depto. de Ingeniería Química- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
Dirección postal: 47 y 116 (CP. 1900)
e-mail: mvsantosd@gmail.com

Resumen

Durante el almacenamiento y refinación de petróleo uno de los peligros más importantes para el medio ambiente es el volcado de efluentes contaminados a cuerpos de aguas. Es frecuente que los efluentes acuosos generados estén emulsionados con petróleo siendo difícil su separación. Se ha propuesto como estrategia la utilización de biopolímeros que logren desestabilizar dichas emulsiones generando la clarificación del agua para su vertido y evitando la producción de barros tóxicos. El quitosano (QS) es un polisacárido lineal formado por cadenas de β-(1-4) D-glucosamina (unidades desacetiladas) y N-acetil-D-glucosamina (unidad acetilada). Este biopolímero se obtiene a partir de residuos sólidos de la industria pesquera como los caparazones de crustáceos, langostinos, etc. que presentan una cantidad apreciable de quitina. Al desacetilar los grupos acetamida presentes en la quitina se obtiene el biopolímero quitosano, que tiene múltiples aplicaciones en alimentos, en el tratamiento de aguas, medicina etc. Es biodegradable, no tóxico y un agente coagulante y floculante. Su potencial como agente desestabilizante de emulsiones radica en que presenta grupos amino libres formando un polímero policatiónico que reacciona con las cargas negativas generando fenómenos de coagulación y floculación. Los objetivos de este trabajo fueron: (a) estudiar la acción del QS para la clarificación de efluentes emulsionados de la industria del petróleo, (b) analizar en un sistema modelo de efluente formado por petróleo, agua y un tensioactivo aniónico biodegradable (dodecilsulfato de sodio, SDS), la turbidez residual de la fase acuosa y volumen de clarificado en función de las dosis de QS y SDS, (c) describir el fenómeno de la desestabilización de dichas emulsiones utilizando distintas técnicas como: mediciones de turbidez residual, registros fotográficos, demanda química de oxígeno, mediciones ópticas basadas en la dispersión estática de la luz y potencial zeta, (d) aplicar la metodología de superficie de respuesta (MSR) para optimizar las dosis de QS y concentración de SDS que minimicen la turbidez residual. Se trabajó con emulsiones petróleo/agua estables con una concentración de petróleo de 2550 ppm; previo a la incorporación de petróleo la fase acuosa se preparó mezclando agua destilada y SDS. La concentración de hidrocarburos en las muestras se determinó por FTIR (Equipo Nicolet IS10 ,Thermo-Scientific). Se caracterizó el quitosano por viscosimetría capilar utilizando la ecuación de Mark-Houwink siendo su peso molecular 5.75×10^5 g/mol y mediante titulación potenciométrica el grado de desacetilación fue 82.9%. Para aplicar MSR se planteó un diseño central compuesto (Box y Draper, 1987) utilizando el software SYSTAT (SYSTAT Inc., Evenston, IL, USA) en el cual se estudió la clarificación de las emulsiones; para la generación de la superficie de respuesta se definieron dos factores: (i) concentración de SDS (2,09- 4,09 mM), (ii) dosis de quitosano (247-1429 mg/L) . Este diseño contó con cinco réplicas en los puntos centrales y como respuesta se analizó el porcentaje de turbidez residual (%TR) y la fracción volumétrica del clarificado. Utilizando micrografías se calcularon los diámetros promedios de las gotas de petróleo D [4,3]=13.13µm. La turbidez residual se midió espectrofotométricamente y se monitoreó la clarificación en tiempo real utilizando un Turbiscan (Beckman Coulter; Fullerton, USA). Además se midió el potencial zeta con un equipo Zeta Potential Analyzer (Brookhaven Instruments Corporation, USA); este parámetro indica la atmósfera iónica en la proximidad de una partícula cargada y cómo actúan las fuerzas eléctricas en el marco de la teoría de la doble capa eléctrica (capa Stern y capa difusa). La emulsión estabilizada con SDS presentaba un potencial zeta negativo (-83.35 mV); al agregar QS se observó la formación de flóculos y una desestabilización de la emulsión debido a la neutralización de cargas. A medida que se aumentaba la dosis de QS se favorecía la desestabilización, sin embargo un exceso provocaba la re-estabilización de la emulsión debido a la repulsión de cargas positivas (+21.09 mV). Esto indica que existe una dosis óptima donde se obtienen dos fases bien marcadas: una correspondiente a los flóculos con petróleo que sedimentan y la otra que es la fase acuosa clarificada. Es interesante marcar que la clarificación del agua se alcanza en tiempos menores a 3 horas, lo cual es un muy ventajoso desde el punto de vista industrial. Las condiciones óptimas de proceso (valor mínimo de %TR=7) correspondieron a una concentración de SDS = 0.984 g/L y QS= 0.832g/L. Los resultados obtenidos indican que el QS es un potente agente desestabilizador de acción rápida y una opción atractiva para tratamiento de efluentes. Asimismo el biopolímero proviene de residuos de la industria pesquera Argentina, por lo tanto su uso resulta en una alternativa sustentable.

Referencias Box, G.E.P. y N. R. Draper. *Empirical model-building and response surfaces.* New York: John Wiley & Sons. (1987).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Determinación de coeficientes de transferencia de calor en procesos de criopreservación de germoplasma animal aplicando modelos computacionales

María V. Santos[1,3], Marina Sansinena[2], Jorge Chirife[2] y Noemí Zaritzky[1,3]
(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos-Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, CIC-PBA, CONICET, 116 y 47, La Plata (CP 1900), Argentina.
(2) Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias Pontificia Universidad Católica Argentina, Av. A.M. de Justo 1500, CABA.
(3) Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP, 47 y 115.
E-mail: mvsantosd@gmail.com ; zaritzkynoemi@gmail.com

Resumen

El proceso de criopreservación de germoplasma animal consiste en reducir la temperatura de una muestra hasta alcanzar la estabilidad biológica. En particular la medición experimental de la curva temperatura vs tiempo es fundamental para el cálculo de velocidades de enfriamiento y para detectar si la muestra ha sido vitrificada o si ha sufrido un proceso de cambio de fase (congelación). Dadas las pequeñas dimensiones de los dispositivos de criopreservación, existen dificultades técnicas para la correcta medición experimental de la temperatura o el flujo calórico en función del tiempo, tanto para el enfriamiento en nitrógeno vapor como en nitrógeno líquido, siendo escasa en la literatura, la información acerca de los coeficientes de transferencia de calor (h) en estos procesos. La simulación computacional constituye una herramienta valiosa para poder obtener a partir de las historias térmicas experimentales los valores de h alimentando las propiedades térmicas adecuadas. En este sentido se estudió la criopreservación de semen bovino que habitualmente se dispone en pajuelas plásticas, las cuales se suspenden en nitrógeno vapor a los efectos de deshidratar las células, previo a su inmersión en nitrógeno líquido para su conservación. Los objetivos del presente trabajo fueron determinar coeficientes (h) durante el enfriamiento de pajuelas plásticas conteniendo germoplasma animal, tanto cuando se sumergían en nitrógeno vapor como en nitrógeno líquido a partir de los perfiles de temperatura medidos experimentalmente y de las simulaciones numéricas. Se utilizó un programa en elementos finitos con propiedades termofísicas del fluido biológico dependientes de la temperatura, incluyendo el cambio de fase del agua lo cual constituye un problema matemático complejo y altamente no-lineal. La determinación de los h que gobiernan el proceso constituye un aspecto muy importante para la optimización de protocolos durante la criopreservación de material biológico.

Determination of surface heat transfer coefficients during the cryopreservation of bovine germplasm using numerical simulations

Abstract

In order to maintain cell viability, biological functions must be halted by cooling it into a solid phase. The time–temperature curve of a sample allows the calculation of cooling rates and helps to determine whether it is vitrified or undergoes phase change transition (freezing). Due to the small dimensions of the devices usually there are technical difficulties associated to the experimental measurements of time-temperature curves or heat flux for samples that are suspended in nitrogen vapor and/or immersed in liquid nitrogen. There is a lack of experimental information concerning the surface heat transfer coefficients of plastic French straws containing biological samples such as bovine semen when they are cryopreserved. A widespread practice is to freeze the sample by suspending the straws in nitrogen vapor over liquid nitrogen for variable periods before plunging into liquid nitrogen for long-term storage. The objectives of the present study were to numerically solve the heat transfer equation to determine the surface heat transfer coefficients that govern the process when straws are suspended in nitrogen vapor over liquid nitrogen and when they are directly plunged in liquid nitrogen. This represents a highly non-linear mathematical problem that must be solved numerically since the thermophysical properties that are involved in the heat transfer partial differential equations undergo abrupt changes with temperature due to ice formation. These algorithms can help optimize cryopreservation protocols which are important when trying to maximize viability of cells.

Keywords: cryopreservation, animal germplasm, surface heat transfer coefficients, modeling, liquid nitrogen, nitrogen vapor

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno líquido (NL) es uno de los fluidos criogénicos más utilizados para la criopreservación de muestras biológicas. La medición de la temperatura en función del tiempo resulta útil para calcular velocidades de enfriamiento y determinar si la muestra logró una vitrificación o si sufrió un cambio de fase con la consecuente formación de cristales de hielo.

La criopreservación de semen bovino se realiza utilizando dispositivos como pajuelas plásticas, en general polipropileno o polietileno, las cuales se suspenden en una primera etapa en nitrógeno vapor (NV) sobre nitrógeno líquido durante intervalos de tiempo específicos previo a su inmersión en NL (-196 ºC) para su almacenamiento prolongado (FAO, 2012). Una práctica ampliamente utilizada es colocar estas pajuelas con el material biológico en contenedores aislantes como poliestireno expandido conteniendo un volumen de NL y posicionar las pajuelas a distintas alturas en nitrógeno vapor (NV) sobre el nivel de NL lo cual genera diferentes temperaturas externas de NV. Varias combinaciones de tiempo de exposición y alturas respecto al nivel de NL han sido reportadas con resultados aceptables en cuanto a su posterior viabilidad (Curry, 2007), sin embargo no existe un estudio específico que permita determinar tiempos de congelación para cada temperatura de NV en base a las condiciones fluido-dinámicas del NV en el contenedor y/o cuáles son los coeficientes de transferencia de calor del sistema.

Existen otros protocolos de preservación de material biológico que requiere que la muestra entre en contacto directamente con NL(sin pasar previamente por NV); en ese caso la temperatura de equilibrio a 1 atmósfera es -196ºC. Dado que se genera una diferencia de temperatura muy elevada (>200ºC) entre NL y la pared del dispositivo ocurre la instantánea ebullición del líquido circundante produciéndose un régimen de ebullición en film (Suryanarayana, y Merte, 1972; Bui y Dhir, 1985; Quéré, 2013). El flujo de calor (q) desde el objeto hacia el nitrógeno líquido se ve disminuido debido a la presencia de una delgada capa o film de nitrógeno vapor que actúa como aislante retardando el enfriamiento (Fig. 1). A la ebullición en film también se lo denomina “efecto Leidenfrost”, fenómeno de formación de una capa de vapor alrededor de un líquido, al encontrarse sobre una superficie con temperatura significativamente mayor al punto de ebullición de ese líquido. El objeto se enfría lentamente hasta alcanzar una temperatura donde el flujo de calor es mínimo (Temperatura de Leidenfrost, TL). A medida que el objeto se va enfriando, disminuye la diferencia de temperatura; a partir de la temperatura de Leidenfrost el film de vapor se desprende bruscamente y el flujo de calor aumenta de manera progresiva alcanzando un valor máximo donde se establece la transición de régimen a ebullición nucleada. La curva de ebullición descripta por el flujo de calor (q) en función de la diferencia de temperatura (ΔT=Tsólido - Tsat) depende de varios factores relevantes tales como: i) el tipo de fluido criogénico y sus propiedades térmicas, ii) del material en contacto con el fluido y su rugosidad el cual afecta a su vez los sitios activos de nucleación y la TL iii) la posición relativa del objeto en el fluido criogénico (vertical, horizontal, ángulo de inclinación) y iv) la geometría del sólido (placas, esferas, cilindros, o geometrías irregulares). En criobiología la información experimental sobre las curvas de ebullición en pajuelas plásticas conteniendo muestras biológicas son escasas. Resulta importante determinar si el proceso de enfriamiento está gobernado por ebullición en film o nucleada o si existe una combinación de ambos regímenes y estudiar el rango de ΔT donde cada régimen de ebullición se desarrolla.

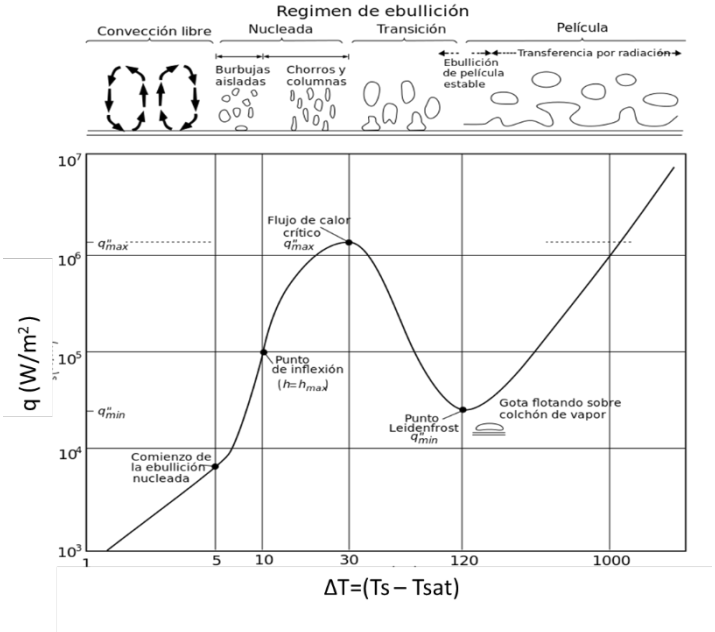


Fig.1 Esquema de los regímenes de ebullición. Representación del flujo calórico en función de la diferencia de temperaturas (Tsólido – Tsat)

ISBN 978-607-8242-11-5

Los objetivos del presente trabajo son: i) Determinar mediante experimentos de laboratorio las curvas de temperatura vs. tiempo de pajuelas plásticas conteniendo hielo y/o material biológico al suspenderlas en NV sobre un nivel de NL y al sumergirlas directamente en nitrógeno líquido NL . ii) Aplicar un modelo de simulación numérica utilizando el método de los elementos finitos que permita calcular los coeficientes de transferencia de calor de este dispositivo cuando se enfría tanto en NV como en NL. En el caso de NL se propone definir los regímenes de ebullición que gobiernan el proceso; iii) Determinar mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) las propiedades termofísicas de un fluido biológico modelo (semen bovino) el cual sufre un proceso de congelación al enfriarse y presenta propiedades termofísicas dependientes de la temperatura. Para realizar este estudio se tuvieron en cuenta las variaciones de las propiedades con la temperatura, lo cual genera que el problema matemático sea altamente no lineal.

MODELADO MATEMATICO

El sistema pajuela plástica y fluido interno se puede describir como dos cilindros concéntricos compuestos por materiales distintos. El fluido interno puede ser agua que congela formando hielo o células biológicas (semen+extender), por fuera de ese cilindro se localiza el soporte plástico de la pajuela (Fig. 2a). El sistema compuesto por dos dominios (fluido+soporte plástico) se consideró como un sólido de revolución, con un eje de simetría axial (Fig. 2b). Las ecuaciones a derivadas parciales que representan la transferencia de energía en estado no estacionario para el fluido que será sometido al proceso de enfriamiento y/o congelación (Ec. 1) y el soporte plástico (Ec. 2) utilizando coordenadas radiales y axiales fueron descriptos en Santos y col. (2013 a, b) siendo las ecuaciones:

$$\rho_s(T)\,Cp_s(T)\frac{\partial T}{\partial t}r = \frac{\partial}{\partial r}\left(k_s(T)\,r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_s(T)\,r\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

$$\rho_p\,Cp_p\frac{\partial T}{\partial t}r = \frac{\partial}{\partial r}\left(k_p\,r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_p\,r\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2)$$

Los subíndices s corresponden a hielo o fluido biológico y p al material plástico.

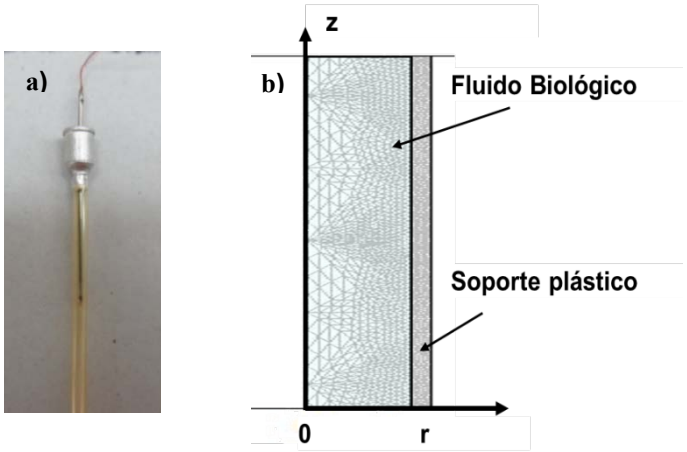


Fig. 2 a: Imagen de la pajuela plástica con fluido biológico y acople de la termocupla, b: dominio del sólido de revolución y sistema de coordenadas cilíndricas.

Tanto la solución biológica como el hielo presentan propiedades termofísicas dependientes de la temperatura. En el caso del soporte plástico las propiedades termofísicas (k_p, ρ_p, Cp_p) se consideraron constantes. El modelado de la solución biológica constituye un problema matemático altamente no lineal debido a los cambios abruptos en las propiedades termofísicas durante el cambio de fase (Santos y col., 2013 a y b, 2014). La temperatura inicial se consideró uniforme en ambos materiales. La condición de borde convectiva en la interfase de contacto plástico-nitrógeno líquido es:

$$-k_p\,\nabla T \cdot n = h(T_{pared} - T_{ext}) \quad (3)$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor, kp es la conductividad térmica del material plástico, T_{pared} es la temperatura en la superficie del material plástico en contacto con el NL o NV, Text es la temperatura externa, y n es el vector normal unitario exterior.

ISBN 978-607-8242-11-5

Se utilizó una malla triangular con elementos de orden dos para discretizar los dominios (Fig. 2b). El número de elementos que constituyó el dominio interior conteniendo el fluido y el dominio exterior correspondiente al material plástico fue de 30656 y 23808, respectivamente. Todas las corridas numéricas se realizaron en el software COMSOL AB y se testearon para conocer su velocidad de cálculo, el máximo tiempo de CPU fue de 10 min utilizando una PC Intel(R) Core(TM) i3 con una velocidad de procesador de 2.93 GHz y una memoria RAM de 4GB.
La discretización temporal se realizó aplicando Backward Euler Differentiation (orden mínimo 1 y máximo 5) con un escalón máximo de 1 s y un mínimo escalón inicial de of 0.0001s.
El programa computacional calcula el perfil de temperatura en función del tiempo, en el dominio plástico y el fluido biológico durante el proceso de congelación, especialmente calcula la temperatura en la superficie plástica, la cual es utilizada para la predicción del flujo calórico aplicando la condición de borde convectiva.
En el caso de pajuelas sumergidas en NL se codificó una subrutina para permitir la aplicación de un coeficiente de transferencia de calor h variable con el tiempo en lenguaje Matlab, la cual se acopló al programa principal desarrollado en el software comercial COMSOL AB. Esta subrutina resulta útil para la predicción de un h promedio para cada tipo de régimen de ebullición. Se propusieron diferentes valores de h para simular las curvas de temperatura versus tiempo y se compararon estas curvas con las curvas experimentales. Se seleccionó el coeficiente de transferencia de calor que minimizaba la Sumatoria de los Residuos al Cuadrado (SRC) (Ec. 4):

$$SRC = \sum \left(T_{exp} - T_{pred}\right)^2 \tag{4}$$

MATERIALES Y METODOS

Las pajuelas plásticas cilíndricas comúnmente utilizadas para criopreservación de semen bovino se obtuvieron de AB Technology, Inc., Pullman, Washington, USA. El valor promedio de diámetro externo, longitud y espesor de pared fue D=2.805mm, L=124mm, e=0.21mm, respectivamente. Para determinar los coeficientes de transferencia de calor en la interfase correspondiente a la superficie plástica expuesta al NL o NV se llenaron las pajuelas con agua ultra-purificada mediante osmosis inversa y filtrada (Milli-Q, Milipore Corporation, MA, USA) teniendo un punto de fusión de 0 ±0.3ºC. Las historias térmicas se registraron mediante termocuplas tipo T (Cobre-Constantán) insertadas en el eje central de la pajuela conteniendo agua al inicio del experimento. La pajuela se suspendió en nitrógeno vapor sobre nitrógeno líquido en un tanque Dewar para generar los cristales de hielo. El hielo tiene propiedades termofísicas conocidas y medidas en el rango de -2 a -194ºC (Choi y Okos, 1986, Choi y Bischof, 2010). Una vez alcanzada la región plateau donde ocurre el cambio de fase o congelación la pajuela se mantuvo en un baño termostático utilizando una solución de etilen-glicol (30%v/v) a una temperatura por debajo de -2ºC y por encima de los -9ºC. Luego de alcanzar el equilibrio se realizaron dos sets de experimentos: 1) la pajuela se colocó en forma horizontal en NV a distintas alturas respecto al nivel de NL en un contenedor de poliestireno expandido 2) la pajuela se sumergió en nitrógeno líquido utilizando el canister para determinar los h en distintos regímenes de ebullición. Los dos tipos de procedimientos experimentales pueden observarse en la Figura 3. La ventaja de usar hielo en las pajuelas radica en que se evita el cambio de fase y por ende el hielo sólo se enfría en la pajuela entre -3ºC a -194ºC. La termocupla se conectó a un equipo de adquisición (TESTO, Alemania).
El calor específico aparente (Cp), el calor de fusión (ΔHm) y la cantidad de agua ligada (xb) de fluido biológico se midió mediante DSC (TA Instruments, New Castle, Delaware, USA) modelo Q100 controlado por un módulo TA 5000 con un sistema de enfriamiento quench bajo atmósfera de nitrógeno a 20 mL/min. El calor específico de la muestra se determinó siguiendo las normas ASTM E1269 e indicaciones de McNaughton and Mortimer (1975).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición de propiedades termofisicas

En el caso de hielo para temperaturas por debajo de 0ºC el calor específico aparente es 1461.7 J/kgºC. Se utilizaron para la conductividad térmica y densidad del hielo vs temperatura en el rango 0ºC a -180ºC datos reportados por Choi y Okos 1986 y Choi y Bishof 2010 (datos no mostrados).
Las propiedades termofísicas del fluido biológico fueron determinadas basadas en su composición centesimal en fracción másica base húmeda; carbohidratos = 0.098, lípidos = 0.031, y proteínas = 0.027.El contenido de humedad medido experimentalmente fue 84.4%. Se utilizaron las ecuaciones de Choi and Okos (1986) para estimar la conductividad térmica y densidad del semen versus la temperatura considerando la fracción de hielo que se formaba en la solución. La temperatura inicial de congelación medida utilizando el método de Fennema (1973) fue de -2.8ºC.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Para obtener ΔHm a partir de las mediciones de DSC se calculó por integración del pico de fusión del hielo(Roos, 1986) obteniéndose un valor de 264.95 kJ/kg para el fluido biológico; este dato se utilizó para determinar la fracción de agua ligada (xb=0.0488 b.h.)

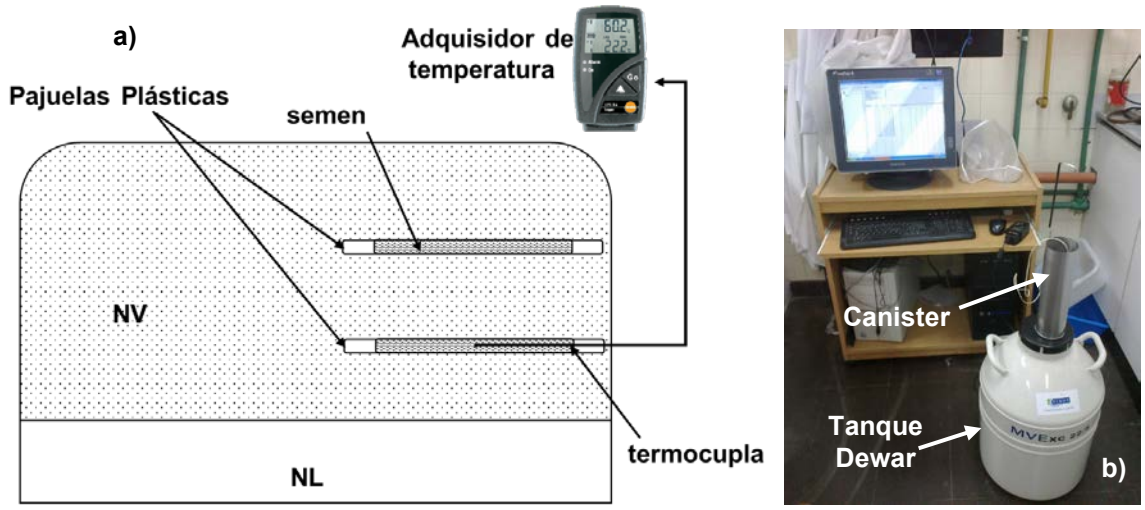


Figura 3. a) Esquema experimental del proceso de congelación de pajuelas plásticas al suspenderlas horizontalmente en NV sobre un nivel de NL, b) Tanque Dewar conteniendo nitrógeno líquido, canister donde se ubica la pajuela con la termocupla insertada y la PC conectada al equipo de adquisición (TESTO).

Como puede observarse de la Fig. 4 que muestra el Cp vs. Temperatura al combinar el calor sensible con el latente en una misma función existe un pico en la zona de cambio de fase o congelación.Esto genera grandes dificultades de convergencia para el modelo numérico, por eso en virtud de alcanzar resultados aceptables y exactos esta función requiere de técnicas de suavizado para que el pico circunscripto al rango de cambio de fase (Neeper, 2000) no altere la solución y diverja. Se implementó una reformulación del Cp utilizando la función Heaviside y Gaussiana (Comsol AB Multiphysics, 2005; Neeper, 2000) la cual mantiene los valores experimentales de rango de cambio de fase, temperatura de transición, calor latente de fusión (Ec.5)

$$Cp(T) = Cp_{ff} + \frac{\Delta H_m}{Ts} \quad f(H_{ea}) + D\,\Delta H_m \tag{5}$$

donde Cpff es el calor específico del material en su estado completamente congelado, Ts es la temperatura del pico (equivalente a la media μ en la curva gaussiana) y D es la función gaussiana definida como:

$$D(T) = \frac{e^{\left(\frac{-(T-T_m)^2}{dT^2}\right)}}{\sqrt{\pi dT^2}} \tag{6}$$

Donde dT es la mitad del rango de cambio de fase, f(Hea) es la función escalón Heaviside, dicha función se encuentra como función interna del entorno Comsol y Matlab teniendo la particularidad y ventaja de que construye una función con derivadas segundas continuas que permiten lograr convergencia a pesar del cambio abrupto en el Cp cuando se utilizan elementos finitos (Comsol AB Multiphysics, 2005).
La curva experimental obtenida por DSC y su reformulación usando las Ec.5-6 se muestran en la Fig4.

Historias térmicas y coeficientes de transferencia en pajuelas suspendidas en Nitrógeno Vapor sobre Nitrógeno Líquido

En el caso de pajuelas con hielo suspendidas en nitrógeno vapor el valor medio de h calculado considerando todos los experimentos fue h=12.5 ± 1.2 W/m^2 K (intervalo de confianza 95%). En la Fig. 5 a) se muestra a modo de ejemplo la historia térmica de una pajuela con hielo y las predicciones numéricas observándose una

ISBN 978-607-8242-11-5

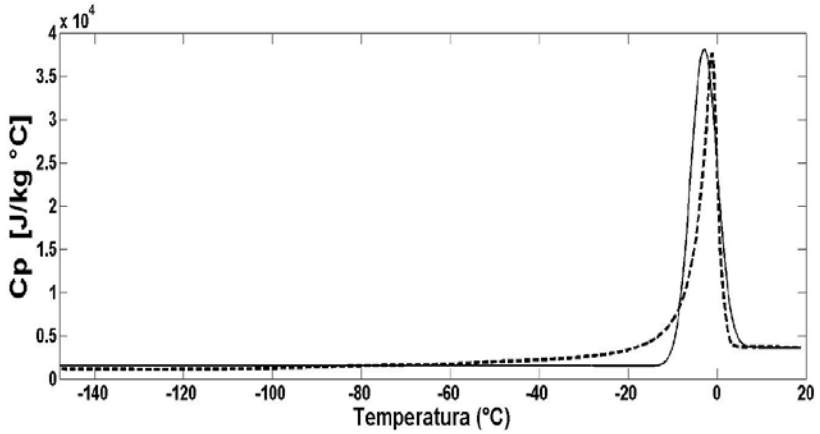


Figura 4: Calor específico aparente de solución biológica (semen) obtenida experimentalmente mediante DSC (- -) y utilizando la reformulación matemática (Ec.5) Heaviside y Gaussiana (—).

excelente concordancia. Los experimentos de pajuelas conteniendo hielo permitieron determinar con mayor rigurosidad los h dado que al no existir cambio de fase el proceso fue claramente observado con el enfriamiento progresivo del hielo en el rango -2 a -196ºC. En la Tabla I se puede observar el aumento de la temperatura de NV a medida que aumenta la distancia vertical sobre el nivel de NL. El valor de h resultó independiente de la posición de la pajuela sobre el nivel de NL, estando en concordancia con valores reportadas en literatura (Bird et al., 1976, Geankoplis, 1986).

Una vez estimados los h estos valores se utilizaron para la simulación de pajuelas con fluido biológico aplicando un protocolo usual de criopreservación: 1) suspensión de pajuela durante 3 minutos en NV a una altura de 12cm seguido de 7 minutos a 2.5cm, tomando como referencia el nivel de NL. En la Figura 5b se puede observar la historia térmica de la pajuela conteniendo semen y las predicciones numéricas obtenidas con el simulador demostrándose la excelente concordancia. A medida que se enfría el material biológico existe un cambio de fase de agua a cristales de hielo, este fenómeno se evidencia en la zona Plateau de la curva en la Fig. 5b.

El proceso de congelación de pajuelas suspendidas en contenedores de poliestireno se puede interpretar como la transferencia de energía desde una fuente caliente (las pajuelas o zona superior) y una fuente fría representada por el NL. Está estudiado extensamente en literatura que superficies calientes transfiriendo calor hacia abajo producen un fenómeno de estratificación en capas de fluido (nitrógeno vapor), en sistemas donde la densidad disminuye a medida que aumenta la temperatura. El perfil vertical de temperaturas de NV genera que las capas densas de nitrógeno vapor se ubiquen por debajo de capas menos densas permitiendo una condición de flujo estanco con casi nula transferencia por convección natural. El calor se transfiere prácticamente a través de un proceso conductivo puro y por tal motivo los h son significativamente menores en comparación con sistemas cuyas fuentes frías están ubicadas por encima de las fuentes calientes (Eckert and Drake 1972).

Tabla 1: Temperatura del NV a distintas alturas sobre el nivel de NL

Altura respecto al nivel de NL (cm)	*Temperatura media (ºC) / desviación estándar*
2	-180.4500 (1.1818)
4	-146.66 (1.222)
6	-123.46 (1.695)
8	-97.58 (2.96)
10	-82.47 (3.98)
12	-61.25 (5.02)
14	-48.03(3.35)

ISBN 978-607-8242-11-5

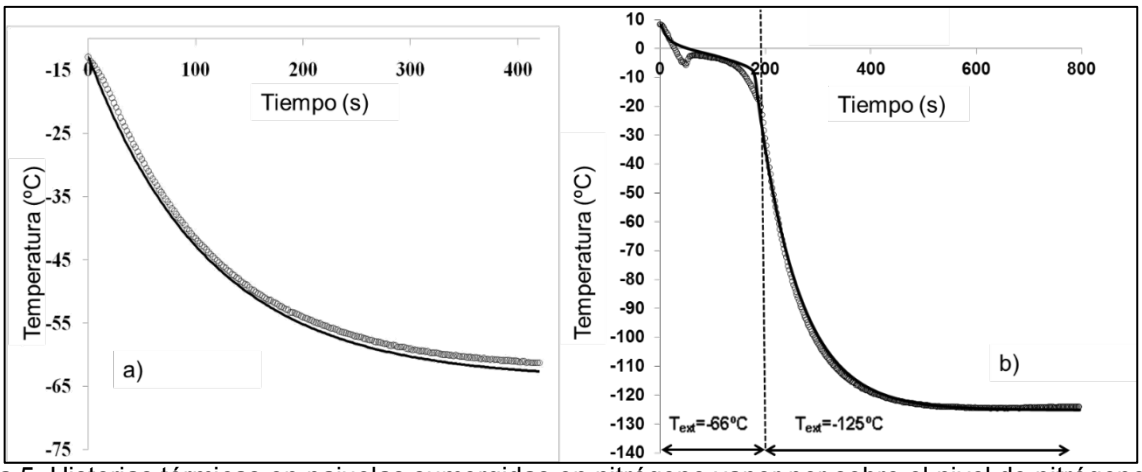


Figura 5. Historias térmicas en pajuelas sumergidas en nitrógeno vapor por sobre el nivel de nitrógeno líquido. Determinación de los coeficientes h. Temperatura experimental (o) y predicciones numéricas (—) para pajuelas plásticas conteniendo a) hielo (enfriamiento sin cambio de fase). Text= -63.9 ºC ,Ti=-12.9ºC, h=10 W/m^2 C, altura=12cm respecto del nivel de NL, b) solución biológica (congelación) protocolo:3 min a 12cm (T_{ext}= -66ºC) y luego 7 min a 2.5cm (T_{ext}=-125ºC). T_i=8.3ºC, h=13 W/m^2 C.

Historias térmicas y coeficientes de transferencia en pajuelas sumergidas en Nitrógeno Líquido

En el caso de pajuelas directamente sumergidas en NL ocurre una ebullición con distintos regímenes a medida que transcurre el enfriamiento. En primera instancia para determinar los h para las distintas etapas del enfriamiento se utilizó hielo en vez del fluido biológico dado que de esa manera se evita el cambio de fase. En la Figura 6a) se muestran las curvas de temperatura versus tiempo asumiendo dos hipótesis distintas i) considerando la existencia de ebullición en film durante todo el experimento (valor único y constante de h), ii) asumiendo que existe una primer etapa donde se desarrolla ebullición en film continuando luego por una segunda etapa donde se desencadena la ebullición nucleada con valores marcadamente más altos de h. Como puede observarse existe una falta de ajuste entre la temperatura predicha por el modelo y la temperatura experimental cuando se utiliza un único valor de h correspondiente a un régimen de ebullición en film (Fig. 6 a). Sin embargo al suponer la existencia de dos regímenes de ebullición con dos valores de h durante el experimento se alcanza una excelente concordancia entre los resultados. La curva de enfriamiento de la pajuela conteniendo hielo muestra un cambio abrupto en su pendiente pudiendo atribuirse al cambio de régimen de ebullición, más específicamente a la transición de ebullición en film a nucleada.
La Fig. 6 b muestra un replicado del experimento considerando los diferentes h en cada etapa. Todas las mediciones de temperatura con las termocuplas tipo T tuvieron un error absoluto de 0.5ºC.
Durante la etapa de ebullición en film el ΔT se encuentra en su valor máximo y el h que mejor ajustó los resultados experimentales fue h=150 W/m^2 ºC. Durante la ebullición nucleada se observa el cambio abrupto en la temperatura y el h que logró minimizar los SRC fue h=1300W/m^2 ºC.

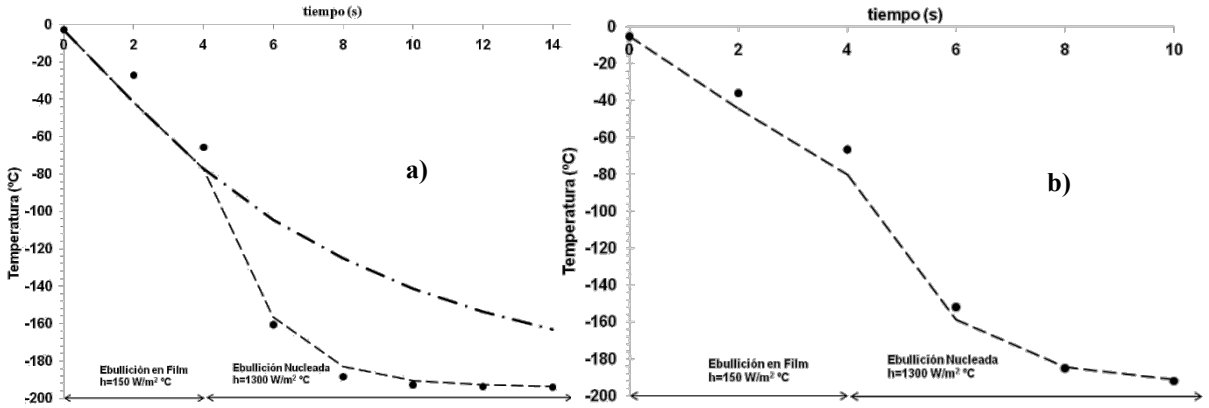


Figura 6 : Historias térmicas en pajuelas sumergidas en nitrógeno líquido y determinación de coeficientes h para los distintos regímenes de ebullición a) Medición experimental de temperatura versus tiempo en la pajuela conteniendo hielo (●) a r= 0.0008 m, L =0.060 m. Predicción numérica de la temperatura mediante simulación computacional considerando un h variable (- -); b) resultados de un replicado del experimento. La curva (— ● —) mostrada en a) se obtuvo considerando un valor único y constante de h=150 W/m^2 ºC (régimen de ebullición en film) durante todo el experimento.

ISBN 978-607-8242-11-5

Luego se validaron estos h utilizando pajuelas conteniendo fluido biológico. La Fig.7a muestra las curvas experimentales de tiempo-temperatura utilizando el programa computacional en elementos finitos para pajuelas plásticas conteniendo semen asumiendo la misma hipótesis que para pajuelas con hielo i) un único valor de h donde existe un régimen de ebullición en film durante todo el experimento (h =150 W/m^2 ºC), ii) considerando que hay una etapa de ebullición en film h =150 W/m^2 ºC seguido de un régimen de ebullición nucleada h = 1300W/m^{2}ºC. Como puede observarse existe una excelente concordancia entre valores predichos y medidos de temperatura si se asume que existe una primera etapa de ebullición en film h=150 W/m^{2}ºC y luego en una segunda etapa un régimen de ebullición nucleada (h=1300 W/m2ºC). Las curvas además muestran una zona de meseta correspondiente al Plateau de cambio de fase debido a la transformación de agua en hielo en la muestra con semen. Luego de esta etapa se observa un descenso abrupto similar al caso observado para pajuela conteniendo hielo y correspondería a la transición del régimen de ebullición. La Fig 7b muestra un replicado del experimento realizado para semen bovino, utilizando los h previamente calculados para el sistema de pajuela conteniendo hielo.

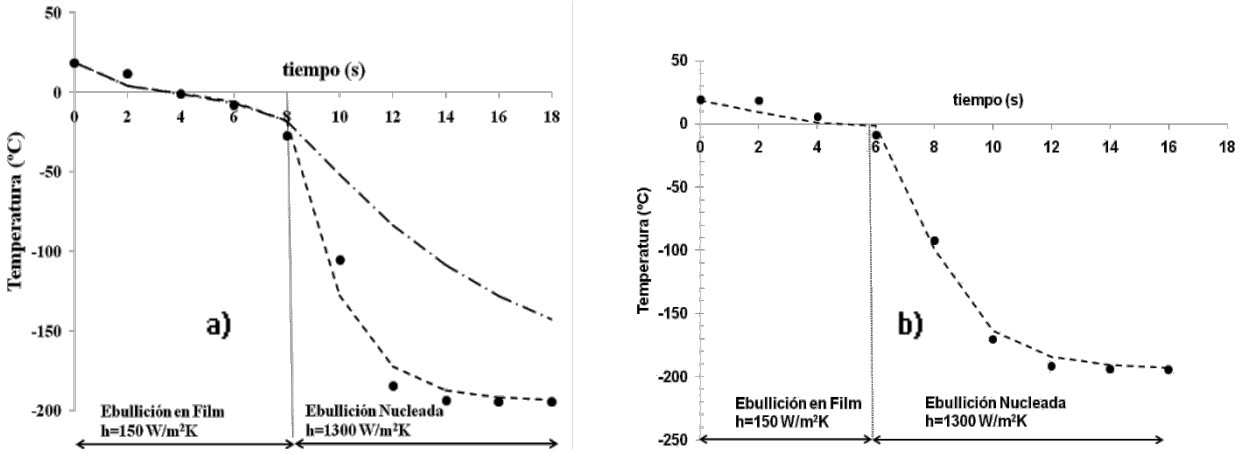


Figure 7: a) Curvas experimentales de tiempo-temperatura (●) pajuela conteniendo el fluido biológico sometido a congelación en r= 0.0008 m; L =0.060 m. Temperaturas predichas por el programa con valores de h variable (- -); b) resultados de un experimento en condiciones similares en r=0.0004m L=0.0604m. La curva (▬ ● ▬) mostrada en a) se obtuvo considerando un solo valor fijo y constante de h=150 W/m^2 ºC (ebullición en film) durante todo el experimento.

CONCLUSIONES

Mediante la comparación de las curvas experimentales de temperatura-tiempo de pajuelas plásticas conteniendo hielo al suspenderlas en NV y al sumergirse en NL contra las predicciones numéricas aplicando el método de los elementos finitos se logró estimar los coeficientes de trasferencia de calor que gobiernan el proceso de enfriamiento en ambos sistemas. En el caso de NL se codificó una subrutina específica en el programa principal que considera h variable a los efectos de tener en cuenta la existencia de dos regímenes de ebullición, primero en film y luego nucleada, cuando se sumergían las pajuelas en nitrógeno líquido.

En todos los casos se validaron estos coeficientes de transferencia de calor utilizando pajuelas plásticas con una suspensión de semen bovino, el cual presenta un cambio de fase o congelación durante su inmersión en el fluido criogénico. En este último caso el programa numérico presentaba la complejidad adicional de ser un problema matemático no-lineal debido al cambio de fase donde las propiedades termofísicas de la suspensión biológica son fuertemente dependientes de la temperatura.

El valor promedio del coeficiente de transferencia de calor obtenido para pajuelas suspendidas horizontalmente en NV fue de 12 W/m^2 K, y resultó independiente de la posición de la pajuela respecto al nivel de NL, o sea de la temperatura del NV. La configuración del sistema, fuente fría (NL) debajo de una fuente caliente (pajuelas), produce una estratificación de las capas de NV siendo el mecanismo de transferencia de energía mayoritariamente por conducción.

Asimismo, existió una excelente concordancia entre los resultados numéricos y experimentales durante el enfriamiento de pajuelas sumergidas directamente en NL cuando contenían tanto hielo como semen. Los valores de h encontrados para el régimen de ebullición en film fueron h=150 W/m^2 K y para ebullición nucleada h=1300 W/m^2 K.

La determinación experimental de los h que gobiernan los distintos procesos de criopreservación de muestras biológicas contenidas en pajuelas plásticas constituye un aspecto importante cuando se trata de optimizar protocolos de manipulación de material biológico en sistemas criogénicos; además resulta útil para el desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras del diseño de dispositivos en el campo de la criobiología.

ISBN 978-607-8242-11-5

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones por su apoyo económico y financiero para el desarrollo del presente trabajo: Dto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, a la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA-CONICET-CIC-PBA) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT)-ARGENTINA.

REFERENCIAS

Bird, R., W. Stewart y E. Lightfoot, "*Fenómenos de Transporte",* Reverté, México (1964).

Bui T.D., y V.K. Dhir. *"Film boiling heat transfer on an isothermal vertical surface"*, J. Heat Transfer, Trans ASME, Ser. C107, 764-771 (1985)

Choi, J. y J.C. Bischof. *"Review of biomaterial thermal property measurements in the cryogenic regime and their use for prediction of equilibrium and non-equilibrium freezing applications in cryobiology".* Cryobiology, 60, 52–70 (2010).

Choi, Y. y M.R. Okos. *"Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods"*. in: M. Le Magher, P. Jelen (Eds.), P. Food Eng. Appl., New York, 93–103 (1986).

Curry, M.R. *"Cryopreservation of mammalian semen"*, Methods Mol. Biol., 368, 303–311 (2007).

FAO. Cryoconservation of animal genetic resources. "*FAO Animal Production and Health Guidelines"* No. 12. Rome,165-166 (2012).

Fennema O. R., W. D. Powrie y E. H. Marth. *"Low Temperatures Preservation of Foods and Living Matter".* Marcel Dekker, Inc. New York (1973).

McNaughton J.L. y C.T. Mortimer, "Calorimetría Diferencial de Barrido", PerkinElmer Corporation, Connecticut, (1975).

Roos YH. *"Methodology. Phase Transitions in Foods"*, Academic Press, San Diego (1995)

Santos, M.V., M. Sansinena, J. Chirife y N. Zaritzky. *"Determination of heat transfer coefficients of biological systems during cooling in liquid nitrogen under film and nucleate pool boiling regimes".* Mecánica Computacional, 33, 2759-2771 (2014).

Santos, M.V., M. Sansinena, N. Zaritzky, y J. Chirife. *"How important are internal temperature gradients in french straws during freezing of bovine sperm in nitrogen vapor?"* Cryoletters, 34,158-65 (2013b).

Santos, M.V., M. Sansinena, N. Zaritzky, y J. Chirife. *"Mathematical prediction of freezing times of bovine semen in straws placed in static vapor over liquid nitrogen".* Cryobiology, 66, 30-37 (2013a).

Suryanarayana N.V., H.Jr. Merte. *"Film boiling onvertical surfaces".* J. Heat Transfer Trans ASME 94, 377-384 (1972).

Quéré D. *"Annu. LeidenfrostDynamics"* Rev. Fluid Mech., 45, 197–215 (2013).

Neeper, D.A. *"Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage"* Solar Energy, 68, 393–403 (2000).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Concepción de un Procedimiento DEA y su Aplicación en un Centro de Educación Superior

Edith Martínez[1]. Osmín Terry[1] y Luis M Hernández [2]
(1) Fac. de Ingeniería Industrial, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba.
(2) Instituto Politécnico Nacional, Ciudad México, México
e-mail: edithmd@ind.cujae.edu.cu

Resumen

Cuba continúa inmersa en un proceso de reordenamiento económico, donde se impone la búsqueda de la eficiencia de las organizaciones como una meta a lograr en un corto plazo. De ahí la necesidad de dotar a las organizaciones de herramientas que tributen a lograr el objetivo deseado.

DEA, de sus siglas en inglés (Data Envelopment Analysis) o AED (Análisis Envolvente de Datos) es una aplicación de la Programación Lineal, que constituye una herramienta de utilidad para efectuar un análisis de la eficiencia relativa entre diversas unidades que realizan una actividad similar, como se manifiesta en la literatura especializada. Diversos son los trabajos que se han desarrollado en este sentido, aunque no en el ámbito nacional. Esta técnica posee cierta complejidad dada por una parte, por la diversidad de modelos y configuraciones que se incluyen en ella así como las condiciones que deben cumplirse en su aplicación, debiéndose simultanear el desarrollo teórico y práctico de la metodología y teniendo como base las particularidades del objeto de estudio práctico. Uno de los aspectos principales en la aplicación del DEA lo constituye la selección de los indicadores apropiados al medir la eficiencia de las organizaciones, y de hecho existen diversas metodologías sin que queden definidos por consenso los mismos. Además, en entornos cambiantes como los que se enfrentan las organizaciones resulta deseable lograr la integración de su gestión para medir correctamente su eficiencia y el cálculo de ésta. En este trabajo se expone un procedimiento que alinea el rumbo estratégico de la organización, con la forma de determinar la eficiencia empleando para ello la herramienta DEA.

Partiendo de la concepción del procedimiento DEA se realiza su aplicación en un centro universitario donde se consideran catorce DMU (Decision Maker Units) u Unidades decisoras existentes en el mismo. Diversas técnicas estadísticas del Análisis Factorial Exploratorio permiten salvar el no cumplimiento de la dimensionalidad del modelo DEA, asegurando su capacidad discriminatoria. La solución de los modelos DEA CCR y BBC que se generan en la aplicación, ambos orientados a inputs y en su forma envolvente; identifican de forma coincidente cuáles DMU son ineficientes, lo que se puede apreciar en la Tabla N° 1:

Tabla N° 1: DMU ineficientes

DMU	Modelo DEA CCR		Modelo DEA BBC	
	Ratios de Eficiencia	Ineficiencia	Ratios de Eficiencia	Ineficiencia
1	0.7742	0.2258	0.7896	0.2104
3	0.7330	0.2670	0.8044	0.1956
13	0.6855	0.3145	0.6989	0.3011
14	0.8264	0.1736	0.8346	0.1654
Promedio	**0.9299**	0.2452	**0.9377**	0.2181

A través de la aplicación de las pruebas estadísticas de Mann- Whitney y de Kolmogorov- Smirnov se contrasta la hipótesis nula que los grupos independientes de los ratios de eficiencia proceden de la misma población, es decir, se verifica que los promedios poblacionales obtenidos en sendos modelos DEA son iguales. Con la solución de dichos modelos también se determinan los grupos de referencias de las DMU ineficientes, lo que conjuntamente con el análisis de las variables de holgura permiten, a través de un Benchmarking, identificar cuáles son los factores que tienen mayor peso en la consecución de la eficiencia y conformar las acciones de mejora relativas a los inputs-outputs. El procedimiento propuesto también incluye la obtención de la jerarquización de las DMU.

Referencias

González-Araya, M. C. y Valenzuela, N.G. *Método de selección de variables para mejorar la discriminación en el análisis de eficiencia aplicando modelos DEA*. No 2, Curicó, Chile: Ingeniería Industrial 0717-9103 (2009)

Lin P., Wu B. y Watada J; *Kolmogorov-Smirnov Two Sample Test with Continuous Fuzzy Data*. Advances in Intelligent and Soft Computing, Vol. 68. 978-3-642-11960-6 (2010)

Santelices, E. et al; *Análisis de los determinantes de la eficiencia hospitalaria: el caso de Chile.* Revista Medicina de Chile, 457-463 (2013)

Torres, M.O. y Marrero, Y.; El análisis envolvente de datos (AED) como método de evaluación de eficiencia. No 1, Revista COFIN Habana (2012)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Optimización del plan de producción de toallas

Edith Martínez 1, Caridad González [2], Rosario Garza [1] y Fernando López[1]
(1) Fac. de Ingeniería Industrial, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE, Cuba
(2) Centro de Estudio de Matemática, Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE, Cuba
e-mail: edithmd@ind.cujae.edu.cu

Resumen

En la actualidad, la necesidad de producir eficientemente sin causar retrasos en las entregas de los productos, ni altos costos, es un factor de suma importancia para las empresas productoras o productoras/distribuidoras. Esto es posible conseguir mediante la implementación de sistemas de planificación de producción eficientes. La aplicación práctica de uno u otro sistema depende del comportamiento de diversas variables que caracterizan a los sistemas de producción y de la clasificación de los mismos. Cuando se habla entonces de planificación los autores afirman que las lógicas PUSH y PULL son los dos principios que más potencialidades presentan al analizar los sistemas productivos, ya que son los que inician el flujo material en el sistema de planificación y control de la fabricación.

La planificación y control de la producción constituye un elemento fundamental en las organizaciones ya que permite garantizar la continuidad de los procesos claves de la empresa y contribuye a elevar la eficiencia de la entidad. En todo momento las empresas trazan planes cercanos a los comportamientos reales, con el fin de minimizar los riesgos y reducir los niveles de incertidumbre que rodean al mundo de los negocios.

Uno de los principales problemas que se evidencian, luego de un análisis en organizaciones de producción de bienes materiales consiste en la planificación ineficiente que hacen de su producción, en la que se emplean datos y conocimientos empíricos fundamentalmente, desaprovechándose la oportunidad de mejorar los indicadores de producción e incurriendo en gastos monetarios innecesarios. La aparición de los ordenadores y los sistemas digitales favorece a que los ingenieros cuenten con una herramienta poderosa para enfrentar los desafíos de eficiencia y flexibilidad de sus procesos según el entorno; más aún en la actualidad, cuando por una parte los sistemas digitales ofrecen una gran cantidad de información, mientras que los ordenadores ofrecen la posibilidad de analizar rápidamente la información para orientar el proceso de toma de decisiones para problemas complejos.

La presente ponencia muestra los resultados fundamentales obtenidos en la investigación realizada. En la misma se propone un procedimiento que permite obtener el plan de producción de una organización, empleando para ello las herramientas técnicas e informáticas que más se ajusten al tipo de sistema productivo PULL/PUSH. Para ello se propone una encuesta que conduce a la clasificación del sistema. Posteriormente, atendiendo a la selección de la herramienta factible de aplicar según criterios que se establecen en el procedimiento propuesto, se modela la situación que se desea planificar y se analizan los resultados alcanzados.

En este trabajo se expone una de las aplicaciones realizadas del procedimiento propuesto y se refiere a la aplicación en una fábrica productora de toallas con diez y nueve surtidos o referencias del artículo, cuyo sistema productivo clasifica como del tipo PUSH. Atendiendo a las funcionalidades de las herramientas factibles de aplicar, los resultados que persigue la empresa y la información de entrada/salida que necesita cada herramienta, en esta aplicación es seleccionada la Programación Lineal. Se conforma el modelo matemático correspondiente, quedando con una dimensión dada por 48 variables y 31 restricciones, abarcando los meses del trimestre de interés, el que una vez resuelto aporta el plan operativo de producción mensual por referencia. Más allá de la optimización del plan y como parte del análisis post-optimal se realiza un análisis del comportamiento de los planes que se obtienen ante nuevas exigencias en la utilización de la capacidad productiva del proceso que constituye el punto limitante del sistema de producción. Para ello se introducen modificaciones en el modelo matemático dirigidas a minimizar la desviación obtenida en los porcientos deseados.

Referencias

Díaz-Madroñero, M., Peidro, D., y Mula, J. ; *Enfoques de programación matemática fuzzy multiobjetivo: una revisión* Paper presented at the International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (2010)

Osorio, J- C. y Motoa, T. G.; Planificación jerárquica de la producción en un job shop flexible. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 44* (2008)

Urquiaga, A. J.; Relación entre los Métodos y Técnicas de Gestión del Flujo Material. *Revista: Ingeniería Industrial* (2001)

Vob, S., Woodruff, D. ; *Introduction to computational optimization models for production planning in a supply chain.* . Berlin Heidelberg.: Springer-Verlag . (2006)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Evaluación de la satisfacción en el proceso de atención a clientes

Ernesto Rodríguez González[1], Rosario Garza Ríos[2], Caridad González Sánchez[3], Edith Martínez Delgado[2] y Dayana Otero Serrano[4]

(1) Universidad Panamericana, Ciudad México, México

(2) Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba

(3) Centro de Enseñanza de las Matemáticas para las Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba

(4) Empresa de Seguridad y Protección, La Habana, Cuba

e-mail: erodrigo@up.edu.mx

Resumen

El desarrollo de las tecnologías y la globalización de las mismas han propiciado el aumento de las expectativas de los clientes sobre los servicios a contratar, situación que unida al incremento de la competencia, hace que se torne más difícil la permanencia de las empresas en el sector.

La Empresa de Servicios de Seguridad Integral es una de estas organizaciones, la cual se dedica a brindar servicios "llave en mano" de sistemas técnicos de seguridad integral. Estudios realizados evidencian que el 54% de las reservas de mejoras detectadas se encuentran en la atención de clientes, siendo además, en su mayoría las que presentan una frecuencia de aparición mayor, destacándose la pérdida de clientes dentro del ciclo de servicios, la cual asciende a más de la mitad del mercado potencial generado por la propia empresa.

Un análisis crítico de las reservas identificadas, determinó que las mismas eran originadas, entre otras causas, por el desconocimiento de las expectativas de los clientes, así como de los elementos propios del servicio y la no medición de la satisfacción de los clientes. Este análisis permitió conocer que del mercado potencial para el servicio de instalación, se pierde un 52% de los clientes, mientras que en el caso del Soporte Técnico la pérdida aumenta a un 77%. Un análisis económico de las pérdidas por concepto de ventas que provoca esta situación arrojó que se dejan de ganar entre un 21 y 27% en miles de pesos CUC +CUP (MMT), lo que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Incremento de los ingresos

Ventas (MMT)	Escenario Pesimista	Escenario más probable	Escenario Optimista
Incremento de las ventas respecto a las ventas reales (%)	21.5	24.07	27.04

Incluso en el escenario pesimista, las ventas asociadas a los clientes que no complementan el ciclo de servicios son elevadas, lo que demuestra los beneficios que pudiera obtener la empresa realizando de forma adecuada el proceso de Atención al Cliente (Paz, 2005). El objeto de estudio de la presente investigación se centra en el subproceso de medición y seguimiento el cual consta de 4 actividades fundamentales: identificación de las variables o atributos del proceso, formulación de indicadores, medición de la satisfacción del cliente y análisis estadístico de los resultados.

Dentro de los indicadores que permiten evaluar la satisfacción del cliente se encuentra el Índice de Satisfacción del Cliente con el Servicio (ISCS), el cual se determina a partir de la encuesta a los clientes, utilizando la función suma ponderada, para el cálculo de dicho índice se realiza un EXCEL programado que permite de forma rápida y segura obtener la evaluación acerca del servicio que oferta la empresa. Además se realizan análisis estadísticos como: análisis univariado, análisis de correlación y análisis de conglomerados o clúster (Gutiérrez, 2004), para realizar todos estos análisis se utiliza un software estadístico.

La medición de la satisfacción de los clientes permitió conocer que el 68.2% de estos se encuentran insatisfechos con el servicio recibido. En correspondencia, el **ISCS es de 3.46**, lo que indica una evaluación de la calidad del servicio de Regular.

Referencias

Gutiérrez, H. y R. De la Vara; *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*, McGraw Hill Interamericana.México (2004)

Paz, R; *Servicio al Cliente. La Comunicación y la Calidad del Servicio en la Atención al Cliente*, Ed. Ideas Propias España. (2005)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Aplicación de la modelación matemática multiobjetivo para la mejora del mantenimiento en una empresa de servicio

Edith Martínez[1], Rogej Hernández [1], María L. Pacheco [1] y Jesús Cabrera [1]
(1) Fac. de Ingeniería Industrial, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Habana, CUJAE, Cuba
e-mail: edithmd@ind.cujae.edu.cu

Resumen

Las serias dificultades enfrentadas por el sistema electro-energético en Cuba en el 2004 condujeron a la puesta en práctica de nuevas concepciones para el desarrollo de un sistema nacional más eficiente y seguro, como es el caso de la generación distribuida, la cual se orienta a resolver el problema de suministro eléctrico como instrumento de desarrollo social y económico. En este sentido, juegan un papel significativo los grupos electrógenos, los que están destinados a una gran variedad de empleos, desempeñando la función de proveedor de energía de reserva, suplementaria o de emergencia; para diversas instalaciones de la producción de bienes materiales y de servicios; también en viviendas rurales aisladas de la red pública de suministro eléctrico. De esta forma se impone mantener a estos activos, cumpliendo las funciones para las cuales fueron diseñados, lo cual está en correspondencia con la política industrial y energética del país, donde se ha reconocido la necesidad de priorizar la reactivación del mantenimiento industrial.

La presente investigación se realiza en una empresa que se dedica al desarrollo, producción y comercialización de equipos, partes, piezas y accesorios de grupos electrógenos, así como brinda servicios técnicos y asesoría en la selección de los mismos, diseño de instalaciones, adiestramiento práctico para el uso y explotación, asistencia técnica por contrato de mantenimiento, instalación y puesta en marcha. Sin embargo, la actividad fundamental es el servicio de mantenimiento de post-venta in situ a grupos electrógenos de emergencia. En particular el trabajo se desarrolla en la agencia habana por ser donde existe un mayor número de grupos electrógenos.

Elementos disfuncionales existentes en la empresa conllevaron al incumplimiento del contrato establecido con los clientes en el 29% de los casos. La aplicación del modelo de diagnóstico desarrollado en esta investigación, donde se evalúan las funciones del sistema de mantenimiento, los indicadores de desempeño y la gestión del mantenimiento; arroja que uno de los aspectos factibles a mejorar es la planificación del servicio de mantenimiento, donde no resulta suficiente el empleo de la matriz de mantenimiento, aún con el empleo del Microsoft Excel. Se evidencia la ausencia de una herramienta matemática que considerando las limitaciones existentes y exigencias de interés, apoye el proceso de decisiones en cuanto a la planificación del servicio de mantenimiento.

Como principal resultado se obtiene el diseño de un procedimiento para la planificación mensual del servicio de mantenimiento preventivo en la entidad objeto de estudio para la muestra seleccionada de 58 clientes, El mismo incluye una heurística que permite la agrupación de los clientes conformándose zonas de trabajo de los mantenedores. También se conforma un modelo matemático de Programación Lineal Multiobjetivo que posibilita valorar el escenario actual del sistema y el deseado. Finalmente se llega a una mejora en cuanto al balance de carga de trabajo, al conocimiento de los recursos a emplear y cuáles servicios realizar y en qué cantidades y al plan de venta; entre otros. lo que aumenta la efectividad en la toma de decisiones.

Para el desarrollo del trabajo se utilizan técnicas, métodos y procedimientos propios del campo de la investigación a partir de métodos teóricos, técnicas matemáticas como el Goal Programming y procedimientos estadísticos de búsqueda de información, como el método Delphi, válido a partir de hipótesis y enriquecido con técnicas multicriterio. Asimismo, se hizo uso de diferentes software como: Sample, Minitab y SolverPro.

Referencias

Boza, L.R.S.; *Diseño de un Procedimiento para la Planificación Operativa del Servicio de Mantenimiento Preventivo Integral. Aplicación en SEISA,* ISPJAE. La Habana (2011)

Canto, S.P.; *Gestión del mantenimiento preventivo para centrales eléctricas. Aplicación a un caso real ilustrativo del sistema eléctrico español de generación.* Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa, **17**: p. 145-154 (2008)

Fuentes, R.D. y M.F. Fernández; *El uso de los grupos electrógenos dentro del concepto de Generación Distribuida y la Calidad de la Energía.*, in *Facultad de Ingeniería Eléctrica*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría: La Habana (2006)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Diseño de organizaciones de servicios públicos. Aplicación de la simulación discreta

Rosario Garza Ríos[1], Caridad González Sánchez[2], Edith Martínez Delgado[1] y Aleida González Gonzalez[1]

(1) Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba

(2) Centro de Enseñanza de las Matemáticas para las Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba

e-mail: rosariog@ind.cujae.edu.cu

Resumen

En la actualidad se evidencia una tendencia internacional a racionalizar trámites y agilizar procedimientos en las entidades que prestan servicios públicos; empleando las nuevas tecnologías de la informática y las comunicaciones que garantizan un servicio rápido y eficiente.

Mejorar el servicio que recibe el cliente y eliminar las ineficiencias que generan insatisfacción en el mismo, y la administración de los recursos así como enfrentar los cambios, eliminando las barreras organizacionales, es el principal objetivo del enfoque a procesos.

De forma general los procesos claves de una organización que brinda servicios públicos son: información al cliente, Captación - Verificación de información, Realización del trámite y Obtención delresultado y mediciónde la satisfacción.

Un análisis del servicio en algunas entidades públicas permitió detectar un conjunto de deficiencias comunes a dichos servicios, las cuales se enumeran a continuación:

- Demoras en la atención a los clientes (entre 5 minutosy 1 hora, dependiendo del trámite).
- Cúmulo de documentación por procesar y exceso de transportes.
- Actividades reiterativas (registro de la misma información manual y digital).
- Retrocesos.
- Actividades que no aportan valor al proceso.
- Demoras en la obtención del resultado final.

Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo es el diseño de una entidad que brinde servicios públicos de forma tal que se logren mitigar las deficiencias presentadas, permitiendo determinar los puestos de trabajos donde se ejecutarán cada uno de los procesos claves, utilizando las nuevas tecnologías.

Para el desarrollo del trabajo se utiliza un enfoque híbrido simulación AHP(González, 2014). Para llevar a cabo la simulación se utilizó el lenguaje ARENA (Kelton, 2009) el cual permite evaluar diferentes alternativas de diseño de la entidad, y el método AHP, el cual garantiza la selección del diseño que mejor cumpla con los atributos definidos por los expertos.

Los resultados obtenidos muestran que en dependencia del tipo de entidad (tamaño), de acuerdo a la estimación de clientes potenciales, las variantes seleccionadas de ejecución de los procesos en los puestos de trabajos serán diferentes. Para ello se generaron 12 variantes de diseño y considerando los atributos: Tiempo de estancia en la entidad, tiempo medio en la cola de cada puesto de trabajo, utilización de los recursos, cantidad de trámites concluidos y costo tecnológico.

Referencias

Kelton, W.D, R. Sadowski y D. Sturrock; *Simulation with ARENA*, 3ra ed., McGraw Hill México (2009)

González, C.R. Garza y E. Malo; *Enfoque hibrido imulación – proceso analitico jerárquico:caso de estudio del rediseño de un restaurante*, Revista Métodos Cuantitativos para la Economía y la empresa: 17, 23 – 41 (2014)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Simulación Numérica Mediante CFD de la Laminación en Caliente de Aceros

Carlos A. Hernández[1], Juana E. Mancilla[1] y Miguel Ángeles[2]
(1) INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, ESIME Azcapotzalco, Av. de las Granjas, 682. Col. Sta. Catarina. Del. Azcapotzalco. CP 02250. Ciudad de México-México.
(2) INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, ESIQIE, Laboratorios Pesados de Metalurgia, Unidad Prof. Adolfo López Mateos. Col. Lindavista. Del. Gustavo A. Madero. CP 07738, Ciudad de México-México
e-mail: cahernandezc@ipn.mx; jmancilla@ipn.mx; mangeles@ipn.mx

Resumen

El problema de laminación de aceros en caliente es muy complejo, por lo cual cuando se aplican métodos analíticos industrialmente para su resolución se requiere de grandes cantidades de tiempo y costos para probarlos. Utilizando una solución numérica basado en el método de volumen finito en este trabajo se presenta una solución numérica, y su implementación en código de la dinámica de fluidos computacional (CFD) del programa ANSYS Fluent, al proceso de laminación en caliente de un acero de bajo contenido de carbono (1008 AISI) para determinar el perfil de distribución temperatura en la zona del entrehierro. Se efectuó la discretización de las ecuaciones para transporte de calor y momento, aplicando una formulación Euleriana. Además se modelaron las propiedades termomecánicas tomadas de la literatura en función de la temperatura. La malla se elaboró en el módulo ANSYS Fluent, cuyas características fueron: 21,624 nodos y 15,750 celdas. Se realizó un análisis de calidad de malla. En cada nodo dentro de la celda se resolvieron las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía bajo condiciones de estado estacionario. Los resultados numéricos muestran que durante la laminación no se conservan constantes ni temperaturas ni velocidades de deformación en la zona del entrehierro. La temperatura más elevada se obtienen al interior del planchón de acero (~1,370 K), siendo las temperaturas sobre la superficie del planchón de acero alrededor de 30 K menores con respecto al centro del planchón. A partir de los resultados obtenidos, el principal factor que se debe controlar en el proceso de laminado en caliente es la temperatura de deformación del acero.

Numerical Simulation of the hot rolling of a 1008 steel by using CFD

Abstract

The problem of hot rolling of steels is very complex. When analytical solutions are industrially used it is prohibitively long and expensive to probe them. A numerical solution achieved by the finite volume method (FVM) is applied to the hot rolling process of an AISI 1008 steel to determine the temperature distribution in the roll gap. A code on the software ANSYS Fluent has been developed. The discretization of the heat and momentum differential equations using a Eulerian formulation is presented. Thermo-mechanical properties as function of the temperature such as thermal conductivity and specific heat capacity are included. ANSYS Fluent was used to generate the mesh formed with 21,624 nodes and 15,750 cell volume elements. A mesh quality calculation is performed. The conservation, momentum, and energy equations under stationary conditions are solved in each node inside the cell. The numerical results shows that in the hot rolling of a 1008 steel the temperatures and strain rates are not conserved constants in the roll gap. At the center of the steel slab the peak temperature is about 1,370 K. The maximum computed temperature on the surface of the steel slab is about 30 K less than that at the center of the steel slab. The most important factor to be controlled in the hot rolling process is the temperature.

Keywords: hot rolling, carbon steel, CFD, FLUENT code, Eulerian formulation, heat transfer, thermal modelling.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La laminación en caliente es un proceso de manufactura en el cual se conforma a temperaturas elevadas (> 0.5 de la temperatura de fusión del material) un planchón haciéndolo pasar entre dos rodillos en varios pasos de deformación. A tales temperaturas, el conformado se realiza bajo condiciones de deformación plástica, lo cual acarrea que la estructura del material sea sensible a los parámetros termomecánicos impuestos durante la deformación, tales como fuerzas de laminación, temperatura, reducción y velocidad de deformación. La modelización matemática de la laminación en caliente de aceros ha sido objeto de gran cantidad de estudios, tanto teóricos como experimentales (Pietrzyk y Lenard, 1991; Richelsen, 1996; Ma et al., 2017; Khlopkov et al., 2017). La solución numérica de la laminación en caliente, descrita como ecuaciones diferenciales parciales (EDP) para las fuerzas y los fenómenos de transporte involucrados, se puede lograr empleando tres métodos: el método de las diferencias finitas (MDF), el método del elemento finito (MEF) y el método del volumen finito (MVF). Los dos primeros son las técnicas más empleadas. El MVF requiere una formulación integral de volumen del problema (Lagrangiana) con un particionado finito del volumen para discretizar las EDP y se emplea normalmente para resolver problemas del ámbito de la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). En este trabajo se desarrolló una solución numérica aplicando el método de volumen finito, y su implementación en código de la dinámica de fluidos computacional (CFD) del programa ANSYS Fluent, al proceso de laminación en caliente de un acero de bajo contenido de carbono 1008 AISI para determinar el perfil de distribución temperatura en la zona del entrehierro, como se ilustra en la Fig. 1.

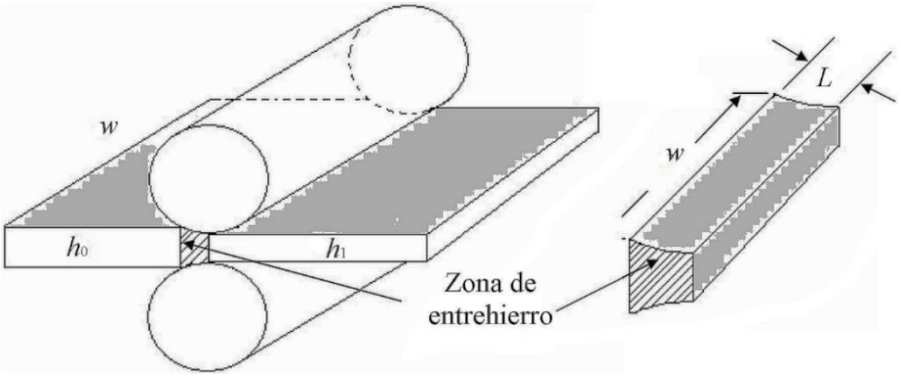


Fig. 1. Esquema de la zona del entrehierro en el proceso de laminación

En el cálculo de la deformación plástica de un acero en la zona del entrehierro, el acero se puede reemplazar por un fluido laminar ya que el sólido cristalino presenta un comportamiento viscoplástico. En el caso de un fluido, este fluye mientras se continúe aplicando un esfuerzo, siendo este proporcional a la velocidad de deformación, y en el caso de un sólido, su deformación es independiente del tiempo durante el cual se aplique el esfuerzo. Perzyna (1966) estableció que en un fluido, el esfuerzo es directamente proporcional a la velocidad de deformación

$$\bar{\sigma} = 3\mu\,\dot{\bar{\varepsilon}} \tag{1}$$

Perzyna propuso el concepto de *superficie de fluencia*, f, para describir al estado viscoelástico:

$$f = f(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}^{P}, k, \beta) \tag{2}$$

siendo $\dot{\varepsilon}_{ij}^{P}$ la velocidad de deformación en su contribución plástica, *k* es el coeficiente de endurecimiento por deformación y β representa a los efectos viscosos.

La dinámica de fluidos computacional, CFD, ayuda a sustituir el conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo por un conjunto de ecuaciones algebraicas, las cuales pueden ser resueltas utilizando recursos computacionales. Se considera como la unión entre la teoría y la experimentación, proporcionando una alternativa económica para la simulación de flujos reales (Wendt, 2009).

En el MVF, el dominio computacional se subdivide en un número finito de elementos contiguos, descrito por Durbin y Medic (2007). De esta forma, este método no trabaja como puntos de intersección en la malla y tiene la capacidad de acomodarse a cualquier tipo de malla. La solución del dominio se subdivide en un número contiguo de volúmenes de control (VC) y las ecuaciones de conservación se aplican a cada volumen de control. En el centroide de cada VC se encuentra un nodo en el cual los valores de las variables se pueden calcular. La interpolación se utiliza para expresar los valores de las variables de las superficies del VC en términos del valor nodal (centro del VC). Las integrales de superficie y de volumen se aproximan empleando fórmulas de cuadratura adecuadas. Como resultado se obtiene una ecuación algebraica para cada VC, es decir se pueden así discretizar las ecuaciones de transporte en donde quedan establecidos una seria de

 ISBN 978-607-8242-11-5

valores nodales vecinos. Debido a que no requiere de una malla estructurada, es un método adecuado para geometrías complejas, en donde la malla se limita a definir las fronteras del VC y no necesita relacionarse con un sistema de coordenadas. El método es conservativo siempre que las integrales de superficie (que representan los flujos convectivos y difusivos) sean las mismas para los VC que comparten fronteras. El valor nominal se deriva a partir de los valores en la celda con respecto a la dirección normal de la velocidad. Por ejemplo, el programa comercial ANSYS-Fluent almacena de forma predeterminada valores discretos del escalar en el nodo central. La desventaja del MVF comparado con el MDF es que en métodos de orden mayor al segundo orden es más complicado desarrollar para aplicaciones tridimensionales por el hecho que las aproximaciones del MVF requieren de tres niveles de aproximación (interpolación, diferencial e integral). El primer nivel es un MVF basado en el nodo central, donde el dominio computacional se divide en una malla y cada elemento constituye un volumen de control. Las ecuaciones de transporte se integran sobre cada volumen y luego se discretizan para obtener en cada volumen un conjunto de ecuaciones algebraicas. En este enfoque de nodo central, el valor de cada variable se guarda en un nodo en el centro de la celda. En las caras de la celda, las ecuaciones discretizadas también tienen valores. Por tanto, los métodos de interpolación se utilizan para obtener valores aproximados en estas posiciones. En la segunda aproximación, la diferencial, los volúmenes de control se construyen alrededor de cada vértice de malla, utilizándolos para guardar las variables. Al igual que en el enfoque basado en el nodo central, las ecuaciones de gobierno se integran sobre cada volumen de control. Sin embargo, ya que cada volumen de control se encuentra dentro de varios elementos de malla, la discretización se realiza dentro de cada elemento y, a continuación, las propiedades se distribuyen a los elementos de control correspondiente.

EL MODELO

Para el caso de transferencia de calor en un medio isotrópico, con generación de calor, se consideran las siguientes ecuaciones:

Conservación de energía

$$\rho \cdot C_q \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \bullet \, V\, T = -\nabla \bullet \left[-k \nabla T \right] + s \tag{3}$$

Conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} = -\left(\nabla \cdot \rho V \right) \tag{4}$$

Conservación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho V + \left[\nabla \bullet \rho V V \right] = -\nabla p - \nabla \bullet \left[-\mu \nabla V \right] + b \tag{5}$$

Para efectos de este trabajo se empleó una formulación euleriana para el dominio computacional que estaría determinado por el perfil de laminado y sus fronteras. Los parámetros *s* y *b* representan términos de generación de energía y momentum, respectivamente. El problema se simplifica con las siguientes suposiciones:

- El metal se comporta como un fluido no newtoniano al estar el hierro en fase austenítica.
- Los materiales son incompresibles.
- El fenómeno está en estado estacionario.
- El estudio es sólo para el comportamiento plástico del material.
- Al ser un proceso en una sola dirección, la velocidad en *z* se toma como 0.

La dependencia con respecto a la temperatura de las propiedades térmicas del acero 1008 AISI se tomaron en cuenta después de cada iteración para aplicarlas a la siguiente iteración.
Las condiciones de frontera utilizadas para la ecuación de conservación de cantidad de movimiento se establecieron en términos de la velocidad en la interface rodillo/pieza laminada. La condición de fricción y sistema de enfriamiento se considera ideal, debido a que el estudio se concentra en un proceso estacionario. La velocidad lineal que toma el material se establece con parámetros de proceso a una velocidad angular de los rodillos constante. La velocidad angular se determina dentro de un marco de referencia Euleriano, como lo establece Davim (2011). Es decir, que para efectos de cálculo, los rodillos y el material de trabajo tienen una velocidad constante en la dirección *x*. Una condición inicial fue la de considerar ciertas velocidades de proceso de entrada y de salida típicas para la manufactura de chapa delgada de acero. Asimismo, se considera que las paredes de la lámina se mueven en la dirección, magnitud y sentido de la velocidad de proceso, ya que estas fronteras son parte del material.

ISBN 978-607-8242-11-5

Respecto a las condiciones de frontera para la ecuación de energía se consideran de tipo Dirichlet en la entrada y condiciones de Neumann para el resto de las paredes, incluyendo la interface rodillos/pieza laminada. Cavaliere (2001) estableció que el flujo de calor entre los rodillos y la pieza de trabajo se mantiene en flujo constante, ya que gran parte del calor se transfiere a los rodillos generando desgaste. Las condiciones de frontera en la superficie libre se dan por:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = h_c\left(T - T_\infty\right) + \sigma_{st}\,\varepsilon_r\left(T^4 - T_\infty^4\right) \tag{6}$$

siendo h_c el coeficiente convectivo de transferencia de calor, σ_{st} es la constante de Stephan =5.67 × 10^{-8} $W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-4}$, ε_r es la Emisividad total de la superficie del material desde la cual ocurre la transferencia de calor y T_∞ es la temperatura del medio ambiente. En la ecuación (6), el lado izquierdo es el flujo de calor conductivo y está dado por:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = -k\left(\frac{\partial T}{\partial x}n_x + \frac{\partial T}{\partial y}n + \frac{\partial T}{\partial z}n_z\right) \tag{7}$$

siendo n_x, n_y y n_z son los cosenos directrices de la normal hacia la superficie. En el lado derecho de la ecuación (7), el primer término representa el calor transferido debido a la convección y el segundo término representa el calor transferido debido a la radiación. Las condiciones de frontera en la superficie de trabajo del rodillo son complejas. Un análisis riguroso requiere el modelado del perfil y el rodillo juntos. En las fronteras, el calor generado debido a la fricción es compartido entre el rodillo y el perfil de laminado. Una forma más simple es considerar que en la zona de trabajo del rodillo, el flujo de calor del perfil de laminado hacia el rodillo y todo el calor de fricción va al rodillo:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = h_c\left(T_s - T_r\right) \tag{8}$$

siendo h_c es el coeficiente de transferencia debido a la conducción. Una parte del calor generado se debe a la deformación plástica en el perfil de laminado, que puede calcularse mediante:

$$\dot{q} = \eta\sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} \tag{9}$$

La velocidad angular del rodillo se estableció a 20.54 rpm y la velocidad de avance de la lámina fue de 0.81 mm/s. Las propiedades del acero se tabulan en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos para la simulación.

Propiedad/Parámetro	***Valor***
Diámetro del rodillo	752
Velocidad de los rodillos, m·s	0.81
Espesor inicial del laminado, mm	48
Espesor final del laminado, mm	36
Ancho de la lámina , mm	1000
Longitud de la lámina , mm	2000
Material de la lámina , mm	Acero 1008 AISI
Densidad 1008 AISI, $kg{\cdot}m^{-3}$	7,871
Coeficiente convectivo del aire, $W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}$	30
Coeficientes convectivos de rodillo y lámina, $W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}$	0:025 y 0:25
Emisividad del acero	0.70
Temperatura de proceso, K	1,346

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta el comportamiento de las temperaturas estimadas por las simulaciones, en función de la velocidad de deformación. En el análisis se utilizó una malla de 117,492 nodos y 109,295 elementos, cuya ortogonalidad mínima fue de 0.94 y ortogonalidad máxima fue de 1.0. El análisis de independencia de malla reveló que mallados superiores no incrementan la precisión de los resultados. La Fig.2 muestra la distribución de temperatura para la velocidad de deformación de 0.81 s^{-1}. Los resultados se registraron con el hecho de que el calor se distribuye a lo largo del acero laminado perdiendo calor en las superficies debido al contacto con el aire y al contacto con el material de los rodillos. A medida que la lámina está sometida a deformación plástica en el entrehierro, la temperatura máxima en la superficie de la lámina alcanza aproximadamente 1,370 K y se incrementa continuamente debido a la contribución de la energía de deformación plástica, en concordancia con los resultados numéricos de Tseng (1984). Por otra parte, también la temperatura de la superficie de la lámina cambia mucho más drásticamente debido a la contribución del calor por fricción y la temperatura del rodillo. Saliendo del entrehierro, la temperatura de la lámina cae rápidamente, aunque tiende a ser constante. Estos resultados de temperaturas en la superficie son consistentes con la base de datos del simulador industrial Hot Strip Mill Model (HSMM, 2013). En los lados se observa ocurre la mayor disipación de calor con una caída de aproximadamente 30 °C a 50 °C respecto a la de la superficie. El fenómeno se explica por la disminución del flujo de calor del material.

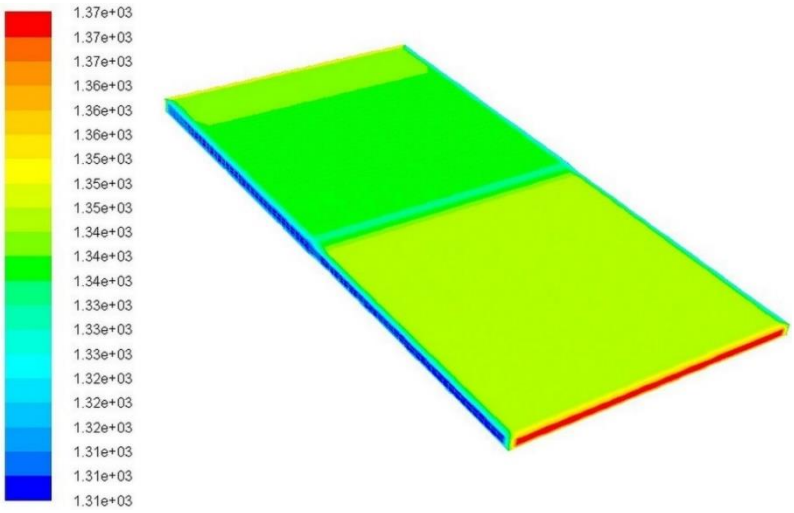


Fig. 2: Distribución de temperaturas del perfil de laminado del acero 1008. Velocidad de deformación=0.81 s^{-1}.

En la Fig. 3 se muestra que la parte central del material presenta mayor temperatura, antes, durante y después de la deformación en el entrehierro. Con respecto a la superficie, el incremento de temperatura fue de entre 25 °C y 40 °C. En el entrehierro, el incremento fue de aproximadamente 30 °C. Este resultado numérico demuestra que las variaciones en la temperatura de la lámina ocurren en una muy delgada capa, lo cual es consistente con los resultados experimentales de Tseng (1984), aunque sus diferencias alcanzaron hasta 60 °C que podría explicarse por las distintas condiciones de frontera empleadas y la composición del acero ensayado.



Fig. 3: Distribución de temperaturas del perfil de laminado del acero 1008 en la parte central. $\dot{\varepsilon}$=0.81 s^{-1}.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden indicar las siguientes conclusiones:
1) El estudio muestra que la CFD representa una buena herramienta para la simulación de la laminación en caliente;
2) el MVF permite determinar los perfiles de temperatura para diferentes condiciones de proceso; y
3) las diferencias entre los valores de temperaturas determinados en este trabajo y los de Tseng (1984) se pueden deber a las distintas condiciones de contorno usadas.

REFERENCIAS

Bird, R., W. Stewart y E. Lightfoot, "*Transport Phenomena",* John Wiley and sons, 2th Edition (2002).

Cavaliere, M. A., Goldschmit, M. B. y Dvorkin, E. N., "*Finite element analysis of steel rolling processes*", Comput. Struct., 79(22-25), 2075-2089 (2001).

Davim, J. P., "*Finite Element Method in Manufacturing Processes*", John Wiley & Sons, Inc. (2011).

Durbin, P. A. y Medic, G., "*Fluid Dynamics with a Computational Perspective*", Cambridge University Press, UK, (2007).

Khlopkov, K., Baron, T. J. y Paul, G., "*Modeling of the Hot Rolling: Towards the Industrial Applicability*", Mater. Sc. Forum (Volume 879), THERMEC 2016, Trans. Tech. Publications. (2017).

Kobayashi, S., "*A review on the finite-element method and metal forming process modeling*", J. Applied Metalworking, 2(3), 163-169 (1982).

Ma, G-S, Liu, Y.M., Peng, W., Yin, F.C., Ding, J.G., Zhao, D.W., Di, H.S. y Zhang, D.H., "*A new model for thermo-mechanical coupled analysis of hot rolling*". J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng., 39(2), 523-530 (2017).

HSMM, "*Manual del programa Hot Strip Mill Model Rel. 3.0*". INTEG process group, AISI/DOE Technology (2013).

Perzyna, P., "*Fundamental Problems in Viscoplasticity*", Academic Press, London (1966).

Pietrzyk, M. y Lenard, J. G., "*Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process*", Springer Berlin Heidelberg, (1991).

Richelsen, A. B., "*Comparison of a numerical analysis of rolling with experimental data*", J. Mater. Process Technol., 57(1-2), 70-78 (1996).

Tseng, A. A., "*A Numerical Heat-Transfer Analysis of Strip Rolling*", J. Heat Trans.-T Asme, 106(3), 512-517 (1984).

Zienkiewicz, O. C, Onate, E. y Heinrich, J. C, "*A General Formulation for Coupled Thermal Flow of Metals Using Finite Elements*" Int. J. Num. Meth Eng., 17, 1497-1514 (1981).

Wendt, J. F., "*Computational Fluid Dynamics. An Introduction*", Springer-Verlag, Verlin (2009).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Optimización multiobjetivo de la flexión de rodillos de trabajo durante la laminación plana en caliente de aceros

Carlos A. Hernández[1], Alejandro López, Guadalupe Castilla [2] y Juana E. Mancilla[1]
(1) INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, ESIME Azcapotzalco, Av. de las Granjas No. 682 Col. Sta. Catarina. Del. Azcapotzalco. C.P. 02250. Ciudad de México, México.
e-mail: cahernandezc@ipn.mx
(2) INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz s/n. C.P. 89440. Cd. Madero Tamaulipas, México

Resumen

La calidad de la planicidad de láminas de acero producidas en trenes de laminación en caliente está definida con base en la calidad superficial y las dimensiones (espesor, ancho y largo). El perfil de la lámina se define como la variación del espesor a lo largo del ancho mientras que la corona de la lámina se define como la diferencia de espesores del centro a los extremos de la lámina. Se supone que el perfil de la lámina es idéntico al perfil del rodillo de trabajo. Este perfil depende de los perfiles iniciales, la expansión térmica y el desgaste de los rodillos de trabajo, de la flexión que sufren cuando pasa la lámina caliente por su superficie, así como de las fuerzas de laminación, que a su vez depende de la resistencia a la deformación de la lámina. En este trabajo se calculó este parámetro con un modelo constitutivo que tiene en cuenta no sólo los parámetros del proceso de laminación (temperatura, velocidad de deformación, deformación, tamaño de grano inicial de la lámina) sino también la composición química de la lámina, lo cual no se tiene en cuenta en los modelos publicados en la literatura especializada. Con este parámetro bien calculado es posible la optimización multiobjetivo de la cédula de laminación minimizando la flexión del rodillo de trabajo y el tiempo total de laminación en un tren de laminación de 6 pasos. Para calcular la flexión de los rodillos de trabajo se utilizó un modelo analítico deducido a partir de la teoría de flexión vigas, cuyos resultados se compararon con aquellos obtenidos mediante análisis por elemento finito de los rodillos de laminación, demostrándose que el error relativo entre la flexión calculada analíticamente y la del método de elemento finito fue de 0.47 %. Para esta optimización se utilizó un algoritmo genético de clasificación no dominante de segunda generación NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*, por sus siglas en inglés), por adaptarse con facilidad a problemas ingenieriles con múltiples objetivos, para el cual se desarrollaron dos distintas configuraciones. Para su verificación se aplicaron instancias de prueba (basadas en la base de datos del simulador comercial *Hot Strip Mill Model* de la compañía INTEG *Process Group*). El algoritmo se implementó con una población inicial de 100 individuos y el número de generaciones fue de 100, con una cruza de 95 % y una mutación de 20 %. Se ejecutaron 30 corridas del algoritmo, para garantizar la fiabilidad de los resultados. Se obtuvieron así 3,000 soluciones que satisfacen a las funciones objetivo planteadas. Una comparativa entre ambas configuraciones se efectuó para probar si el tipo de configuración afecta los resultados obtenidos. La implementación del NSGA-II en sus dos variantes minimizaron la corona de flexión de los rodillos de trabajo respecto a la obtenida industrialmente y mejorando hasta en un 0.37 % el tiempo de laminación industrial, a bajo costo computacional, que para este caso, en un lapso de 15 a 70 segundos, generó conjuntos de 3,000 soluciones. La Fig. 1 muestra las reducciones determinadas por el NSGA-II respecto a las reducciones industriales. Nótese que las reducciones optimizadas están mejor distribuidas en cada paso de laminación, generando reducciones menos críticas que disminuyan la flexión en los rodillos.

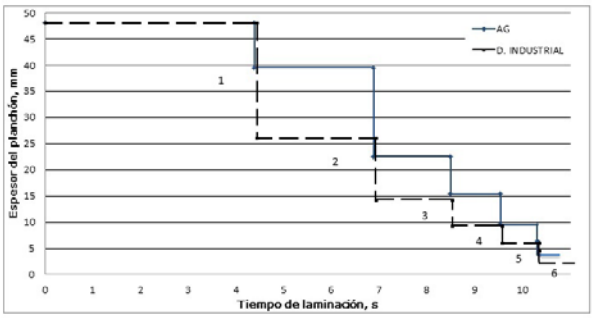


Fig. 1. Comparación entre la cédula de laminación obtenida por el NSGA-II y la cédula industrial. Los números indican el paso de laminación.

Referencias

Samareh Salavati Pour, H., Khademhosseini Beheshti, H., Alizadeh, Y. y Poursina, M. *Calculation of work roll initial crown based on desired strip profile in hot rolling*. Neural Comput Appli.: 24, 1123-1133 (2013)

Pholdee, N. et al. *Optimization of Flatness of Strip during Coiling Process based on Evolutionary Algorithms*. Inter J Precision Eng Manuf.:16, 1493-1499 (2015)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Sistemas Embebidos en un GMAO para Robustecer la Visión Holística de la Condición de un Motor Diésel

Cristian L. Garcia[1,2], Ileana I. Concho[1,2], Mary J. Vergara[1,2,3], Fernando Chica[1,2]
(1) Grupo de Investigación en Ingeniería de Transporte GIIT, Carrera de Ingeniería Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana. Sede Cuenca, Ecuador
(2) Grupo de Investigación de Diseño y Modelado de Máquinas DIMMA, Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes, La Hechicera Mérida, Venezuela
(3) Grupo de Investigación en Diseño Sustentable GIDISUS. Escuela de Diseño. Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Sede Ibarra. Ibarra, Ecuador
E-mail: cgarciag@ups.edu.ec; ilecori82@gmail.com; vmary@ula.ve; jchica@ups.edu.ec

Resumen

Actualmente, empresas que trabajan con Motores Diésel (MD) se han visto en la necesidad de implementar diferentes herramientas tecnológicas para realizar un mantenimiento de manera eficiente en la búsqueda de la disminución de contaminantes en el medio ambiente. Por otro lado, la creciente demanda de MD en el área automotriz ocasiona que las empresas que manejan estos equipos, requieran de programas de gestión de mantenimiento asistido por ordenador (GMAO) que permitan no solo el manejo de la gestión de los mismos, con sus módulos clásicos, sino que además se pueda establecer una visión holística de la condición del motor. Los programas disponibles en el mercado normalmente no poseen esta información, o en el mejor de los casos se encuentra desagregada, por lo tanto, se requiere de la incorporación de módulos adicionales que ayuden a la detección y diagnóstico de MD. En pro de diseñar herramientas robustas en países emergentes con sistemas propios, se desarrolla un GMAO que permite automatizar la gestión de mantenimiento en MD, incorporando dos módulos embebidos: uno de Mantenimiento Basado en Condición y otro que integra un Sistema Experto, que en conjunto pueden ser utilizados para detectar y diagnosticar la condición de un MD, ya que el primero maneja datos de vibración, ruido, temperatura y aceite; mientras que el segundo presenta información de expertos. El software desarrollado y sus módulos embebidos se han diseñado con Microsoft Access y son verificados utilizando datos de un MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0 del Taller Automotriz CIMA, junto con información específica de los expertos de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Estos módulos permiten presentar un programa novedoso e innovador para las empresas automotrices, ya que este les permitirá en corto y mediano plazo tomar decisiones en los niveles operativos, tácticos y gerenciales.

Palabras clave: GMAO; MBC; motor diésel; sistema experto; diagnóstico

Systems Embedded in a CMMS to Strengthen the Holistic View of the Condition of a Diesel Engine

Abstract

Nowadays, companies working with Diesel Engines (DE) have been in need of implement different technological tools to perform a maintenance in an efficient way in the search for the reduction of pollutants in the environment. On the other hand, the increasing demand for DE in the automotive area causes that the companies that manage these equipment require computer assisted maintenance management (CMMS) programs. They need programs that allow not only the management of DE, with their classic modules, but also can establish a holistic view of the engine condition. The programs available in the market do not normally have this information, or at best it is disaggregated, therefore, it is necessary to incorporate additional modules that help the detection and diagnosis of DE. In order to design robust tools in emerging countries with own systems, a CMMS is developed that allows to automate maintenance management in DE, incorporating two embedded modules: one of Condition Based Maintenance and another that integrates an Expert System. These together can be used to detect and diagnose the condition of a DE, since the first one handles vibration, noise, temperature and oil data, while the second presents expert information. The software developed and its embedded modules have been designed with Microsoft Access and verified using data from a DE Hyundai Santa Fe CRDi 2.0 of the Automotive Workshop CIMA, together with specific information from the experts of the Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. These modules allow to present a new and innovative program for automotive companies that will allow in the short and medium term to make decisions at the operational, tactical and managerial levels.

Keywords: CMMS; CBM; diesel engine; expert system; diagnosis

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

A medida que pasan los años se van creando nuevas tecnologías dirigidas a todos los campos para facilitar y mejorar el desarrollo de todos los procesos en la vida cotidiana. Cada vez se generan más herramientas tecnológicas enfocadas a manejar todo digitalmente, de manera más rápida y eficiente, considerando la gestión de la información de manera digital y en la "nube" o en la "niebla" como parte fundamental de los procesos y como una nueva tendencia evolutiva. Dentro de los campos en los que se han realizado grandes avances tecnológicos se encuentra el campo computacional, ya que cada vez se generan más herramientas informáticas que permiten interactuar de manera rápida y sencilla con cualquier tipo de información.

Existen muchas áreas en las que se requiere gestionar de manera digital y óptima toda la información, y una de ellas que es de gran interés para esta investigación es la que tiene que ver con el mantenimiento. El mantenimiento es un servicio que se aplica a cualquier tipo de activo, necesario para el buen funcionamiento del mismo y para su preservación durante su vida útil. Dentro de los tipos de activos a los que se les puede realizar mantenimiento se encuentran los equipos, de los cuales uno de gran interés para esta investigación son los Motores Diésel (MD) en el área automotriz. Durante la aplicación del mantenimiento a MD, se genera mucha información que normalmente requiere ser almacenada y organizada para su posterior análisis. Para ello, las empresas que le realizan mantenimiento a estos motores requieren de diferentes herramientas en las que siempre destacan los Sistemas de Gestión Asistidos por Ordenador (GMAO), los cuales son diseñados específicamente para gestionar toda la información generada por el servicio de mantenimiento, a través de sistemas tecnológicos computarizados.

A pesar de que los MD han incrementado su presencia en el mercado, existen muy pocas herramientas computacionales que permitan gestionar de manera específica toda la información generada del mantenimiento de estos activos. Los GMAO que se consiguen en el mercado son muy genéricos y consideran muy poco la utilización del Mantenimiento Basado en Condición (MBC) y la utilización de los sistemas de Inteligencia Artificial como medida para la detección y diagnóstico de la condición de un motor. A pesar de que hoy en día se pueden encontrar diversas investigaciones que están relacionadas con la integración de un Sistema Experto de Diagnóstico a un GMAO tomando en cuenta el MBC o de un GMAO con a otras herramientas, ninguna de ellas ha sido desarrollada de forma específica para MD considerando técnicas MBC como vibraciones, termografía y ruido. Así, una de las investigaciones que destaca es la de Ballester y otros (2002), en la que proponen dentro de un GMAO el diagnóstico de averías de una flota de transporte a través de un Sistema Experto con datos obtenidos a partir de la aplicación de técnicas predictivas como análisis de aceite, vibraciones y termografía. De igual manera, Bangemann y otros (2006) desarrollan la plataforma integral PROTEUS de aplicación general, compuesta por un GMAO, que se utiliza clásicamente para planificar y controlar el mantenimiento, y un Sistema Experto de Diagnóstico, que da apoyo a la toma de decisiones de mantenimiento teniendo en cuenta valores medidos por sensores para diagnosticar el estado del equipo. También Levrat y lung (2007) desarrollan la plataforma TELMA de aplicación general, que entre sus sistemas contiene un GMAO, y una de sus funciones es el monitoreo y diagnóstico de dispositivos en tiempo real utilizando agentes inteligentes de servicio en línea para ayudar a la toma de decisiones en el mantenimiento. En el mismo sentido, Szanto y Nagy (2008) presentan el programa BDES que integra diferentes Sistemas Expertos dedicados a las técnicas MBC en máquinas rotativas de una refinería, los cuales son ExpertALERT para vibraciones, ThermoALERT para termografía, LeakageALERT para detección de fugas, OilALERT para aceite y FerroALERT para análisis ferrográfico, y los cuales poseen una interface que conecta con un GMAO a través de un módulo de diagnóstico. Así mismo, Simeón, Álvares y Ribeiro (2010) presentan el programa SIMPREBAL que posee un Sistema Experto de Diagnóstico y que utiliza MBC en una central hidroeléctrica, el cual incorpora el conocimiento en documentos de evaluación de equipos y el conocimiento de expertos en mantenimiento. Además, Bjorling y otros (2013) proponen integrar un GMAO con el Monitoreo de la Condición, en donde se considera el diagnóstico con un Sistema Experto que analiza las mediciones del sistema de Monitoreo de la Condición y con eso diagnostica los fallos en la máquina. De igual manera, en la investigación de López-Campos, Cannella y Bruccoleri (2014), se propone la combinación del GMAO, del MBC y del E-Mantenimiento, integrando los registros del GMAO con información obtenida de sensores en los equipos, de manera que se tenga un modelo de datos que permita el desarrollo del sistema. Así mismo, Liu, Feng y Si (2014) describen la aplicación del MBC a través de un Sistema Experto de Diagnóstico inteligente para una unidad generadora hidráulica, utilizando diferentes parámetros medidos por sensores, de manera que el Sistema Experto compara los parámetros y da su diagnóstico de la condición. Igualmente, McKee y otros (2014) realizan una revisión de todos los sistemas empleados para diagnosticar y pronosticar fallas en bombas centrífugas donde destacan los Sistemas Expertos, en especial uno que desarrolla una base de datos con síntomas y posibles causas que presenta el equipo, de manera que el usuario selecciona los síntomas y el Sistema Experto determina la causa. Además, Sisteplant (2014) presenta la plataforma PRISMA 3 GMAO de aplicación general, compuesta por varios módulos en los que destaca el de Gestión de Conocimiento, en donde se tiene un Sistema Experto de diagnóstico de averías con reglas de decisión. De igual forma, Invensys System (2015) desarrolla el programa Avantis Condition Manager, el cual es un programa inteligente de

 ISBN 978-607-8242-11-5

aplicación general para la gestión de la condición de los activos, que se encarga de recolectar y analizar en tiempo real el diagnóstico de todos los activos del plan de producción. Este programa integra diferentes técnicas como el MBC, un Sistema Experto Multi-Variable basado en reglas, la Gestión de Activos Empresariales o Enterprise Asset Management (EAM)/GMAO, la Planificación de Recursos Empresariales o Enterprise Resource Planning (ERP) y Sistemas de Inteligencia Empresarial. Más recientemente, Villa y otros (2015) proponen un Sistema Experto SCADA para un teleférico de transporte masivo, en donde se utilizan sensores para medir información en tiempo real que alimenta al Sistema Experto de lógica difusa, el cual viene combinado con técnicas MBC para facilitar la operatividad, el mantenimiento y la seguridad del teleférico. Adicionalmente, Galar y otros (2015) proponen un sistema de decisión de mantenimiento basado en un modelo hibrido, en el cual utilizan un modelo impulsado por datos para encontrar y confirmar un modelo basado en el deterioro físico de un activo tomando en cuenta datos históricos de mediciones del Monitoreo de la Condición y las ordenes de trabajo extraídas de un GMAO que gestiona el mantenimiento de estos activos, en donde las condiciones de funcionamiento están relacionadas con la acumulación de la degradación en un sistema con consideración de los aspectos impulsados por el contexto.

Ikuobase y otros (2016), proponen una metodología que integra herramientas de toma de decisiones multi-criterio (MCDM), para determinar los intervalos óptimos de inspección en maquinaria naval. La información que alimenta al sistema MCDM es tomada de un GMAO, en combinación con un sistema experto. Guillén y otros (2016), plantean un sistema MBC genérico, en el cual un sistema experto identifica los factores que influyen negativamente en la confiabilidad, para el seguimiento de la fiabilidad se utilizan el número de intervenciones realizadas en el equipo; datos que son obtenidos de un GMAO identificando de esta manera los modos de fallo más significativos. Chemweno y otros (2016), proponen un Sistema experto para realizar un análisis causa raíz de los fallos más frecuentes en equipos críticos, aportando en la toma de decisiones de mantenimiento en aspectos como la planificación de tareas o la asignación de recursos, la metodología toma como referencia el historial de fallos del equipo que se obtienen de un GMAO. Nazeri y Naderikia (2017), trabajan en la creación de un sistema difuso (DEMATEL), combinado con un proceso de jerarquización ANP para el análisis de los diferentes modos de falla y posterior selección de la estrategia de mantenimiento. Para la obtención de los modos de falla utilizan el criterio de expertos y manejo de historial de fallos contenido en un GMAO.

Considerando esto, se desarrolla un programa computacional automatizado que permita gestionar toda la información que se genera del servicio de mantenimiento a MD dentro de un taller automotriz, como lo son: la gestión de todos los sistemas que lo conforman, la gestión de inventarios, la gestión de personal, la gestión del mantenimiento, la gestión con módulos embebidos para la detección y diagnóstico de la condición del activo utilizando MBC y Sistemas Expertos, la gestión de reportes de mantenimiento, la gestión de costos, la gestión de la tercerización y por último una propuesta sin desarrollo fuera de los objetivos de este trabajo, pero que podría ser considerada que es la gestión de la predicción de vida útil del activo y ocurrencia de falla. El GMAO desarrollado ha sido verificado para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0 utilizando datos del Taller Automotriz CIMA, junto con información específica de los expertos de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Ecuador.

SISTEMAS PROPUESTOS PARA EL DESARROLLO DEL GMAO

En el GMAO para MD, en conjunto con el Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai CRDi 2.0 y las técnicas del MBC, se consideran diferentes estructuras, algoritmos, bases de datos y herramientas informáticas que permitan organizar y gestionar la gran cantidad de información que se obtiene de todo lo relacionado al mantenimiento de los MD. Para esto se desarrollan los sistemas utilizando un esquema que toma como base toda la información extraída de las revisiones bibliográficas desarrolladas, y que tienen que ver con la estructura generada del GMAO para MD y sus módulos embebidos: MBC y Sistema Experto.

El proceso de recolección de la información técnica, teórica y de campo necesaria, que tiene que ver con el Taller de Carrera Ingeniería Mecánica Automotriz (CIMA) de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) de la Ciudad de Cuenca, Ecuador, se realiza a través de entrevistas y cuestionarios aplicados al personal que labora en el mismo, de donde se extrae información de la gestión del mantenimiento de los MD. Aunado a esto, también se realiza una recopilación de toda la información que se necesita extraer de dos expertos en el tema de los MD, en especial los MD Hyundai CRDi 2.0, para el desarrollo del Sistema Experto de Diagnóstico de manera análoga a la anterior. Basándose en toda la información recolectada, se desarrollan las estructuras internas y el contenido que tendrán las bases de datos tanto del GMAO como del Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai CRDi 2.0.

Considerando todo lo anterior, se propone para el Sistema GMAO para MD desarrollado una estructura compuesta por diez módulos, los cuales se describen a continuación, siguiendo el esquema de la Fig. 1.

 ISBN 978-607-8242-11-5



Fig. 1: Módulos del GMAO para Motores Diésel.

El Módulo de Gestión de Activos Físicos se utiliza para definir toda la información importante que tiene que ver en este caso con los MD, sus sistemas y sus componentes, los equipos del taller en donde se realice el mantenimiento de los motores y las herramientas, repuestos, materiales de mantenimiento y consumibles que normalmente se utilicen para realizar las actividades de mantenimiento. Este módulo está dividido en nueve submódulos que son: Motores Diésel, Sistemas del Motor Diésel, Componentes de los Sistemas del Motor Diésel, Equipos del Taller Automotriz CIMA, Historial de Fallas de Sistemas, Componentes y/o Equipos, Herramientas, Repuestos, Materiales de Mantenimiento y Consumibles.

El Módulo de Gestión de Inventarios permite mantener y controlar los registros de los repuestos, las herramientas, los consumibles y los materiales de mantenimiento que haya dentro del almacén del Taller Automotriz CIMA, y que estén disponibles para las diferentes actividades de mantenimiento que se van a realizar. Este módulo permite controlar la entrada y salida de los recursos de mantenimiento a través de diez submódulos, los cuales son: Inventario de Herramientas, Inventario de Repuestos, Inventario de Materiales de Mantenimiento, Inventario de Consumibles, Solicitud de Consumo, Devolución de Materiales No Utilizados, Históricos de Consumo, Solicitud de Compra, Adquisición de Material y Empresas Distribuidoras.

Otro módulo de gran importancia es el Módulo de Gestión de Personal, el cual se utiliza para recopilar toda la información referente al personal de mantenimiento, como por ejemplo los datos personales, los datos laborales y las actividades que realice cada trabajador. Este módulo se divide en cuatro submódulos, los cuales son: Datos Personales, Datos Académicos, Datos Laborales y Registros de Intervenciones.

Uno de los módulos centrales del GMAO es el Módulo de Gestión de Mantenimiento, ya que es el que se encarga de todo lo que se refiere a la orden de trabajo, a la planificación y programación de las actividades de mantenimiento y al registro de las mismas, por lo que se considera el módulo central que se relaciona con prácticamente todos los módulos del GMAO. Este módulo viene estructurado por siete submódulos, los cuales son: Órdenes de Trabajo, Estatus de Órdenes de Trabajo, Mantenimiento Rutinario, Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Predictivo, Mantenimiento Correctivo y Registro del Mantenimiento Realizado.

El Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico es el más innovador de este GMAO y tiene una combinación de dos técnicas comúnmente aplicadas para el diagnóstico de la condición de un activo, que son el MBC y el Sistema Experto. En este módulo se integran valores obtenidos aplicando el MBC a los MD con valores límites establecidos por expertos en los Sistemas Expertos de Diagnóstico para MD, de manera que se puede realizar una detección y un diagnóstico del estado de los mismos, lo que permite tomar decisiones en cuanto a las actividades de mantenimiento a realizar de acuerdo a los niveles de alerta emitidos por el Sistema Experto. Este módulo viene estructurado por seis submódulos que son: Sistemas Expertos de Diagnóstico, Niveles de Alerta del Sistema Experto de Diagnóstico, Análisis de Vibraciones, Análisis de Ruido, Análisis de Temperatura y Análisis de Aceite. El submódulo Sistemas Expertos de Diagnóstico contiene el nombre del Sistema Experto, las especificaciones del motor al que pertenece, el tipo de Sistema Experto y el link de acceso. En cuanto al tipo de Sistema Experto, el mismo puede ser Estático (Offline), que está compuesto por

ISBN 978-607-8242-11-5

información recopilada de expertos dentro de una base de datos, y Dinámico (Online), con expertos disponibles en vivo dentro de un portal web para ayudar al diagnóstico. Por otro lado, el submódulo Niveles de Alerta del Sistema Experto de Diagnóstico es muy importante ya que es el que lleva los registros de los niveles de alerta emitidos por el Sistema Experto de Diagnóstico cada vez que se ingresan valores del MBC dentro del mismo y éste da un diagnóstico de la condición del MD. Este submódulo está compuesto por el nivel de alerta, su código y descripción, el número de orden de trabajo que se genera automáticamente por el Sistema Experto debido a la alerta, el activo involucrado, la información sobre el análisis realizado y las respectivas recomendaciones. El resto de los submódulos del Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico, es decir los submódulos Análisis de Vibraciones, Análisis de Ruido, Análisis de Temperatura y Análisis de Aceite son los referidos al MBC, los cuales sirven para registrar toda la información generada por cada análisis que se aplicada de acuerdo a la programación del mantenimiento predictivo. Estos submódulos en general vienen estructurados con: códigos de los análisis, tipo de análisis, número de la orden de trabajo que pidió la realización del análisis, activo involucrado, fecha de realización e información referente a cada análisis realizado. Estos submódulos son llenados por el usuario cuando se realicen los análisis MBC a los MD.

El Módulo de Gestión de Predicción es el que se encarga de registrar y generar toda la información referente a los pronósticos de ocurrencia de falla y por lo tanto a la estimación de la vida útil de un activo. Este módulo está compuesto por dos submódulos, los cuales son: Predicción de Ocurrencia de Falla y Estimación de Vida Útil Remanente.

El Módulo de Gestión de Reportes, tiene como objetivo gestionar todos los reportes obtenidos de la gestión de mantenimiento, es decir, es el módulo en donde se encuentran todos los reportes de mantenimiento extraídos del Módulo de Gestión de Activos Físicos, del Módulo de Gestión de Inventarios, del Módulo de Gestión de Personal, del Módulo de Gestión de Mantenimiento, del Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico, del Módulo de Gestión de Tercerización y del Módulo de Gestión de Costos. Los reportes que se generan en este módulo normalmente son mensuales y anuales. Este módulo está compuesto por un total de 17 submódulos, los cuales son: Reportes de Órdenes de Trabajo en Proceso, Reportes de Órdenes de Trabajo Postergadas, Reportes de Órdenes de Trabajo Rechazadas, Reportes de Órdenes de Trabajo Procesadas, Reportes de Estatus de Órdenes de Trabajo, Reportes de Mantenimiento Rutinario, Reportes de Mantenimiento Preventivo, Reportes de Mantenimiento Predictivo, Reportes de Mantenimiento Correctivo, Reportes de Historial de Fallas, Reportes de Personal, Reportes de Consumo de Repuestos/Consumibles/Materiales de Mantenimiento, Reportes de Tercerización, Reportes de Detección y Diagnóstico, Reportes de Predicción, Reportes de Costos de Mantenimiento y Reportes de Gestión.

El Módulo de Gestión de Costos, es el que se encarga de recopilar y gestionar toda la información referente a los costos generados por el mantenimiento, todo esto con el objetivo de realizar un análisis económico de lo que implique el mantenimiento. Al igual que con el Módulo de Gestión de Reportes, en este módulo la información de los costos es extraída del resto de los módulos del GMAO, como son el Módulo de Gestión de Inventarios, el Módulo de Gestión de Personal, el Módulo de Gestión de Mantenimiento, el Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico y el Módulo de Tercerización. Este módulo está compuesto por siete submódulos, los cuales son: Costos de Mantenimiento Rutinario, Costos de Mantenimiento Preventivo, Costos de Mantenimiento Predictivo, Costos de Mantenimiento Correctivo, Costos de Tercerización, Costos de Análisis MBC y Costos de Adquisición.

Por otro lado, el Módulo de Tercerización es el que se encarga de registrar toda la información referente al mantenimiento tercerizado y a las empresas contratadas. Este módulo está dividido en tres submódulos, los cuales son: Registros de Mantenimiento Tercerizado, Empresas de Servicios Permanentes y Empresas de Servicios Eventuales.

Por último, el Módulo de Ayuda permite gestionar los nombres de usuario y contraseñas, consultar el manual de usuario del GMAO y de los Sistemas Expertos de Diagnóstico, consultar los procedimientos de mantenimiento y consultar las diferentes normas relacionadas con el mantenimiento, la seguridad del personal y la organización. Este módulo está dividido en cuatro submódulos, los cuales son: Usuarios, Manual de Usuario, Procedimientos de Mantenimiento y Normas. Los submódulos Manual de Usuario, Procedimientos de Mantenimiento y Normas contienen archivos PDF los cuales pueden ser consultados e impresos. En el caso del submódulo Usuarios, aparte de definir los nombres de usuario y contraseña, se definen también los diferentes accesos que pueden llegar a tener los diferentes trabajadores de mantenimiento.

Adicionalmente, el GMAO para MD que se desarrolla en esta investigación viene integrado con Sistemas Expertos de Diagnóstico, para los diferentes motores a los que se les hace mantenimiento, y que se almacenan en el Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico. Uno de los Sistemas Expertos que integran este GMAO y que se presenta en esta investigación es el Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0. La estructura del Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0

 ISBN 978-607-8242-11-5

se plantea considerando la información extraída anteriormente de los dos expertos y la información que se puede llegar a ingresar de los análisis realizados en el motor, que tienen que ver con la aplicación de las técnicas MBC para realizar el respectivo diagnóstico. Estas informaciones se organizan internamente considerando tres componentes estructurales principales que todo Sistema Experto posee, que son: Base de Conocimiento, Base de Hechos y Motor de Inferencia. En la Fig. 2 se pueden observar tanto los componentes principales como los demás componentes que conforman internamente la estructura del Sistema Experto de Diagnóstico. También se pueden observar componentes que permiten interactuar con la información, como: la Interfaz del Usuario, el Usuario, el Ingeniero del Conocimiento y las Interfaces Externas. La Interfaz del Usuario es un portal web que se propone desarrollar en Microsoft Access. Por otro lado, el Usuario es el personal de mantenimiento del Taller Automotriz CIMA. El Ingeniero del Conocimiento es la persona encargada de manipular las bases de datos internas del sistema que en este caso es el investigador. Y por último las Interfaces Externas se refiere en este caso al propio sistema GMAO para MD.

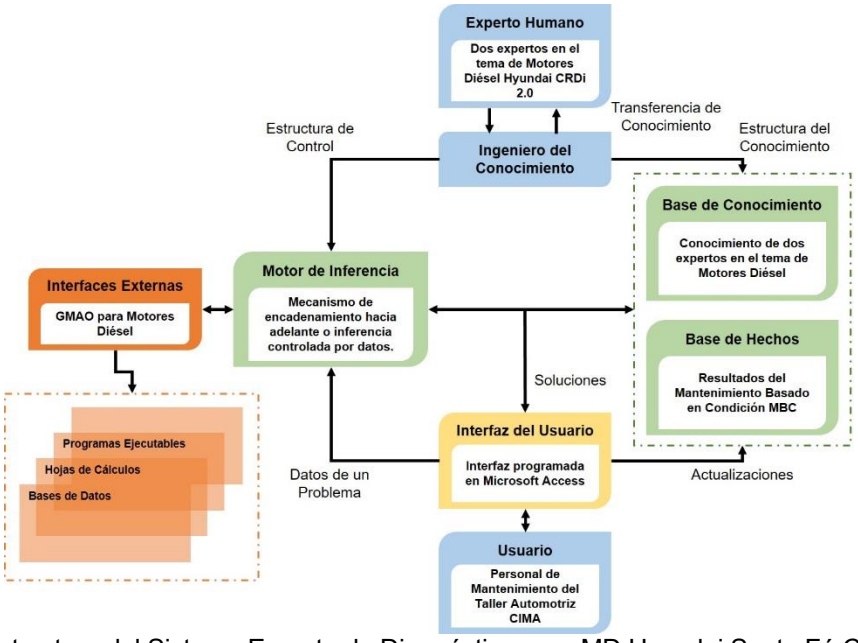


Fig. 2: Estructura del Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0.

El Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0 es considerado como un sistema que combina un contenido funcional, conformado por la información de las fallas extraída de los dos expertos y que es propiamente el Sistema Experto, con un contenido estructural, que corresponde con la información del motor extraída del manual del mismo pero validada por los expertos y que compone un Sistema Basado en Conocimiento. Esto quiere decir que el mismo viene estructurado con información necesaria para diagnosticar la falla, las causas y las acciones de mantenimiento, y con información de las especificaciones y estructuras del motor. Considerando esto, para el Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0 se propone una arquitectura compuesta por cuatro secciones principales como se muestra en la Fig.3, las cuales son: Motor Diésel, Estructura del Motor Diésel, Detección de Condición y Diagnóstico de Fallas.

En la primera sección conocida como Motor Diésel se encuentra una única subsección conocida como Especificaciones Técnicas del Motor Diésel, la cual es parte del Sistema Basado en Conocimiento, ya que la información almacenada en ella es extraída del manual del fabricante del motor y validada por los expertos. Parte de esta información es del Manual de Taller del Motor Diésel D4EA (Hyundai, 2000), del cual se extraen las especificaciones y la mayoría de las imágenes explicativas de la estructura del motor. En esta subsección se describe toda la información técnica del motor referente al: tipo de motor, ciclo de trabajo, número de cilindros, disposición de los cilindros, número de válvulas, carrera, cilindrada, relación de compresión, torque por rpm, potencia máxima y consumo de combustible. A continuación, en la segunda sección Estructura del Motor Diésel se presentan diez subsecciones que corresponden a cada uno de los sistemas del MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0, que son: Órganos Principales del Motor, Sistema de Distribución, Sistema de Refrigeración, Sistema de Lubricación, Sistema de Admisión, Sistema de Sobrealimentación, Sistema de Escape, Sistema de Inyección de Combustible, Sistema de Arranque y Sistema de Carga. En cada una de estas subsecciones se describen las especificaciones del sistema y de sus componentes, y se muestran sus diferentes diagramas, lo que forma parte del Sistema Basado en Conocimiento.

ISBN 978-607-8242-11-5

Por otro lado, la sección Detección de Condición es la parte del Sistema Experto en donde se puede ingresar los datos que resulten de los análisis MBC que se realicen al MD para detectar la condición del mismo, comparando valores normales de operación con valores de condición de falla y obteniendo niveles de alerta. Esto quiere decir que esta sección está compuesta por dos subsecciones que son: Valores Normales de Funcionamiento y de Condición de Falla y Nivel de Alerta.

La subsección Valores Normales de Funcionamiento y de Condición de Falla es la que almacena todos los valores de operación normal y de falla de los sistemas y componentes del motor, los cuales son presentados por los expertos y tienen que ver con variables estadísticas de vibración, ruido, temperatura y aceite. En el caso de vibraciones y ruido, los valores de condición de operación normal y de fallas del MD se obtienen a través de datos estadísticos que caracterizan las señales a diferentes regímenes de giro (820 rpm, 1660 rpm y 2500 rpm), y que tienen que ver con: media, varianza, desviación estándar, mediana, máximo, mínimo, potencia, energía, factor de curtosis, asimetría, valor RMS, factor de cresta y potencia en el intervalo de frecuencia. En el caso de la temperatura, los valores de condición normal de funcionamiento y de fallas del motor se obtienen a través de firmas térmicas trazadas en gráficas a diferentes regímenes de giro (820 rpm, 1660 rpm y 2500 rpm).

Por otro lado, en el caso del aceite, los valores de condición normal de operación y de fallas se obtienen tomando en cuenta el estudio de parámetros de: viscosidad, número básico total (TBN), detergencia, punto de inflamación, agua, dilución por combustible, materia carbonosa y partículas por millón de silicio, cromo, aluminio, cobre, hierro, níquel, plomo y estaño. Todos estos son los diferentes valores con los que se comparan los datos obtenidos por técnicas MBC para diagnosticar la condición del motor. La subsección Nivel de Alerta es análoga a la anterior, solo que en esta se almacena toda la información proporcionada por los expertos referente a los niveles de alerta que puede generar el diagnóstico de la condición al comparar los valores de las variables de vibración, ruido, aceite y temperatura medidos por el MBC con los valores tabulados del Sistema Experto. De acuerdo al resultado de la comparación entre los valores tabulados y los valores del MBC, se genera un nivel de alerta en el Sistema Experto, el cual se encuentra entre 1 y 4, donde 1 significa que existe una falla en el motor y 4 que el motor se encuentra operando de manera normal.

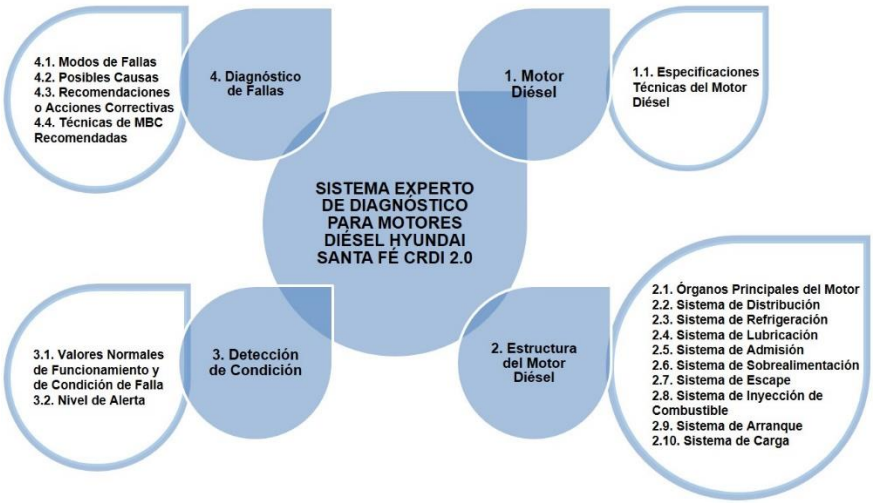


Fig. 3: Secciones del Sistema Experto de Diagnóstico.

Por último, se tendrá la sección Diagnóstico de Fallas, la cual está constituida por cuatro subsecciones que son: Modos de Fallas, Posibles Causas, Recomendaciones o Acciones Correctivas y Técnicas de MBC Recomendadas. En el caso de la subsección Modos de Fallas, se encuentran almacenadas todas las fallas proporcionadas por los dos expertos que pueden llegar a presentar los MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0 en cada uno de sus sistemas. Cada falla que se describe en esta sección tiene relación con las variables de las técnicas de MBC mencionadas. Luego se tiene la subsección de Posibles Causas, en donde se presentan las diferentes causas relacionadas con cada falla que se produce en el motor, las cuales son extraídas del conocimiento de los expertos en el tema. Para cada causa presentada dentro del Sistema Experto se tiene una serie de acciones de mantenimiento recomendadas por los expertos dentro de la subsección Recomendaciones o Acciones Correctivas. Además, para cada causa también se tienen recomendaciones en cuanto a las técnicas de MBC que se deberían utilizar para detectar la causa de la falla. Dichas recomendaciones van dentro de la subsección Técnicas de MBC Recomendadas, en donde se describe cuáles de los análisis MBC (Análisis de Vibraciones, Aceite, Ruido y Temperatura) se deberían realizar para obtener datos óptimos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Luego de tener claro las diferentes estructuras internas y la arquitectura que tiene tanto el GMAO para MD como el Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0, se puede proceder a generar las bases de datos y a crear ambos programas utilizando ciertas herramientas informáticas. Para el desarrollo completo de ambos programas se utiliza el programa Microsoft Access, el cual es un sistema de gestión de bases de datos que viene incluido en el paquete de Microsoft Office. Esta herramienta computacional permite la creación de tablas, consultas, formularios y reportes para una base de datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando las estructuras planteadas, se desarrolla tanto la base de datos como la interfaz del GMAO para MD en Microsoft Access, tomando en cuenta que el mismo está dividido en diez módulos principales con sus respectivos submódulos. Cada submódulo está compuesto por información estructurada en tablas, tablas que se encuentran relacionadas unas con otras para alimentar el buen funcionamiento del sistema de gestión.

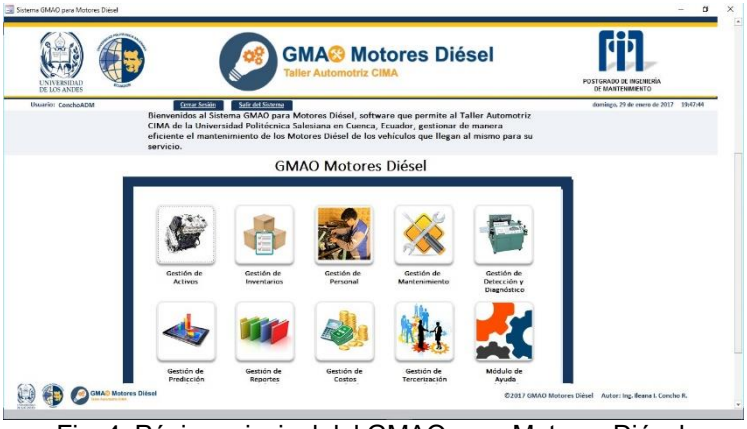


Fig. 4: Página principal del GMAO para Motores Diésel.



Fig. 5: Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico.

El programa GMAO para MD desarrollado se encuentra conectado a diferentes sistemas inteligentes a través del Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico, en el cual a través de links de acceso se puede ingresar a los mismos y consultarlos. Dentro de este módulo se puede encontrar al Sistema Experto de Diagnóstico para Motores Diésel Hyundai Santa Fé CRDi 2.0, el cual se desarrolla en esta investigación utilizando Microsoft Access 2016 tanto para la base de datos como para la interfaz de mismo. Como se indicó anteriormente, este sistema inteligente posee cuatro secciones principales que son Motor Diésel, Estructura del Motor Diésel, Detección de Condición y Diagnóstico de Fallas. Para ingresar a cada una de estas secciones, el sistema consta de una página principal en la cual se describe brevemente el propósito y el contenido del mismo (ver Fig. 6).

Luego de haber desarrollado ambos programas se procede a realizar diferentes comprobaciones para verificar el funcionamiento de ambos sistemas en conjunto y reducir lo máximo posible la presencia de errores de programación y operación. Se realiza una prueba de caja blanca (Palacios y Moreno, 2011), la cual se centra en los detalles procedimentales de cada programa, por lo que su diseño está fuertemente entrelazado con el código fuente. Por lo tanto, se escogieron distintos valores de entrada para cada uno de los módulos y submódulos del GMAO para MD, y para las secciones Detección de Condición y Diagnóstico de Fallas en el caso del Sistema Experto de Diagnóstico para MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0. Con estos valores se examinaron cada uno de los posibles flujos de ejecución de los programas, cerciorándose de que se devuelven los valores de salida adecuados. Como resultado de estas pruebas, se encontraron pequeños errores en algunos procesos, los cuales

ISBN 978-607-8242-11-5

fueron corregidos para que las funciones de ambos sistemas se realicen con normalidad y el funcionamiento de los mismos sea óptimo y cumpla con los requerimientos para los cuales fueron desarrollados.

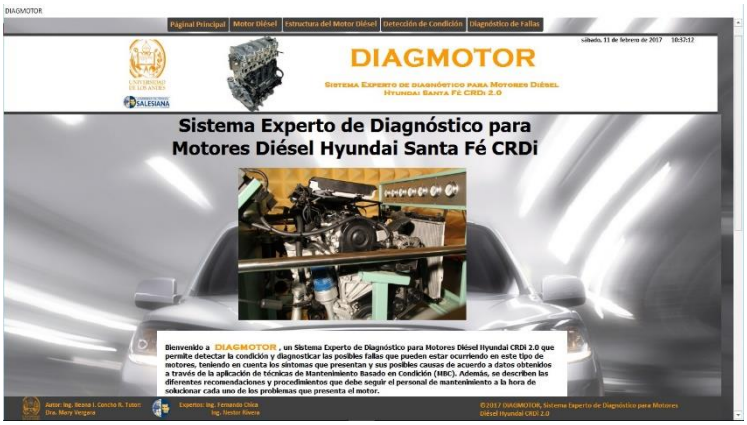


Fig. 6: Página principal del Sistema Experto de Diagnóstico para Motores Diésel Hyundai Santa Fé CRDi 2.0.

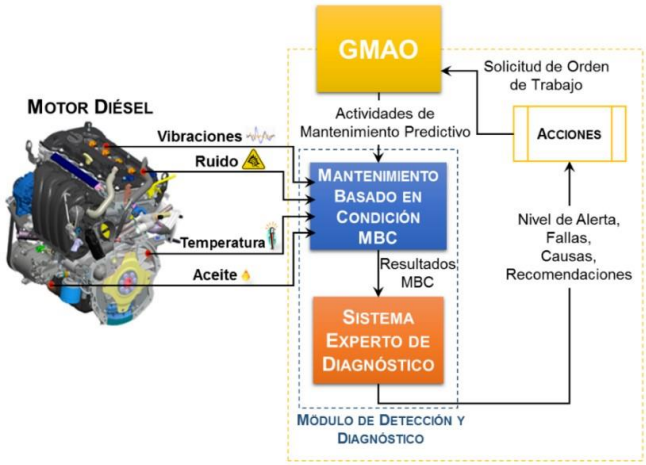


Fig. 8: Diagrama de interacción del Sistema Experto de Diagnóstico con las técnicas MBC y el GMAO de Motores Diésel.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa automatizado para la gestión del mantenimiento de los MD en el área automotriz, generando estructuras novedosas e innovadoras compuestas por módulos embebidos que integran técnicas del MBC, relacionadas con los Análisis de Vibración, los Análisis de Ruido, los Análisis de Temperatura y los Análisis de Aceite aplicados al motor, y Sistemas Expertos para la detección y diagnóstico de fallas en MD.

Se establecieron los esquemas y componentes necesarios para el desarrollo de los sistemas embebidos, logrando una estructura completa para el GMAO para MD compuesta por diez módulos, de los cuales el más innovador fue el Módulo de Gestión de Detección y Diagnóstico que integra el MBC y Sistemas Expertos de Diagnóstico, dentro de los cuales se incluye como ejemplo al Sistema Experto desarrollado en esta investigación para el MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0.

Finalmente, se verificó el funcionamiento de ambos sistemas computarizados desarrollados utilizando información de un MD Hyundai Santa Fé CRDi 2.0, dando como resultado dos sistemas, uno embebido dentro del otro, completos y altamente funcionales que permiten gestionar toda la información esencial para el mantenimiento y para el diagnóstico de la condición del motor a través de técnicas MBC, los cuales al estar integrados hace que el programa computarizado desarrollado sea innovador y de gran utilidad para la industria automotriz que abarca el mantenimiento de los MD.

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCIAS

- Ballester, S., P. Olmeda, V. Macián y B. Tormos, *El Mantenimiento de las Flotas de Transporte,* Revista Técnica Industrial, La Industria del Turismo, 247, 42-47 (2002).
- Bangemann, T. y otros 7 autores, *PROTEUS – Creating Distributed Maintenance Systems through an Integration Platform*, doi:10.1016/j.compind.2006.02.018, Computers in Industry, Elsevier: 57(6), 539-551 (2006).
- Bjorling, S., D. Baglee, D. Galar, y S. Singh, *Maintenance Knowledge Management with Fusion of CMMS and CM*, DMIN 2013 International Conference on Data Mining, Nevada, USA, 22 a 25 de Julio (2013).
- Galar, D., A. Thaduri, M. Catelani y L. Ciani, *Context Awareness for Maintenance Decision Making: A Diagnosis and Prognosis Approach*, doi:10.1016/j.measurement.2015.01.015, Measurement, Elsevier, 67, 137-150 (2015).
- Anis Ben Said, Muhammad Kashif Shahzad, Eric Zamai. *Experts' knowledge renewal and maintenance actions effectiveness in high-mix low-volume industries, using Bayesian*. En Cognition, Technology & Work. London: Springer, págs. 193-213 (2015).
- Antonio J. Guillén, A. *C. A framework for effective management of condition based maintenance programs in the context of industrial development of E-Maintenance strategies*. En Computers in Industry 82. Sevilla: Elsevier. 170–185 (2016).
- Peter Chemweno, L. P. *i-RCAM: Intelligent expert system for root cause analysis in maintenance decision making*. Heverlee – Leuven, Belgium: IEEE. (2016).
- Ali Nazeri, R. N. *A new fuzzy approach to identify the critical risk factors in maintenance management*. 2017: Springer. (2017).
- Ikuobase Emovon, R. *A. An integration of multi-criteria decision making techniques with adelay time model for determination of inspection intervals for marine machinery systems*. En Applied Ocean Research. Newcastle: Elsevier. 65-82 (2016).
- Hyundai, *Diesel Engine D4EA. Bosch Common Rail.* Shop Manual Supplement., Korea (2000).
- ICCT, *European Vehicle Market Statistics. Pocketbook 2016/2017.* The International Councel on Clean Transportation, (2017).
- Invensys Systems Inc [en línea], *Avantis Condition Manager (2014),* http://software.schneider-electric.com/pdf/datasheet/avantis-condition-manager/, Acceso: 17 de Octubre (2015).
- Levrat, E. y B. Iung, *TELMA: A Full E-Maintenance Platform*, Proc. Second World Congress on Engineering Asset Management, Nancy Université, Faculté des Sciences, Vandoeuvre, France, (2007).
- Liu, X., F. Feng y A. Si, *Condition Based Monitoring, Diagnosis and Maintenance On Operating Equipments of a Hydraulic Generator Unit*, doi:10.1088/1755-1315/15/4/042014, IOP Publishing, 24th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 15(4), 1755-1315 (2014).
- López-Campos, M., S. Cannella, M. Bruccoleri, *E-Maintenance Platform: A Business Process Modelling Approach*, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532014000100004, ISSN 0012-7353, Revista Dyna, Universidad Nacional de Colombia Medellin, 81, 31-39 (2014).
- McKee, K., G. Forbes, I. Mazhar, R. Entwistle y I. Howard, *A Review of Machinery Diagnostics and Prognostics Implemented on a Centrifugal Pump*, in Engineering Asset Management 2011, 1era edición, Editorial London: Springer, pp. 593-614, London, England (2014).
- Palacios, G. y Moreno, J, *Software para el Sistema de Gestión del Taller y Mantenimiento Programado del Parque Automotor de Petroproducción Filial Lago Agrio*. Tesis de Grado. Escuela de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador, (2011).
- Simeón, E., A. Álvares y R. Ribeiro, *An Expert System for Fault Diagnostics in Condition Based Maintenance*, ABCM Symposium Series in Mechatronics, 4, 304-313 (2010).
- Sisteplant [en línea], *Smart Maintenance: PRISMA GMAO (2014)*, http://www.sisteplant.com/es/soluciones/innovative-technologies/smart-maintenance-prisma-cmms/. Acceso: 13 de Julio (2015).
- Szanto, J. y I. Nagy, *Integration of Fault Diagnostic Technologies Into A Complex Condition Monitoring System and Its Practical Results*, 4th World Congress on Maintenance, Haikou, China 24 a 26 de Noviembre (2008).
- Villa, L., O. Quintero, L. Castañeda y G. Mejíac, *Fuzzy Inference System for Modelling Failure Modes in a Ropeway for Massive Transportation*, 2015 International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering (AIIE 2015), 113-116, Phuket, Thailand, 26 al 27 de Julio (2015).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Estimación de Esperanzas en Experimentos por Simulación Estocástica de Dos Niveles

David Fernando Muñoz
Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones, Instituto Tecnológico Autónomo de México, Río Hondo #1, 01080 Ciudad de México, México
Email: davidm@itam.mx

Resumen

Las metodologías actualmente propuestas para el análisis de experimentos por simulación con incertidumbre paramétrica son llamadas métodos de simulación anidados en dos niveles (exterior e interior). En el nivel exterior se generan (n) observaciones de los parámetros, y en el nivel interior se generan (m) observaciones usando el modelo de simulación con el valor del parámetro fijado en el nivel exterior. En este artículo nos enfocamos en el análisis de la salida de los experimentos por simulación estocástica de dos niveles, para el caso particular en que las observaciones del nivel interior son independientes, mostrando cómo la varianza de las observaciones simuladas se descompone en varianza paramétrica y varianza estocástica. Posteriormente, derivamos teoremas de límite central que nos permiten calcular intervalos de confianza asintóticos para medir la precisión de los estimadores por simulación, tanto del pronóstico puntual como de los componentes de varianza. La validez de nuestros resultados teóricos se confirma a través de experimentos con un modelo de pronóstico para demandas esporádicas, para el cual se han obtenido expresiones analíticas para el pronóstico puntual y los componentes de varianza.

Palabras clave: pronósticos bayesianos, simulación estocástica, incertidumbre paramétrica, simulación de dos niveles

Estimation of Expectations in Two-Level Stochastic Simulation Experiments

Abstract

Proposed methodologies for the analysis of simulation experiments under parameter uncertainty are called two-level (outer and inner) nested simulation methods. On the outer level we generate (n) observations for the parameters and, on the inner level we generate (m) observations using the simulation model with the parameter value fixed on its corresponding value generated in the outer level. In this paper, we focus on the output analysis of two-level stochastic simulation experiments for the case where the observations in the inner level are independent, showing how the variance of the simulated observations can be decomposed in parametric and stochastic components. Furthermore, we derive central limit theorems that allow us to compute asymptotic confidence intervals to assess the accuracy of the simulation-based estimators for the point forecast and the variance components. Validity of our results are confirmed through experiments using a forecasting model for sporadic demand, where we have obtained analytical expressions for the point forecast and the variance components.

Keywords: Bayesian forecasting, stochastic simulation, parameter uncertainty, two-level simulation

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

La simulación está ampliamente reconocida como una técnica efectiva para construir pronósticos, evaluar riesgos, animar e ilustrar la evolución de un sistema en muchas áreas (ver, e.g., Kelton et al., 2012). Cuando existe incertidumbre en el comportamiento de algunos de los componentes del modelo de simulación, estos componentes aleatorios deben modelarse utilizando distribuciones de probabilidad y/o procesos estocásticos que son generados durante la simulación, que ahora recibe el nombre de simulación estocástica.

El método más utilizado para estimar un parámetro de desempeño de estado transitorio y, en particular, una esperanza, en una simulación estocástica, consiste en repetir el experimento por simulación *n* veces y, a partir de la salida de los experimentos, se calcula el estimador θ_n para el parámetro de interés θ, el cual debe ser consistente, es decir, debe cumplir que $\theta_n \Rightarrow \theta$, cuando $n \to \infty$ (donde "$\Rightarrow$" denota convergencia débil de variables aleatorias). La consistencia de un estimador asegura que el estimador se acercará al parámetro a medida que crece el número de repeticiones *n*, aunque la magnitud de *n* que asegura un grado de precisión deseado en la estimación, depende del problema, y típicamente se mide a través de un intervalo asintótico de confianza (IAC) para el parámetro, siendo que la forma precisa del IAC típicamente se obtiene a partir de un Teorema de Límite Central (TLC) para el estimador θ_n (para un mayor detalle, ver, por ejemplo, el capítulo III de Asmussen y Glynn, 2007).

Para $i = 1$ a n:

Generar (independientemente) un valor θ_i de $p(\theta \mid x)$.

Para $j = 1$ a m:

Correr una simulación con $\Theta = \theta_i$ para obtener una observación independiente W_{ij} de $W = g(Y(s), 0 \le s \le T; \Theta)$

Fin Loop

Fin Loop

Calcular $\hat{\alpha}_i = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} W_{ij}, i = 1, \ldots, m, \hat{\alpha}(n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \hat{\alpha}_i.$

Fig. 1. Algoritmo anidado en dos niveles para estimar el pronóstico puntual por medio de simulación estocástica bajo incertidumbre paramétrica.

A diferencia de los parámetros de desempeño, los parámetros de entrada de un experimento por simulación se estiman a partir de datos reales disponibles (*x*) y, aunque en la mayoría de las aplicaciones reportadas en la literatura, se asume que no existe incertidumbre en el valor de estos parámetros, ésta puede ser significativa cuando la información disponible es escasa, en cuyo caso la Estadística Bayesiana permite incorporar esta incertidumbre en el análisis de la salida de los experimentos por simulación, por medio de la distribución posterior $p(\theta|x)$. Las metodologías actualmente propuestas para el análisis de experimentos por simulación con incertidumbre paramétrica son llamados métodos de simulación anidados en dos niveles (del inglés "nested, two-level"), y se han propuesto métodos para la estimación del pronóstico puntual (la esperanza de la variable de desempeño), ver por ejemplo, L'Ecuyer (2009), Andradóttir y Glynn (2016). En el primer nivel se generan (*n*) observaciones de los parámetros a partir de la distribución posterior $p(\theta|x)$, y en el segundo nivel se generan (*m*) observaciones usando el modelo de simulación con el valor del parámetro fijado en el primer nivel (ver la Fig. 1). En esta investigación nos enfocamos en el análisis de la

ISBN 978-607-8242-11-5

salida de los experimentos por simulación estocástica de dos niveles, para el caso particular en que las observaciones del segundo nivel son independientes, mostrando cómo la varianza de las observaciones simuladas se descompone en varianza paramétrica y varianza estocástica. Posteriormente, derivamos un TLC tanto para el estimador del pronóstico puntual como para cada uno de los estimadores de los componentes de varianza, lo que nos permite calcular un IAC para cada estimador. La validez de nuestros resultados teóricos se confirma a través de experimentos con el modelo de pronóstico para demandas esporádicas reportado en Muñoz y Muñoz (2009).

Luego de esta Introducción, en la siguiente sección se presenta la metodología propuesta para la construcción de un IAC para estimar el pronóstico puntual y los componentes de varianza en experimentos por simulación estocástica de dos niveles. A continuación, se presenta un ejemplo ilustrativo que tiene una solución analítica para los parámetros de interés en esta investigación, mismo que será utilizado en la siguiente sección para ilustrar, a través de experimentos por simulación, la aplicación y la validez de las metodologías propuestas para la construcción de los IAC. Finalmente, en la última sección, se presentan las conclusiones e investigación a futuro.

METODOLOGÍA

Con el objetivo de identificar los componentes de la varianza de cada observación W_{ij} del algoritmo de la Fig. 1, denotemos por $\mu(\Theta) = E[W_{11}|\Theta]$, y $\sigma^2(\Theta) = E\left[W_{11}^2|\Theta\right] - \mu(\Theta)^2$. Bajo esta notación, el pronóstico puntual resulta $\alpha = E[\mu(\Theta)]$, y la varianza de W_{ij} es

$$V[W_{ij}] \overset{def}{=} E\left[W_{ij}^2\right] - E[W_{ij}]^2 = E\left[E\left[W_{ij}^2|\Theta\right] - \mu(\Theta)^2\right] + E\left[\mu(\Theta)^2\right] - E[\mu(\Theta)]^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2, \tag{1}$$

para i = 1,..., n; j = 1,...,m, donde $\sigma_1^2 = E\left[\sigma^2(\Theta)\right]$, y $\sigma_2^2 = V[\mu(\Theta)] \overset{def}{=} E\left[\mu(\Theta)^2\right] - E[\mu(\Theta)]^2$. Es conveniente mencionar que, en la literatura especializada, σ_1^2 se conoce como la varianza estocástica, y σ_2^2 como la varianza paramétrica.

Estimadores puntuales

En este artículo estamos interesados tanto en la estimación del pronóstico puntual $\alpha = E[\mu(\Theta)]$ como de los componentes de la varianza de las observaciones generadas por el algoritmo de la Fig. 1 y definidos en (1), para lo cual primero definimos los estimadores puntuales apropiados.

$$\hat{\alpha}(n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\hat{\alpha}_i, \hat{\sigma}_T^2(n) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}(n))^2, \hat{\sigma}_2^2(n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}S_i^2, \tag{2}$$

donde $\hat{\alpha}_i = m^{-1}\sum_{j=1}^{m}W_{ij}$, y $S_i^2 = (m-1)^{-1}\sum_{j=1}^{m}(W_{ij} - \hat{\alpha}_i)^2$, i = 1,...,m. Nótese que las $\hat{\alpha}_i$ son independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d.) con esperanza $E[\hat{\alpha}_1] = \alpha$ y varianza

$$\begin{aligned} V[\hat{\alpha}_1] &= E\left[(\hat{\alpha}_1 - \alpha)^2\right] = m^{-2}\left(mE\left[(W_{11} - \alpha)^2\right] + m(m-1)E[(W_{11} - \alpha)(W_{12} - \alpha)]\right) \\ &= m^{-1}\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2\right) + m^{-1}(m-1)\sigma_2^2 = \sigma_2^2 + m^{-1}\sigma_1^2 \end{aligned} \tag{3}$$

y, por otro lado, las S_i^2 son i.i.d. con esperanza $E\left[S_1^2\right] = \sigma_2^2$, por lo que la siguiente proposición es consecuencia de la Ley de los Grandes Números (Teorema 5.4.2 de Chung, 2001).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Proposición 1. Dado $m \geq 1$, si $E[|W_{11}|] < \infty$ entonces $\hat{\alpha}(n)$ y $\hat{\sigma}_T^2(n)$ son estimadores insesgados y consistentes (cuando $n \to \infty$) para α y $\sigma_2^2 + m^{-1}\sigma_1^2$, respectivamente. Si además $m \geq 2$, $\hat{\sigma}_2^2(n)$ es un estimador insesgado y consistente (cuando $n \to \infty$) para σ_2^2.

Precisión de los estimadores puntuales

Como acabamos de establecer, los estimadores puntuales propuestos en (2) son estimadores consistentes de sus correspondientes parámetros, por lo que se aproximarán a sus parámetros a medida que $n \to \infty$. Sin embargo, para establecer el grado de precisión de las estimaciones, debemos establecer un TLC (para cada uno de los estimadores) que nos permita obtener el IAC correspondiente. Notar que, tanto $\hat{\alpha}(n)$ como $\hat{\sigma}_2^2(n)$ son promedios de observaciones i.i.d., por lo que la siguiente proposición es consecuencia directa del TLC clásico.

Proposición 2. Dado $m \geq 1$, si $E\left[W_{11}^2\right] < \infty$ entonces

$$\frac{\sqrt{n}(\hat{\alpha}(n) - \alpha)}{\sqrt{V(\hat{\alpha}_1)}} \Rightarrow N(0,1),$$

cuando $n \to \infty$, si además $m \geq 2$ y $E\left[W_{11}^4\right] < \infty$, entonces

$$\frac{\sqrt{n}\left(\hat{\sigma}_2^2(n) - \sigma_2^2\right)}{\sqrt{V\left(S_1^2\right)}} \Rightarrow N(0,1),$$

donde $N(0,1)$ denota a la distribución normal estándar, $\hat{\alpha}(n), \hat{\sigma}_2^2(n), \hat{\alpha}_1, S_1^2$ están definidos en (2), $V[\hat{\alpha}_1]$ está definida en (3), y $V\left[S_1^2\right] = E\left[\left(S_1^2 - \sigma_2^2\right)^2\right]$.

Debido a que disponemos de estimadores consistentes para $V[\hat{\alpha}_1]$ y $V\left[S_1^2\right]$, el siguiente corolario es consecuencia de la Proposición 1 y del Teorema de Slutsky (ver, por ejemplo, Serfling, 2009).

Corolario 1. Bajo la misma notación e hipótesis de la Proposición 2 se tiene

$$\frac{\sqrt{n}(\hat{\alpha}(n) - \alpha)}{\sqrt{\hat{V}(\hat{\alpha}_1)}} \Rightarrow N(0,1), \text{ y } \frac{\sqrt{n}\left(\hat{\sigma}_2^2(n) - \sigma_2^2\right)}{\sqrt{\hat{V}\left(S_1^2\right)}} \Rightarrow N(0,1),$$

para $m \geq 1$ y $m \geq 2$, respectivamente, cuando $n \to \infty$, donde $\hat{V}[\hat{\alpha}_1] = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}(n))^2$, $\hat{V}\left[S_1^2\right] = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(S_i^2 - \overline{S}^2\right)^2$, $\overline{S}^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S_i^2$.

Para obtener un TLC para $\hat{\sigma}_T^2(n)$, nótese que éste es el estimador de la varianza de un conjunto de observaciones i.i.d., por lo que podemos utilizar el siguiente Lema, cuya prueba se omite, mencionando que se puede probar aplicando el método Delta (Proposición 2 de Muñoz y Glynn, 1997).

Lema 1. Si $X_1, X_2, \ldots$ es una secuencia de variables aleatorias i.i.d. con $E\left[X_1^4\right] < \infty$, entonces

ISBN 978-607-8242-11-5

$$\frac{n^{1/2}\left(S^2(n)-\sigma^2\right)}{\sigma_S} \Rightarrow N(0,1),$$

cuando $n \to \infty$, donde $\sigma^2 = \mu_2 - \mu_1^2$, $\sigma_S = \sqrt{8\mu_1^2\mu_2 - 4\mu_1^4 - 4\mu_1\mu_3 + \mu_4 - \mu_2^2}$, $\mu_k = E\left[X_1^k\right]$, k = 1, 2, 3, 4; $S^2(n) = (n-1)^{-1}\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{\mu}_1)^2$, $\hat{\mu}_1 = n^{-1}\sum_{i=1}^n X_i$.

Corolario 2. Bajo las mismas hipótesis del Lema 1 se tiene

$$\frac{n^{1/2}\left(S^2(n)-\sigma^2\right)}{\hat{\sigma}_S} \Rightarrow N(0,1),$$

cuando $n \to \infty$, donde $\hat{\sigma}_S = \sqrt{8\hat{\mu}_1^2\hat{\mu}_2 - 4\hat{\mu}_1^4 - 4\hat{\mu}_1\hat{\mu}_3 + \hat{\mu}_4 - \hat{\mu}_2^2}$, $\hat{\mu}_k = n^{-1}\sum_{i=1}^n X_i^k$.

El Corolario 2 es consecuencia de que $\hat{\mu}_k$ es un estimador insesgado y consistente de μ_k, y el siguiente corolario es consecuencia de que $\hat{\sigma}_T^2(n)$ es la varianza muestral de los $\hat{\alpha}_i$.

Corolario 3. Dado $m \geq 1$, si $E\left[W_{11}^4\right] < \infty$ entonces

$$\frac{\sqrt{n}\left(\hat{\sigma}_T^2(n) - \left(\sigma_2^2 + m^{-1}\sigma_1^2\right)\right)}{\sqrt{\hat{V}_T}} \Rightarrow N(0,1),$$

cuando $n \to \infty$, donde $\hat{V}_T = 8\bar{\alpha}_1^2\bar{\alpha}_2 - 4\bar{\alpha}_1^4 - 4\bar{\alpha}_1\bar{\alpha}_3 + \bar{\alpha}_4 - \bar{\alpha}_2^2$, $\bar{\alpha}_k = n^{-1}\sum_{i=1}^n \hat{\alpha}_i^k$.

Dado $0 < \beta < 1$, con base en el Corolario 1 y el Corolario 3 podemos establecer un IAC del 100β% de confianza para el pronóstico puntual α, y los componentes de varianza σ_2^2 y $\sigma_T^2 = \sigma_2^2 + m^{-1}\sigma_1^2$; cada IAC estará centrado en el correspondiente estimador puntual ($\hat{\alpha}(n)$, $\hat{\sigma}_2^2(n)$ o $\hat{\sigma}_T^2(n)$) y su ancho medio es

$$H_n(\alpha) = z_\beta \frac{\sqrt{\hat{V}(\hat{\alpha}_1)}}{\sqrt{n}},\ H_n\left(\sigma_2^2\right) = z_\beta \frac{\sqrt{\hat{V}\left(S_1^2\right)}}{\sqrt{n}},\ \text{y}\ H_n\left(\sigma_T^2\right) = z_\beta \frac{\sqrt{\hat{V}_T}}{\sqrt{n}}, \tag{4}$$

para α, σ_2^2 y σ_T^2, respectivamente, donde z_β es el $(1-\beta/2)-$cuantil de una distribución $N(0,1)$, $\hat{V}(\hat{\alpha}_1)$ y $\hat{V}\left(S_1^2\right)$ están definidos en el Corolario 1, y $\hat{V}_T$ está definido en el Corolario 3.

Notar que los IAC propuestos en (4) asumen que el valor de *m* en el algoritmo de la Fig. 1 es fijo, y la precisión del estimador se mejora (disminuye el ancho del IAC) a medida que *n* (el número de observaciones en el primer nivel) crece. Dado que se puede construir un IAC válido para cualquier valor de *m*, una pregunta relevante es cuál es el valor de *m* apropiado desde el punto de vista del tiempo de cómputo necesario para obtener el mismo nivel de precisión. Para responder a esta pregunta en el caso de la estimación del pronóstico puntual α, fijemos el número total de iteraciones del algoritmo de la Fig. 1 en *k* = *nm*, y nótese de (3) que

$$n^{-1}V[\hat{\alpha}_1] = k^{-1}\left(m\sigma_2^2 + \sigma_1^2\right), \tag{5}$$

toma su valor mínimo para *m* = 1, sugiriendo que el estimador puntual $\hat{\alpha}(n)$ definido en (2) tiende a ser más preciso para *m* = 1. Notar que esta elección de *m* = 1, dado un número fijo de iteraciones *k* = *nm* es conveniente, desde el punto de vista del tiempo de cómputo disponible, cuando la generación de W_{ij}

ISBN 978-607-8242-11-5

requiere de igual o mayor tiempo de cómputo que Θ_i, como se sugiere en la literatura (por ejemplo, Andradóttir y Glynn, 2016). Más aún, si permitimos que *m* no necesariamente sea fijo, sino que crezca con *n*, podemos obtener la siguiente proposición, cuya prueba se omite, mencionando que se puede probar aplicando el Teorema de Lindeberg-Feller (Teorema 7.2.1 de Chung, 2001).

Proposición 3. Dado $0 < p \le 1$, si $m = \lfloor n^{-1+1/p} \rfloor$ y $E[W_{11}^2] < \infty$ entonces

$$\frac{\sqrt{n}(\hat{\alpha}(n) - \alpha)}{\sqrt{V[\hat{\alpha}_1]}} \Rightarrow N(0,1),$$

cuando $n \to \infty$, donde $V[\hat{\alpha}_1]$ está definida en (3).

Si nuevamente fijamos el número total de iteraciones del algoritmo de la Fig. 1 en *k* = *nm*, y hacemos $n \approx k^p, m \approx k^{1-p}$ y *nm* = *k*, de la Proposición 3 podemos apreciar que la varianza asintótica de $\hat{\alpha}(n)$ es $n^{-1}V[\hat{\alpha}_1]$ para cada $0 < p \le 1$, y alcanza su valor mínimo cuando $p = 1$, es decir, cuando *n* = *k* y *m* = 1. Por supuesto que para estimar σ_2^2 es necesario que $m \ge 2$, y a continuación confirmamos nuestros resultados teóricos con resultados experimentales.

UN EJEMPLO CON SOLUCIÓN ANALÍTICA

El siguiente modelo (reportado en Muñoz y Muñoz, 2009) ha sido propuesto para la estimación de demandas esporádicas, y con el mismo se pueden encontrar expresiones analíticas para los parámetros considerados en este artículo. Este modelo será utilizado en la siguiente sección para ilustrar la aplicación y la validez de los IAC propuestos en este artículo.

Las llegadas de los clientes a una tienda de repuestos ocurre según un proceso de Poisson, aunque existe incertidumbre en la tasa de llegadas Θ_0, de manera que, dado $[\Theta_0 = \theta_0]$, los tiempos entre las llegadas sucesivas de clientes son i.i.d. con función de densidad exponencial:

$$f(y|\theta_0) = \begin{cases} \theta_0 e^{-\theta_0 y}, & y > 0, \\ 0, & \text{de otra forma,} \end{cases}, \tag{6}$$

donde $\theta_0 \in S_{00} = (0,\infty)$. Cada cliente puede ordenar *j* unidades de cierto repuesto con probabilidad Θ_{1j}, $j = 1,\ldots,q$, $q \ge 2$. Denotando $\Theta_1 = (\Theta_{11},\ldots,\Theta_{1(q-1)})$ y $\Theta_{1q} = 1 - \sum_{j=1}^{q-1}\Theta_{1j}$, entonces $\Theta = (\Theta_0, \Theta_1)$ es el vector de parámetros, y el espacio de parámetros resulta $S_0 = S_{00} \otimes S_{01}$, donde

$$S_{01} = \left\{ (\theta_{11},\ldots,\theta_{1(q-1)}) : \sum_{j=1}^{q-1} \theta_{1j} \le 1; \theta_{1j} \ge 0, j = 1,\ldots,q-1 \right\}.$$

La demanda total durante un periodo de longitud *T* está dada por

$$D = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N(T)} U_i, & N(T) > 0, \\ 0, & \text{de otra forma,} \end{cases}, \tag{7}$$

donde $N(s)$ es el número de clientes que llegaron en el intervalo $[0,s]$, $s \ge 0$, y $U_1, U_2 \ldots$ son las demandas individuales (asumidas condicionalmente independientes en relación a Θ). La información sobre Θ consiste de observaciones (i.i.d.) $v = (v_1,\ldots,v_r)$, $u = (u_1,\ldots,u_r)$ de clientes pasados, donde v_i es el

 ISBN 978-607-8242-11-5

tiempo entre la llegada del cliente *i* y el (*i* - 1), y u_i es el número de unidades ordenadas por el cliente *i*. Considerando la densidad a priori no informativa (de Jeffrey) para Θ, se obtiene la densidad posterior (ver detalles en Muñoz y Muñoz, 2009) $p(\theta|x) = p(\theta_0|v)p(\theta_1|u)$, donde $x_i = (v_i, u_i)$, $i = 1,\ldots,r$, $x = (x_1,\ldots,x_r)$, $\theta = (\theta_0, \theta_1)$, y

$$p(\theta_0|v) = \frac{\theta_0^{r-1}\left(\sum_{i=1}^{r} v_i\right)^r e^{-\theta_0 \sum_{i=1}^{r} v_i}}{(r-1)!},\ p(\theta_1|u) = \frac{\left(1-\sum_{j=1}^{q-1}\theta_{1j}\right)^{c_q - 1/2}\prod_{j=1}^{q-1}\theta_{1j}^{c_j-1/2}}{B(c_1+1/2,\ldots,c_q+1/2)}, \tag{8}$$

donde $c_j = \sum_{i=1}^{r} I[u_i = j]$, y $B(a_1,\ldots,a_q) = \prod_{j=1}^{q}\Gamma(a_j)/\Gamma\left(\sum_{j=1}^{q} a_j\right)$, para $a_1,\ldots,a_q > 0$. Bajo esta notación, puede probarse que

$$\alpha = E[T\Theta_0]\sum_{j=1}^{q} jp_j,\ \sigma_1^2 = \frac{E\left[T^2\Theta_0^2\right]}{(q_0+1)}\sum_{j=1}^{q} j^2 p_j + \frac{E[T\Theta_0]^2[(q_0/n)-1]}{(q_0+1)}\left(\sum_{j=1}^{q} jp_j\right)^2,\ \sigma_2^2 = E[T\Theta_0]\sum_{j=1}^{q} j^2 p_j, \tag{9}$$

donde $E[T\Theta_0] = Tr\left(\sum_{i=1}^{r} v_i\right)^{-1}$, $E\left[T^2\Theta_0^2\right] = T^2 r(1+r)\left(\sum_{i=1}^{r} v_i\right)^{-2}$, $p_j = q_j/q_0$, $q_j = c_j + 1/2$, $j = 1,\ldots,q$, $q_0 = \sum_{j=1}^{q} q_j$.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con la finalidad de ilustrar la validez de los IAC propuestos en (4) para medir la precisión de los estimadores puntuales propuestos en (2), utilizaremos el ejemplo de la sección anterior que tiene la solución analítica (9) para α, σ_2^2 y σ_T^2, respectivamente. En primer lugar, hemos considerado los datos $T = 15$, $r = 20$, $\sum_{i=1}^{r} x_i = 10$, $q = 5$, $c_1 = 5, c_2 = 3, c_3 = 2, c_4 = 3, c_5 = 7$. Con estos datos, el pronóstico puntual es $\alpha \approx 95.333$, y los componentes de la varianza son $\sigma_1^2 \approx 380.667, \sigma_2^2 \approx 568.598$.

Tabla 1. Desempeño de los IAC del 90% con base en 1000 repeticiones para *m* = 2.

	n = 100, *m* = 2			*n* = 1000, m = 2			*n* = 10000, *m* = 2		
	α	σ_2^2	σ_T^2	α	σ_2^2	σ_T^2	α	σ_2^2	σ_T^2
Cubrimiento	0.896	0.893	0.868	0.892	0.902	0.892	0.898	0.910	0.897
Promedio AM	4.493	91.327	183.384	1.423	29.616	60.703	0.450	9.419	19.386
Des. Est. AM	0.352	18.481	45.769	0.036	2.092	5.606	0.004	0.215	0.613
R.E.C.P .	2.716	53.794	117.903	0.875	17.901	38.067	0.278	5.673	11.995
Sesgo	-0.015	-1.547	1.918	0.011	-0.326	-0.226	0.008	0.116	-0.048

Con el objetivo de ilustrar la validez de los IAC propuestos en (4), a continuación reportamos los resultados de 1000 repeticiones independientes del algoritmo de la Fig. 1 para cada IAC del 90% de confianza, para valores *nm* = 200, 2000, 20000, y *m* = 2, 5. Finalmente, con el objetivo de comparar la elección de *m* = 1 (que consideramos óptima para la estimación del pronóstico puntual), reportamos también los resultados de

ISBN 978-607-8242-11-5

experimentos similares con nm = 100, 10000, con m = 1 y $m \approx (nm)^{1/3}$ (sugerido por Andradóttir y Glynn, 2016, como elección adecuada para m para el caso de estimadores sesgados en el nivel interior del algoritmo). En la Tabla 1 se presentan el cubrimiento (fracción de IAC que cubren el parámetro), promedio y desviación estándar del correspondiente ancho medio definido en (4), raíz del error cuadrático promedio (R.E.C.P.) y sesgo empíricos con base en las 1000 repeticiones para cada IAC. Como puede observarse de la tabla, los cubrimientos son aceptables (muy cercanos al nominal de 0.9, aún para m = 100), verificando las validez de los IAC definidos en (4). Por otro lado, todas las medidas de desempeño de los IAC (promedio y desviación estándar de los anchos medios, R.E.C.P. y sesgo) mejoran al incrementarse el número de repeticiones n.

Tabla 2. Desempeño de los IAC del 90% con base en 1000 repeticiones para m = 5.

	n = 40, m = 5			n = 400, m = 5			n = 4000, m = 5		
	α	σ_2^2	σ_T^2	α	σ_2^2	σ_T^2	α	σ_2^2	σ_T^2
Cubrimiento	0.894	0.862	0.818	0.898	0.892	0.891	0.890	0.891	0.899
Promedio AM	6.553	75.712	235.617	2.077	24.695	81.722	0.655	7.829	25.879
Des. Est. AM	0.830	15.714	95.501	0.082	1.706	11.997	0.008	0.178	1.191
R.E.C.P .	3.978	48.081	164.462	1.248	15.262	50.276	0.405	4.911	15.557
Sesgo	0.134	-2.111	10.234	-0.028	-0.262	3.827	-0.024	-0.176	-0.049

En la Tabla 2 se presentan los resultados para m = 5, donde se puede observar que, si bien los cubrimientos son válidos (cercanos al nominal de 0.9), todas las medidas de desempeño de los IAC (promedio y desviación estándar de los anchos medios, R.E.C.P. y valor absoluto del sesgo) son peores (mayores) que los reportados en la Tabla 1, para la estimación de α y σ_T^2, y mejores para la estimación de σ_2^2, sugiriendo que, para el mismo número de observaciones nm, un menor valor de m es mejor para estimar α y un valor mayor de m es mejor para estimar σ_2^2.

Tabla 3. Desempeño de los IAC del 90% con base en 1000 repeticiones para m = 1, $m \approx (nm)^{1/3}$.

	nm = 100, m = 1		nm = 100, m = 5		nm = 10000, m = 1		nm = 10000, m = 20	
	α	σ_T^2	α	σ_T^2	α	σ_T^2	α	σ_T^2
Cubrimiento	0.913	0.869	0.890	0.781	0.889	0.899	0.887	0.872
Promedio AM	5.029	232.305	9.203	306.107	0.504	24.351	1.765	65.799
Des. Est. AM	0.392	61.479	1.655	157.539	0.004	0.752	0.065	8.873
R.E.C.P .	2.933	147.120	5.507	234.267	0.308	14.570	1.115	42.196
Sesgo	0.020	1.367	0.004	11.555	-0.015	-0.194	0.034	-0.890

Finalmente, en la Tabla 3 se muestran los resultados de las estimaciones para α y σ_T^2, comparando los resultados para m = 1 y $m \approx (nm)^{1/3}$, encontrando nuevamente que todas las medidas de desempeño de los IAC (promedio y desviación estándar de los anchos medios, R.E.C.P. y valor absoluto del sesgo) son peores (mayores) para $m \approx (nm)^{1/3}$, confirmando nuestro resultado de que, para el mismo número de repeticiones nm, m = 1 produce mejores estimadores puntuales que $m \approx (nm)^{1/3}$ para la estimación de α.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

En este artículo se proponen metodologías para calcular los estimadores puntuales y sus correspondientes anchos medios, tanto para el pronóstico puntual como para los componentes de varianza en experimentos por simulación estocástica de dos niveles, cuya aplicación es relevante para la construcción de pronósticos bayesianos con base en modelos de simulación.

Tanto los resultados teóricos como los experimentales muestran que los estimadores puntuales propuestos y sus correspondientes anchos medios son asintóticamente válidos, es decir, los estimadores puntuales se aproximan a sus correspondientes parámetros y los anchos medios tienden a tener el cubrimiento nominal, a medida que el número de repeticiones (*n*) del primer nivel crece.

En este artículo también se muestra que la elección de una sola repetición en el segundo nivel ($m = 1$) es más conveniente, desde el punto de vista de la precisión del estimador, para un número fijo de observaciones totales (*nm*), tanto para la estimación del pronóstico puntual (α) como de la varianza del pronóstico puntual ($\sigma_1^2 + \sigma_2^2$).

Una investigación interesante a futuro, relacionada con este tema, es la experimentación con otros estimadores puntuales (cuasi Montecarlo o integración de Simpson) con la finalidad de investigar posibles estimadores puntuales más precisos para los parámetros considerados en este artículo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Asociación Mexicana de Cultura A.C., por el apoyo proporcionado.

REFERENCIAS

Andradóttir, S., y P. W. Glynn; *Computing Bayesian means using simulation*, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), 26(2), paper 10 (2016).

Asmussen, S., y P. W. Glynn (2012); *Stochastic Simulation Algorithms and Analysis*, Springer, New York, USA (2007).

Chung, K. L.; A Course in Probability Theory, Academic Press, New York, USA (2001).

L'Ecuyer, P.; *Quasi-Monte Carlo methods with applications in finance*, Finance and Stochastics, 13(3), 307-349 (2009).

Kelton W. D., J. S. Smith, D. T. Sturrock y D. F. Muñoz; Simio y Simulación, Modelado, Análisis, Aplicaciones, Simio LLC, Sewickley (USA) (2011).

Muñoz, D. F. y P. W. Glynn; *A batch means methodology for estimation of a nonlinear function of a steady-state mean*. Management Science, 43(8), 1121-1135 (1997).

Muñoz Negrón, D. F. y D. F. Muñoz Medina; *Pronósticos bayesianos para repuestos de automóviles usando simulación estocástica*, Journal of Economics, Finance and Administrative Science, 14(27), 7-20 (2009).

Serfling, R. J.; Approximation Theorems of Mathematical Statistics. John Wiley & Sons, New York, USA (2009).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Reconstruction of Process Loads Based on CNC Data

Thomas M. Rudolf[1]
(1) Departamento Académico de Ingeniería Industrial y Operaciones; Instituto Tecnológico Autónomo de México – ITAM; Río Hondo No.1, Col. Progreso Tizapán, 01080 México, CDMX.; thomas.rudolf@itam.mx

Abstract
The presented paper describes the reconstruction of process force signals using control internal data, control parameterisation and mechanical compliance characteristics. In this article, an analysis has been conducted considering controller parameterisation of feed drive axis, its control frequency response and parasitic frequency response together with the static and dynamic compliance of the machine axis. The analysis is used to reconstruct the force and torque values at the tool (process). To do so and to be able to reconstruct the values in real time the transfer behaviour is approximated by the method “Vector Fitting” presented in [GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A].

The presented work is part of the investigation done by the author at the Laboratory of Machine Tools and Production Engineering WZL, RWTH Aachen, Germany.

Keywords: process monitoring, digital drive signals, process force reconstruction

INTRODUCCION

High quality products and effective manufacturing processes are a key factor for a successful enterprise. Process monitoring and diagnostics are widely used to ensure the quality and effectiveness of processes to detect failures as early as possible and to be able to counteract. Regarding the manufacturing process and milling process there are numerous methods and applications, (TANSEL, I. N.; ARKAN, T. T., et al.). In most cases the implementation of additional sensors are required to obtain the necessary process data e.g. cutting forces and cutting torques, however the usage of control integrated data, has become more and more important in recent years since no additional sensors are required. However, the main disadvantage of such monitoring strategies is the fact that the location of the machine integrated sensors is relatively remote from the process under observation. For instance, the usage of drive current signals implies that the mechanical machine tool components such as spindle nut and axis table are influencing the signal. Thus, the mechanical behaviour has been analysed and considered, [DENKANA, B.; OVERMEYER, L.; LITWINSKI K. M; PETERS, R.], [RUDOLF, Th.].
During the milling process the process loads are applied to the cutting tool and cause reaction forces and torques. These forces and torques act on the machine structure and finally on the axis motors. The motor control structure receives position, velocity and current signals that are finally used to control the process. These signals, however, are distorted by the mechanical characteristics of the machine axis. In order to use digital drive signals as a source for process monitoring strategies, the influences of mechanical characteristics and control parameter configuration have to be considered. Generally, the control structure of a feed drive axis consists of a cascaded control including the current control loop, velocity control loop and position control loop, Fig. 1. The control structure pretends to influence the complete transfer characteristics (mechanicals, electromechanical and control) so that the current tool movements are following the reference values within the mechanical limits and with a very low margin of error. Once the control structure is parameterized, the control system can be modelled based on the given structure in Fig. 1. The mechanical behaviour can be analysed with different methods, e.g. correlation analysis or modal testing, [DENKANA, B.; OVERMEYER, L.; LITWINSKI K. M; PETERS, R.]. Therefore, the machine tool is mechanically exited and the reaction is measured by force sensors, acceleration sensors or displacement sensors. Usually, the mechanical excitation varies in frequency and amplitude in order to characterise the system as general as possible.
Analysing both, control structure and mechanical behaviour, the process forces can be reconstructed to use these data for monitoring purpose. In the following the analysis and the method to reconstruct the process forces and torques will be described. The focus of this paper is the dynamic characteristic of the drive data. Nevertheless, it is of importance to consider the friction behaviour as well. Consideration and the modelling of the friction behaviour has been under investigation and is published in [BRECHER, C; RUDOLF, Th.]. The results of this paper are taken into consideration and the current signals of the feed drive axis are already diminished from friction applying the described method.

 ISBN 978-607-8242-11-5

CONTROL STRUCTURE OF A FEED DRIVE AXIS OF A MACHINE TOOL

Fig. 1 shows a simplified structure of a cascaded control of a feed drive axis. To analyse the impact of a load (e.g. load torque M_L) on the position one must reorganise the control block diagram. The inner control loops (current control loop and velocity control loop) can be summarised to one block. The analysed machine tools are controlled by a PI controller for the current loop and the velocity control loop with the parameter K_{iq}, T_{iq} and K_{vel}, T_{vel}, respectively. For. The position controller is realised as a P controller with the parameter K_L.

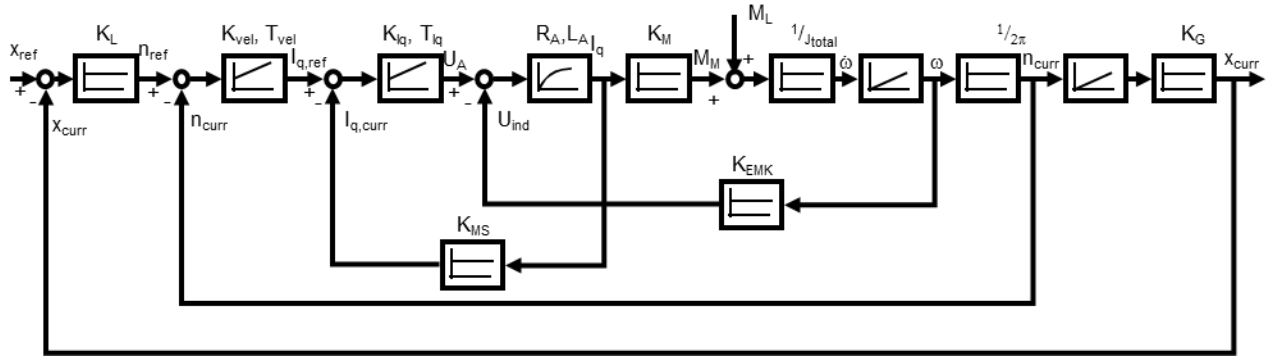


Fig. 1: cascaded control structure of a feed drive axis, [RUDOLF, Th.]

Considering the control structure in Fig. 1, the inner loop of the current controller can be expressed with eq. (1) with the given transfer function of the PI controller $G_{Iq,PI}$ (eq. (2)) and the motor transfer function as G_{Motor} (eq. (3))

$$I_{q,curr} = \frac{G_{Iq,PI} \cdot G_{Motor}}{1 + K_{MS} \cdot G_{Iq,PI} \cdot G_{Motor}} \cdot I_{q,ref} + \frac{K_{EMC} \cdot G_{Motor}}{1 + K_{MS} \cdot G_{Iq,PI} \cdot G_{Motor}} \cdot \omega_{curr}, \quad K_{MS} = 1 \tag{1}$$

$$G_{Iq,PI} = \frac{K_{Iq} \cdot T_{Iq} \cdot s + K_{Iq}}{T_{Iq} \cdot s} \tag{2}$$

$$G_{Motor} = \frac{1/R_A}{1 + \frac{L_A}{R_A} \cdot s} \tag{3}$$

The constants are defined as follows:

- K_{Iq}: Proportional gain for the PI current controller,
- T_{Iq}: Time constant of the PI current controller,
- L_A: Armature inductivity of the motor and
- R_A: Armature resistance of the motor
- K_{EMC}: Electromagnetic constant
- K_{MS}: Amplification of measurement system

Considering low feed velocities, the electromagnetic force can be neglected. Therefore, the transfer function $\boldsymbol{G_{IqRef2Iqcurr}}$ for the reference current to the current can be rewritten in eq. (4).

$$\boldsymbol{G_{IqRef2Iqcurr} = \frac{I_{q,curr}}{I_{q,ref}} = \frac{(K_{Iq} \cdot T_{Iq} \cdot s + K_{Iq})}{(L_A \cdot T_{Iq} \cdot s^2 + (K_{Iq} + R_A) \cdot T_{Iq} \cdot s + 1)}} \text{ with } \boldsymbol{\omega_{curr} \cong 0} \tag{4}$$

Regarding Fig. 1 the load torque M_L represents the process forces or process torques. In order to reconstruct the process forces and process torques it is necessary to reorganise the block diagram in that way that the load M_L is the input of the system under consideration and the resulting displacement x_{curr} the output. In other words, it is essential to find the transfer function between the load and the displacement. This transfer function will be referred to $G_{Dist,pos}$. From the feed drive axis point of view these loads are a disturbance and the controller structure tries to compensate these disturbances. Fig. 2 represents the block diagram considering the process forces and process torques as input. As mentioned earlier, the position, velocity and current sensors are not installed directly at the process but at the drive system. E. g. the encoder signal for the position and velocity signals are installed at the motor shaft. Therefore, the mechanical behaviour between the motor shaft (index *Mot*) and the cutting tool (index *TCP*) must be considered. This situation is illustrated in Fig. 2 by the transfer functions $G_{TCP2Mot}$ and G_{MS2Mot}. These transfer functions

ISBN 978-607-8242-11-5

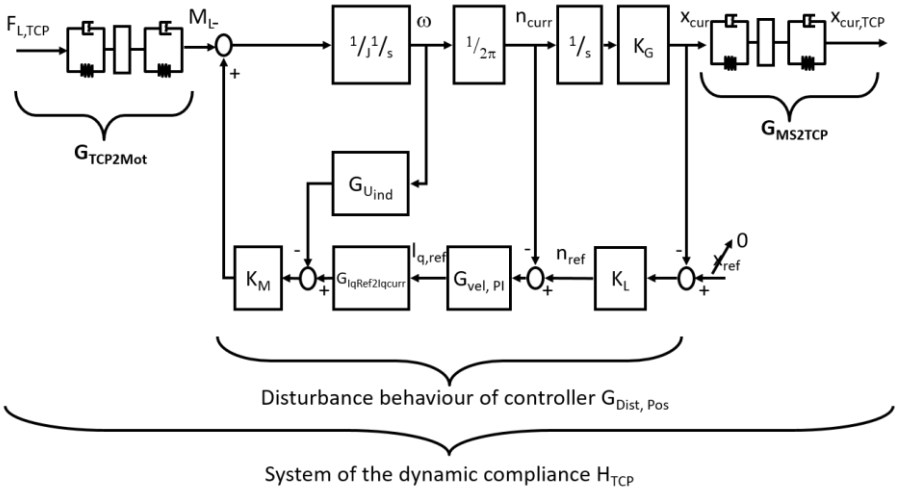


Fig. 2: Block diagram of a machine tool axis with load as input and current position as output, [RUDOLF, Th.]

represent the mechanical behaviour between the tool centre point (TCP) and the motor. In the following chapter, the mechanical behaviour will be discussed.

To identify the disturbance behaviour of the feed drive axis $G_{Dist,pos}$ one can model using the described block diagram and the parameterisation. There are, however, some unknown parameters such as the inertia and the backlash, for instance. Therefore, another approach is used in the presented work. For controller parameter configuration purposes, most CNC provide a tool to run frequency responses and allow to store the frequency responses as data. Fig. 3 represents this analysis for different parameterisation of position controller proportional gain K_L. For the system under consideration the disturbance frequency response (e-f, Fig. 4) are of interest. Once the controller is parameterised the frequency responses can be recorded and analysed.[1]

Control Frequency Response and Parasitic Frequency Response

For the presented analysis, the control frequency response is of less importance and will not be analysed further. It is, however, important to document the control frequency response since it gives information about the dynamic of the system under consideration. Amplifications of more than 0 dB should be avoided (Fig. 4, d) since this implies possible oscillation at turn points like cutting corner of 90º.

Whereas, the parasitic frequency response represents the characteristics of the $G_{Dist,pos}$ shown in Fig. 2. Fig. 3 illustrates the parasitic frequency response under different parameterisation of the position controller. With increasing value or K_L the parasitic frequency response has a lower impact on the displacement and therefore the process load has lesser effect on the axis movements. However, the high values of K_L lead to amplification of the control frequency response higher than 0 dB, as mentioned earlier. Once, the best fitting value for K_L is found the transfer behaviour can be recorded and represents the characteristic $G_{Dist,pos}$ in Fig. 2. This data contains the amplitude and the phase with respect to the frequency.

MECHANCIAL CHRACTETRISTICS OF A FEED DRIVE AXIS OF A MACHINE TOOL[2]

The static and dynamical mechanical behaviour of the machine components is mapped by the compliance frequency response. This frequency response represents the relative displacement of the tool centre point (TCP) as a reaction to a force at the TCP, [WECK06d, KEIS07, WEIG08]. KEISER [KEIS07] evaluated the effects of a tool displacement and the effects on the work piece contour. He established a linear relation between process loads and tool displacement and compensated these effects using digital drive signals. The static stiffness can be approximated by eq. (4):

$$\boldsymbol{k_j = \frac{\Delta F}{\Delta j}, j = x, y, z} \tag{4}$$

Weigold [WEG08] proposes a compensation of the static compensation of the TCP displacement by modelling the mechanical structure of the industrial robot and separates the work area in several sub areas. The dynamic compliance is represented by compliance frequency response. The dynamic behaviour is especially relevant for the milling process since it represents an interrupted cut. Therefore, the static and dynamic behaviour needs to be considered. The interrupted cut induces vibration to the machine components and the workpiece by the cutting-edge frequency. The cutting-edge frequency is a multiple of the main spindle rotational velocity. To identify the dynamic behaviour, a force with a defined amplitude and

[1] In the described case, the used CNC was a Sinumerik 840D solution line.

[2] The described method was conducted at the Laboratory of Machine Tools and Production Engineering WZL, RWTH Aachen.

ISBN 978-607-8242-11-5

varying frequencies is applied to the TCP and the corresponding displacement of the TCP is measured. In Fig. 3 (right hand side) shows the compliance frequency response of a machine tool for each axis (x, y, z). The upper diagram gives information about the quotient between the displacement and the responsible force (amplitude) while the lower graph illustrates the phase delay. The amplitude at a frequency f=0 Hz is the reciprocal value of the static stiffness. The static characteristic is measured in an analogous way. A force is applied to the TCP and the steady state displacement caused by this force is measured. The displacement for different force values is recorded and illustrated in Fig. 3 (left hand side) for each axis.

The local maxima of the compliance frequency response represent the resonance magnification. Theoretically, each axis can be represented by a several mass-spring-damper systems. The complexity, however, increases with an increasing number of systems. In the presented analysis of the machine tool, three resonance magnitudes can be realised for each axis. These leads to the assumption that with up to three to four mass-spring-damper systems the dynamic behaviour can be represented well.

The first resonance frequency is of special interest. In the presented case, the x-axis and y-axis has a first resonance at approximately 60 Hz in case of the z-axis at approximately 50 Hz.

From a signal processing point of view, the mechanical behaviour can be interpreted as a low pass filter with a corner frequency at the first resonance frequency. This means that force signals applied at the TCP are transmitted through the mechanical parts to the motor drive. If the force signal frequency is higher than the resonance frequency, the amplitude is received diminished at the motor. The current signal which is proportional to the torque signal, does not represent the current torque at the TCP. Cutting frequencies close to the resonance frequency will lead to an amplification of the current force or torque signal. Typical values of the cutting velocities v_c for steel and rough milling are between $100\frac{m}{min}$ and $200\frac{m}{min}$. Using a milling tool of diameter d=40 mm and four cutting edges (z) leads to a rotational speed N of $796\frac{1}{min}$ to $1592\frac{1}{min}$ (13.3 Hz to 26.6 Hz) and a cutting-edge frequency $f_{cutting}$ of 53.2 Hz to 106.4 Hz. These cutting conditions lead to the situation that the torque producing current at the cutting-edge frequency is not representing the current applied by torque or force value at the tool centre point. It is either amplified (53.2 Hz, cutting velocity of $100\frac{m}{min}$) or damped (106.4 Hz, cutting velocity $200\frac{m}{min}$).

$$\boldsymbol{v_c = N \cdot \frac{d}{2} \cdot 2\pi;} \qquad \boldsymbol{f_{cutting} = z \cdot \frac{N}{60}} \tag{5}$$

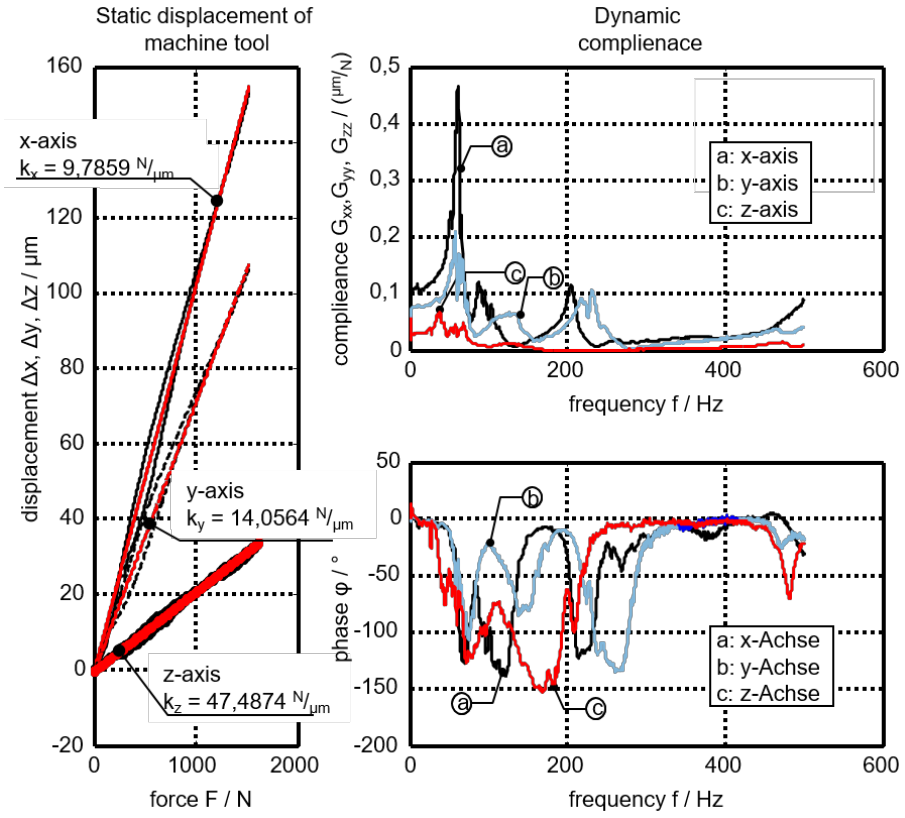


Fig. 3: Static and dynamic machine tool characteristics of a machine tool, [RUDOLF, Th.]

ISBN 978-607-8242-11-5

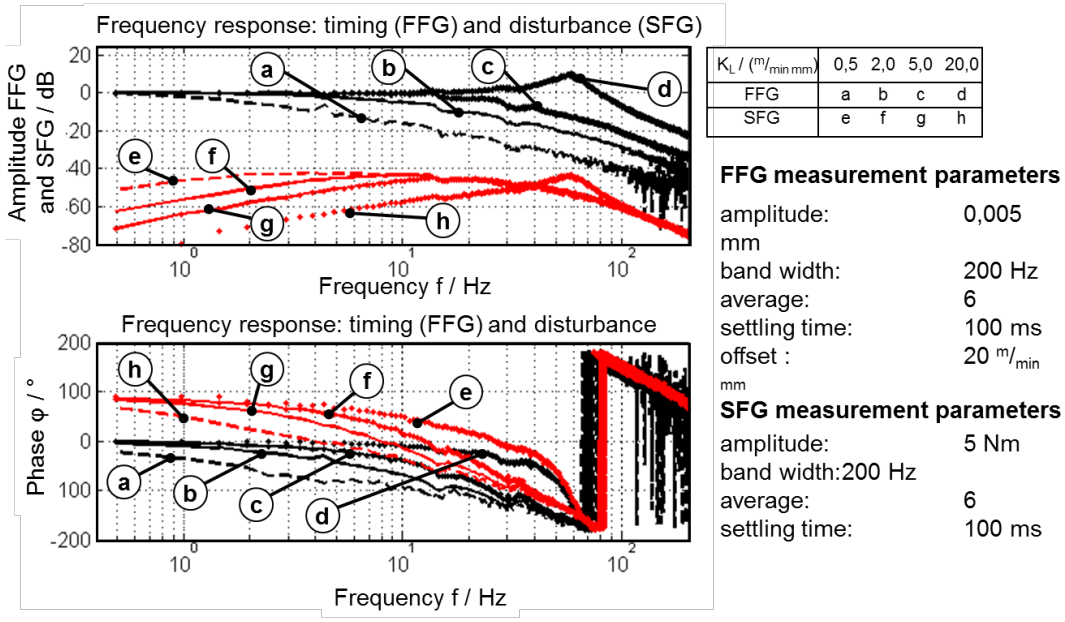


Fig. 4: Control frequency response and parasitic frequency response with different parameters, [RUDOLF, Th.]

Therefore, it is crucial to obtain the identity of the resonance frequencies of the mechanical parts and the parasitic frequency response to obtain reliable process information through digital drive signals and to reconstruct process data.

MODELLING OF THE TRANSFER BEHAVIOUR

So far, the obtained data are vectors containing the applied frequencies and the corresponding amplitudes and phase angles. To develop a mathematical model that can be applied to different input forces or input torques, the method of curve fitting explained in [GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A.] has been applied. This method requires the vector data as input and returns a mathematical model in form of zeros and poles. Therefore, the vectors representing the dynamic characteristic between the force and the displacement at the TCP can be expressed in a rational function by poles and zeros. The same procedure is applied to the parasitic frequency response.

Going back to Fig. 2 the relation between the parasitic frequency response $G_{Dist,pos}$ and the mechanical compliance H_{TCP} can be written as:

$$\boldsymbol{H_{TCP} = G_{TCP2Mot} \cdot G_{Dist,Pos} \cdot G_{MS2TCP}} \tag{6}$$

Considering the representation of the parasitic frequency response $G_{Dist,Pos}$ with denominator $D_{Dist,Pos}$ and nominator $N_{Dist,Pos}$ the mechanical characteristic between the TCP and the motor shaft can be described as in eq. (7) and eq. (8). As the mechanical behaviour between the TCP and the motor shaft (measurement system MS) and the motor shaft to the TCP are the same the amplitude and the phase delay depending on the frequencies can be calculated as given in eq. (7) and eq. (8).

$$\begin{aligned} G_{TCP2Mot} \cdot G_{MS2TCP} &= A_{TCP2Mot} \cdot e^{-j\phi_{TCP2Mot}} \cdot A_{MS2TCP} \cdot e^{-j\phi_{MS2TCP}} = H_{TCP} \frac{D_{Dist,Pos}}{N_{Dist,Pos}} \\ &= A_{TCP2Mot} \cdot A_{MS2TCP} \cdot e^{-j\left(\phi_{TCP2Mot}+\phi_{MS2TCP}\right)} = \\ &= A_{TCP2Mot}^2 \cdot e^{-j\left(2\cdot\phi_{TCP2Mot}\right)} = H_{TCP} \frac{D_{Dist,Pos}}{N_{Dist,Pos}} \end{aligned} \tag{7}$$

$$with \quad \left|A_{TCP2Mot}\right| = \sqrt{abs\left(G_{TCP2Mot} \cdot G_{MS2TCP}\right)} \quad and \quad \phi_{TCP2Mot} = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{\mathrm{Im}\left(G_{TCP2Mot} \cdot G_{MS2TCP}\right)}{\mathrm{Re}\left(G_{TCP2Mot} \cdot G_{MS2TCP}\right)}. \tag{8}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTS AND DISCUSSION

To proof the reconstruction of process forces, the toque generating drive current signals is taken and pre-processed by the logging module described in [BRECHER, C.; RUDOLF, Th.]. This module separated the friction and acceleration components of the current signals. The output of this module are current signals without friction and acceleration components and is taken as input signals for the developed mechanical transfer function $G_{TCP2Mot}$, eq. (8). The model developed by Kienzle, [KIENZLE, O.] has been used as a reference model.
Kienzle describes the cutting forces as follows:

$$\boldsymbol{F_{j,i}(t) = k_{j1,1} h\, b^{1-m_c} = a_p f_z^{1-m_c} sin(\kappa)^{1-m_c} k_{j1,1} sin\left(\omega_c\, t + \frac{2\pi}{z}(i-1)\right)^{1-m_c}} \quad (9)^3$$

The forces model by Kienzle are in a cylindric coordinate systems and they have to be transformed into cartesian coordinates by a transformation matrix, Fig. 5 left hand side to be comparable to the feed drive axis forces. Fig. 5 left hand side shows the application of the described method to reconstruct the feed forces F_x at the TCP and the tool. After reducing the friction component of the current signal, the current is multiplied by the motor constant to obtain the torque signals. This torque signal is then used as input for the calculated transfer function $G_{Mot2Tcp}$ to get the force values at the tool. Fig. 5 right hand side shows the result of the reconstructed force signal (a) compared to the modelled force values based on Kienzle (b). The diagram below (right hand side) shown a time window of one second (400 measurement points with T_s = 0,0025). The amplitude of the reconstructed signal and the modelled signals are approximately equal. Therefore, the presented method allows the reconstruction of process forces at the tool using torque generating motor current signals. These signals are available in a machine tools.
There is, however, a difference in the phase angle. Since the entrance angle of the simulation and the real process are not synchronized, this difference is still there. By synchronizing both signals this might be improved. One should consider, however, that a sample time of 2,5 ms (control position cycle) at a rotational speed of 2108 $^1/_{min}$ leads to 11,38 measurement points per turn. In the presented case, the difference between the phase angle can be reduced to steps of 31,62° (= $^{360°}/_{11,38}$). However, this step width is not sufficient to synchronize the two signals.

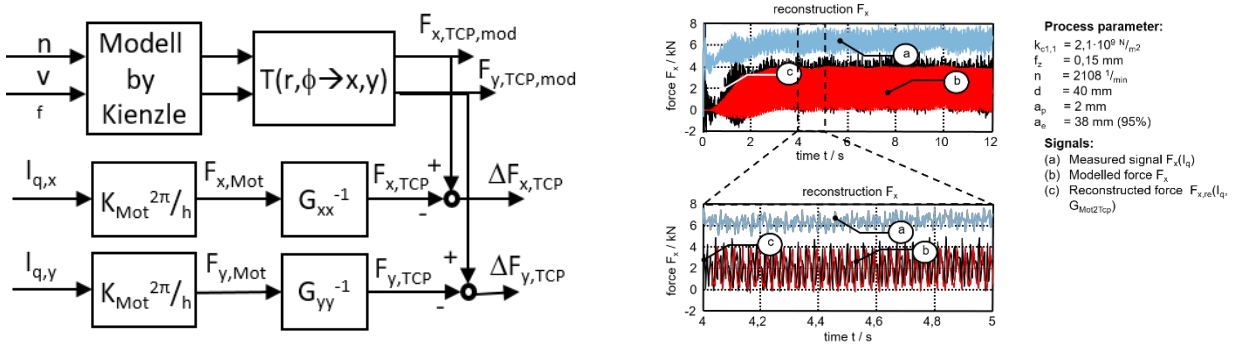


Fig. 5: left hand side: block diagram for the online reconstruction of process force; right hand side: results of the reconstruction of process forces [RUDOLF, Th.].

CONCLUSION

The presented method provides satisfactory results regarding the amplitudes of the process forces. These values can be used in a wide range of monitoring task to detect failures such as tool wear detection and tool breakage. Due to the limited sample rate provided by the position control cycle, the synchronisation regarding the phase angle, requires a more complex analysis. A better synchronisation could lead to a better identification of entrance and exit angle identification.

3 $\boldsymbol{a_p}$: cutting depth, $\boldsymbol{f_z}$: feed rate per cutting edge, $\boldsymbol{\kappa}$: tool angle, $\boldsymbol{k_{j1,1}}$, $\boldsymbol{m_c}$ and $\boldsymbol{\omega_c}$ process parameters, j = c, cN, p (c: cutting direction, cN: perpendicular to cutting direction, passive force direction, normally parallel to tool axis) and i as the index of the cutting edge (i = 1…z).

ISBN 978-607-8242-11-5

REFERENCES

TANSEL, I. N.; ARKAN, T. T.; KAO, W. Y.; MAHENDRAKAR, N.; SHISLER, B.; SMITH, D.; MCCOOL, M.: *Tool Wear Estimation in Micro-Machining. Part I: Tool Usage-Cutting Force Relationship*. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture. 40. Jg., 2000, S. 599–608.

DENKANA, B.; OVERMEYER, L.; LITWINSKI K. M; PETERS, R.: *Compensation of geometrical deviations via model based-observers*, International Journal of Advances Manufacturing Technologies. Jg. 73: 989–998, 2014 DOI 10.1007/s00170-014-5885-5.

RUDOLF, Th.: *Adaptierbare Parametrierung von Diagnosesystemen durch Verwendung digitaler Antriebssignale in der Prozessüberwachung,* Ergebnisse aus der Produktionstechnik; Apprimusverlag, Aachen, 2014, ISBN 978-3-86359-208-0.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A.: *Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting*. In: Power Delivery, IEEE Transactions on. 14. Jg., 1999, Nr. 3, S. 1052–1061.

BRECHER, C.; RUDOLF, Th.: *Adaptive Logging Module for Monitoring Applications Using Control Internal Digital Drive Signals* in: Production Engineering, Vol.3, H.3 2009, S. 305-312., 2009

WECK, M.; BRECHER, C.: *Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. 7.*, neu bearb. Auflage. Berlin: Springer, 2006.

WEIGOLD, M.: *Kompensation der Werkzeugabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern.* Aachen: Shaker, 2008.

KEISER, R.: *Kompensation von statischen und dynamischen Verlagerungen im Fräsprozess. Technische Hochschule,* Diss. Aachen: Shaker, 2007.

KIENZLE O., 1952, *Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen,* VDI-Z, 94/11-12, 299-305.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Un modelo para la estimación de la probabilidad de ganar las elecciones presidenciales

Edgar D. López[1,2] y Luis V. Montiel[1]

Instituto Tecnológico Autónomo de México – ITAM. Río Hondo #1 Col. Progreso Tizapán CP. 01080. Álvaro Obregón, Ciudad de México.
E-mail: (1) ed_gar_da_vid134@hotmail.com; (2) luis.montiel@itam.mx

Resumen

En este documento se presenta una propuesta para un levantamiento estratégico de encuestas electorales en los distintos estados de los Estados Unidos de América (EUA). Dicha propuesta está basada en un modelo probabilístico para estimar la probabilidad de ganar las elecciones presidenciales en los EUA.

A model for estimating the probability of winning the presidential election

Abstract

This paper presents a proposal for a strategic location of electoral surveys at different states in the United States. Such proposal is based on a probabilistic model to estimate the probability of winning the presidential elections in the US.

Keywords: electoral College, JDSIM, EUA, modeling, random variable.

 ISBN 978-607-8242-11-5

1. INTRODUCCIÓN

La elección presidencial más reciente en los EUA mostró que es el colegio electoral el principal factor para determinar quién ganará las elecciones; sin embargo, el hecho no es nuevo. En la historia reciente de EUA destaca la elección del 2000, disputada entre el candidato demócrata Al Gore y el candidato republicano George W. Bush, en la que el primero perdió a pesar de ganar el voto popular.

Del hecho anterior surge el interés de estimar una distribución de probabilidad para el número de votos electorales que va a obtener un candidato. Al respecto destaca el trabajo de Erickson y Sigman (2000) y el enfoque de Kaplan y Barnett. (2003); en este último está basado nuestro proyecto. En él, los autores obtienen una estimación de la probabilidad de ganar las elecciones, a través de un enfoque bayesiano que modela la probabilidad de ganar usando las encuestas estatales de intención de voto y proponen un algoritmo de localización de encuestas en distintos estados de los EUA. Uno de los principales supuestos de este modelo es la independencia; esto quiere decir, por ejemplo, que la probabilidad de ganar el estado de California es independiente de la probabilidad de ganar el estado de Oregón, lo cual puede no ser cierto. Un enfoque distinto es el de Fair (2007), que propone un modelo de *rankings*. Por último, Chen et al. (2007) proponen un modelo de difusión con variables latentes.

El presente documento busca dejar de lado el supuesto de independencia de Kaplan y Barnett. (2003) utilizando el procedimiento JDSIM para generar funciones de distribución conjunta y proponer un algoritmo de localización de encuestas electorales en los distintos estados de los EUA a partir de este enfoque.

El modelo para estimar la distribución de probabilidad del número de votos electorales propuesto por Kaplan y Barnett. (2003) considera que todos los votos electorales de un estado son asignados para el candidato que gana la mayoría de votos en dicho estado —"*all or nothing*"— y que sólo existen dos candidatos presidenciales. Este modelo se enfoca en un candidato, por lo que p_i representa la probabilidad de que dicho candidato gane el voto popular en el estado i y define una variable aleatoria V_i que representa el número de votos electorales que ganó este candidato en el estado i.

Bajo el supuesto de "*all or nothing*", la distribución de probabilidad de V_i se define como:

$$P[V_i = v] = \begin{cases} p_i, & si\ v = v_i \\ 1 - p_i, & si\ v = 0 \\ 0, & en\ otro\ caso \end{cases} \quad (1)$$

El número de votos electorales obtenidos por el candidato se expresa de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^{51} V_i \quad (2)$$

De esta manera, el candidato que gana la elección es aquel que consigue el mayor número de votos electorales; es decir, el candidato gana si $T \geq 270$.

Las siguientes secciones componen al documento: la segunda sección trata principalmente de la problemática de localización de encuestas junto con una breve explicación sobre el procedimiento JDSIM y nuestro algoritmo; la tercera parte presenta los resultados de la localización de encuestas por el algoritmo, y, por último, la sección cuatro y cinco incluyen las conclusiones y las referencias.

2. EL MODELO

El modelo de Kaplan y Barnett. (2003) supone que se cuenta con encuestas a nivel estatal para poder estimar la probabilidad de ganar en cada estado. Ello crea un reto adicional para la localización de las encuestas a lo largo de los distintos estados de los EUA: obtener la mayor cantidad de

ISBN 978-607-8242-11-5

información dado un número de encuestas dado. Kaplan y Barnett. (2003) proponen un algoritmo basado en un modelo bayesiano con variables aleatorias independientes, por lo que el objetivo de nuestro trabajo es generar un algoritmo de localización de encuestas que deje de lado el supuesto de independencia y sea capaz de, dado un número fijo de encuestas que queramos realizar, localizarlas en los distintos estados de los EUA de manera que capturemos la mayor cantidad de información. Para ello utilizamos un enfoque de localización encuesta por encuesta.

Para dejar de lado el supuesto de independencia, definiremos p_i, $p_{i,j}$. Donde $p_{i,j}$ representa la probabilidad de ganar el estado i y el estado j.

Siguiendo a Kaplan y Barnett. (2003), modelamos la probabilidad p_i con un enfoque bayesiano: utilizando una distribución beta con parámetros $\alpha = 1/2$ y β=1/2 como distribución *a priori* no informativa. Sea X la variable aleatoria que representa el número de personas que respondieron en la encuesta a favor del candidato, donde X se distribuye como una binomial con parámetros n y π .

A partir de esto podemos definir nuestra p_i de la siguiente manera:

$$p_i = P(\pi > 1/2 \mid n) = \sum_{x_i=0}^{n_i} \int_{\pi>1/2} \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \binom{n}{x} \pi^{\alpha+x-1}(1-\pi)^{\beta+(n-x)-1} \quad \forall i = 1,2,...,51 \tag{3}$$

Para definir la probabilidad $p_{i,j}$ proponemos utilizar una cópula gaussiana. Informalmente, una cópula[1] es una función que une —"*copule*"— una función de distribución multivariada con su función de distribución marginal. De esta manera podemos definir nuestra $p_{i,j}$ como:

$$p_{i,j} = \Phi_C(\Phi^{-1}(p_i), \Phi^{-1}(p_j)) \quad \forall i = 1,2,...,51 \; \forall j = 1,2,...,51 \text{ con } i \neq j \tag{4}$$

Aquí, C es la matriz de correlaciones.

De aquí vamos a generar una familia de distribuciones utilizando el procedimiento JDSIM[2] —"*Joint Distribution Simulation Procedure*"— para generar una familia de funciones de distribución conjunta para cada estado. El método genera una colección aleatoria de distribuciones conjuntas a partir de información parcial y muestrea dentro de esta colección de distribuciones. Así, podemos construir k familias de distribuciones conjuntas $\mathrm{D_i}\ \forall\ i = i, \ldots k$, donde k es el número de estados que queramos considerar.

Para encontrar la localización óptima del número de encuestas vamos a implementar un algoritmo que varíe $\mathrm{n_i}$ (el número de encuestas aplicadas en el estado i) y medir el valor esperado de la variabilidad de la familia de distribuciones conjuntas en la realización del mundo donde $\mathrm{n_i} = \bar{n}$ para cierto estado i.

El algoritmo quedaría definido como en la Figura 1:

[1] Más información sobre las cópulas puede encontrarse en Nelsen (1999).

[2] Una explicación más detallada del procedimiento JDSIM puede encontrarse en Montiel y Bickel (2012).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Algorithm 1 Localización de encuestas en k estados

Require: Un vector $V \leftarrow \{v_1, \ldots, v_k\}$ de votos electorales disponibles por estado y un valor t de encuestas que se quieran realizar.

$H_0 \leftarrow \{0, \ldots, 0\}$ un vector de ceros
while $u < t + 1$ **do**
    $H_1 \leftarrow H_0 + \{n_1 = 1, \ldots, 0, \ldots, 0\}$
    Genera un vector de probabilidades $P \leftarrow \{p_1, \ldots, p_k\}$ a partir de H_1
    Genera un vector de probabilidades conjuntas $P_{i,j} \leftarrow \{p_{1,2}, \ldots, p_{1,k}, \ldots, p_{2,k}, \ldots, p_{k-1,k}\}$
    Genera r funciones de distribucion conjunta $F \leftarrow \{f_1, \ldots, f_r\}$ a partir de P y $P_{i,j}$, donde
    $a_1 \leftarrow E\{[Var[f_1], \ldots, Var[f_k]]\}$
    $H_2 \leftarrow H_0 + \{0, n_2 = 1, \ldots, 0, \ldots, 0\}$
    ...
    $a_2 \leftarrow E\{[Var[f_1], \ldots, Var[f_k]]\}$
    $H_3 \leftarrow H_0 + \{0, 0, n_3 = 1, \ldots, 0, \ldots, 0\}$
    ...
    ...
    $a_k \leftarrow E\{[Var[f_1], \ldots, Var[f_k]]\}$
  $i \leftarrow argmin[\{a_1, \ldots, a_k\}]$
  $H_0 \leftarrow \{0, \ldots, n_i = 1, \ldots, 0\}$
  $u \leftarrow u + 1$
end while
return

Fig. 1: Seudocódigo del algoritmo de localización de encuestas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados de correr el algoritmo para 3 estados y 5 estados. La razón por la que no podemos trabajar con los 51 estados se debe a que JDSIM trabaja con vectores del orden 2^k, donde k es el número de estados que estemos considerando.

Se corrió el algoritmo realizando variaciones en la matriz de correlaciones en la copula para el caso de $k = 3$ y $k = 5$ asumiendo que todos los estados tenían la misma correlación entre sí. De esta manera, se analizaron tres tipos de correlación: fuerte, moderada y no correlacionados. Los estados seleccionados para este algoritmo fueron los estados de California, Arizona, Nevada, Oregón e Idaho, que cuentan con 55, 11 ,6 ,7 y 4 votos electorales respectivamente.

Para el caso de $k = 3$, la asignación del algoritmo para 15 encuestas, fue de 14 encuestas para el estado de California, 0 encuestas para Arizona y 1 encuesta para Nevada en los tres tipos de correlación. Esto se debe a que el estado de California cuenta con el mayor número de votos electorales comparado con el total de votos disponibles para los 3 estados, es decir, el 76%, por lo que el tipo de correlación parece no tuvo efecto en la distribución de las encuestas.

Para el caso de $k = 5$, el tipo de correlación comenzó a tener efecto en la distribución de las encuestas, como puede verse reflejado en la Figura 2 que nos muestra el número de encuestas asignados a cada estado para los tres experimentos que corrimos variando el tipo de correlación entre los estados. Nota que cuando estaban fuertemente correlacionados, Oregón fue el estado al que se le asignaron un mayor número de encuestas, mientras que Idaho recibió el mayor número de encuestas para la correlación moderada, pero la menor asignación para la correlación fuerte. Esto podría indicar que conforme agreguemos más estados, la matriz de correlaciones empieza a tener una relevancia mayor.

ISBN 978-607-8242-11-5

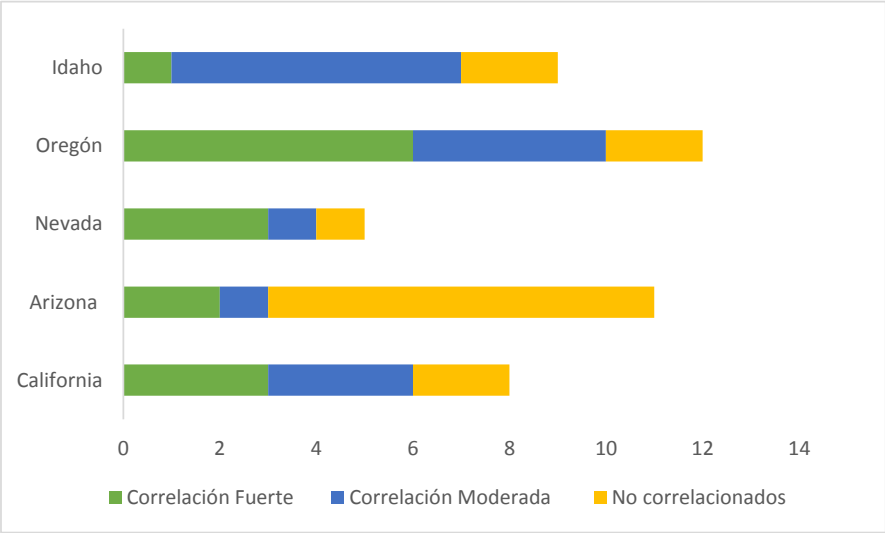


Fig. 2: Distribución de encuestas para el caso de 5 estados con distintos tipos de correlación

Hay varias formas de generar la matriz de correlaciones. En este primer acercamiento se consideró la localización de los estados para decidir si un estado debería estar fuertemente correlacionado con otro. En este sentido, retomando el caso en donde $k = 5$, se aplicó una regla de adyacencia: si el estado i compartía frontera con el estado j, entonces consideramos que estaban fuertemente correlacionados; si entre el estado i y el estado j había otro estado, entonces consideramos que tenían correlación moderada y, si entre el estado i y el estado j había dos estados, se consideró que estaban no correlacionados.

Esta regla funciona bien para el caso $k = 5$, pues es fácil de generar la matriz de correlaciones tomando en consideración la Figura 3, donde, por ejemplo, Nevada estaría fuertemente correlacionado con los otros cuatro estados, mientras que Oregón y Arizona estarían moderadamente correlacionados.
Cabe mencionar que en el caso de Oregón y Arizona hay una distancia de un estado si consideramos la frontera hacia Nevada, pero hay una distancia de dos estados si consideramos la frontera hacia Idaho y Utah. Para estos casos se tomó la opción que generar una mayor correlación entre ambos estados.



Fig. 3: Mapa de Estados Unidos de América
http://www.yupis.com.mx/educativo/mapas-estados-unidos-con-division-con-nombres.jpg

ISBN 978-607-8242-11-5

Al aplicar el algoritmo tomando en consideración la regla de adyacencia y variando el número total de encuestas que se asignaban, se obtuvieron los resultados de la Figura 4:

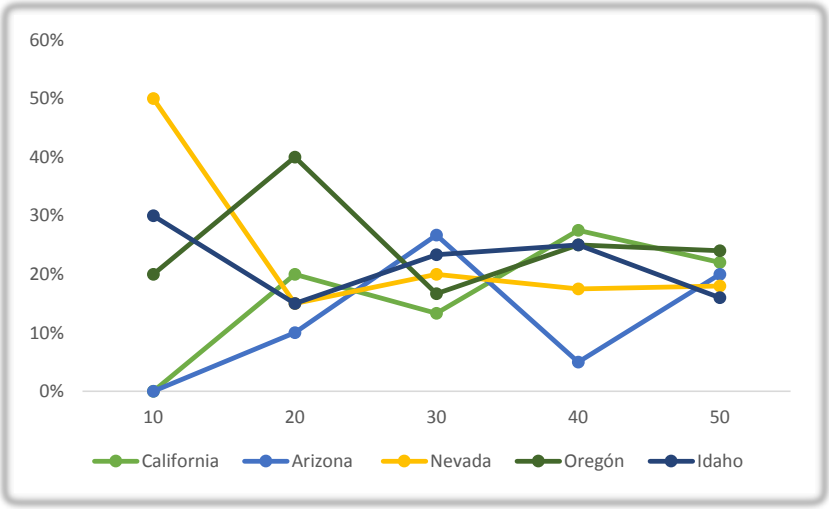


Fig. 4: Distribución del número de encuestas para el caso de 5 estados con distintos tipos de correlación

La Figura 4 muestra el porcentaje de encuestas asignados a cada estado con respecto al total de encuestas asignadas. Se puede observar claramente como, conforme aumenta el total de encuestas que podemos asignar, la distribución de encuestas de todos los estados comienza a converger alrededor del 20%, lo cual tiene sentido si consideramos que, bajo la regla de adyacencia todos están correlacionados. Además, los estados que cuentan un mayor número de votos electorales — California con 55 votos electorales, Arizona con 11 y Oregón con 7 — son los que reciben un mayor porcentaje cuando el total de las encuestas llega a 50.

4. CONCLUSIONES

Dado los resultados obtenidos se puede concluir que la aplicación de JDSIM para el diseño de levantamientos de encuestas en EUA es una alternativa interesante al supuesto de independencia del modelo de Kaplan y Barnett. (2003). Falta, sin embargo, encontrar un diseño que nos permita aumentar el número de estados que podemos manejar dentro del algoritmo y generar nuevas reglas de asignación de correlaciones entre estados a partir de un análisis más a fondo de las características internas de cada uno de ellos .

5. REFERENCIAS

Box,G.E.P.,G.C Tiao. 1973. Bayesian Inference in Statistical Analysis. Addisson-Wesley, Reading, MA.

Chen, M. K, Ingersoll E. J, Kaplan, E.H. 2007. Modeling a Presidential Prediction Market. *Institute for Operations Research and the Management Sciences.* Pubsonline. http://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/mnsc.1080.0872

Erikson, R.S.,K. Sigman K. 2000. A simple stochastic model for close US presidential elections. Working paper, Department of Political Science, Columbia University, New York, New York.

Fair, R. C. 2007. Interpreting the Predictive Uncertainty of Elections. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=931412

 ISBN 978-607-8242-11-5

Kaplan, E.H. and A. Barnett. 2003. A new approach to estimating the probability of winning the presidency. *Operations Research.* 51(1):32-40

Montiel LV, Bickel JE 2012. A simulation-based approach to decision making with partial information. *Decision Anal*. 10(1):26-41

Nelsen, R.B. 1999. An Introduction to Copulas. Springer, Lecture Notes in Statistics.

 ISBN 978-607-8242-11-5

DEA application to Higher Education Institutes: Public Universities in México

Luis A. Moncayo-Martínez[1]
(1) Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones, ITAM, Rio Hondo 1, Ciudad de México 01080, México
E-mail: luis.moncayo@itam.mx

Resumen

Higher Education Institutes (HEI) face the need to manage effectively and efficiently their resources because of both the increasing demand for high-quality human resources and the amount of money invested from taxes in public HEI (p-HEI). According to this, governments need to assess the results of the p-HEI to distribute the monetary resources among all them. Therefore, an evaluation system based on actual results must be developed to support the activities of the p-HEI with higher efficiency. We propose a system based on Data Envelopment Analysis (DEA) that not only detects the p-HEI with high technical efficiency but also compares the p-HEI to identify the benchmarks of every institution.

DEA is a non-parametric and determinist methodology based on linear programming models to compute the efficiency as the relation outputs/inputs. Every decision-making unit (every p-HEI in our study) has a technical efficiency defined as maximum output given some inputs. DEA has been used widely in very different industries. The highest growth nowadays is in energy, environment, and finance. In education, a similar analysis has been carried out in universities from Spain, UK, Philippines, Australia, and Portugal. Even though the inputs and outputs are different in each case because the aim of the analysis had different purposes, e.g. the output of the analysis of UK universities measures the income for consultancy and research.

Our analysis is different since we develop three models to asset the results in teaching, research, and knowledge dissemination. Our input variables are 1) number of full/partial-time teachers; 2) amount of money received by the federal or local government; and 3) number of researchers. The outputs are: 1) alumni; 2) number of accredited undergraduate programs; 3) number of journal papers indexed e.g. ISI–Thomson, SCOPUS–Elsevier; 4) number of patents granted; 5) number of accredited postgraduate programs; 6) number of edited journals indexed; and 7) number of cites.

To validate our proposed system, we use a database called ExeCUM (http://www.execum.unam.mx) developed by the biggest p-HEI in Mexico. We compute the technical efficiency of 40 p-HEI for the years 2013 and 2014 to classify them in either efficient or inefficient, and we set a hypothesis test to trace the increase/decrease in technical efficiency. Additionally, we provide examples to show how an inefficient p-HEI could get the results of its benchmark.

Our results show that 83.4% of the p-HEI have a 100% efficiency in teaching, 80.32% p-HEI have 100% efficiency in research, but 70.73% get 100% effectiveness in knowledge dissemination. Nevertheless, there is no statistical evidence to show a difference in the results of years

Referencias

Johnes, J. (2006). Data envelopment analysis and its application to the measurement of efficiency in higher education. *Economics of education review*, 25 (3), 273-288.
Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. (2014). Estudio comparativo de universidades mexicanas (ECUM). Recuperado el 24 de Octubre de 2014, de http://www.ecum.unam.mx

 ISBN 978-607-8242-11-5

La Ingeniería de Procesos en los tiempos del diseño asistido por ordenador

V. R. Ferro, J. Palomar, C. Moya, M. Larriba, G. Pedrosa, J. de Riva, D. Moreno, R. Santiago
Sección de Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, España
e-mail: victor.ferro@uam.es

Resumen

En la categorización tradicional de la Ingeniería de Procesos se reconoce a las Ingenierías Conceptual y Básica como las etapas iniciales en la vida de un proyecto conducente a la creación de un proceso industrial nuevo. En la Ingeniería Conceptual se seleccionan los sistemas (reactantes y/o productos, disolventes, absorbentes, agentes extractores, etc.) y las operaciones que deben garantizar el producto final con las especificaciones deseadas. En la Ingeniería Básica se suelen seleccionar y dimensionar los equipos donde se desarrollan dichas operaciones y se inicia su diseño. Por lo general se selecciona un grupo limitado de alternativas en cada caso, pero suficientemente grande como para permitir la posterior selección de las mejores alternativas. La cuestión limitante en esta tarea es el acceso a la información, el volumen de esta a manejar, la capacidad de las herramientas de trabajo disponibles y el tiempo demandado necesario para hacerlo. Para la selección de sistemas y operaciones se recurre, generalmente, a criterios termodinámicos (equilibrios químicos y de fase, espontaneidad y extensión de los cambios, etc.). En la Ingeniería Básica se incorporan criterios cinéticos (de la reacción química y las transferencias de calor y materia), fundamentalmente para el dimensionado y el diseño de equipos pero también para concluir la selección de sistemas y operaciones.

En los últimos tiempos, el uso de potentes sistemas de cálculo aplicados a la Ingeniería de Procesos, el desarrollo de extensas bases de datos para los programas en que se implementan esos sistemas de cálculo y la capacidad incorporada en dichos programas para realizar cálculos por lotes, ha producido un cambio muy significativo en los contenidos y los tiempos de las Ingenierías Conceptual y Básica de los proyectos. El uso de simuladores de proceso permite, por ejemplo, incorporar criterios cinéticos y acometer tareas de dimensionado y diseño básico de equipos a la vez que resolver la selección de sistemas y operaciones. Esto es, permite fusionar tareas de las Ingenierías Conceptual y Básica, aumentando el volumen de información incluida en la toma de decisiones y enriqueciéndola con optimizaciones parciales o completas de las operaciones y procesos y todo ello reduciendo simultáneamente el tiempo necesario.

En este trabajo se ilustra el fenómeno descrito más arriba a través del ejemplo del diseño básico de la operación de absorción de CO_2 utilizando líquidos iónicos (LIs) en calidad de absorbentes y columnas de relleno. Los LIs son compuestos iónicos que tiene la peculiaridad de permanecer en estado líquido a temperaturas en torno a la ambiental e inclusive inferiores. Por sus propiedades se han propuestos como candidatos respetuosos con el medio ambiente para sustituir a los disolventes orgánicos convencionales en operaciones industriales. Entre sus excepcionales propiedades los LIs exhiben una casi despreciable presión de vapor en condiciones ambientales y una elevada capacidad de absorción de gases como el CO_2. Sin embargo, los LIs tienen también importantes limitaciones para su posible aplicación a escala industrial como los elevados costes y las altas viscosidades. Esto unido al hecho de que sus propiedades pueden variar considerablemente con el catión y el anión que lo constituyen (son frecuentemente definidos como disolventes de diseño) determina que la selección de sistemas en este caso comporte una gran complejidad y está estrechamente relacionada con el diseño de las operaciones y equipos. En correspondencia, el desarrollo de investigaciones orientadas a la selección de LIs con propiedades optimizadas para determinadas aplicaciones y el diseño de operaciones y procesos con LIs es prácticamente imposible al margen del diseño asistido por ordenadores. En el caso particular del uso de los LIs como absorbentes han predominado “históricamente” los criterios termodinámicos para seleccionar los mejores. Como resultado de ello se ha sugerido sistemáticamente que los LIs de cadenas orgánicas largas y elevados pesos moleculares resultan los más indicados para la captura de CO_2. En este trabajo se hizo un estudio sistemático de esta operación en columnas de relleno mediante simulaciones con Aspen Plus empleando modelos rigurosos que reconocen el control cinético por transferencia de materia. Se incluyó una muestra de más 100 LIs. En el análisis se consideraron criterios técnicos y económicos. Como resultado se demostró que los criterios termodinámicos no conducen a una correcta selección de LIs con propiedades optimizadas para la captura de CO_2 y que los criterios cinéticos son ineludibles en este esfuerzo.

Referencias

de Riva, J., J. Suarez-Reyes, D. Moreno, I. Diaz, V. R. Ferro and J. Palomar (2017). Ionic liquids for post-combustion CO_2 capture by physical absorption. Thermodynamic, kinetic and process analysis. International Journal of Greenhouse Gas Control 61: 61-70.

ISBN 978-607-8242-11-5

Resistencia térmica del ácido poliláctico obtenido por extrusión reactiva: Efecto de la adición de nanoarcillas

Félix Carrasco[1], Orlando O. Santana[2], Jonathan Cailloux[2], Miguel Sánchez-Soto[2], Jordi J. Bou[3] y Maria Ll. Maspoch[2]

(1) Departamento de Ingeniería Química, Universitat de Girona, C/ Maria Aurèlia Capmany, 61, 17003 Girona (España)
(2) Centre Català del Plàstic. Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Colom, 114, 08222 Terrassa (España)
(3) Departamento de Ingeniería Química, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Diagonal, 647, 08028 Barcelona (España)

Resumen

En este trabajo se han fabricado, mediante extrusión reactiva, láminas de 1 mm de espesor de ácido poliláctico y de su nanocompuesto con un 2.5% en masa de montmorillonita organomodificada. En este proceso de extrusión reactiva se ha utilizado un extensor de cadena, al 0.5% en masa, con el fin de mejorar las propiedades de estos materiales. Se ha empleado la ecuación analítica general para evaluar los parámetros cinéticos de la descomposición térmica del ácido poliláctico y de su nanocompuesto. Se han analizado diferentes mecanismos empíricos y teóricos de reacciones en estado sólido con el fin de elucidar cuál es el mejor modelo cinético. Para alcanzar este objetivo, se han construido las funciones de conversión estandarizadas, $f(\alpha)/f(0,5)$. Puesto que estas curvas patrón suministran información tan solo cualitativa, se ha propuesto un índice cuantitativo, basado en el error medio integral (EMI) entre los valores teóricos y experimentales de la función de conversión estandarizada. De esta forma, ha podido demostrarse que el mejor modelo cinético teórico es el de escisión aleatoria de cadenas macromoleculares. La presencia de nanopartículas ha sido beneficiosa, al mejorar la resistencia a la degradación térmica del ácido poliláctico.

Palabras clave: ácido poliláctico; extrusión reactiva; nanoarcillas; modelos cinéticos; ecuación analítica general; escisión aleatoria; índice de error.

Thermal resistance of poly(lactic acid) manufactured by reactive extrusion: Effect of adding nanoclays

Abstract

In the present work, poly(lactic acid) sheets (with a nominal width of 1 mm) reinforced with organically modified montmorillonite (with a mass content of 2.5%) have been manufactured through a reactive extrusion process. A chain extensor (with a mass content of 0.5%) has been used in order to improve poly(lactic acid) properties. The kinetics of the thermal degradation has been analyzed by means of the general analytical equation. Various empirical and theoretical solid-state mechanisms have been tested to elucidate the best kinetic model. In order to reach this goal, the standardized conversion functions, $f(\alpha)/f(0,5)$, have been constructed. Given that it is not always easy to visualize the best accordance between experimental and theoretical values of standardized conversion functions, a quantitative index, based on integral mean errors, has been developed. By doing that, it has been possible to ascertain that random scission of macromolecular chains was the best theoretical kinetic model. The presence of nanoparticles has been beneficial, given that they improved the thermal resistance of poly(lactic acid).

Key words: poly(lactic acid); reactive extrusion; nanoclays; kinetic models; general analytical equation; random scission; error index.

Introducción

A lo largo de la pasada década, los nanocompuestos de polímero y silicatos laminados han generado un gran interés en la Ciencia y la industria por sus aplicaciones en el sector de envasado. Entre las arcillas comercialmente disponibles, las montmorillonitas organomodificadas (OMMT) son las que han gozado de

 ISBN 978-607-8242-11-5

mayor atención. Las nanoarcillas exfoliadas han conseguido mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de la matriz polimérica. Por otro lado, los biopolímeros, tales como el ácido poliláctico (PLA), han ganado popularidad al poseer altos valores de resistencia mecánica y excelentes módulos de elasticidad. Aunque las nanoarcillas consiguen mejorar las propiedades reológicas, térmicas, mecánicas y de fractura de la matriz polimérica, también actúan como catalizadores de la degradación térmica durante su procesado. Por esto motivo, la extrusión reactiva, que se realiza en presencia de un extensor de cadena, se ha convertido en una excelente herramienta, ya que consigue disminuir la degradación térmica durante el procesado e, incluso, promueve un incremento del peso molecular medio de la matriz polimérica, consiguiendo así a una mejora de sus prestaciones reológicas, mecánicas y térmicas.

La creciente importancia comercial de los polímeros ha evocado un interés continuo en su estabilidad térmica. La modelización cinética de la descomposición térmica de materiales poliméricos es crucial para predecir el comportamiento térmico en diferentes condiciones de trabajo [1-14]. Para ello se requiere el conocimiento del triplete cinético: factor preexponencial, energía de activación y modelo cinético, f(α). Este último parámetro, también conocido como función de la conversión, es una expresión algebraica que está asociada al modelo matemático que describe la cinética de la reacción en estado sólido. Es preciso remarcar que el conocimiento del mecanismo reaccional de la degradación térmica de macromoléculas es muy útil en el campo de la estabilidad térmica de polímeros [15-20].

Así pues, el objetivo del presente artículo ha consistido en estudiar la mejora de la estabilidad térmica del PLA al incorporar un extensor de cadena y nanoarcillas, y en determinar el modelo cinético que mejor describe las reacciones de descomposición térmica del polímero y de su nanocompuesto. Para ello, se han analizado diferentes modelos cinéticos: (a) mecanismos teóricos convencionales (R1, F1, D1, R2, F2, D2, R3, F3 y D3) y no convencional (escisión aleatoria de cadenas macromoleculares) y (b) mecanismos empíricos (orden n y autocatalítico). Una vez determinado el mejor modelo cinético, ha sido posible evaluar correctamente los parámetros cinéticos (energía de activación y factor preexponencial) del proceso degradativo.

Modelización cinética

La velocidad de una reacción en estado sólido se describe habitualmente mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k\, f(\alpha) = A\, exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \tag{1}$$

donde k es la constante cinética, A es el factor preexponencial, R es la constante universal de los gases ideales, E es la energía de activación, α es el grado de conversión, T es la temperatura y f(α) es la función de la conversión (i.e. modelo cinético).

Al integrar la ecuación (1), se obtiene la ecuación integral para experimentos llevados a cabo a velocidad de calentamiento constante (β). Dicha ecuación se denomina “ecuación analítica general”, desarrollada por Carrasco en 1993 [21]:

$$ln\left[\beta\, \frac{g(\alpha)}{T^2 \sum_{i=1}^{\infty}(-1)^{i+1}\, i!\left(\frac{RT}{E}\right)^{i-1}}\right] = ln\frac{AR}{E} - \frac{E}{R}\frac{1}{T} \qquad siendo\ g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} \tag{2}$$

La ecuación analítica general contiene una serie infinita de términos. Se ha podido demostrar que, para energías de activación superiores a 100 kJ/mol, dicha serie infinita se puede truncar en el tercer término, con lo cual la ecuación (2) se convierte en:

$$ln\left[\beta\, \frac{g(\alpha)}{T^2\left(1 - 2\frac{RT}{E} + 6\left(\frac{RT}{E}\right)^2\right)}\right] = ln\frac{AR}{E} - \frac{E}{R}\frac{1}{T} \tag{3}$$

La energía de activación se determina a partir de la pendiente de la ecuación (3). Resulta evidente que se requiere un procedimiento iterativo para calcular E, ya que este parámetro aparece también en el primer miembro. Vale la pena resaltar que, en el caso de bajas energías de activación (E < 50 kJ/mol), sería preciso truncar la serie infinita, manteniendo un mayor número de términos.

ISBN 978-607-8242-11-5

Materiales y métodos

Materiales

Se ha utilizado un grado comercial de ácido poliláctico PD,L-LA (PLA 4032D®), Las características de este polímero son las siguientes: contenido en enantiómero D = 98%, peso molecular medio M_w = 181 kg/mol, índice de polidispersidad = 2, temperatura de transición vítrea T_g = 60ºC y temperatura de fusión T_m = 170°C. Las nanoarcillas (Cloisite 30B®), orgánicamente modificadas con grupos radicales de alquilamonio, tienen un peso molecular medio, M_w = 404.8 g/mol. El extensor de cadena (Joncryl-ADR-4300F®) es un oligómero epoxídico, con las siguientes propiedades: temperatura de transición vítrea, T_g = 56ºC, peso molecular medio, M_w = 5443 g/mol y peso equivalente de grupos epoxi = 433 g/eq [23-24].

Fabricación de los *masterbatch*

Inicialmente se prepararon dos masterbatch con el fin de evitar los problemas de manipulación y procesado de las nanoarcillas y del extensor de cadena. La mezcla en estado fundido del ácido poliláctico con las nanoarcillas se llevó a cabo en una extrusora de tornillo sinfín de doble husillo de 25 mm de diámetro y ratio L/D = 36 (KNETER 25X24D, COLLIN), con el objeto de fabricar un masterbatch de OMMT al 10%. El perfil de temperaturas fue: 140ºC en la zona de alimentación, 160ºC en la zona de fundido y 165ºC en la zona final. El tiempo medio de residencia fue de 1.5 min y la velocidad del husillo de 120 rpm. El extrudato obtenido se enfrió en agua fría y se granuló. Una extrusora de simple husillo de 30 mm de diámetro y ratio L/D = 25 (IQAP-LAP E30-25D, IQAP Technologies) se utilizó para fabricar un masterbatch de ácido poliláctico y extensor de cadena al 5%. El perfil de temperaturas fue: 130ºC en la zona de alimentación, 132ºC en la zona de compresión y 135ºC en la zona final. El tiempo medio de residencia fue de 1.0 min y la velocidad del husillo, de 60 rpm. Se aplicaron bajas temperaturas con el fin de evitar reacciones prematuras entre los grupos epoxi del extensor y los grupos funcionales del PLA. El extrudato obtenido se enfrió con agua fría y se granuló.

Proceso de extrusión reactiva en planta piloto

La granza de PLA y los masterbatch se mezclaron físicamente con el objeto de obtener dos mezclas distintas: (1) 0.5% de extensor de cadena (para procesar el PLA) y (2) 0.5% de extensor de cadena y 2.5% de OMMT (para procesar el nanocompuesto). Dichas mezclas se procesaron en una extrusora de tornillo sinfín de doble husillo, como la utilizada anteriormente. El perfil de temperaturas fue: 150ºC en la zona de alimentación, 170ºC en la zona de fusión y 175ºC en la zona final. El tiempo medio de residencia fue de 4.5 min y la velocidad del husillo, de 40 rpm. Se obtuvieron láminas de 1 mm de espesor y 100 mm de anchura en una calandria (TEACHLINE CR72T, COLLIN), cuyo rodillo operó a 50ºC y una velocidad de rotación de 1.25 rpm. Finalmente, se aplicó un tratamiento térmico a las láminas en un horno a 60ºC durante 40 min. A continuación, se enfriaron en agua a 0ºC durante 15 min. Por fin, se almacenaron durante 1 semana antes de proceder a los análisis TGA.

Caracterización térmica

Los experimentos TGA se llevaron a cabo en un analizador termogravimétrico Mettler Toledo, modelo TGA-SDTA851. Las muestras de 20 mg se calentaron a la velocidad constante de 10 K/min desde la temperatura ambiente hasta 600ºC, haciendo circular nitrógeno seco a un caudal de 40 mL/min.

Resultados y discusión

La figura 1 ilustra la diferencia de estabilidad térmica del PLA preparado con o sin nanoarcillas. A partir de esta gráfica, se pudieron determinar varias temperaturas de descomposición: temperatura inicial de descomposición (T_5: temperatura a la cual se pierde el 5% de masa), temperatura a la velocidad máxima de descomposición (T_m) y temperatura final de descomposición (T_{95}: temperatura a la cual se pierde el 95% de la masa). La figura 2 contiene tales valores. La temperatura inicial de descomposición creció de 328 to 338ºC al añadir la nanoarcilla. (*i.e.* 10ºC superior en el nanocompuesto). Por otro lado, la temperatura final de descomposición aumentó de 372 to 383ºC al añadir la nanoarcilla. (*i.e.* 11ºC superior en el nanocompuesto). El grado de conversión a la velocidad máxima de conversión se mantuvo aproximadamente constante (α_m = 64 y 66% para el polímero y su nanocompuesto). También se mantuvo prácticamente constante la derivada de la conversión a la velocidad máxima de descomposición ($(d\alpha/dT)_m$ = 2.9 x 10^{-2} y 3.2 x 10^{-2} K^{-1}). Las temperaturas iniciales de descomposición del extensor de cadena y de la OMMT fueron de 296 y 276ºC, respectivamente. La masa residual del REX-PLA, REX-PLA+OMMT, extensor de cadena y OMMT fueron del 0.35, 3.1, 0.65 y 73.5%, respectivamente.

ISBN 978-607-8242-11-5

La figura 3 ilustra los resultados obtenidos al utilizar la ecuación analítica general para los dos modelos cinéticos empíricos (orden n y autocatalítico) y el mecanismo teórico de escisión aleatoria de cadenas. Los resultados fueron excelentes ($r^2 > 0.99$) para estos tres modelos, aunque el modelo de escisión aleatoria fue más satisfactorio para el polímero y el modelo autocatalítico para el nanocompuesto. Los valores de la energía de activación así calculados fueron de 193-248 kJ/mol para el polímero y 216-278 kJ/mol para el nanocompuesto, como se muestra en la figura 4. En todos los casos, la adición de nanopartículas condujo a energías de activación 23-30 kJ/mol superiores. Vale la pena resaltar que la ecuación analítica general aplicada al mecanismo de escisión aleatoria consiguió el mejor ajuste en todo el intervalo de conversiones. En este caso, los valores de la energía de activación fueron de 193 y 216 kJ/mol para el polímero y el nanocompuesto, respectivamente. Varios autores han argumentado que reacciones térmicas e hidrolíticas pueden dar lugar a la rotura aleatoria de grupos éster [25-26]. Esto está de acuerdo con nuestros resultados cinéticos.

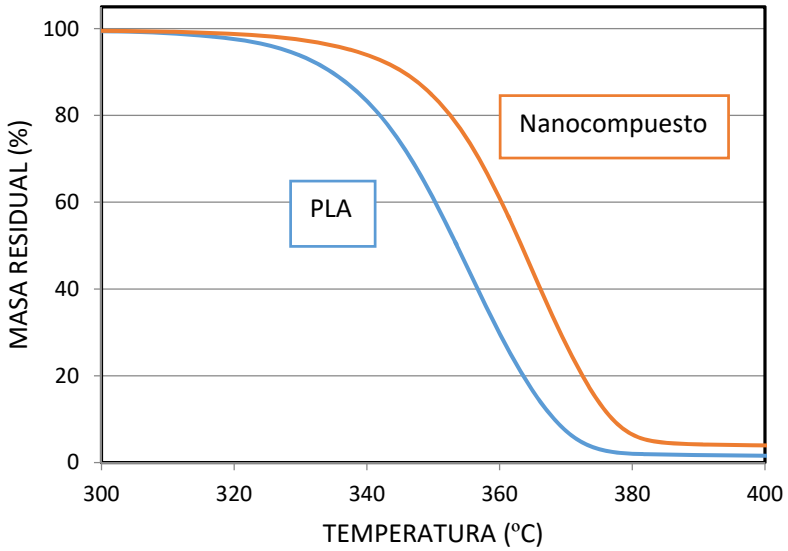


Fig. 1: Curvas TGA del ácido poliláctico obtenido por extrusión reactiva (PLA) y su nanocompuesto con nanoarcillas en el intervalo de temperatura de 300-400ºC.

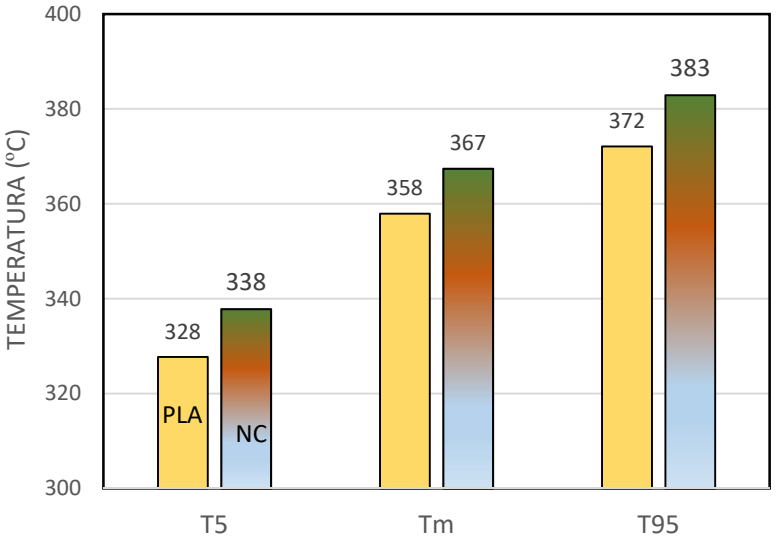


Fig. 2: Valores de la temperatura inicial de descomposición (T_5), temperatura a la Velocidad máxima de descomposición (T_m) y temperatura final de descomposición (T_{95}) del polímero (PLA) y de su nanocompuesto (NC).

ISBN 978-607-8242-11-5

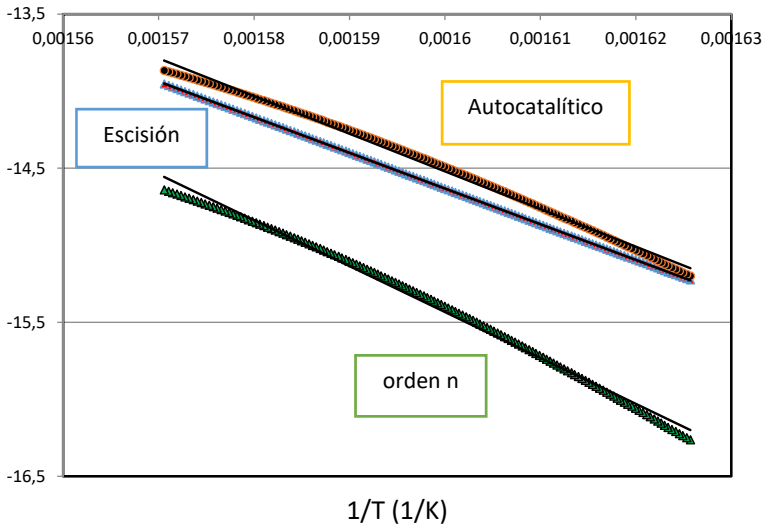


Fig. 3: Aplicación de la ecuación analítica general, ecuación (3), a la degradación térmica del nanocompuesto, utilizando dos modelos cinéticos empíricos (orden n y autocatalítico) y un mecanismo teórico no convencional (escisión aleatoria).

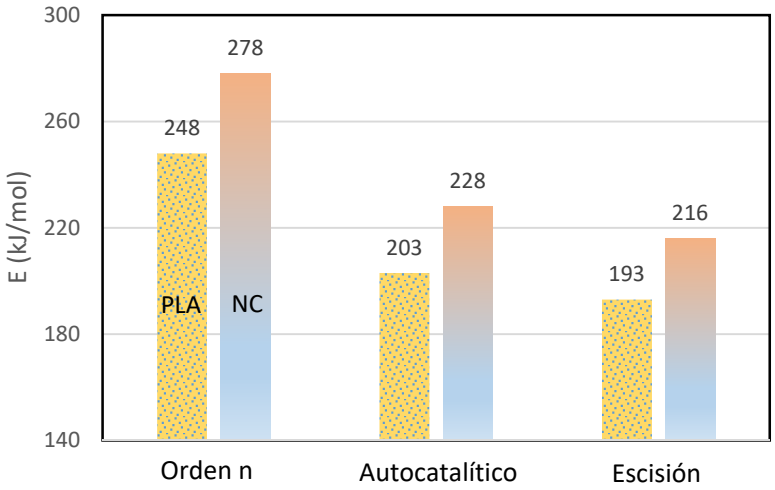


Fig. 4: Valores de la energía de activación obtenidos a través de la ecuación analítica general, utilizando dos modelos cinéticos empíricos (orden n y autocatalítico) y un mecanismo teórico no convencional (escisión aleatoria) para el polímero (PLA) y el nanocompuesto (NC).

Al aplicar la ecuación analítica general a los mecanismos convencionales para reacciones en estado sólido (R1, F1, D1, R2, F2, D2, R3, F3 y D3) se obtuvieron, en general, excelentes ajustes. Los valores de la energía de activación para todos los mecanismos teóricos convencionales estudiados en este trabajo se muestran en la figura 5. A la vista de estos resultados, se concluyó que los valores de la energía de activación son de 203-527 kJ/mol para el polímero y de 228-589 kJ/mol para el nanocompuesto. Por consiguiente, la adición de nanopartículas contribuyó a un aumento de la energía de activación de 25-62 kJ/mol. El aumento de la energía de activación fue aproximadamente del 12% para todos estos mecanismos reaccionales al añadir nanopartículas.

ISBN 978-607-8242-11-5

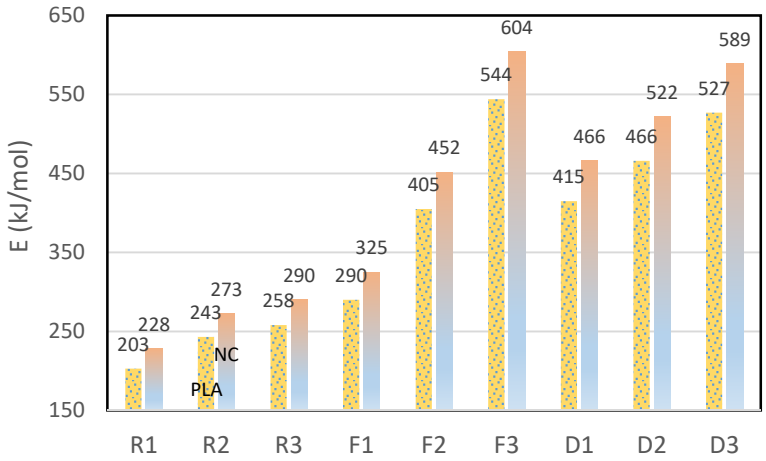


Fig. 5: Valores de la energía de activación obtenidos mediante la ecuación analítica general, utilizando diferentes mecanismos teóricos convencionales para el polímero (PLA) y el nanocompuesto (NC).

En todos los casos analizados, el coeficiente de regresión fue superior a 0.984, lo cual significa que todos los mecanismos son adecuados, desde el punto de vista matemático, para representar la descomposición térmica del PLA obtenido por extrusión reactiva y de su nanocompuesto con OMMT. Esto significa que es necesario encontrar un método que permita discernir el mejor modelo cinético con el fin de determinar el valor correcto de la energía de activación. Las funciones de la conversión estandarizadas, f(α)/f(0.5), se han utilizado con éxito a tal fin. Los valores teóricos de las funciones de la conversión estandarizadas están disponibles en la literatura [22]. Por otro lado, los valores experimentales de tales funciones se han determinado a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{f(\alpha)}{f(0.5)} = \frac{\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)}{\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)_{0.5}} \; exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{0.5}}\right)\right] \tag{4}$$

donde $f(0.5)$, $\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)_{0.5}$ y $T_{0.5}$ son la función de la conversión, la derivada de la conversión y la temperatura a α = 0.5. La derivada de la conversión y la temperatura a α = 0.5 son valores experimentales y E es la energía de activación previamente calculada para cada uno de los mecanismos reaccionales. La figura 6 ilustra las funciones de la conversión estandarizadas del polímero correspondientes a los dos mecanismos empíricos (orden n y autocatalítico) y al mecanismo teórico no convencional (escisión aleatoria de cadenas). A la vista de estos resultados, pudo concluirse que el modelo cinético de orden n no es apropiado para representar la degradación térmica del polímero, ya que se visualizan importantes divergencias entre los valores teóricos y experimentales. Se llegó a la misma conclusión para el nanocompuesto. Estas curvas suministran una importante información acerca de los mecanismos más adecuados, aunque tal información es solo cualitativa.

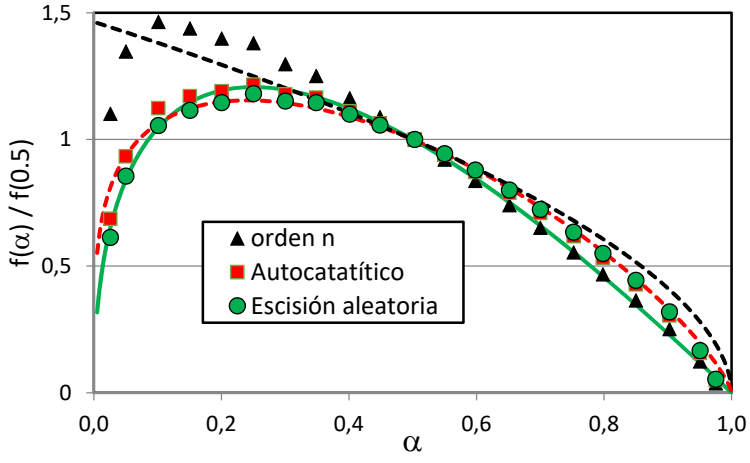


Fig. 6: Valores experimentales y teóricos de las funciones de la conversión estandarizadas, correspondientes a la degradación térmica del ácido poliláctico.

ISBN 978-607-8242-11-5

Con el fin de elucidar el modelo cinético más apropiado, es necesario desarrollar un procedimiento cuantitativo. Un método potencial para alcanzar tal fin es el cálculo del valor absoluto del error, definido de la siguiente forma:

$$\left|\Delta_{f(\alpha)/f(0,5)}\right| = \left|\left(\frac{f(\alpha)}{f(0.5)}\right)_{experimental} - \left(\frac{f(\alpha)}{f(0.5)}\right)_{theoretical}\right| \quad (5)$$

La figura 7 muestra el valor absoluto del error entre los valores experimentales y teóricos de f(α)/f(0.5) para los modelos de orden n, autocatalítico y de escisión aleatoria de cadenas, correspondiente a la degradación térmica del nanocompuesto. El mejor mecanismo (i.e. mínimo error) correspondió al modelo cinético autocatalítico.

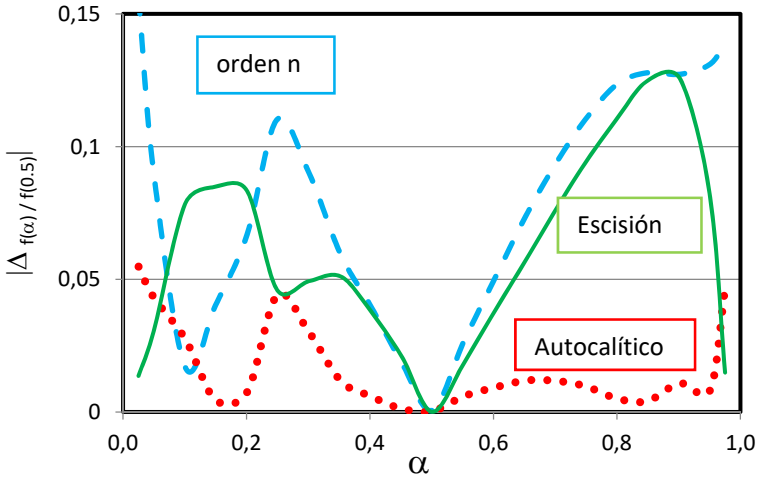


Fig. 7: Valores absolutos del error entre las funciones de conversión estandarizadas experimental y teórica, correspondientes a la degradación térmica del nanocompuesto, utilizando dos modelos cinéticos empíricos (orden n y autocatalítico) y un mecanismo teórico no convencional (escisión aleatoria).

Cuando se compararon los mecanismos R1, F1, D1 y escisión aleatoria, el mejor mecanismo correspondió al mecanismo F1. Al comparar los mecanismos R2, F2, D2 y escisión aleatoria, el mejor mecanismo correspondió a la escisión aleatoria. Cuando se compararon los mecanismos R3, F3, D3 y escisión aleatoria, el mejor mecanismo correspondió a la escisión aleatoria. Puesto que este procedimiento no permite discernir cuál es exactamente el mejor mecanismo, puede concluirse que se trata de un procedimiento semicuantitativo. Por esta razón, hemos propuesto un nuevo índice, el error medio integral (EMI), que tiene en cuenta el área media bajo la curva del error absoluto, y que se define a través de la siguiente ecuación:

$$EMI = \frac{\int_0^{\alpha}\left|\Delta_{f(\alpha)/f(0,5)}\right|d\alpha}{\int_0^{\alpha} d\alpha} \cdot 100 \quad (7)$$

La tabla 1 contienen los valores EMI para todos los mecanismos estudiados en este trabajo. De estos resultados, se concluyó que los tres mejores mecanismos para la degradación térmica del polímero fueron F1 (EMI = 2.0%), autocatalítico (EMI = 2.9%) y escisión aleatoria de cadenas (EMI = 4.2%), y para el nanocompuesto, autocatalítico (EMI = 1.4%), F1 (EMI = 1.9%) y R3 (EMI = 5.0%). Por otro lado, los peores mecanismos fueron D1, D2 y D3, con valores EMI del 22-104%. Además, R1, F2 y F3 no fueron tampoco mecanismos apropiados, con valores EMI comprendidos entre el 12% y el 159%. Por consiguiente, los mejores mecanismos reaccionales teóricos son F1 (convencional) y escisión aleatoria de cadenas (no convencional). Los valores de energías de activación calculados para el modelo autocatalítico (procedimiento experimental) y escisión aleatoria (mecanismo teórico) son razonablemente similares (203 y 193 kJ/mol para el polímero, y 228 y 216 kJ/mol para el nanocompuesto) y completamente diferentes de los valores obtenidos para los mecanismos F1 (290 kJ/mol para el polímero y 325 kJ/mol para el nanocompuesto) y R3 (258 kJ/mol para el polímero y 290 kJ/mol para el nanocompuesto). Por este motivo, es plausible concluir que el mejor mecanismo teórico para la degradación del PLA y de su nanocompuesto con nanoarcillas (fabricados por extrusión reactiva) es la escisión aleatoria de cadenas macromoleculares. Por otro lado, el mecanismo empírico más adecuado fue el autocatalítico.

ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Error medio integral (EMI) entre valores experimentales y teóricos de f(α)/f(0.5) para diferentes mecanismos reaccionales.

	Error Medio Integral, EMI (%)	
Mecanismo	PLA	Nanocompuesto
Orden n (empírico)	9.5	7.4
Autocatalítico (empírico)	2.9	1.4
Escisión aleatoria	4.2	6.3
R1	26.3	24.4
R2	10.6	8.6
R3	7.1	5.0
F1	2.0	1.9
F2	18.0	23.8
F3	84.5	122.2
D1	59.2	52.7
D2	59.4	45.9
D3	53.9	22.0

Con el fin de validar los valores de energías de activación evaluadas para la degradación térmica del polímero y de su nanocompuesto mediante escisión aleatoria de cadenas, debe emplearse la siguiente ecuación:

$$\alpha = \left[1 - exp\left[-\frac{A\,R\,T^2}{\beta\,E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\,exp\left(-\frac{E}{RT}\right)\right]\right]^2 \tag{8}$$

Al comparar los valores experimentales y teóricos del grado de conversión (α), puede aseverarse que el mecanismo teórico no convencional de escisión aleatoria de cadenas es totalmente apropiado para describir la degradación térmica del PLA, obtenido por extrusión reactiva, y de su nanocompuesto con nanoarcillas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han fabricado, mediante extrusión reactiva, láminas de 1 mm de espesor de ácido poliláctico y de su nanocompuesto con un 2.5% en masa de montmorillonita organomodificada. En este proceso de extrusión reactiva se ha utilizado un extensor de cadena, al 0.5% en masa, con el fin de mejorar las propiedades de estos materiales. La temperatura inicial de descomposición del PLA se incrementó de 328 a 338ºC al añadir nanopartículas de OMMT (i.e. 10ºC superior). Por consiguiente, la adición de nanopartículas mejoró claramente la estabilidad térmica de la matriz polimérica. Se ha aplicado la ecuación analítica general a diferentes modelos cinéticos: empíricos (orden n y autocatalítico), teóricos convencionales (R1, F1, D1, R2, F2, D2, R3, F3 y D3) y teórico no convencional (escisión aleatoria de cadenas macromoleculares). Además, se ha desarrollado un nuevo índice, basado en el valor absoluto del error medio integral entre los valores experimentales y teóricos de la función de la conversión estandarizada, f(α)/f(0.5). Este índice constituye un criterio cuantitativo para discernir cuál es el mejor mecanismo reaccional. El modelo cinético de escisión aleatoria de cadenas ha resultado ser el mejor mecanismo teórico para describir la descomposición térmica del PLA y de su nanocompuesto con OMMT, obtenidos por extrusión reactiva. Los valores de la energía de activación así calculados han sido de 193 y 216 kJ/mol para el polímero y su nanocompuesto, respectivamente (i.e. 12% superior para el nanocompuesto). También se ha demostrado que el modelo empírico autocatalítico es adecuado, con energías de activación de 203 y 228 kJ/mol para el polímero y su nanocompuesto, respectivamente. En consecuencia, la presencia de nanopartículas en el interior de la matriz polimérica ha ejercido un efecto protector contra la degradación térmica.

Agradecimiento

El ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España ha financiado este trabajo a través de los proyectos MAT2013-40730-P y MAT2016-80045-R (AEI/FEDER, UE).

 ISBN 978-607-8242-11-5

BIBLIOGRAFÍA

[1] M.C. Bruns, J.H. Koo, O.A. Ezekoye, Population-based models of thermoplastic degradation: Using optimization to determine model parameters, Polym. Degrad. Stab. 94(6) (2009) 1013-1022.

[2] G. Madras, B.J. McCoy, Distribution kinetics for polymer mixture degradation, Ind. Eng. Chem. Res. 38(2) (1999) 352-357.

[3] V. Mamleev, S. Bourbigot J. Yvon, Kinetic analysis of the thermal decomposition of cellulose: The main step of mass loss, J. Anal. Appl. Pyrol. 80(1) (2007) 151-165.

[4] O. Bianchi, J.D. Martins, R. Florio, R.V.B. Oliveira, Changes in activation energy and kinetic mechanism during EVA crosslinking, Polym. Test. 30(6) (2011) 616-624

[5] J.E.J. Staggs, Population balance models for the thermal degradation of PMMA, Polymer 48(13) (2007) 3868-3876.

[6] S. Vyazovkin, Model-free kinetics - Staying free of multiplying entities without necessity, J. Therm. Anal. Calorim. 83(1) (2006) 45-51.

[7] P. Paik, K.K. Kar, Thermal degradation kinetics and estimation of lifetime of polyethylene particles: Effects of particle size, Mater. Chem. Phys. 113(2-3) (2009) 953-961.

[8] F. Carrasco, P. Pagès, Thermal degradation and stability of epoxy nanocomposites: Influence of montmorillonite content and cure temperature, Polym. Degrad. Stab. 93(5) (2008) 1000-1007.

[9] C. Reverte, J.L. Dirion, M. Cabassud, Kinetic model identification and parameters estimation from TGA experiments, J. Anal. Appl. Pyrol. 79(1-2) (2007) 297-305.

[10] F. Carrasco, P. Pagès, J. Gámez-Pérez, O.O. Santana, M.Ll. Maspoch, Processing of poly(lactic acid): Characterization of Chemical Structure, Thermal Stability and Mechanical Properties, Polym. Degrad. Stab. 95(2) (2010) 116-125.

[11] P. Budrugeac, E. Segal, Application of isoconversional and multivariate non-linear regression methods for evaluation of the degradation mechanism and kinetic parameters of an epoxy resin, Polym. Degrad. Stab. 93(6) (2008) 1073-1080.

[12] F. Carrasco, O.O. Santana, J. Cailloux, M.Ll. Maspoch, Kinetics of the thermal degradation of poly(lactic acid) obtained by reactive extrusión: Influence of the addition of montmorillonite nanoparticles, Polym. Test. 48 (2015) 69-81.

[13] O. Bianchi, R.V.B. Oliveira, R. Florio, J.D.N. Martins, A.J. Zattera, L.B. Canto, Assessment of Avrami, Osawa and Avrami-Osawa equations for determination of EVA crosslinking kinetics from DSC measurement, Polym. Test. 27(6) (2008) 722-729.

[14] S. Vyazovkin, N. Sbirrazzuoli, Isoconversional kinetic analysis of thermally stimulated processes in polymers, Macromol. Rapid Comm. 27(18) (2006) 1515-1532.

[15] J. Pielichowski, J. Njuguna, Thermal Degradation of Polymeric Materials, Rapra Technology Ltd, Shawbury, 2005.

[16] P.E. Sánchez-Jiménez, L.A. Pérez-Maqueda, A. Perejón, J.M. Criado, Combined kinetic analysis of thermal degradation of polymeric materials under any thermal pathway, Polym. Degrad. Stab. 94(11) (2009) 2079-2085.

[17] Y. Xu, Y. Wang, T. Xu, J. Zhang, C. Liu, C. Shen, Crystallization kinetics and morphology of partially melted poly(lactic acid), Polym. Test. 37 (2015) 179-185

[18] L.A. Pérez-Maqueda, J.M. Criado, F.J. Gotor, J. Malek, Advantages of combined kinetic analysis of experimental data obtained under any heating profile, J. Phys. Chem. A 106(12) (2002) 2862-2868

[19] S.W. Bigger, M.J. Cran, M.A. Bohn, Novel theoretical and computer-assisted modeling of isothermal and non-isothermal depolymerization kinetics, Polym. Test. 44 (2015) 1-7.

 ISBN 978-607-8242-11-5

[20] L.A. Pérez-Maqueda, P.E. Sánchez-Jiménez, A. Perejón, C. García-Garrido, J.M. Criado, M. Benítez-Guerrero, Scission kinetic model for the prediction of polymer pyrolysis curves from chain structure, Polym. Test. 37 (2015) 1-5.

[21] F. Carrasco, The evaluation of kinetic parameters from thermogravimetric data: Comparison between established methods and the general analytical equation, Thermochim. Acta 213 (1993) 115-134.

[22] F. Carrasco, L.A. Pérez-Maqueda, P.E. Sánchez-Jiménez, A. Perejón, O.O. Santana, M.Ll. Maspoch, Enhanced general analytical equation for the kinetics of the thermal degradation of poly(lactic acid) driven by random scission, Polym. Test. 32 (2013) 937-945.

[23] J. Gámez-Pérez, L. Nascimento, J. J. Bou, E. Franco-Urquiza, O. O. Santana, F. Carrasco, M. Ll. Maspoch, Influence of crystallinity on the fracture toughness of poly(lactic acid)/montmorillonite nanocomposites prepared by twin-screw extrusion, J. Appl. Polym. Sci. 120(2) (2011) 896-905.

[24] J. Cailloux, O. O. Santana, E. Franco-Urquiza, J. J.Bou, F. Carrasco, J. Gámez-Pérez, and M. L. Maspoch. Sheets of branched poly(lactic acid) obtained by one-step reactive extrusion calendering process: Melt rheology analysis, eXPRESS Polym. Lett. 7(3) (2013) 304-318.

[25] Y. Doi, Y. Kanesawa, M. Kunioka, T. Saito, Biodegradation of microbial copolyesters: Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate), Macromolecules 1 (1990) 26–31.

[26] H. Yu, N. Huang, C. Wang, Z. Tang, Modeling of poly(L-lactide) thermal degradation: Theoretical prediction of molecular weight and polydispersity index, J. Appl. Polym. Sci. 11 (2003) 2557–2562.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Elaboración de heurística para la determinación de personal a domicilio en restaurante de comida rápida usando simulación

Diego E. Silva[1]
(1) Facultad de Ingeniería de Negocios, Escuela Superior de Economía y Negocios, La Libertad, El Salvador
E-mail: diego.esilva94@gmail.com

Resumen

La rapidez del servicio a domicilio es muy importante para la industria de la comida rápida, por lo que el dimensionamiento de una flota de unidades a domicilio es un factor clave para las operaciones. Se pretende desarrollar un modelo de simulación estocástica de fácil implementación y de bajo costo que permita determinar la cantidad de motociclistas necesarias para cubrir la demanda por hora en un restaurante de comida rápida. Se muestran los análisis de entrada y de salida para el modelo de simulación pertinente, así como una explicación detallada del algoritmo (y su programación en Excel VBA) que genera estas salidas. Se demuestra la capacidad de encontrar intervalos de confianza para el número esperado de motociclistas requeridos por cada hora con un nivel de precisión bastante aceptable, así como el número de réplicas necesarias para alcanzar este nivel.

Palabras clave: simulación de eventos discretos, dimensionamiento de flota, Excel VBA, heurística

Abstract

The speed of delivery services is of utmost importance for the fast food industry, which is why the determination of the fleet size of delivery units is key for everyday operations. A stochastic simulation model of simple and low-cost implementation is developed, which will determine the expected number of motorcyclists needed for covering the hourly demand in a fast food restaurant. The input and output analyses for the simulation model are presented, along with a detailed explanation of the algorithm (and its Excel VBA programming code) which generates the outputs. It is shown that the model can find confidence intervals for the expected number of required motorcyclists for each work hour with a very acceptable level of precision, along with the number of replications needed for such precision level.

Key words: discrete event simulation, fleet size determination, Excel VBA, heuristics

INTRODUCCIÓN

La calidad del servicio es de suma importancia para la industria de comida rápida. En ella influyen diversos factores como el sabor de los alimentos, su precio, la ubicación de las sucursales, la calidad del servicio de entrega a domicilio, etc. Por definición, la rapidez del servicio a domicilio es primordial entre estos factores, lo cual justifica la necesidad de un dimensionamiento de la flota de unidades a domicilio (motociclistas) que requerirá el restaurante. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un modelo de simulación estocástica que permita determinar la cantidad de motociclistas necesarios para la operación de un día con 15 intervalos de una hora (de 6:00 AM a 9:00 PM). Cada uno de estos intervalos j tendrá asociado un nivel de demanda, estimado por el usuario, y un correspondiente número de motociclistas Mot_j (Tabla 1). Como objetivo secundario se desea que su solución sea de bajo costo y de fácil replicabilidad.

Tabla 1: Tabla de demanda estimada y motociclistas a determinar para intervalos de tiempo de 1 hora.

Hora inicio	*Hora fin*	*Pedidos estimados*	*Motociclistas necesarios*
6:00 AM	7:00 AM	3	Mot_1
7:00 AM	8:00 AM	5	Mot_2
⋮	⋮	⋮	⋮
7:00 PM	8:00 PM	27	Mot_{14}
8:00 PM	9:00 PM	10	Mot_{15}

La simulación estocástica ha demostrado ser útil en diversas aplicaciones, e.g. apoyando la toma de decisiones en la administración de la ruta crítica de proyectos y en la estimación del tiempo requerido de las distintas actividades a realizar (Muñoz y Muñoz, 2010), en el análisis del impacto de la variación en la radiación solar en el funcionamiento de una planta termoeléctrica (Ponce y Valderrama, 2016), en el análisis del comportamiento de un sistema de arquitectura empresarial (Giraldo-García y Puerta-Ramírez, 2016) y la

 ISBN 978-607-8242-11-5

optimización del dimensionamiento de una flota de vehículos a utilizar en el proceso de abastecimiento y distribución de mercancías (Costa Salas y Castaño Pérez, 2015).

Debe aclararse que el modelo no es uno de pronóstico de demanda (los pedidos esperados deben ser estimados previamente por el dueño del proceso) ni un problema de ruta más corta. A lo largo del trabajo se expondrá la lógica tras el desarrollo del modelo de simulación mediante la abstracción del proceso real. Dicho modelo será parametrizado para otorgar resultados lo más apegados a la realidad posible, por lo que se dedica una sección al análisis estadístico de las entradas, la asignación de las distribuciones de probabilidad y la justificación de los supuestos tomados. Posterior a esto se describirá, de manera detallada, el algoritmo que genera la simulación (junto a su implementación en Excel VBA). Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos con el objetivo de ofrecer recomendaciones para su posterior puesta en la práctica.

METODOLOGÍA

Desarrollo del modelo

El proceso que sigue un pedido a domicilio puede resumirse en la secuencia: arribo del pedido → fase de producción → fase de despacho → fase de retorno (extendida en la figura 1). El arribo del pedido se refiere al momento en el que un pedido es creado junto con sus variables aleatorias: $HoraArribo$, $TipoProducto$ y $Sector$ (i.e. el lugar geográfico donde el cliente esperará el pedido). La fase de producción se refiere a la preparación en cocina del producto. Su variable relevante es el tiempo de producción ($t_{producción}$), el cual dependerá del $TipoProducto$. Esta fase cuenta con una capacidad K asociada a la cocina, i.e. la cantidad máxima de pedidos que pueden ser "producidos" de manera simultánea. Luego se tiene la fase de despacho, i.e. trasladar el pedido completado en la fase de producción hasta el cliente. Su variable relevante es el tiempo de despacho ($t_{despacho}$), el cual dependerá del $Sector$. Finalmente, la fase de retorno consiste en el traslado del motociclista desde el punto de entrega hasta regresar al restaurante, cerrando así el pedido. Su variable relevante es el tiempo de retorno ($t_{retorno}$), el cual, como se verá más adelante, dependerá de $t_{despacho}$.



Fig. 1: Proceso seguido por un pedido a domicilio

Tanto la fase de producción como la de despacho tienen asociados tiempos de espera previos a ingresar a ellas, ilustrados en la figura 1. Con t denotando tiempo, el tiempo total que le toma a un pedido cerrar puede expresarse mediante la ecuación (1):

$$t_{total} = t_{espera1} + t_{producción} + t_{espera2} + t_{despacho} + t_{retorno} \quad (1)$$

El $t_{espera1}$ se genera cuando se está utilizando el 100% de la capacidad de producción (número de pedidos en cocina = K), pues debe esperar a que se libere capacidad para comenzar producción. En caso contrario, $t_{espera1} = 0$. El $t_{espera2}$ funciona de manera más compleja. Cada sector de entrega tiene asignado un tiempo de garantía ($t_{garantía}$), es decir, el máximo tiempo que el cliente esperará por su pedido (normalmente 30 minutos, aunque se extiende a 45 minutos en algunos casos). La expresión (2) ilustra este concepto:

$$t_{total} - t_{retorno} \leq t_{garantía} \quad (2)$$

Si se asigna un pedido a un motociclista inmediatamente termina de producirse ($t_{espera2} = 0$), no se estaría tomando en cuenta una posible holgura en el cumplimiento de la expresión (2) y el número de motociclistas necesarios se incrementaría de manera innecesaria. La ecuación (3) provee un método para calcular este tiempo de holgura:

$$t_{holgura} = (HoraArribo + t_{garantía}) - (HoraFinPrdxn + \hat{t}_{despacho}) \quad (3)$$

Donde $HoraFinProdx = HoraArribo + t_{espera1} + t_{producción}$ y $\hat{t}_{despacho}$ es el tiempo de despacho esperado del $Sector$ con base en los datos históricos (lo que el restaurante espera tardarse en llegar hasta el cliente). La expresión anterior denota que el tiempo de holgura es la diferencia entre la hora límite de entrega ($HoraArribo + t_{garantía}$) y la hora estimada de entrega si se despacha el producto inmediatamente después de ser producido ($HoraFinPrdxn + \hat{t}_{despacho}$). Sin embargo, $\hat{t}_{despacho}$ es solo un estimador, y el $t_{despacho}$ real

 ISBN 978-607-8242-11-5

(simulado) puede ser mayor o menor, por lo que se agregará un margen de error ME (e.g. 5 minutos) global definido por el usuario, con el objetivo de mitigar el impacto en $t_{holgura}$ de la variación del $t_{despacho}$ real.

Con base en esta información, el tiempo de espera 2 para un pedido i ($t_{espera2,i}$) puede tomar cualquiera de tres valores, según la tabla 2.

Tabla 2: Valor de $t_{espera2}$ para un pedido i junto con el criterio para la asignación de su valor

Valor de $t_{espera2}$ para el pedido i	*Condición*
$t_{espera2,i} = 0$	$t_{holgura,i} \leq ME$ o no hay ningún motociclista fuera
$t_{espera2,i} = t_{holgura,i}$	$t_{holgura,i} > ME$ y ningún motociclista de los pedidos $1, \dots, i-1$ regresa en el intervalo de tiempo $[HoraFinProdxn_i, HoraFinProdxn_i + t_{holgura,i}]$
$t_{espera2,i} = \min(HoraRetorno)_1^{i-1} - HoraFinPrdxn_i$	$t_{holgura,i} > ME$ y existe por lo menos un motociclista que regresa en el intervalo de tiempo $[HoraFinProdxn_i, HoraFinProdxn_i + t_{holgura,i}]$, por lo que se toma la mínima $HoraRetorno$ de dichos motociclistas

La razón de que un pedido i tenga un tiempo de espera $t_{espera2,i}$ es para permitir que uno de los motociclistas que se encuentran fuera regrese y sea asignado al pedido i, y así disminuir la cantidad de motociclistas necesitados sin tener que romper con la garantía prometida al cliente.

Ahora que se tiene una descripción abstracta del proceso y de las principales variables de entrada, se procederá a una descripción de alto nivel del modelo. La idea principal consiste en simular la llegada de los pedidos i (cada uno con las variables anteriormente mencionadas) para cada intervalo de tiempo j y así determinar los motociclistas necesarios para cubrir con dichos pedidos. Cada uno de estos intervalos se comporta de manera distinta en base a sus pedidos esperados. En forma de ejemplo para el resto del trabajo, se utilizarán los pedidos estimados de la tabla 3, la cual es una extensión de la Tabla 1. Estos son datos de demanda estimada.

Tabla 3: Pedidos estimados para un día completo

Hora inicio	*Hora fin*	*Pedidos esperados*
6:00 AM	7:00 AM	3
7:00 AM	8:00 AM	5
8:00 AM	9:00 AM	8
9:00 AM	10:00 AM	8
10:00 AM	11:00 AM	11
11:00 AM	12:00 PM	47
12:00 PM	1:00 PM	54
1:00 PM	2:00 PM	30
2:00 PM	3:00 PM	13
3:00 PM	4:00 PM	8
4:00 PM	5:00 PM	9
5:00 PM	6:00 PM	19
6:00 PM	7:00 PM	35
7:00 PM	8:00 PM	27
8:00 PM	9:00 PM	10

Con esto se tiene las variables de entrada necesarias para el modelo. Ahora se explicará el cálculo de la variable respuesta (*motociclistas necesarios para el j-ésimo intervalo* o Mot_j). Cada intervalo se simula por separado y en orden, para asegurar que pedidos generados en intervalos anteriores y que aún no han sido cerrados se mantengan para el cálculo de motociclistas requeridos. Es decir, si al inicio del intervalo de las 10:00 AM aún existen pedidos generados en el intervalo de las 9:00 AM que no han sido cerrados (i.e. el motociclista no ha retornado) estos deben de tomarse en cuenta en el nuevo intervalo como parte de los motociclistas necesarios. Un motociclista es asignado a un pedido i en el momento $HoraSalida_i = HoraFinPrdxn_i + t_{espera2,i}$. Este proceso se repite para cada pedido i despachado y se define la variable

 ISBN 978-607-8242-11-5

$MotF_i$=número de motociclistas fuera del restaurante luego de despachar al motociclista del pedido i. Por tanto, se tiene que $Mot_j = \max(MotF_i)$ para todo pedido i despachado en el intervalo j.

Sin embargo, la variable Mot_j puede ser engañosa. En la realidad, un motociclista puede llevar más de un pedido en su caja, es decir un despacho conjunto. El que dos pedidos se despachen de esta manera depende de la proximidad (en tiempo) de sus $HoraFinPrdxn$, pero principalmente de la cercanía geográfica de sus sectores de entrega. Dicho análisis geográfico de rutas se encuentra fuera del alcance de este trabajo, pero es posible hacer un ajuste a Mot_j mediante una constante de ajuste c, ilustrado en (4)

$$MotReal_j = c \cdot Mot_j \quad 0 < c < 1 \tag{4}$$

Donde $c = 1 - \%PedidosConjuntos$, el cual es un dato obtenido de observaciones históricas. Si se tiene 100 pedidos por despachar y $\%PedidosConjuntos = 20\%$, entonces 20 pedidos serán despachados junto a otros pedidos, disminuyendo la cantidad de despacho (y de motociclistas necesarios) en un 20%. Por tanto, $MotReal_j$ será la variable de respuesta final.

Análisis de entradas y supuestos

Para este trabajo se utilizará un enfoque clásico para el análisis de las entradas, el cual consiste en identificar una familia de distribuciones que se ajuste a nuestras necesidades, bajo la suposición de que el componente aleatorio consiste de observaciones i.i.d. de cierta distribución de probabilidad (Muñoz y Villafuerte, 2015). Existen varias metodologías propuestas para dicho procedimiento (Banks et. al., 2005; Costa Salas y Castaño Pérez, 2015), las cuales serán condensadas en los siguientes pasos:

1. Definición de objetivos, alcance y requerimientos en base al modelo propuesto (cubierto en la sección anterior)
2. Recolección de datos del sistema real de interés. En caso de no estar disponible, se usará la opinión de expertos y el conocimiento del proceso para hacer estimaciones educadas
3. Identificar distribuciones probabilísticas que representen los procesos de entrada
4. Evaluar la distribución escogida y los parámetros asociados por bondad de ajuste

Gran parte del primer paso fue cubierto en el desarrollo del modelo. La recolección de los datos se hizo mediante la obtención de los datos históricos de todos los pedidos recibidos para el año 2016 y principios del 2017 en una sucursal de una cadena de restaurantes de comida rápida, la cual permanecerá anónima por motivos empresariales. De esta base de datos se extraen los tiempos de arribo de pedidos, proporción de pedidos por sector y por tipo de producto, tiempos de producción y tiempos de despacho. Sin embargo, los tiempos de producción de la base se encuentran sesgados, pues estos incluyen el $t_{espera2}$ (aquí la producción termina hasta que el pedido es asignado a un motociclista). Adicionalmente, esta base no contiene los tiempos de retorno (el pedido se cierra una vez llega al cliente, y no se almacena el tiempo que le toma al motociclista en regresar al local).

Esto abre paso para la identificación y evaluación de distribuciones de probabilidad. Se comenzó con el *tiempo entre arribos*. La llegada de pedidos no es igual entre día y hora, por lo que se separó toda la data (71,447 pedidos) según estos dos factores. Luego cada subgrupo fue analizado utilizando la herramienta de identificación de distribuciones de Minitab 17. Dicho software utiliza la prueba de Anderson-Darling para 16 distribuciones, donde la hipótesis nula es que los datos siguen la respectiva distribución de probabilidad. Para cada subgrupo se eligieron las 3 distribuciones con mejor ajuste (mayor valor p y menor estadístico de AD), resultando en la tabla 4. Gran parte de los datos, sin embargo, no encontraron ningún ajuste a ninguna distribución (valor p menor a 0.05), denotados por un asterisco en su apartado. Específicamente, de los 71,447 pedidos, únicamente 10,996 pertenecen a intervalos con ajuste a alguna de las distribuciones (15%). De este 15%, 71% tuvieron ajuste a la distribución Exponencial, 70% a la Weibull, 66% a la Gamma y 2% a la Weibull de 3 parámetros (3Weibull en la tabla 4). Debido a lo anterior, la distribución escogida fue la distribución exponencial.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 4: Ajuste de tiempos entre arribos a distintas distribuciones. Asterisco significa falta de ajuste.

	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM	3:00 PM	4:00 PM	5:00 PM	6:00 PM	7:00 PM	8:00 PM	9:00 PM
Lunes	Exponential Weibull Gamma	Weibull Gamma Exponential	Exponential Gamma Weibull	Weibull Gamma	*	*	*	Exponential Weibull Gamma	Exponential Weibull Gamma	*	*	*	*	Exponential	Weibull Gamma Exponential
Martes	3Weibull	3Weibull	Gamma	Gamma Weibull	*	*	*	Exponential Weibull Gamma	*	Weibull Gamma	*	*	*	Exponential Gamma Weibull	Weibull Gamma Exponential
Miércoles	Exponential Weibull Gamma	Gamma Weibull	Exponential Weibull Gamma	Gamma	*	*	*	Gamma Weibull	Gamma Weibull Exponential	Weibull Gamma	*	*	*	Exponential Gamma Weibull	Exponential Weibull Gamma
Jueves	Exponential	Weibull Gamma	Weibull	Weibull	*	*	*	Gamma	Weibull	Exponential Weibull Gamma	*	*	*	Exponential Weibull Gamma	*
Viernes	Exponential Weibull Gamma	Exponential Weibull Gamma	Weibull Gamma	Weibull Gamma	*	*	*	*	Exponential Weibull Gamma	Weibull	*	*	*	*	Exponential Weibull Gamma
Sábado	Exponential Weibull Gamma	Exponential Weibull	Exponential Weibull Gamma	Exponential Weibull Gamma	*	*	*	*	Exponential	Exponential Weibull Gamma	*	*	*	Exponential	Exponential Weibull Gamma
Domingo	Exponential Weibull Gamma	*	Exponential	*	*	*	*	*	*	Exponential Weibull Gamma	*	*	*	Exponential	Weibull Gamma

Nota: para el intervalo de 6:00 AM a 7:00 AM no se tienen suficientes datos en ninguno de los 7 días, por lo que no aplica para esta prueba.

Se pasa ahora a la distribución de los *tipos de producto*. Para este caso existe dos tipos de productos: el producto A y el producto B. Al ser una variable categórica, se le asignó una distribución discreta con dos categorías cuyos parámetros serán las proporciones de las veces que se pidió el producto A y las del producto B.

Tabla 5: Distribución del tipo de producto

Producto	*Proporción (%)*
A	82%
B	18%

Similarmente se trabajó el *sector de entrega* en base a las proporciones de cada uno. El restaurante cubre un total de 400 sectores, por lo que la distribución tendrá 400 categorías. Al haber tantos sectores, la proporción individual es bastante pequeña (<1% para algunos) pero representativa.

El *tiempo de producción*, como se discutió antes, se encuentra sesgado en la base de datos pues contiene tiempos de espera. En otras palabras, no se tienen observaciones confiables por lo que se utilizará la distribución triangular con parámetros establecidos con base en la opinión de los dueños del proceso (Law, 2014; Muñoz y Villafuerte, 2015) obteniendo así la siguiente tabla paramétrica:

Tabla 6: Parametrización del tiempo de producción (en minutos) para distribución triangular

Producto	*Mínimo*	*Moda*	*Máximo*
A	0:05	0:10	0:12
B	0:10	0:12	0:17

El *tiempo de despacho* resulta difícil modelar de manera estocástica pues los datos contienen numerosos errores en la toma de tiempos. Existen tiempos iguales a cero, tiempos demasiado largos e incluso tiempos negativos, los cuales terminan sesgando el ajuste de alguna distribución. Adicionalmente, la data tiene alta variación debido a que los tiempos dependen del nivel de tráfico y del sector al que se dirigen. Por tanto, se decidió asignar una distribución triangular a estos tiempos. Sin embargo, no puede utilizarse los tiempos mínimos y máximos de los datos pues muchos son erróneos e incluso imposibles. Afortunadamente, estos datos corresponden a menos del 5% de los datos aproximadamente, por lo que, para cada sector, el parámetro mínimo será el percentil 5 de sus datos, el parámetro máximo será el percentil 95 y la moda será representada por la media, pues se trata de datos continuos.

Para el *tiempo de retorno* no se encuentra disponible ninguna observación. Sin embargo, los dueños del proceso tienen una regla empírica basada en la observación: $t_{retorno} < t_{despacho}$ debido a que, normalmente, los motociclistas tienden a regresar a una mayor velocidad pues ya no llevan pedidos en sus

ISBN 978-607-8242-11-5

cajas y porque se ahorran el tiempo de buscar el lugar específico donde se encuentra el cliente. Más específicamente se tiene $t_{retorno} = Ret \cdot t_{despacho}$, donde Ret es una constante de ajuste. Los dueños del proceso toman su valor como $Ret = 80\%$.

Finalmente, la constante c discutida en el desarrollo del modelo es tomada como 70% pues un 30% de los pedidos son despachados de manera conjunta. Esta información no viene disponible en la base de datos y es únicamente un estimado proporcionado por los dueños del proceso.

Algoritmo

Antes de pasar a la descripción detallada del algoritmo, es necesario discutir uno de los aspectos más importantes en simulación: la generación de variables aleatorias. Específicamente, se deben generar tres tipos de variables aleatorias: exponencial, triangular y discreta (categórica). Se usará el método de la inversa para las tres por ser el más eficiente en cuanto a su computación (Elizandro y Taha, 2007), pero para ello es necesario generar números aleatorios U, uniformemente distribuidos en [0,1].

Existen tres métodos para generar números aleatorios uniformes en Excel: la función RAND(), el generador contenido en el Statistical Toolpak add-in y la función de VBA `rnd`. Hasta Excel 2007, estos generadores han tenido una mala implementación (McCullough y Heiser, 2008). Sin embargo, a partir de la versión del 2010, Microsoft ha mejorado significativamente el generador usado por la función RAND() (Melard, 2011), pero a pesar de su fácil implementación sigue siendo considerado inferior a otros generadores de mejor calidad. Para el caso en cuestión, se decidió utilizar el generador de Mersenne twister por ser altamente eficiente y tener un largo periodo de $2^{19937} - 1$ (Matsumoto y Nishimura, 1998). Se utilizó la implementación del generador que está en la librerá llamada *GenVarAlea* y se puede llamar como en la interfaz en Excel VBA *(Random Number Generators)* elaborada por el Dr. David Muñoz Negrón y recuperada de http://ciep.itam.mx/~davidm/sofdop.htm.

Para el algoritmo en sí se utilizarán algunas convenciones para el nombramiento de variables: todas tendrán un prefijo en base a su tipo. Por ejemplo, `intIntervalos` es una variable de tipo `Integer` (entera). Muchas de las inicializaciones de variables se hacen en base a valores que se encuentran en el libro de trabajo, pues la idea es que los parámetros puedan ser fácilmente modificados sin entrar en el editor. A continuación, se presenta una descripción general del algoritmo y un pseudocódigo (VBA) de alto nivel de este. Nota: las variables que no cuentan con un prefijo son estrictamente pseudocódigo, para simplificar su lectura.

Pseudocódigo:

```
'Funciones generadoras de números aleatorios:
Declare Function ExpoMT Lib "GenVarAlea.dll" (b As Double) As Double
Declare Function RanMT Lib "GenVarAlea.dll" () As Double
Declare Function TriaMT Lib "GenVarAlea.dll" (min As Double,max As Double,c As Double) _
As Double
'Donde c = (moda-min)/(max-min)

'Inicialización de variables
intPeriodos = 15 'Número de periodos o intervalos, de 6:00 AM a 9:00 PM
intCapacidad = 8 'Número de pedidos que pueden ser producidos de manera simultanea
intPedido = 0 'Contador para pedidos generados
dblRet = 0.8 'Variable double, proporción de tiempos de retorno y tiempos despacho
intReplicas = 10 'Número de réplicas para el experimento
dblME = 5 minutos 'Margen de Error
dblConjuntas = 0.7 'Constante C, es igual a 1-%PedidosConjuntos

'Generación de pedidos
For intReplica = 1 To intReplicas
    For intPeriod = 1 To intPeriodos
        intLambda = Pedidos estimados para el periodo actual
        varFinPeriodo = Hora final para el periodo actual

        Do While True
            'Para cada pedido
            Arribo = [Arribo de (intPedido-1)] + ExpoMT(1/intLambda)
            If Arribo de intPedido < varFinPeriodo Then
                intPedido = intPedido + 1
            Else
                Exit Do
```


ISBN 978-607-8242-11-5

```
            End If

            'Producto
            Producto = VLOOKUP(RanMT, TablaProbAcumProductos, 2, True)
            TProduccion = TriaMT(MinProducto, MaxProducto, c)

            'Sector
            Sector = VLOOKUP(RanMT, TablaProbAcumSectores, 2, True)
            TDespacho = TriaMT(Percentil5, Percentil95, c)
            TGarantia = VLOOKUP(Sector, TablaGarantiasPorSector, 2, False)
            TDespachoHistorico = VLOOKUP(Sector, TablaTiemposHistoricos, _
            2, False)

            'Pedidos en cocina (chequeo de capacidad)
            intCocina = Número de pedidos cuya HoraFinPrdxn >= Arribo
            If intCocina >= intCapacidad Then
                For j=1 To intPedido-1
                    If Pedido en producción Then
                        Añadir HoraFinPrdxn a arreglo PedidosEnProdxn()
                    End If
                Next j
                HoraInicioPrdxn = Min(PedidosEnProdxn())
            Else
                HoraInicioPrdxn = Arribo
            End If
            HoraFinPrdxn = HoraInicioPrdxn + TProduccion

            'Holgura
            dblHolgura = (Arribo+TGarantia)-(HoraFinPrdxn+TDespachoHistorico)
            If dblHolgura <= dblME Then
                HoraSalida = HoraFinPrdxn
            Else
                For j=1 To intPedido-1
                    If Pedido en despacho Then
                        Añadir HoraRetorno a arreglo PedidosEnDespacho()
                    End If
                Next j
                HoraSalida = Min(PedidosEnDespacho())
            End If

            'Horas
            HoraEntrega = HoraSalida + TDespacho
            HoraRetorno = HoraEntrega + dblRet * TDespacho
        Loop

        'Cálculo de motociclistas
        For intPedido = 1 To UltimoPedido
            'Ordenados por HoraSalida, ascendiente
            If intPedido = 1 Then
                intMoto(intPedido) = 1
            ElseIf HoraSalida <= varFinPeriodo Then
                intMoto(intPedido) = COUNTIF(Pedidos anteriores, con HoraRetorno _
                > HoraSalida(intPedido)) + 1
            Else
                intMoto(intPedido) = intMoto(intPedido-1)
            End If
        Next intPedido
        MotosNecesarias = Max(intMoto()) 'Variable Necesaria
        MotosReals = dblConjuntas * MotosNecesarias 'Respuesta por periodoo
    Next intPeriod
Next intReplica
```

Una breve explicación del algoritmo: Para determinar la hora de `Arribo` de cada pedido, se genera exponencialmente un tiempo entre arribos sumado al arribo del pedido anterior hasta que el `Arribo` sea mayor que la hora en que finaliza este intervalo (condición de salida del bucle). Luego se determinan las variables de cada pedido en base a las distribuciones antes mencionadas y usando el generador RanMT (MT de Mersenne twister) y buscando este valor en tablas de probabilidades acumuladas (usando la función VLOOKUP()). Finalmente, se ordenan todos los pedidos del intervalo en base a la `HoraDespacho` y se determinan los motociclistas necesarios en cada pedido (`intMoto`) al contar todos los motociclistas que se

ISBN 978-607-8242-11-5

encuentran en despacho y sumándole 1 a esa cantidad. Para determinar Mot_j se encuentra el máximo de los `intMoto`. Nota importante: al pasar de un intervalo a otro se eliminan todos los pedidos que han sido cerrados, y se mantienen los pedidos que aún no han sido cerrados, para que sean tomados en cuenta al calcular los `intMoto` del siguiente intervalo.

Una vez calculados los motociclistas necesarios (sacando el máximo de todos los `intMoto` para cada intervalo), estos son ajustados por la variable `dblConjuntas` y almacenados en una tabla que contiene las respuestas de todas las réplicas. Posteriormente, se encuentran los resultados promedios de todas las réplicas y se presentan en forma de intervalo de confianza.

RESULTADOS

Análisis de salidas

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para un experimento de 10 réplicas. Adicionalmente, se usa un 95% de confianza para calcular los intervalos de confianza para cada periodo, correspondientes a la distribución t de Student. Los datos de motociclistas se presentan sin decimales y aproximados al entero más cercano por ser una variable de naturaleza entera.

Tabla 7: Resultados obtenidos en base a 10 réplicas

Entradas			*Salidas (motociclistas)*			
Hora inicio	*Hora fin*	*Pedidos esperados*	*Lím Inf*	*Estimado promedio*	*Lím Sup*	*Ancho Medio*
6:00 AM	*7:00 AM*	3	1	2	2	1.0
7:00 AM	*8:00 AM*	5	1	2	3	0.8
8:00 AM	*9:00 AM*	8	1	2	3	1.0
9:00 AM	*10:00 AM*	8	2	3	3	0.6
10:00 AM	*11:00 AM*	11	3	4	5	1.1
11:00 AM	*12:00 PM*	47	10	13	15	2.4
12:00 PM	*1:00 PM*	54	14	16	18	2.2
1:00 PM	*2:00 PM*	30	11	12	14	1.7
2:00 PM	*3:00 PM*	13	6	8	9	1.5
3:00 PM	*4:00 PM*	8	3	4	5	1.0
4:00 PM	*5:00 PM*	9	2	3	4	0.8
5:00 PM	*6:00 PM*	19	5	6	7	1.2
6:00 PM	*7:00 PM*	35	8	10	11	1.3
7:00 PM	*8:00 PM*	27	8	10	12	1.8
8:00 PM	*9:00 PM*	10	5	7	9	1.6

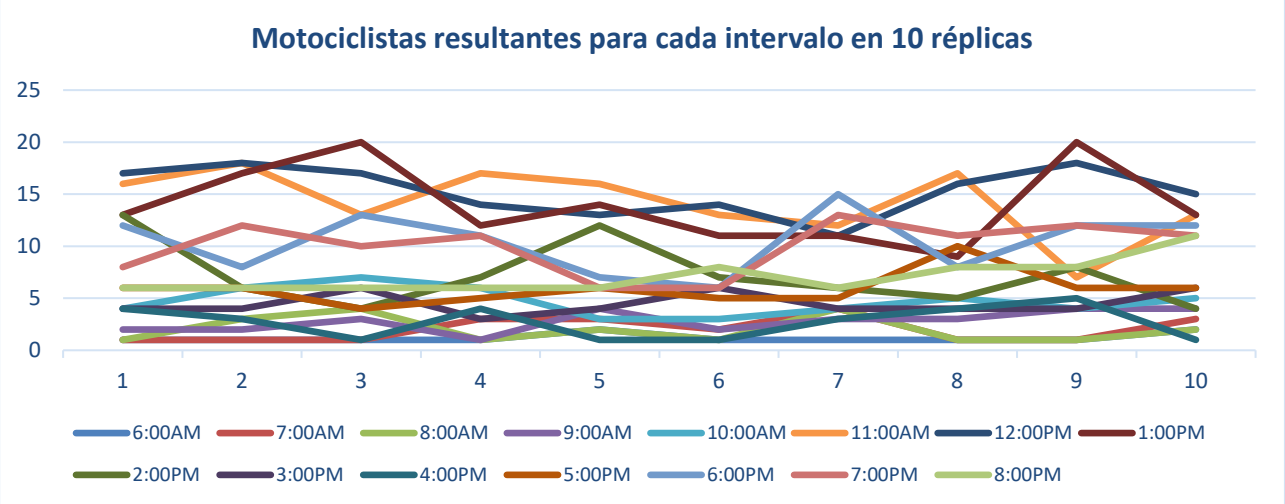


Fig. 2: Ilustración de los resultados de las 10 réplicas

En la figura 2 se observa que los resultados tienen relativamente poca variación a lo largo de las 10 réplicas. El ancho medio máximo de todos los intervalos es de 2.4 motociclistas para el intervalo de las 11:00 AM –

ISBN 978-607-8242-11-5

12:00 PM. Si se desea una precisión (ancho medio) más específica ϵ, puede utilizarse la fórmula de aproximación de k réplicas (Banks, 2005):

$$k \geq \left(\frac{Z_{1-\alpha/2}s}{\epsilon}\right)^2 \quad (5)$$

Donde $Z_{1-\alpha/2}$ denota el valor para la distribución normal y s es la desviación estándar muestral. En este caso, k sería el mínimo número (entero) de réplicas necesarias para cumplir con la desigualdad. Tomando $\epsilon = 1$ motociclista, se encuentra que el mínimo número de réplicas necesarias para obtener los resultados con un ancho medio menor o igual a 1 motociclista es *45 réplicas.* Los resultados de este experimento se muestran en la Tabla 8. Notar que efectivamente se ha logrado la precisión deseada.

Tabla 8: Resultados de experimento con 45 réplicas (ancho medio máximo de 1 motociclista)

Entradas			*Salidas (motociclistas)*		
Hora inicio	*Hora fin*	*Pedidos esperados*	*Lím Inf*	*Estimado promedio*	*Lím Sup*
6:00 AM	*7:00 AM*	3	1	1	1
7:00 AM	*8:00 AM*	5	1	2	2
8:00 AM	*9:00 AM*	8	2	3	3
9:00 AM	*10:00 AM*	8	3	3	3
10:00 AM	*11:00 AM*	11	4	4	4
11:00 AM	*12:00 PM*	47	12	13	14
12:00 PM	*1:00 PM*	54	14	15	15
1:00 PM	*2:00 PM*	30	12	13	14
2:00 PM	*3:00 PM*	13	7	7	8
3:00 PM	*4:00 PM*	8	4	4	4
4:00 PM	*5:00 PM*	9	3	3	3
5:00 PM	*6:00 PM*	19	6	7	7
6:00 PM	*7:00 PM*	35	9	10	11
7:00 PM	*8:00 PM*	27	9	10	11
8:00 PM	*9:00 PM*	10	7	7	8

CONCLUSIONES

Se presentó un problema de dimensionamiento de flota de motociclistas para un restaurante de comida rápida y se desarrolló el modelo de simulación estocástica como solución propuesta al problema. Dentro del desarrollo del modelo se hizo una descripción del proceso que siguen cada uno de los pedidos a domicilio, una breve discusión de ciertos detalles importantes del modelo y la determinación de las variables de interés. Posteriormente se procedió a realizar un análisis de las entradas del modelo, asignando distribuciones de probabilidad a las variables aleatorias mediante bondad de ajuste cuando era posible y utilizando el criterio de los dueños del proceso cuando no. Luego se pasó a la descripción del algoritmo que genera las salidas del modelo, describiendo el generador de números aleatorios y la implementación del algoritmo en el lenguaje de VBA para Excel para finalmente presentar los resultados y, mediante un análisis de la salida, otorgar la precisión deseada en las respuestas.

Se presentó una solución al problema propuesto y se demostró adicionalmente que puede realizarse su implementación a bajo costo, pues se asume que la mayoría de negocios ya poseen el software de Microsoft Excel (el cual incluye la funcionalidad de macros de VBA), y existen alternativas gratuitas para los programas de ajuste de distribuciones, por lo que el costo marginal radicaría principalmente en las horas hombre necesarias para su adecuación e implementación.

La dirección natural para una investigación posterior a este trabajo radica en la estandarización de los procesos del negocio para que un análisis más extenso y completo de los datos históricos sea posible, y para que se disminuya el sesgo contenido en estos. Se recalca la importancia de almacenar todas las mediciones posibles, como los tiempos de retorno y despachos conjuntos, para disminuir el número de supuestos y se pueda trabajar con datos reales. Adicionalmente podría implementarse un módulo de ruta más corta a este modelo, incluyendo distancias y estimaciones de niveles de tráfico, con el objetivo de mejorar la estimación de los tiempos de despacho.

ISBN 978-607-8242-11-5

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Sven Guzmán Alvarado por la oportunidad de trabajar en este proyecto. También al Dr. David Muñoz Negrón por su guía en el desarrollo de este artículo, así como permitir el uso de su librería del Mersenne twister. A Danilo Ortiz, por sugerir el uso de la holgura en el despacho. A Ronald Ventura, Raúl Solís, William Cerón, Roberto Cerrato y Diego Fuentes por el mapeo y esclarecimiento del proceso de entrega.

REFERENCIAS

Banks, J., Carson, J. S., II, Nelson, B. L., & Nicol, D. M. *"Discrete-event system simulation"*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall (2005)

Costa Salas, Yasel José, & Castaño Pérez, Néstor Jaime. *"Simulación y optimización para dimensionar la flota de vehículos en operaciones logísticas de abastecimiento-distribución".* Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 23(3), 372-382 3305 (2015)

Elizandro, D., & Taha, H. "*Simulation of Industrial Systems: Discrete Event Simulation Using Excel/VBA"*. Auerbach Publications. (2007)

Escobar, Diego A, Tapasco, Omar A, & Giraldo, Jaime A. *"Medición de Desempeño del Sistema de Transporte Cable Aéreo de la Ciudad de Manizales en Colombia, usando Tres Enfoques: Analítico, Simulado y de Accesibilidad Urbana."* Información tecnológica, 26(6), 199-210. (2015)

Law, A. M., & Kelton, W. D. *"Simulation Modeling and Analysis"*. (2014)

Matsumoto, M. & Nishimura, T. *"Mersenne twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator".* ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), 8(1), 3-30. (1998)

McCullough, B., & Heiser, D. *"On the accuracy of statistical procedures in Microsoft Excel 2007"*. Computational Statistics and Data Analysis, 52(10), 4570–4578. (2008)

Mélard, G. *"On the accuracy of statistical procedures in Microsoft Excel 2010".* Computational Statistics and Data Analysis, 29(5), 1095-1128. (2011)

Muñoz, David F, & Muñoz, Diego F. *"Planeación y Control de Proyectos con Diferentes Tipos de Precedencias Utilizando Simulación Estocástica."* Información tecnológica, 21(4), 25-33. (2010)

Muñoz, D. & Villafuerte, D. *"Análisis de la Entrada en Simulación Estocástica"*. Información tecnológica, 26(1), 13-22. (2015)

Ponce, Carolina V. & Valderrama, José O. *"Análisis de la Influencia de la Radiación Solar en una Planta de Ciclo Combinado con Colectores Solares Integrados mediante Simulación"*. Información tecnológica, 27(3), 151-160 (2016)

Puerta-Ramírez, Jorge E, & Giraldo-García, Jaime A. *"Dominio de Arquitectura Empresarial, Armonizando la Simulación de Procesos y la Metodología de Desarrollo de Arquitectura (ADM)"*. Información tecnológica, 27(6), 19-30 (2016)

Vanalle, Rosangela M, Lucato, Wagner C, Vieira Júnior, Milton, & D. Sato, Ivone. *"Uso de la Simulación Monte Carlo para la Toma de Decisiones en una Línea de Montaje de una Fábrica".* Información tecnológica, 23(4), 33-44 (2012)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Automatización de reportes gerenciales e inteligencia de negocios utilizando Excel VBA: un caso de estudio

Diego Silva[1] y Mariana Zelaya[1]
(1) Ingeniería de Negocios, Escuela Superior de Economía y Negocios, Santa Tecla, La Libertad, El Salvador
Email: diego.esilva94@gmail.com, mariana.zelaya95@gmail.com

Resumen

Este artículo tiene como objetivo presentar una herramienta automatizada de reportería e Inteligencia de Negocios con un enfoque orientado a metas. Esta fue desarrollada para la empresa Excel Automotriz con el fin de agilizar el seguimiento de sus principales KPI y la toma de decisiones a nivel táctico y operativo. La metodología del proyecto consistió en reunirse con los decisores (futuros usuarios de la herramienta) de las distintas áreas involucradas para identificar y listar los requerimientos más importantes. Luego se hizo un análisis de la información disponible, encontrando limitantes y fortalezas para luego comenzar con el diseño de la herramienta, incluyendo todas las tablas y gráficos requeridos por los decisores. La herramienta resultante permitió monitorear las operaciones de la empresa a nivel nacional de manera automática, teniendo beneficios de ahorro de tiempo, mejor flujo de información e incremento en las ventas.

Palabras clave: Inteligencia de Negocios, automatización de procesos, KPI, reportería, Excel VBA

Automation of management reports and business intelligence using VBA Excel: a case study

Abstract

This article aims to present an automated reporting and Business Intelligence tool with a goal-oriented approach. This was developed for the company Excel Automotriz to streamline the monitoring of its main KPI and the decision making at a tactical and operational level. The methodology of the project consisted of interviewing the decision makers (end users of the tool) of the different areas involved to identify and list the most important requirements. Then an analysis of the available information was made, finding limitations and strengths, to start developing the design of the tool, including all the reports required by the decision makers. The resulting tool made it possible to monitor the operations of the company at a national level in an automated way, having benefits of time saved, better information flow and increased sales.

Key words: Business Intelligence, process automation, KPI, reporting, Excel VBA

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las actividades de seguimiento a los resultados obtenidos son muy importantes para las empresas modernas. Permiten identificar fortalezas y debilidades, y marcan el camino a seguir a futuro. Existen muchas empresas que poseen grandes cantidades de datos, pero carecen de herramientas eficientes de inteligencia de negocios con las que puedan facilitar y agilizar este seguimiento. En el caso de la empresa salvadoreña distribuidora de automóviles Excel Automotriz, específicamente en su división de Repuestos Didea que actualmente cuenta con 45 salas de venta, ya se cuenta con un sistema de información propio, llamado GRD. Este contiene todas las transacciones y movimientos internos a nivel nacional, e incluso tiene herramientas de reportería ya incorporadas. Estas, sin embargo, no van al ritmo que se necesita con los proyectos tácticos y operativos, por lo que los tomadores de decisiones han tenido que trabajar los reportes que necesitan manualmente, a base de consultas SQL y tablas dinámicas de Excel. Estos reportes toman tiempo y no todos los tomadores de decisiones poseen habilidades de SQL, por lo que una alternativa era necesaria. Este trabajo tiene como objetivo presentar el desarrollo de una herramienta automatizada que permita generar los reportes más importantes de dos de los departamentos de Didea: el área de ventas y de logística, con el propósito de apoyar a la toma de decisiones a un nivel táctico y operativo.

Antes del inicio del proyecto, se tomó en consideración algunas alternativas. La primera fue la implementación de la reportería adicional requerida al sistema GRD. Esta fue descartada al realizarse que dicha implementación podría tomar aproximadamente un año de trabajo y un alto costo. También se consideró la opción de capacitar al personal en el uso de SQL Server, sin embargo, esta solución implicaría nuevamente un alto costo y una larga inversión de tiempo, y aumentaría de manera dramática el riesgo de errores en las consultas a la base de datos. La solución más práctica era la de desarrollar una herramienta automatizada que apoyara a GRD y que pueda conectarse directamente a la base de datos para que las consultas SQL sean también automatizadas. Para este proyecto de 3 meses de duración, se trabajará conectando a Microsoft Excel con el servidor de consultas, y se utilizará el lenguaje de Visual Basic for Applications (VBA) para la automatización de las consultas y la generación de los reportes.

La inteligencia de Negocios (BI) es un acercamiento estratégico para orientar sistemáticamente, rastrear, comunicar y transformar puntos débiles relevantes en información útil sobre la cual se basa la toma de decisiones (Rouibah & Ould-ali, 2002), por otra parte ayuda a automatizar y a hacer más eficientes los procesos de una empresa. La automatización de procesos consiste en la incorporación al mismo de un conjunto de elementos y dispositivos tecnológicos que aseguren su control y buen comportamiento (Moreno, 1999). La ingeniería de requerimientos sirve como una base sólida en el proceso de desarrollo de software (Chaves, 2005), por lo que la obtención de estos datos debe de ser lo primero que se realice al momento de crear una herramienta para la toma de decisiones.

En la siguiente sección se expondrá la metodología utilizada para crear la herramienta, expuesta de manera general para luego adentrarse en los requerimientos y desarrollos de las áreas de ventas y logística. Para ejemplificar algunos requerimientos, se mostrarán los resultados finales de estos a través de capturas de pantalla, para ilustrar mejor el alcance al que estos llegan. También se explicará brevemente la implementación de la herramienta en la operación de Didea. Finalmente, se expondrán los resultados obtenidos luego de 5 meses de haberse implementado; es decir, los principales beneficios obtenidos gracias a su implementación.

METODOLOGÍA

La primera fase para desarrollar la herramienta es obtener los requerimientos que las áreas solicitan (Pérez Acosta, Moreno Espino, & Bandón Casamayor, 2015), por lo que se realizaron entrevistas a los usuarios finales por departamento con el objetivo de identificar las necesidades de cada área, separando los KPI y la información extra solicitada para cumplir con sus requerimientos (Tabla 1 y Tabla 2). Por otro lado, ayudó a identificar los procesos manuales que se pueden automatizar y establecer el diseño del funcionamiento de la herramienta.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Tabla 1: Requerimientos área de Logística

Indicadores Claves de Rendimiento (KPI) para el área de Logística			
Compras y Costos	**Desarrollo de Sucursales**	**Importaciones**	**Tráfico**
GMROI	Meses de Inventario	Total de Retaceos	Estadísticas de Tiempos
Inventario	Tasa de Servicio	Retaceos por vía	Tareas totales por placa
Lento Movimiento	Índice OBS	Retaceos por pedido	Tipo de tareas por sucursal
Inventario OBS	Estándar de Servicio	Retaceos por marca	Cartera de Clientes Frecuentes
Sobre Inventario	Gestión de Almacén	División de gastos	
Tasa de Servicio	Gestión de Operación	Gastos por país	
Meses de Inventario	Pureza de inventario	Pedido Especial	
Gestión Comercial		Pedido Stock	
		Pedidos Otros	

Tabla 2: Requerimientos área de Ventas

<table>
<tr><th colspan="2">Sucursales</th><th colspan="2">Venta de Campo</th><th>TeleRepuestos</th><th>Gerencia de Ventas</th></tr>
<tr><td rowspan="6">Por cada sucursal</td><td>Venta Neta del mes por tipo de cliente y tipo de producto</td><td rowspan="5">Por cada equipo</td><td>Venta Neta del mes por tipo de cliente y tipo de producto</td><td>Venta Neta del mes por tipo de cliente y tipo de producto</td><td rowspan="8">Resultados agregados de Sucursales, Venta de Campo y TeleRepuestos</td></tr>
<tr><td>% de alcance de la meta</td><td>% de alcance de la meta</td><td>% de alcance de la meta</td></tr>
<tr><td>Resultados de talleres clave</td><td>Desempeño de vendedores</td><td>Desempeño de vendedores</td></tr>
<tr><td>Desempeño de vendedores</td><td>Cartera de clientes frecuentes</td><td>Cartera de clientes frecuentes</td></tr>
<tr><td>Cartera de clientes frecuentes</td><td>Gestión de Oportunidades</td><td>Gestión de Oportunidades</td></tr>
<tr><td>Gestión de Oportunidades</td><td rowspan="3">Gerencia de Venta de Campo</td><td rowspan="3">Resultados de los 6 equipos</td><td rowspan="3">Gestión de Órdenes</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Gerencia de Sucursales</td><td>Resultados de las 12 sucursales</td></tr>
<tr><td>Resultados de los talleres principales de cada sucursal</td></tr>
</table>

Posteriormente, fue necesaria la familiarización con la principal fuente de datos de Repuestos Didea, es decir, el servidor que contiene la base de datos. Este posee un servidor copia exacta que se actualiza todos los días a medianoche, convirtiéndose en el servidor de consultas y es al que deben conectarse los archivos de Excel, por lo que en la empresa realmente existen dos tipos de servidores, de consulta y de producción. Se procedió a diseñar las consultas de SQL que proveen los datos necesarios para cubrir con los requerimientos solicitados, y a diseñar una versión prototipo la cual fue sometida a un proceso de evaluación con los usuarios finales hasta ser aceptada.

Una vez la propuesta fue aceptada, se comenzó de lleno al diseño completo del funcionamiento de la herramienta. Esta se compone por una serie de libros de Excel según el requerimiento, los cuales contienen macros que siguen el procedimiento ilustrado en la Figura 1. Realizan conexiones al servidor de consultas y extraen los datos mediante las consultas SQL, luego se ordenan estos datos según sea necesario para poder crear cada reporte de resultados y calcular los KPI requeridos. Luego se aplica un formato estándar a todos los reportes, previamente discutido con la empresa.

ISBN 978-607-8242-11-5



Fig. 1: Arquitectura del funcionamiento de la herramienta

Una vez creada la herramienta, era necesario realizar una fase de validación. Para comprobar el buen funcionamiento de la herramienta, se hizo una simulación con los datos del año 2016 para comparar los resultados obtenidos con los otorgados por el sistema GRD. Luego, se verificó que los requerimientos de cada usuario habían sido satisfechos. Una vez terminada la validación, se concluyó que la herramienta funcionaba de forma correcta y podía entrar en operación. Finalmente, se explicó detalladamente a los usuarios el uso de la herramienta y se procedió a la entrega final de los paquetes de Excel para cada departamento.

Se construyeron una gran cantidad de reportes automatizados para ambas áreas. Para entender de la mejor forma el trabajo realizado se explicarán cuatro de ellos, dos de cada área. Los datos contenidos en las imágenes son meramente ilustrativos y no representan los resultados reales de la empresa.

Área de Logística

Iniciando por la hoja Resumen de KPI de Compras y Costos (Figura 2), se selecciona la fecha y el código del parámetro de interés, para obtener la nota final del parámetro seleccionado, que es la suma de todas las notas individuales de los KPI del departamento. La nota individual se obtiene por medio de la multiplicación del nivel de cumplimiento y la ponderación que cada requerimiento.

Mes	**7**	**Año**	**2017**
Código	**A**	**Marca**	**Nombre del Parámetro**

Nombre del Parámetro					
KPI	**Real**	**Meta**	**Cumplimiento**	**Nota**	**Ponderación**
Inventario	$ 200,000.00	$250,000.00	100%	1.25	12.5%
Lento Movimiento	$ 50,000.00	$100,000.00	100%	1.25	12.5%
Inventario OBS	$ 25,000.00	$ 20,000.00	80%	1.00	12.5%
Sobre Inventario	$ 45,000.00	$ 50,000.00	100%	1.25	12.5%
GMROI	1.50	1.20	100%	1.25	12.5%
Tasa de Servicio	0.91	0.95	95%	1.19	12.5%
Meses de Inventario	7.50	5.00	67%	0.83	12.5%
Gestión Comercial	3	4	75%	0.94	12.5%
Nota			**9.0**		

Fig. 2: Resumen de KPI del departamento de compras y costos

A partir de las tablas resultantes, se crean gráficos que ayudan a la visualización de los datos (Figura 3). El primer tipo de gráfico es la comparación del dato real del KPI con su meta y el alcance que se tuvo en ese mes. El segundo tipo, es la suma de los porcentajes individuales de varios KPI de la misma rama (Inventario, Lento Movimiento, Inventario OBS y Sobre inventario) para cada marca, que en este caso es el parámetro.

ISBN 978-607-8242-11-5

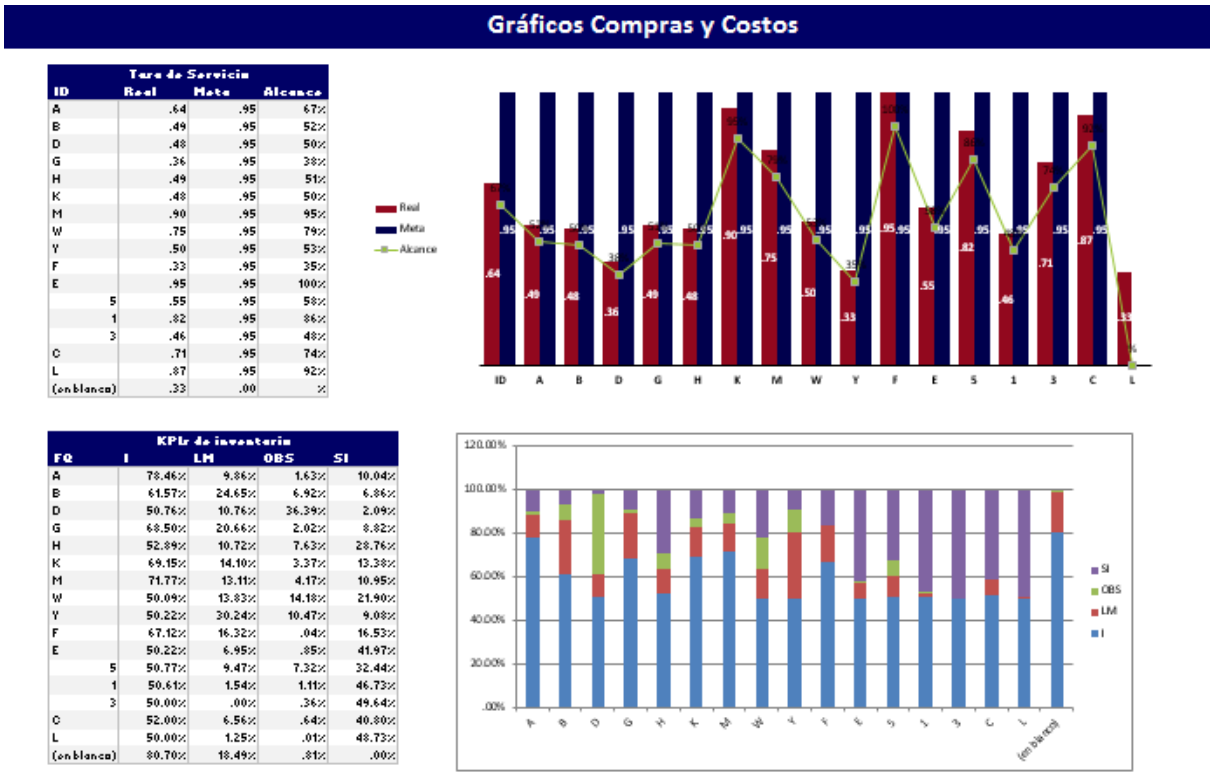


Fig. 3: Gráfico de compras y costos

Área de Ventas

Comenzamos con el reporte de resultados de las sucursales. Presenta las proyecciones de venta al cierre del mes versus el presupuesto de venta del mes (en miles de dólares) para cada sucursal, donde el principal indicador es el alcance respecto a dicha meta.

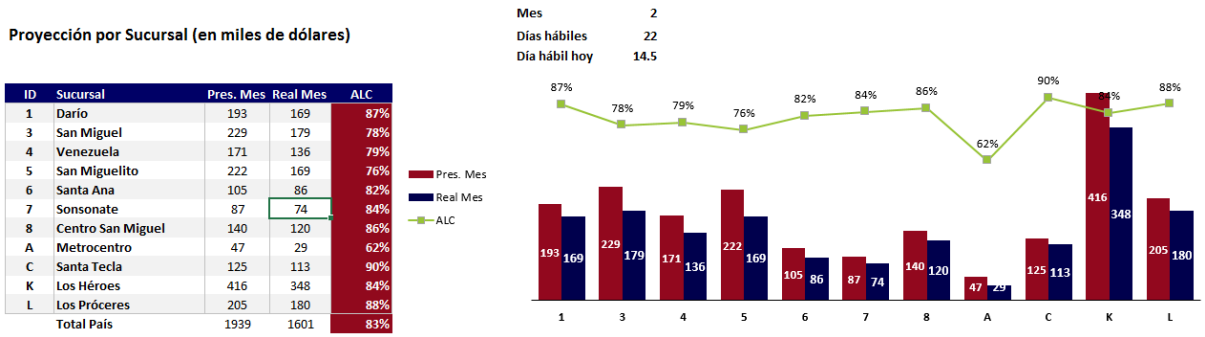


Fig. 4: Resultados de gerencia de sucursales (en miles de dólares)

El siguiente archivo presenta un seguimiento que previamente era imposible. Llamado Gestión de Oportunidades, es un reporte que presenta todas las cotizaciones realizadas en una sucursal específica, cuyo monto bruto es mayor a cierta cantidad y que fue ingresada en los últimos X días. A la derecha tenemos la división de las marcas. Si está en verde, significa que esa cotización contiene dicha marca. Esto ha permitido un seguimiento concentrado en las marcas que más lo necesitan, y facilita el cierre de estas ventas a través de su seguimiento.

ISBN 978-607-8242-11-5

Análisis de Cotizaciones y Oportunidades

Cotizaciones activas de los últimos 7 días con montos mayores a US$100

									Marcas						
Cotización ID	Cliente	ATS	Fecha Grabación	Cuenta corriente	Teléfono	Sucursal	Vendedor	Valor Bruto	15	1B	1F	1H	1K	1M	1T
30108774	1		09:46 13-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	3SCXX	$ 13,950.36							
30108679	2		15:18 10-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	81GXX	$ 8,935.14							
30108731	3		09:40 12-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	81GXX	$ 6,631.29							
30108720	4		16:14 11-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	846XX	$ 3,117.34							
30108749	5		11:56 12-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	81gXX	$ 2,958.05							
30108763	6		15:40 12-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	81gXX	$ 2,792.19							
30108783	7		15:03 13-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	81gXX	$ 2,539.30							
30108787	8		08:09 14-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	3scXX	$ 2,285.01							
30108656	9		09:20 10-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	81GXX	$ 1,869.75							
30108772	10		09:22 13-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	3SCXX	$ 1,502.37							
30108699	11		08:41 11-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	81MXX	$ 925.60							
30108682	12		15:50 10-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	943XX	$ 831.00							
30108753	13		13:09 12-07-2017	XXXXX	YYYY-YYYY	3	3scXX	$ 761.02							

Fig. 5: Análisis de cotizaciones y oportunidades

RESULTADOS

Los resultados de la implementación de esta herramienta pueden expresarse en términos de los beneficios obtenidos tras 5 meses de uso. Estos serán divididos en tres partes: ahorro de tiempo, mejora en el flujo de información e impacto en ventas.

Para los usuarios de la herramienta, el impacto más notable es el ahorro en el tiempo requerido para el seguimiento del rendimiento y la elaboración de los reportes semanales. Para el caso de ventas, la Tabla 3 otorga una estimación del tiempo utilizado antes de usar la herramienta:

Tabla 3: Horas utilizadas anteriormente en reportería (área de ventas)

Área	#	*Horas semanales en reportería y seguimiento*	*Total*
Gerencia de Ventas	1	3	3
Gerencia de Sucursales	1	4	4
Jefaturas de Sucursales	12	5	60
Gerencia de Venta Campo	1	3	3
Equipos de Campo	6	3	18
TeleRepuestos	1	2	2
Total (horas semanales)			**90**

Dado que todas las macros tardan menos de 1 minuto en correr, podemos considerar este tiempo como despreciable y tomar las 90 horas semanas como el ahorro de tiempo neto. Sin embargo, otro de los beneficios de la herramienta es que esta reportería semanal puede revisarse en cualquier día de la semana sin mayor inversión de tiempo. Este seguimiento diario es de especial importancia, principalmente al nivel operativo como las jefaturas de cada sucursal, pues permite seguir más de cerca su rendimiento y el de sus colaboradores.

Otro de los beneficios de la herramienta es la mejora en el flujo de información. Hay que considerar que las jefaturas no utilizaban consultas SQL a los servidores para obtener los datos, sino que dependían del flujo de información proveniente de los gerentes para poder trabajar en su reportería. Similarmente sucedía con los equipos de campo, creando una dependencia en la información. Sin embargo, la herramienta permite un acceso a la información proveniente directamente de la base de datos para todos los usuarios, eliminando la necesidad de las dependencias pues los mismos reportes que ven los jefes de sucursal pueden ser vistos por el gerente de sucursales, creando un flujo de información más transparente y apoyando a la estandarización del trabajo.

ISBN 978-607-8242-11-5

Finalmente tenemos el impacto de las ventas. En este caso la herramienta que más frutos da es la gestión de oportunidades, pues permite enfocarse en una marca y llevar un seguimiento a las cotizaciones más importantes de dicha marca. Esto ha facilitado que los jefes y sus vendedores puedan cerrar estas ventas potenciales y así incrementar el total de ventas. Por ejemplo, la marca K tuvo mejoras del 17% en ventas, la marca H del 11% y la marca F, aunque no tuvo un crecimiento global, si aumentó en un 129% sus ventas a clientes de mostrador. Las tres marcas anteriores son las que requerían de un seguimiento más cercano, lo cual es exactamente lo que permite la gestión de oportunidades.

CONCLUSIONES

En este artículo, se presentó el caso de estudio de Excel Automotriz en donde se desarrolló una herramienta automatizada de reportería, integrando la inteligencia de negocios para suplir con las necesidades del usuario. Se utilizó el lenguaje VBA para conectar los servidores de la empresa con Microsoft Excel y automatizar la generación de los reportes requeridos. Los entregables de este proyecto fueron varios libros de Excel de reportería que incluían gráficos, tablas y generación de archivos PDF con los que se facilita la toma de decisiones en cada gerencia. Un resultado inmediato de su implementación fue el ahorro de tiempo, aproximadamente 90 horas de trabajo en el área de ventas. Adicionalmente, se mejoró el flujo de información y, al agilizar el seguimiento de ciertas marcas, se logró un incremento en las ventas de estas.

Un punto muy importante que fue demostrado gracias a la realización de este proyecto es que no es necesario una gran inversión de tiempo y dinero para implementar herramientas de inteligencia de negocios. La instalación de módulos adicionales a un sistema de información que ya está en marcha puede ser un proceso muy complejo y costoso, y la capacitación del personal en lenguajes de programación tiene un alto riesgo de producir resultados erróneos, simplemente debido a la poca experiencia que se tiene con este lenguaje. Se demostró que el correcto uso de VBA para Excel es más que suficiente para producir reportería ágil y eficaz, y dado que Excel ya se encuentra instalado en la mayoría de equipos corporativos no es necesario una inversión adicional en software dedicado.

De este proyecto parte naturalmente una extensión de la herramienta para incluir más dashboards y scorecards gerenciales, que permitan llevar un seguimiento a nivel estratégico y así apoyar en la toma de decisiones estratégicas de la empresa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores le agradecen a Excel Automotriz por el apoyo que se nos otorgó durante todo el proyecto, al igual que la confianza en mostrarnos su base de datos e información confidencial.

REFERENCIAS

Chaves, M. A., *"La ingenieria de requerimientos y su importancia en el desarrollo de proyectos de software"*, Revista de las Sedes Regionales, 6(10) (2005).

Excel Automotriz, *Excel Online*, Obtenido de https://excelautomotriz.com/el-salvador/quienes-somos/

Moreno, E. G., "*Automatización de Procesos Industriale",* España: Editorial Universitat Politecnica de Valencia (1999)

Pérez Acosta, A., Moreno Espino, M., & Bandón Casamayor, R., *"Goal-Oriented dashboard´s requirements with i*: a case study",* Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 24(4), 680-689 (2016).

Rouibah, K., & Ould-ali, S., *"A concept and prototype for linking business intelligence to business strategy"*, Journal of Strategic Information Systems, 11(2), 133-152 (2002).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Cálculo del Trabajo Durante un Proceso Adiabático Usando Aproximaciones Tipo Sumas de Riemann

Delfino Ladino-Luna, Ricardo T. Páez-Hernández
Física de Procesos Irreversibles, Dpto. Ciencias Básicas, Univ. Autónoma Metropolitana-A,
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, 02200, Atzcapotzalco, D. F., México
dll@correo.azc.uam.mx, phrt@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

Con el objetivo de proponer una manera de calcular los tiempos de duración de los procesos adiabáticos en ciclos que contengan este tipo de procesos, se presenta una alternativa de cálculo basada en la idea de las sumas de Riemann del cálculo integral. Se propone una partición en el intervalo de valores de los volúmenes inicial y final de dicho proceso, se supone una isoterma representativa en cada sub-intervalo, de manera que se puedan tener diferenciales de área cuya suma sea, en el límite a infinito del número de sub-intervalos, la suma total de dichas diferenciales de área. Esto es, el trabajo realizado por el sistema termodinámico durante un proceso adiabático. Se espera poder escribir de manera directa los tiempos de duración de estos procesos e incorporarlos al tiempo total de un ciclo que contenga al menos un proceso adiabático.

Palabras clave: proceso adiabático, trabajo adiabático, trabajo isotérmico

Calculation of Work During an Adiabatic Process Using Riemann Summative Approximations

ABSTRACT

In order to propose a way to calculate the duration time of adiabatic processes in cycles containing these processes, an alternative calculation based on the idea of Riemann sums of integral calculus is presented. It is proposed a partition in the range of values of the initial and final volumes of these processes, a representative isotherm is assumed in each sub-interval, so that we can have differentials of area whose sum is, in the limit to infinity of the number of sub-intervals, the total sum of these differential area. That is, the work done by the thermodynamic system during an adiabatic process. It is expected to be able to directly write the duration times of these processes and incorporate them into the total time of a cycle containing at least one adiabatic process.

Keywords: adiabatic process, adiabatic work, isothermal work

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la Termodinámica de Tiempos Finitos, en diversas publicaciones sobre ciclos termodinámicos que involucran procesos adiabáticos, como los conocidos ciclos de Curzon y Ahlborn, Diesel y Otto, el cálculo teórico de la potencia del ciclo a partir de su definición, y el de su eficiencia, usualmente se basan en la suposición de que los procesos adiabáticos son muy rápidos comparados con el tiempo total del ciclo, o bien de que su efecto no es apreciable (Curzon y Ahlborn, 1975; Andresen y col., 1977; Rubin, 1979; Angulo-Brown, 1991; Xia y col., 2011); aún en trabajos donde se analizan ciclos con irreversibilidades internas (angulo-Brown y col., 1994; Calvo y col., 1996). Prácticamente se supone que el proceso de expansión adibática se anula con el proceso de compresión adibática.

Sin embargo, en la realidad dichos procesos son sólo un límite ideal de los procesos reales que suceden durante la expansión y la compresión sin fuentes de calor en contacto térmico con el sistema, pues no podemos garantizar paredes cien por ciento aislantes de calor, además de la posibilidad de pérdidas internas de calor por diversos factores mecánicos de las máquinas. Por otro lado, debemos incluir el hecho de que la substancia de trabajo cambia durante los procesos del ciclo, por ejemplo en un motor de automóvil al principio se tiene una mezcla de gasolina líquida (o diesel) y aire, y al final del ciclo se tiene esa mezcla pero quemada y con residuos sólidos. Esto indica que no es la misma substancia de trabajo, los valores de las conductividades térmicas son diferentes, y por tanto los procesos de expansión y compresión no ocurren a la misma velocidad ni con los mismos valores de los parámetros involucrados. En el caso del ciclo de Curzon y Ahlborn, algunos autores han incluido una forma de tomar en cuenta el tiempo de los procesos adiabáticos (Gutkowicz-Krusin, y col., 1978; Agrawal, y col., 1994; Ladino-Luna y de la Selva, 2000).

Pero estos procedimientos no son únicos, puesto que el cálculo del tiempo de duración de los procesos adiabáticos necesitan de de que se incluyan los cambios de temperatura del sistema. Una manera que podría permitir modelar esta transformación adiabática es mediante la comparación del trabajo adiabático con el trabajo isotérmico, entre los mismos valores del volumen que ocupa la substancia de trabajo durante el proceso adiabático. En el presente trabajo se discute la posibilidad de realizar esta comparación de manera semejante al cálculo de áreas con las conocidas sumas de Riemann, utilizando como función para el cálculo del trabajo a las isotermas asociadas a un valor intermedio de los puntos que aparecen en una partición del intervalo de volúmenes máximo y mínimo durante el ciclo.

CÁLCULO APROXIMADO DEL TRABAJO EN UN CICLO

Recuérdese que en termodinámica el trabajo realizado por un sistema, durante cualquier proceso, se define como,

$$W_{if} = \int_i^f p dV \ , \tag{1}$$

en donde W_{if} es el trabajo entre los estados i y f, p es la presión y dV es una diferencial de volumen; y que se interpreta también como el área bajo la curva, en donde la presión aparece como la función $p = p(V,T)$, con las consecuencias de tener ó p *= constante,* ó V *= constante*, ó T *= constante.*

Para representar el cálculo del trabajo desarrollado por una máquina térmica, representado por un ciclo cualquiera a partir de la definición dada en (1), es posible utilizar algún modelo aproximado como los siguientes: dividiendo el área encerrada por el ciclo en subáreas encerradas por ciclos infinitesimales formados por dos isotermas y dos isócoras (Figura 1), o bien tomando dichas subáreas formadas por dos isóbaras y dos isócoras (Figura 2); en ambos casos alternadamente. Esto es, estaríamos utilizando un procedimiento basado en el cálculo de áreas de Riemann. Para el caso de un solo proceso la situación cambia, pues se conoce la manera de calcular el trabajo durante los procesos isocórico, isobárico e isotérmico, de manera directa sin recurrir a la Primera Ley, con el objetivo importante de hallar la forma de escribir el tiempo de duración de un proceso cualquiera, a partir de la rapidez de intercambio de calor.

Por otro lado, como en el caso de un proceso adiabático (reversible o no) no existe intercambio de calor, se tiene que buscar una forma alternativa que permita llegar al objetivo de calcular el tiempo de duración del proceso. Se sabe que existen procedimientos experimentales para calcularlo o medirlo, pero no a partir de primeros principios. En Gutkowicz-Krusin, y col. (1978); Agrawal, y col. (1994); Ladino-Luna y de la Selva (2000), se propuso una manera de calcular el tiempo de duración de las adiabatas en un ciclo de Curzon y Ahlborn (1975), que consiste básicamente en suponerlo como función de tiempo de las isotermas previas a cada proceso adiabático.

ISBN 978-607-8242-11-5

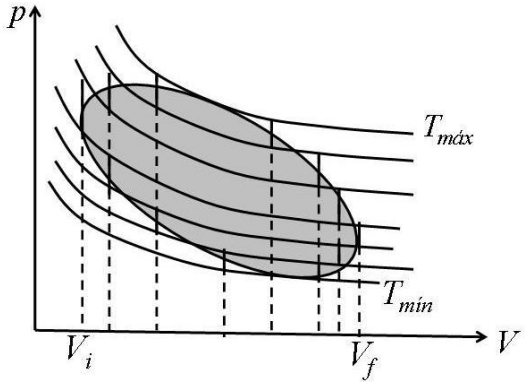


Fig. 1. Trabajo aproximado por isotermas e isocoras

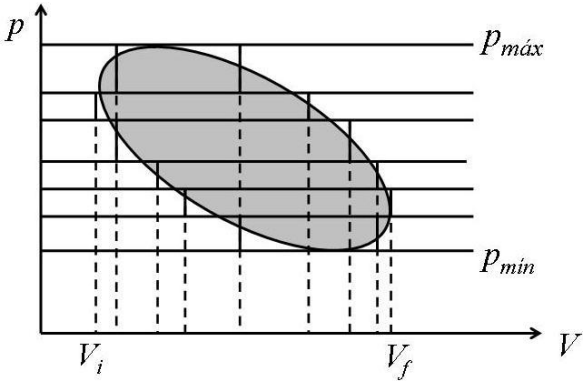


Fig. 2 Trabajo aproximado por isobaras e isocoras

Sería conveniente buscar la forma de no depender de los procesos isotérmicos previos. La situación se podría resolver si utilizamos un procedimiento semejante a los casos para el cálculo del trabajo total de un ciclo, antes comentados, y que en el fondo son semejantes al cálculo de áreas de Riemann: necesitamos establecer una partición del intervalo de valores de los volúmenes máximo y mínimo durante el proceso. Para arribar a este procedimiento, revisemos brevemente el cálculo de áreas con el método de Riemann.

Como se sabe, dada la forma de una función en el plano cartesiano mediante la expresión $y = f(x)$, en donde *y* representa el valor de *f* para el valor de la variable x, el área encerrada por la curva representada por *f*, se encuentra de manera aproximada para una partición discreta como $\{x_0, x_1, \ldots, x_N\}$, esto es,

$$\text{área} \approx \sum_{i=1}^{N} (x_i - x_{i-1}) f(\sigma_i), \;\; x_{i-1} \le \sigma_i \le x_i \,. \tag{2}$$

La partición del intervalo permitirá tener el conjunto de intervalos,

$$\{[x_0, x_1], [x_1, x_2], \ldots, [x_{N-1}, x_N]\}, \tag{3}$$

como se muestra en la Figura 3. En general el tamaño de los sub-intervalos es arbitrario, así como el punto que representa σ_i en cada sub-intervalo. Pero, si el valor de σ_i tiene solo la restricción de estar dentro del sub-intervalo correspondiente, y el ancho de cada sub-intervalo es arbitrario, se puede simplificar el cálculo haciendo $\sigma_i = \frac{1}{2}(x_i + x_{i-1})$, y suponiendo sub-intervalos del mismo tamaño, esto es, $|x_1 - x_0| = |x_2 - x_1| = \ldots = |x_N - x_{N-1}|$. Esto significa tener,

$$\text{área} \approx \sum_{i=1}^{N} |x_i - x_{i-1}| f(\tfrac{1}{2}(x_i + x_{i-1})), \;\; x_{i-1} \le \sigma_i \le x_i \,. \tag{4}$$

El límite a infinito de esta suma (o la anterior) lleva al cálculo de la integral definida.

 ISBN 978-607-8242-11-5

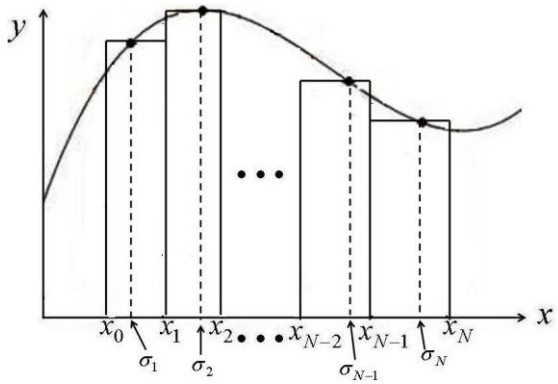


Fig. 3. Cálculo del área bajo una curva. Sumas de Riemann

Para modelar el trabajo adiabático durante una expansión (o una compresión), se puede establecer una partición del intervalo de valores de los volúmenes $[V_{mín}, V_{máx}]$, siendo $V_{mín} = V_0$ y $V_{máx} = V_N$, que puede escogerse de la manera más simple, asumiendo que los sub-intervalos sean del mismo tamaño, esto es, $|V_1 - V_0| = |V_2 - V_1| = \ldots = |V_N - V_{N-1}|$.

Tomando como función para el cálculo del trabajo (como área bajo la curva), a las isotermas para cada V_i, a continuación tenemos que escoger si proponemos el punto medio de cada sub-intervalo, o escogemos el necesario para tener el promedio de temperaturas que corresponda a cada sub-intervalo. Lo segundo resulta más adecuado, pues de esa manera sabemos el valor de la función para cada v_i, de manera que $V_{i-1} < v_i < V_i$, con $i = 0,1,2,....,N$. La Figura 4 muestra claramente esta situación en donde se ha modelado el trabajo durante un proceso adiabático, por medio de sucesivas expansiones isotérmicas, seguidas de enfriamientos isocóricos, de manera que en cada sub-intervalo aparece un área por arriba de la adiabática, y un área por debajo de la adiabática, de tal forma que al sumarse y tomar el límite a infinito se tenga el trabajo realizado por la adiabática, simulado por sumas de sub-áreas de las isotermas promedio en cada sub-intervalo. La parte sombreada corresponde al área aproximada, esto es, el trabajo desarrollado durante el proceso.

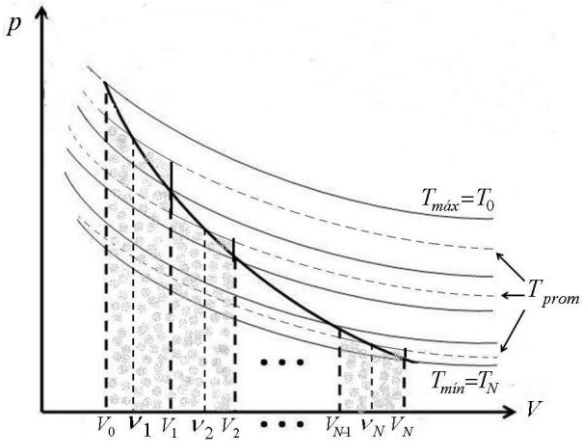


Fig. 4. Aproximación del trabajo para una adiabática con sucesivas isotermas promedio e isocoras

Suponemos ahora un mol de gas ideal. Para cada sub-intervalo de volúmenes se tiene asociada una temperatura promedio de las temperaturas correspondientes a cada punto de la partición del intervalo de volúmenes. Podemos escribirlo de la siguiente manera:

$$\Delta V = V_1 - V_0 = V_2 - V_1 = \ldots = V_N - V_{N-1}. \quad (5)$$

En el caso de *i*-ésimo volumen, se tiene,

$$V_i = V_0 + i\Delta V; \quad (6)$$

y de manera análoga, se tiene,

 ISBN 978-607-8242-11-5

$$T_{iprom} = \frac{1}{2}(T_i + T_{i-1}) , \tag{7}$$

así que,

$$W_{ad} \approx \sum_{i=1}^{N} RT_{iprom} \ln \frac{V_i}{V_{i-1}} = \sum_{i=1}^{N} R \frac{1}{2}(T_i + T_{i-1}) \ln \frac{V_i}{V_{i-1}} . \tag{8}$$

Como puede observarse, hallar el límite de esta serie es muy complicado, pero se puede aproximar si recordamos que para valores de x alrededor de 1 se tiene,

$$\ln x \cong (x-1) - \tfrac{1}{2}(x-1)^2 + \tfrac{1}{3}(x-1)^3 - \tfrac{1}{4}(x-1)^4 + \cdots + (-1)^{N-1}(x-1)^N , \tag{9}$$

y entonces, puesto que $\frac{V_i}{V_{i-1}} = \frac{V_{i-1}+\Delta V}{V_{i-1}}$ tendremos que,

$$W_{ad} \approx \sum_{i=1}^{N} R \frac{1}{2}(T_i + T_{i-1}) \left[(\frac{V_i}{V_{i-1}} - 1) - \frac{1}{2}(\frac{V_i}{V_{i-1}} - 1)^2 + \frac{1}{3}(\frac{V_i}{V_{i-1}} - 1)^3 - \frac{1}{4}(\frac{V_i}{V_{i-1}} - 1)^4 + \cdots + (-1)^{j-1}(\frac{V_i}{V_{i-1}} - 1)^j \right], \tag{10}$$

siendo j un natural, tan grande como se quiera tener el nivel de precisión del cálculo. Como se puede observar en la Figura 4, $T_i < T_{i-1}$, y la diferencia entre ellas es cada vez menor, esto es, $|T_i - T_{i-1}| \to 0$ cuando $N \to \infty$ en la expresión (8). Desde el punto de vista geométrico este límite permite suponer que para $T_{máx}$ y $T_{mín}$ conocidas, la suma de áreas superiores e inferiores se puede escribir de manera aproximada con la siguiente aproximación gruesa,

$$W_{ad} \approx RT_{iprom} \ln \frac{V_{máx}}{V_{mín}} = R \frac{1}{2}(T_{máx} + T_{mín}) \ln \frac{V_{máx}}{V_{mín}} , \tag{11}$$

y se tendría la situación mostrada en la Figura 5.

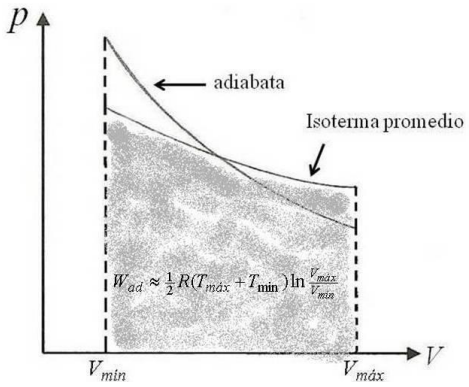


Fig. 5. Aproximación del trabajo para la adiabática por medio de una isoterma promedio

CONCLUSIONES

Como se puede colegir, el problema de modelar un proceso adiabático suponiendo sucesiones de transformaciones isotérmicas seguidas de transformaciones isocóricas, tiene en el fondo una solución geométrica, que se puede resolver si se encuentra de manera adecuada la forma de calcular, aunque sea de forma aproximada, la suma planteada en la expresión (8). De otra manera solo queda guiarse por la intuición, planteada en la expresión (9). Sin embargo, la aplicación de esta idea a dos ciclos en particular, los ciclo Otto y Diesel, pueden permitir unA corrección al cálculo de la potencia y la eficiencia, en el sentido de que sus representaciones gráficas se acercan más a las que se conocen sin la consideración de un tiempo finito para las transformaciones adiabáticas, independientemente de que se considere internamente reversible o irreversible el ciclo considerado.

 ISBN 978-607-8242-11-5

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo total de la Universidad Autónoma Metropolitana-A (México)

REFERENCIAS

Agrawal D. C., Gordon M. J. y Huleihil, M.; Endorreversible Engines with Finite-Time Adiabats, Indian J. Eng. Mat.Sc. 1994; 1: 195-198.

Andresen B., Salamon P. y Berry R.S., Thermodynamics in Finite Time: Extremal for Imperfect Heat Engines. J. Chem. Phys. 1977; 66: 1571-1577.

Angulo-Brown, F., An ecological optimization criterion for Finite-Time heat Engines. J. Appl. Phys. 1991; 69: 7465-7469.

Angulo-Brown F., Fernández-Betanzos J. y Díaz-Pico C.; Compression Ratio of an Optimized Air Standard Otto-cycle Model. Eur. J. Phys. 1994; 15: 38-42.

Calvo-Hernández A., Rocco J. M. M., Medina A. y Velasco S.; An Irreversible and Optimized Four Stroke Cycle Model for Automotive Engines. Eur. J. Phys. 1996; 17: 11-18.

Curzon, F. L. y Ahlborn, B.; Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power Output. Am. J. Phys. 1975; 43: 22-24.

Gutkowics-Krusin D., Procaccia I. y Ross J.; On the Efficiency of Rate Processes. Power and Efficiency of Heat Engines. J. Chem. Phys. 1978; 69: 3898-3906.

Ladino-Luna D. y de la Selva S. M. T.; The Ecological Efficiency of a Thermal Finite Time Engine. Rev. Mex. Fís. 2000; 46: 52-56.

Rubin M.; Optimal Configuration of a Class of Irreversible Heat Engines. I. Phys. Rev. A 1979; 19: 1272-1276.

Rubin M., Optimal Configuration of a Class of Irreversible Heat Engines. II. Phys. Rev. A 1979; 19: 1277-1289.

Xia D., Chen L. y Sun F.; Ecological optimization of endoreversible chemical engines, Energy and Enviroment 2011; 2: 909-920.

 ISBN 978-607-8242-11-5

La Educación en Valores y el Método Científico: Una Relación Simbiótica

Gloria Ma. Jaime-Mirabal[1], Delfino Ladino-Luna[2]
(1) CES, Universidad de Pinar del Río, Martí No. 300, Pinar del Río, Cuba
(2) Física de Procesos Irreversibles, Dpto. Ciencias Básicas, Univ. Autónoma Metropolitana-A,
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, 02200, Atzcapotzalco, D. F., México
[1]gjaimem@upr.edu.cu, [2]dll@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En el presente trabajo se discuten las principales ideas de la Educación en Valores y la manera implícita como se utiliza durante el desarrollo de la labor docente en las ciencias duras, tales como física, química, biología, por ejemplo, cuando se expone la forma como se proponen y prueban las teorías sobre el comportamiento de la naturaleza. El trabajo se divide en dos partes: una exposición de los principios y objetivos de la teoría de la Educación en Valores, y otra de los principios básicos sobre el Método Científico. Finalmente se muestra como al poner en práctica el Método Científico, se realiza de manera implícita la aplicación de los principios de la Educación en Valores. La idea concebida muestra cómo incide la Educación en Valores al momento de enseñar cualquier contenido de un determinado campo del conocimiento. Para hacer explícita esta idea, se hace uso de los llamados diagramas de flujo, que comúnmente se utilizan para construir algoritmos en computación (programación de computadoras), como una herramienta útil para mostrar cómo influyen las decisiones que se toman a partir de una hipótesis, y como se relacionan las los principios básicos de la Educación en Valore y del Método Científico.

Palabras clave: método científico, educación en valores, formación socio-humanista.

Education in Values and the Scientific Method: A Symbiotic Relationship

ABSTRACT

In this paper it is discussed the main ideas of the Education in Values and the implicit way in which it is used during the development of teaching in the hard sciences, such as physics, chemistry, biology, for example, when it is exposed how Theories on the behavior of nature are proposed and tested. The work is divided in two parts: an exposition of the principles and objectives of the theory of Education in Values, and another one on the basic principles on the Scientific Method. Finally, it is shown how when implementing the Scientific Method, the implementation of the principles of Education in Values is implicitly performed. The idea conceived shows how Education in Values affects the moment of teaching any content of a certain field of knowledge. To make this idea explicit, we use the so-called flow diagrams, which are commonly used to construct computer algorithms, as a useful tool to show how decisions are influenced by a hypothesis, and how the basic principles of Education in Values and the Scientific Method relate.

Keywords: scientific method, education in values, socio-humanist formation.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Generalmente se piensa que las teorías de la educación tienen su principal campo de aplicación en los niveles inicial y primario: los primeros nueve años de escuela, después del pre-escolar (llámese Kindergarden, pre-primaria o cualquier otro nombre). Sin embargo, si uno revisa la llamada *Teoría de la Educación en Valores* (Lucini 1994, Schmelkes 1996, Batista 1997, Arana y Batista 1997, Barba 2005, Garcell 2010), encuentra que existe una relación entre ésta y el llamado *Método Científico* con el cual se enseñan, a nivel universitario, los fundamentos de las llamadas ciencias duras (química, física, biología, entre otras semejantes). La primera aspira a lograr en el estudiante una estructuración de su pensamiento para obtener un desempeño profesional íntegro; el segundo aspira a que en el desarrollo del pensamiento prevalezca el apego a la libre discusión de las teorías, sin trasgredir los principios básicos de cada ciencia, en palabras llanas pudiera expresarse, sin hacer trampa. Esto es, tomando como principio una hipótesis, de manera que dentro del marco de ésta se encuentren resultados que reflejen el actuar de la naturaleza, hasta donde es posible (Poincaré, 1906). Pero el aprendizaje de cualquier disciplina debe contar con el espíritu con que el estudiante se aproxime a ésta (Córdoba y Rojo, 1985), esencialmente sin miedo, con interés y con la idea de aprovechar para la vida futura lo que pueda se aprender.

Para arribar al objetivo que se espera, que el estudiante se convierta en un individuo productivo y comprometido con la sociedad en donde se desarrollará como adulto, una tendencia significativa en los últimos años, no siempre lograda, ha sido la de dar relevancia al componente humanista y de las ciencias sociales en la formación de ingenieros, pues se espera que de esa manera el futuro profesional ejerza con calidad su profesión. Se espera que estas disciplinas favorezcan el desarrollo de una visión más completa de la responsabilidad que el futuro ingeniero tendrá. En la práctica del proceso docente (enseñanza-aprendizaje) existe actualmente la idea de desarrollar valores en el estudiante, a través de la ampliación del nivel cultural general, al mismo tiempo que métodos de adquirir conocimiento y técnicas de investigación, desarrollando estilos de pensamiento y habilidades de comunicación.

Como consecuencia de la idea previamente aparece la polémica sobre la manera de lograr el objetivo planteado, a saber, si la formación socio-humanista se alcanza mediante la adición de asignaturas de ciencias sociales, o si los conocimientos obtenidos de las ciencias sociales deben insertarse dentro de las disciplinas propias de la ingeniería. La experiencia ha mostrado que una adecuada alternativa consiste en integrar simbióticamente las posibilidades que brindan las ciencias sociales, con las ciencias naturales y exactas desde un enfoque interdisciplinario. Una herramienta básica para desarrollar esta alternativa es el diseño de programas de *Tecnología Apropiada*, que consiste básicamente en *mostrar con sencillez y sensibilidad la tecnología en beneficio del hombre y su contexto, al mismo tiempo que se plantea un cambio de valores en la ingeniería y la enseñanza de los elementos que la componen, revitalizando los valores que se piensa que debe poseer todo ingeniero en su profesión* (Arana y Armenteros 1996).

En el presente trabajo se discute la manera como la teoría de la Educación en Valores está implícita al momento de desarrollar las ideas básicas del llamado Método Científico, y a su vez, el Método Científico ha sido usado de manera implícita al momento de plantear una alternativa de desarrollo de los valores en el futuro ingeniero. Para aclarar mejor este planteamiento, el trabajo se desarrolla de la siguiente manera: primero de forma breve se plantean los principios básicos de la Educación en Valores, para a continuación discutir también brevemente las ideas básicas del Método Científico, y finalmente se muestra como aparecen las ideas de uno en el otro y viceversa, de tal forma que se puede concluir que al momento de enseñar las ciencias duras necesarias en la ingeniería, se está desarrollando una educación en valores. Y no menos importante, se muestra a través de esquemas gráficos las relaciones entre las llamadas dimensiones necesarias y un conjunto de valores básicos elegidos para la profesión, y se discute también la manera como al aplicar ciertos aspectos del Método Científico para la adquisición de conocimiento útil para el futuro ingeniero, al mismo tiempo se está reforzando la adquisición de dicho conjunto de valores.

LA EDUCACIÓN EN VALORES, UNA ALTERNATIVA METODOLÓGICA

Toda teoría dentro de cualquier rama del conocimiento humano parte de un objetivo, propuesto por la necesidad de obtener un resultado que contenga las aspiraciones de la sociedad en que se desarrolla. Es el caso de la preparación de profesionales, y en particular de profesionales en ingeniería (en cualquiera de sus especialidades). La ingeniería en general se puede definir como la actividad que aplica un conjunto de conocimientos científicos y tecnológicos para la innovación, invención, desarrollo y mejora de técnicas y herramientas para satisfacer las necesidades del entorno en que vive: la sociedad. El ingeniero utiliza los conocimientos de las llamadas ciencias duras, tanto para el desarrollo de tecnologías, como para el manejo eficiente y productivo de recursos y fuerzas de la naturaleza en beneficio de la sociedad. En este sentido la ingeniería es una actividad que transforma el conocimiento en algo práctico. Se dice comúnmente que el ingeniero debe tener una vocación de servicio. Sin embargo, las diferentes situaciones que vive actualmente cada individuo, no necesariamente permite que se obtenga esa vocación de servicio. Una alternativa de

 ISBN 978-607-8242-11-5

infundir en el futuro profesional dicha vocación es a través del desarrollo de teorías pedagógicas que se puedan llevar a la práctica en el nivel propiamente de desarrollo del futuro ingeniero. Es así que una interesante teoría es la llamada *Educación en Valores*.

La educación moral, al igual que las normas socio-jurídicas, tienen el objetivo de colaborar para lograr un comportamiento ligado a la responsabilidad y ética, que son valores que se intenta fomentar desde la niñez. Pero en la actualidad al parecer vivimos en una sociedad sin valores; o en el mejor de los casos han aparecido nuevos valores asociados al nuevo paradigma socioeconómico y cultural. También hay quien piensa que el problema está en la existencia de una multi-variedad de valores, lo que produce confusión y desorientación en la actuación y valoración de los seres humanos. Quizás esté ocurriendo todo ello.

Ante este reto ha aparecido la teoría pedagógica de la Educación en Valores, con la cual se piensa que se puede contribuir a desarrollar el trabajo en equipo con los estudiantes, fomentando principios morales que regulen el comportamiento de los individuos, enfocados en lograr una mejor convivencia. Las técnicas de discusión, intercambio y reflexión, son ampliamente utilizadas para transmitir principios éticos a nivel de aula entre los estudiantes, proponiendo la discusión de tópicos de actualidad que inviten a evaluar opiniones y contrastar puntos de vista.

De acuerdo al marco teórico descrito, la Educación en Valores se centra en establecer una perspectiva referida a la acción pedagógica. Un ambiente pedagógico donde el aprendizaje vaya a las raíces mismas del comportamiento del alumno, ya que de lo que se trata es de:

- educar, formar, no sólo instruir.
- reconocer que el crecimiento de una persona autónoma y responsable en el plano moral es prioritario;
- lograr que la formación del carácter preceda a la instrucción;
- ayudarles a superar sus problemas afectivos;
- sostenerlos en la resolución de sus problemas familiares y sociales;
- acompañarles en la larga conquista de la autonomía y responsabilidad en estos tiempos de crisis de la evolución humana.

Esta acción pedagógica no se concibe como una negación de los valores como objetivos o ideales, sino que se centra en la premisa de que es la misma persona la que va auto-construyendo su aprendizaje a través de la interacción social donde asimila valores, desecha anti-valores y reorganiza en forma jerárquica su propia normativa o escala de valores (Pereira 2008; Hoyos, Martínez y Palos 2001). En este sentido el proceso de enseñanza-aprendizaje puede plantearse como el esquema de la Figura 1.

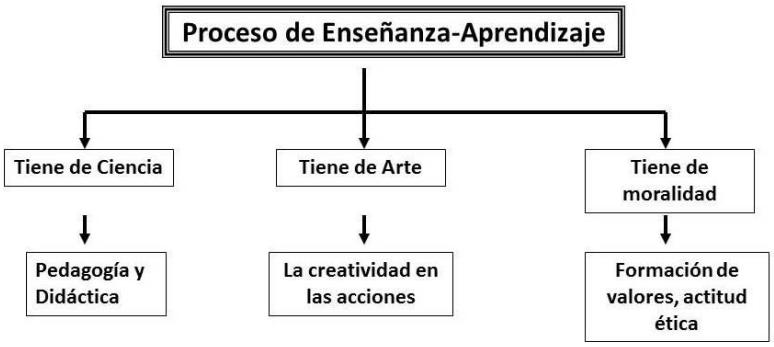


Fig. 1. Diagrama que muestra las características del proceso de enseñanza-aprendizaje

EL MÉTODO CIENTÍFICO, UNA GUÍA PARA EL APRENDIZAJE

Cuando se habla del método científico, se espera generalmente empezar por una definición apropiada. Sin embargo siempre que se intenta establecer una definición, solo se logra realizarla de manera limitada (ver por ejemplo Rosenbluet, 1971). Así que nos limitaremos en este espacio a comentar solo acerca de la utilización del método en las ciencias experimentales, particularmente en la física, porque esta rama del conocimiento ocupa un lugar preponderante en la formación de un ingeniero, y porque es en ésta en donde mayores éxitos ha obtenido el uso sistemático de este método. La forma esquemática tradicional de presentar al método científico es como una sucesión de pasos a seguir, como se muestra en la Figura 2.

 ISBN 978-607-8242-11-5

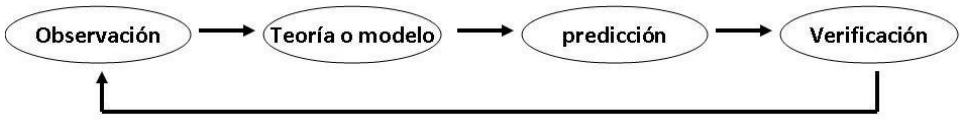


Fig. 2. Diagrama que muestra los pasos principales del Método Científico

Obsérvese que se forma un ciclo, pero lo más importante de este esquema es que no constituye un dogma que lleve al conocimiento "verdadero", pues cada paso implica una gran cantidad de problemas por resolver, que implícitamente llevan a la construcción de nuevas teorías que modifiquen, mejoren y substituyan a las que se encuentren en el momento de alguna investigación o estudio, lo que se denomina como "período de ciencia normal" (Kuhn, 1971). Pero, sin duda hemos de reconocer que todo conjunto de conocimientos que aspira a obtener la categoría de ciencia, parte del postulado fundamental de que la naturaleza es predecible. Y para hacer más útil el método científico, podemos plantearlo mediante un esquema más elaborado que indique diversas posibilidades de decisión al momento de llegar a resultados acordes con lo que se observa de la naturaleza, como el diagrama de la Figura 3.

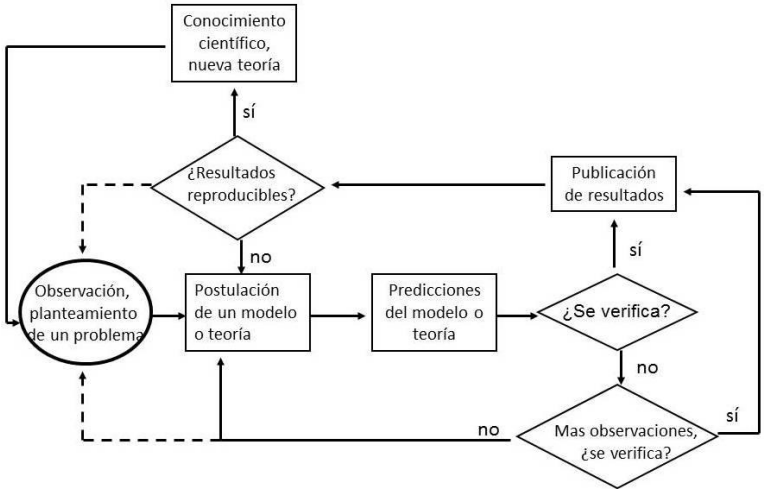


Fig. 3. Diagrama que muestra la manera como se aplica el Método Científico en general

Obsérvese que en el diagrama mostrado en la Figura 3, existen dos puntos importantes de bifurcación, de necesidad de decidir, y dos puntos de postulación que van conectados inmediatamente. Podemos resumir lo que se entiende por tales puntos importantes del diagrama.

Observación: en particular para un sistema físico consiste en tratar de entenderlo e intentar predecir su comportamiento (lo que significa actualmente buscar una manera de medir).

Postulación de un modelo o teoría: consiste establecer un conjunto de supuestos que necesitan ser verificados, considerándose una teoría como una refinación del modelo.

Predicciones del modelo: su característica principal es que debe poder predecir el comportamiento del sistema.

Verificación: en esta acción se somete al modelo del sistema a una revisión que le da consistencia lógica y puede o no asegurar su validez, comparándolo con el comportamiento de la naturaleza que hace el papel de árbitro en cuanto a la validación del modelo. La validez (si) permite proponer la verificación de resultados, y la no validez (no) obliga a proponer otro modelo o mejorar el anterior.

Reproducción de resultados: resulta crucial mostrar que los resultados del modelo son reproducibles, pues en caso afirmativo (si) lleva directamente a establecer una nueva teoría que debe contener a la anterior sobre la misma observación. En caso contrario (no), nos regresa al modelo para mejorarlo o desecharlo al crear uno más satisfactorio.

Es evidente que el método científico tiene una naturaleza dialéctica, en el sentido de que al momento de crear un modelo válido para un hecho natural, permite crear el posible rival (el contrario) que permita mejorar dicho modelo. Además nos muestra que una vez elegido un modelo y ciertas reglas de verificación, no podemos ni debemos transgredir dichas reglas. Se convierte en norma de conducta para cualquiera que desee dedicarse a esta actividad (la ciencia) o sus aplicaciones.

ISBN 978-607-8242-11-5

INTERACCIÓN VALORES - METODO CIENTÍFICO

Para hablar apropiadamente de una interacción entre Educación en Valores y Método Científico, es necesario observar que la invención y la innovación generan implícitamente un conjunto de sentimientos, valoraciones, gusto estético, deseo de demostración de las capacidades, desafíos y satisfacción, al vencer estos desafíos y obtener reconocimiento. Éstos son motivos para la creatividad, para el entusiasmo por la profesión y la entrega al trabajo, pero resultaría negativo que entraran en conflicto con los interese de la sociedad en que el futuro ingeniero se desarrollará. Una posible solución adecuada depende de un sistema de valores presente en el proceso de enseñanza-aprendizaje, que permita un desarrollo considerado adecuado del futuro profesional, proporcionando equilibrio en el desempeño de su labor. Se hace imprescindible hacer una selección de valores, a partir del modelo de profesional que se desee obtener. Así, en el caso de la ingeniería, se pueden proponer, sin que sean únicos o suficientes, los siguientes valores:

- Eficacia
- Dignidad
- Sensibilidad
- Compromiso Social

Se espera que estos valores generen un conjunto de actitudes a través de los valores específicos que se fomenten. Así, como se muestra en la Figura 4, se establece una relación entre las actitudes y los valores fomentados.

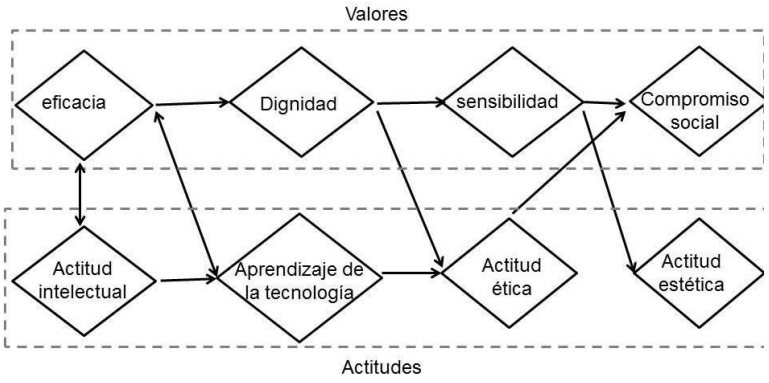


Fig. 4 Relación entre las Dimensiones (actitudes) y Valores seleccionados

Obsérvese que existe una retro-alimentación entre valores fomentados y actitudes, así la formación de valores permite la formación de actitudes para enfrentar el aprendizaje y la práctica profesional. También existe una relación entre estas actitudes y valores con la práctica del Método Científico, al utilizarlo en la enseñanza de las ciencias duras, como antes se dijo, particularmente en la enseñanza de la física. Un análisis de las actitudes necesarias al momento de utilizar este método nos muestra que existe implícitamente la formación de los valores arriba descritos (Figura 4), como se observa al analizar paso a paso el método.

Observación: al plantear un problema se muestra una actitud intelectual de manera que el modelo sea una forma adecuada de representar un hecho o fenómeno natural, se busca ser eficaz al tratar de resolver un problema.

Postular una teoría: para dicho modelo, aquí se aprende y se desarrolla una tecnología, a través de la creación de algoritmos para medir y comparar.

Verificación de las predicciones: aquí requerimos de una actitud ética, al presentar solo aquello que realmente se ha obtenido a partir del modelo, aunque no se ajuste a nuestras predicciones.

Actitud estética: una vez que el modelo ha sido verificado, y refinado, uno siempre busca una presentación lo más simple posible, en aras de la estética del modelo y, en su caso, del algoritmo necesario para la predicción de resultados.

En el caso de tener que regresar al punto inicial, el modelo mejorado o que substituye al anterior, conlleva una actitud de compromiso social, misma actitud que uno presenta al publicar solo resultados verdaderamente acordes con el modelo.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Es conveniente hacer ahora algunas aclaraciones sobre el presente trabajo. Sería interesante analizar algunos ejemplos de temas centrales de la Ingeniería o afines a ella. Pero tal vez tendríamos que precisar a cuál Ingeniería nos estaríamos refiriendo, pues en las universidades de muchos países no existe en especial una carrera de Ingeniería, pero si existen Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería en Sistemas, Ingeniería en Computación, Ingeniería Química, Ingeniería Ambiental, Ingeniería Hidráulica, etc. (un muy largo etc.). Todas ellas tienen un denominador común: el estudio de las matemáticas como herramienta (existe un nivel básico que sirve a todas) y el estudio de la física (también con un número básico de temas que a todas sirve). Introducir una discusión sobre alguna de estas ingenierías, llevaría a aumentar al menos en un par de cuartillas el presente extenso, y excedería los objetivos que se han planteado en forma general, pues la exposición se centra en mostrar las similitudes entre los objetivos intrínsecos del Método Científico en las ciencias duras necesarias en las ingenierías, y los objetivos explícitos de la teoría de la Educación en Valores. Esto es, el planteamiento es de carácter comparativo y no específico de una carrera o una asignatura.

CONCLUSIONES

Del estudio presentado, se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

1.- En el desarrollo del proceso enseñanza-aprendizaje para las ciencias duras, es posible aprovechar la insistencia de la utilización del Método Científico, para incluir en la enseñanza la apropiación de valores, por parte del estudiante, que moldeen los rasgos o características de la personalidad del futuro ingeniero, en aras de una actitud de servicio hacia la sociedad que lo ha entrenado, no solo para resolver problemas prácticos, también para tener una actitud digna ante los problemas y retos que se le presenten en su vida profesional.

2.- La Educación en Valores, como teoría pedagógica, puede ser incluida en el momento en que el Método Científico es puesto en práctica como una forma de exposición de la manera como el desarrollo de las teorías científicas han ido apareciendo, el estudiante puede verse reflejado como el futuro agente de cambio y desarrollo de la sociedad en que vive.

3.- Al analizar detenidamente los aspectos principales de la Educación en valores y el Método Científico, es posible hallar coincidencias entre los objetivos de una y otro, de manera que se forma una simbiosis, que puede ser aprovechada por los profesores, durante el desarrollo del proceso enseñanza-aprendizaje, para beneficio del futuro profesionista en particular, y la sociedad que lo prepara para la vida en general.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de sus respectivas Instituciones en el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

Arana, M. y Armenteros, Ma. Del C.; Formación Sociohumanista en las Carreras de Ciencias Técnicas en Cuba. Contactos 1996; III [23]: 26-29.

Arana, M. y N. Batista; La Educación en Valores: Una propuesta Pedagógica para la Formación Profesional, ISPAJAE, Ministerio de Educación Superior (Cuba), Documentos de Trabajo (1997).

Barba, B.; Educación y valores: Una búsqueda para reconstruir la convivencia. Revista Mexicana de Investigación Educativa 2005; 10 (24): 9-14.

Batista, N. y Reyes, D.; La integraliadad en la formación del egresado: un imperativo universitario. Contactos 1997; III [22]: 37-43.

Córdova, J. y Rojo, A.; Actitudes Científicas en el Aprendizaje de Ciencias. Contactos 1985; II [7] : 52-61

Garcell, B.M.; Teorías y Estrategias para la Formación de Valores en la Educación, Cuadernos de educación y Desarrollo 2010; 2 [17].

Kuhn, T. S.; La estructura de las revoluciones científicas. FCE, 4ª ed., México: 2013.

Lucini, F.; Educación en Valores y Reforma Educativa. Vela mayor: 2, Anaya educación, España (1994).

Poncairé, R.; Filosofía de la Ciencia, Edición en castellano, CONACYT, México (1981).

Rosenblueth, A.; El método Científico, Prensa Médica Mexicana, CIEA-IPN, México (1971).

Schmelkes, S.; La formación de Valores en la Educación, Estudios (Filosofía-Historia-Letras), verano-otoño ITAM, México (1996).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Uso de Mapas Conceptuales para la Elaboración de Contenidos Básicos de la Termodinámica

Gloria Ma. Jaime-Mirabal[1] y Delfino Ladino-Luna[2]
(1) CES, Universidad de Pinar del Río, Martí No. 300, Pinar del Río, Cuba
(2) Física de Procesos Irreversibles, Dpto. Ciencias Básicas, U. Autónoma Metropolitana-A
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, 02200, Atzcapotzalco, D. F., México
e-mail: [1]gjaimem@upr.edu.cu, [2]dll@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra la manera como se puede utilizar la metodología de los mapas conceptuales para un curso básico de termodinámica, que tiene el defecto de estar ubicado antes de conocer de manera adecuada el cálculo diferencial e integral de una y varias variables, y antes de haber superado los cursos elementales de física general (cinemática y dinámica de partículas), lo cual dificulta la exposición de este tema. El objetivo principal es mostrar una posible estructuración del contenido de dicho curso, haciendo notar como se relacionan los principales conceptos y definiciones necesarios e indispensables para lograr una exposición coherente y lo más simple posible, con la ayuda de los diagramas de flujo utilizados en la programación de computadoras. Aunque para un mismo tema se puede proponer más de un mapa conceptual, con el ejemplo que se presenta se pretende motivar el uso de este recurso didáctico (los mapas conceptuales) para la elaboración tanto de los programas analíticos del curso, como de las exposiciones en el aula para los alumnos.

Palabras clave: mapas conceptuales, enseñanza-aprendizaje, estructuración programática

Use of Conceptual Maps for the Elaboration of Basic Contents of Thermodynamics

ABSTRACT

The present work shows how the methodology of conceptual maps can be used for a basic course of thermodynamics, which has the defect of being located before adequate knowledge of the differential and integral calculus of one and several variables, and Before they have passed elementary courses in general physics (kinematics and particle dynamics), which makes this subject difficult to explain. The main objective is to show a possible structuring of the content of this course, noting how the main concepts and definitions necessary and indispensable are related to achieve a coherent exposition and the simplest possible, with the help of the flowcharts used in programming Of computers. Although for a same theme it is possible to propose more than one conceptual map, with the example presented, it is intended to motivate the use of this didactic resource (conceptual maps) for the preparation of both the analytical programs of the course and the exhibitions in The classroom for the students.

Keywords: conceptual maps, teaching-learning, programmatic structuring

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Una de las disciplinas del conocimiento más maduras es la física, que se sustenta en métodos en los que todo el pensamiento puede expresarse de manera concisa a través de los modelos y definiciones que le son inherentes. En particular para la termodinámica, que es la una de las partes más recientemente estructuradas, una preocupación importante en el proceso de enseñanza-aprendizaje es hallar la mejor manera posible de estructurar los programas de estudio, debido a lo muy general de las leyes que de ella se han obtenido. Y una alternativa de estructuración de los contenidos de dichos programas de estudio es la elaboración de mapas conceptuales, que permitan organizar de la manera más simple posible los principales temas y conceptos de ella, así como la manera como éstos se relacionan entre sí, apoyado en el formalismo matemático adecuado, con el propósito de lograr la mayor aproximación posible al conocimiento de cómo actúa la naturaleza.

Por otro lado, en general en las ciencias se puede afirmar que el objetivo central de su desarrollo es la comprensión de cómo actúa la naturaleza. Comprender los fenómenos naturales ha sido una actividad constante de la humanidad desde los primeros tiempos de su existencia. Para lograr este objetivo, se han elaborado modelos, que después se han verificado comparándolos con lo que se observa, de manera que estos modelos se han ido mejorando. La estructura de los modelos puede establecerse de dos maneras: experimental ó teórica. En este sentido es importante hace notar que un modelo simple de desarrollo de las teorías en la ciencia se puede plantear como el esquema cíclico:

$$\text{OBSERVACIÓN} \Rightarrow \text{EXPLICACIÓN} \Rightarrow \text{TEORÍA} \Rightarrow \text{LEY} \Rightarrow \text{OBSERVACIÓN}$$

El objetivo es lograr una estructuración lógica del pensamiento (Mancilla-Coello y Ladino-Luna, 1998). Es posible complementar este esquema simple planteando mapas conceptuales (Ahumada, 1983) que indiquen la forma como se puede lograr una estructuración lógica del pensamiento.

En el presente trabajo se muestra la manera como se pueden emplear dichos mapas conceptuales, que se entienden como diagramas que relacionan varios conceptos con cierta jerarquía de éstos, que reflejen la organización conceptual propiamente dicha. Puesto que los mapas conceptuales son diagramas bidimensionales, permiten establecer estas relaciones jerárquicas entre conceptos, y derivan su existencia de la propia estructura de la disciplina que se quiera representar. Además, estos mapas conceptuales, resultan un adecuado recurso en la preparación de la exposición de los temas de cualquier disciplina durante el proceso de enseñanza-aprendizaje (Moreira, 1988). El trabajo se apoya en las herramientas que contienen los paquetes computacionales para el diseño de diagramas de flujo, de manera que el éxito de esta discusión consiste en gran medida en la adecuada elección de los pasos necesarios y la manera de relacionar jerárquicamente los conceptos básicos involucrados en cada disciplina. Como un ejemplo simple se presenta la manera como puede plantearse el curso básico de termodinámica, tal como se imparte en el tronco básico de las carreras de Ingeniería, de la Unidad Azcapotzalco (Campus), de la Universidad Autónoma Metropolitana, tomando en cuenta que el estudiante promedio tiene muy elementales conocimientos de matemáticas y física necesarios para el curso.

Se espera que esta presentación motive la discusión de estos mapas conceptuales como una guía de desempeño de una clase típica, de cualquier tema de la física que se quiera explicar, haciendo hincapié en la necesidad de obtener un aprendizaje productivo por parte del alumno, en el sentido de que sea capaz de aplicar los conocimientos adquiridos de forma creativa.

LOS MAPAS CONCEPTUALES

Puede definirse a los mapas conceptuales a través de una descripción de ellos. Así, podemos decir que los mapas conceptuales son diagramas gráficos en los que se establece una jerarquía entre los conceptos del conjunto de conocimientos que se quiera representar, de manera que se tengan conceptos supra-ordenados (que sean muy generales), conceptos subordinados (que sean intermedios), y conceptos específicos (relacionados con los primeros a través de los segundos). Son esencialmente diagramas jerárquicos que reflejan la organización conceptual de una disciplina o parte de ella.

Los mapas conceptuales como técnica para relacionar significados en los programas de enseñanza son actualmente una posibilidad didáctica, que tuvo su origen en el Programa de Educación en Ciencias y Matemáticas, del Departamento de Educación de la Universidad de Cornell, Ithaca, N.Y., en los años ’70 del siglo pasado (Bogden, 1977; Novak, 1977).

Existen diagramas que dan una visión solamente jerárquica de los conceptos de una disciplina, se les conoce como uni-dimensionales. Pero un diagrama que además de establecer jerarquías muestra relaciones entre varios conceptos, resulta más útil, y se les conoce como bi-dimensionales. Estos diagramas

 ISBN 978-607-8242-11-5

bi-dimensionales son lo que realmente llamamos mapas conceptuales. La forma de un mapa conceptual para una disciplina en particular no es única, pues la forma de mostrar la jerarquía conceptual no es tampoco única. Por tanto cualquier mapa conceptual debe ser considerado como una de las posibles representaciones de una cierta estructura conceptual (Moreira, 1988). A continuación presentamos dos diagramas para un mismo curso de nivel básico universitario. La Figura 1 muestra un diagrama típicamente jerárquico del contenido de un curso básico de ecuaciones diferenciales (diagrama de seriación de temas); la Figura 2 muestra un diagrama con interrelaciones, que es ya propiamente un mapa conceptual, en el cual se especifican algunos conceptos.

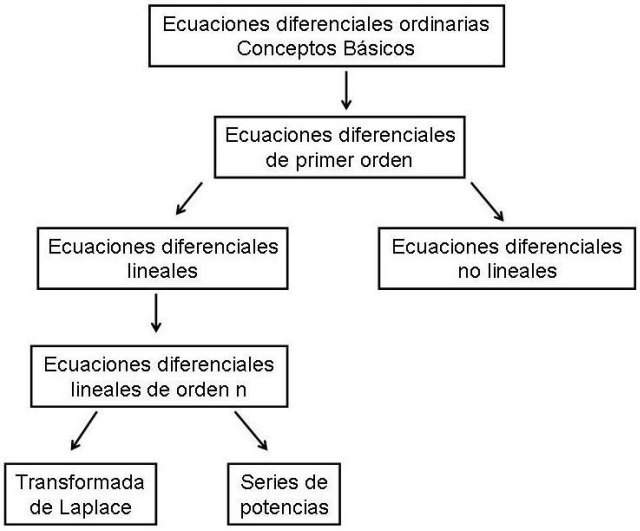


Fig. 1. Diagrama de seriación de un programa de estudio

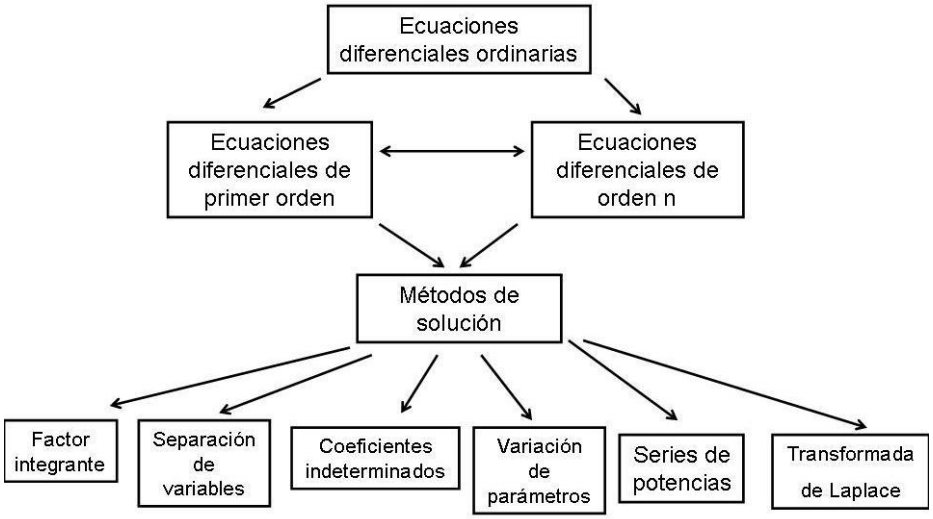


Fig. 2. Diagrama que relaciona conceptos: mapa conceptual

Pero es necesario aclarar que los mapas conceptuales son esencialmente auxiliares en la elaboración de contenidos y en la preparación de una clase (exposición del profesor en el aula). Pueden servir como recurso didáctico al momento de realizar una recapitulación de algún tema, pues le sería útil al alumno si éste ya tiene una cierta familiaridad con los conceptos básicos que se estén estudiando. Además, como señala adecuadamente Moreira (Moreira, 1988), debe tenerse cuidado al tratar de utilizar estos mapas conceptuales, pues así como se les puede hallar virtudes, también resultan contraproducentes. Tal vez la mayor virtud es que proporcionan una visión integrada del tema que se esté estudiando, pero puede ser tan complejo que cree confusiones y dificulte el aprendizaje y la comprensión de los conceptos, en vez de facilitarlos. Un buen programa implica un cuidadoso análisis de cuáles son los conceptos centrales para la comprensión de una disciplina o parte de ella, que esté siendo considerada. Los mapas conceptuales pueden ser extraordinariamente útiles en esta tarea, pero debe tomarse en cuenta que no existe una manera única de representar una materia de enseñanza, y por tanto no existe la mejor manera de hacerlo.

ISBN 978-607-8242-11-5

EL CURSO BASICO DE TERMODINÁMICA EN LA UAM-A

En la Unidad Azcapotzalco (Campus), de la Universidad Autónoma Metropolitana, en el segundo nivel de lo que se llama el Tronco Básico General de Unidades de Enseñanza-Aprendizaje (uea), aparece un primer curso de Termodinámica. En otras instituciones de este mismo nivel aparece generalmente cuando ya el alumno ha superado varios cursos de física general (mecánica clásica, electricidad y magnetismo, óptica, fluidos, etc.) así como de matemáticas (básicamente Cálculo Diferencial e Integral de una y varias variables y Ecuaciones Diferenciales Ordinarias). Pero en esta Unidad Académica, el estudiante que opta por cursar esta uea, solamente ha asistido a las uea's de Cinemática y Dinámica de Partículas y una Introducción al cálculo, y sin que éstas sean un requisito. Al mismo tiempo debe cursar las uea's de Cálculo Diferencial e Integral de una variable y Dinámica del Cuerpo Rígido, como se puede observar en la página web de la UAM-A (http://cbi.azc.uam.mx/work/models/CBI/Documentos/TroncoGeneral/TNA_y_TG_Boligrama.pdf). Al impartir esta uea, debe seleccionarse cuidadosamente la manera de presentar los temas que corresponden a ella, pues el estudiante está desarmado, y por tanto el curso debe ser muy elemental. Existen desde luego un contenido sintético y un programa analítico de la uea (ver también la página de la UAM-A). A partir de estos materiales es posible construir un mapa conceptual para esta uea, que sirva de guía al momento de preparar cada sesión con los estudiantes. El contenido sintético es el siguiente:

1. Equilibrio térmico y temperatura
2. Ecuación de estado
3. Trabajo, calor y energía interna
4. Procesos
5. Ciclos
6. Entropía y espontaneidad

Se observa que aparecen tres conceptos básicos, a saber, Temperatura, Calor y Entropía. Cada uno de ellos permite enunciar una ley de la Termodinámica: la Temperatura permite establecer el principio de Equilibrio Térmico, el Calor permite establecer el Principio de la Conservación de la Energía, la Entropía permite establecer el Principio de la No-Reversibilidad de los procesos termodinámicos. Esto es, las leyes Cero, Primera y Segunda de la Termodinámica. Pero, aparecen además otros conceptos relacionados con estas leyes. Los principales son: Trabajo, Energía Interna, Variable de Estado, Capacidad Calorífica, Calor Específico.

Vale la pena hacer notar que cuando se habla de contacto térmico, se busca que en cierto momento dos cuerpos cualesquiera (sistemas) compartan una forma de energía que llamamos calor, para que mediante un termómetro obtengamos una misma medida de lago que llamamos temperatura. Cuando dos cuerpos tienen la misma temperatura, decimos que están en equilibrio térmico, y a menos que cambiemos sus condiciones (su estado), esa temperatura permanecerá constante (Ley Cero). Cuando cambiamos las condiciones, mediante algún proceso, parte de ese calor que tiene el cuerpo se puede aprovechar para obtener trabajo, pero la cantidad de energía que existe en el sistema permanece constante, aunque se haya transformado, pues la energía no es más que una medida de la capacidad de realizar trabajo (Segunda Ley). Finalmente, una vez que se ha transformado la energía en trabajo (que se puede concebir como energía en transformación), las condiciones del sistema han cambiado, y no es posible el proceso inverso de manera espontánea (Segunda Ley). Este es básicamente el camino a seguir en la exposición de la termodinámica e este nivel, cuando se imparte esta uea.

Es interesante observar que al intentar hacer un mapa conceptual de un programa de estudio, en el fondo el número de conceptos importantes es relativamente pequeño, como es el caso que estamos analizando. Pero el mapa conceptual es una representación abierta de los conceptos y proposiciones y representan sus relaciones significativas. Una posibilidad para esta uea (termodinámica a un nivel elemental) sería el diagrama mostrado en la Figura 3, que ha sido elaborado de manera que se distingan los conceptos básicos importantes (que permiten directamente el establecimiento de leyes generales), de los conceptos auxiliares que permiten el cálculo de las cantidades más importantes para la resolución de problemas de aplicación práctica. La interrelación de algunos conceptos se ha hecho evidente con flechas de doble dirección, no así le manera como se indica una consecuencia directa:

$$\text{Concepto (cantidad definida)} \Rightarrow \text{Ley general}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

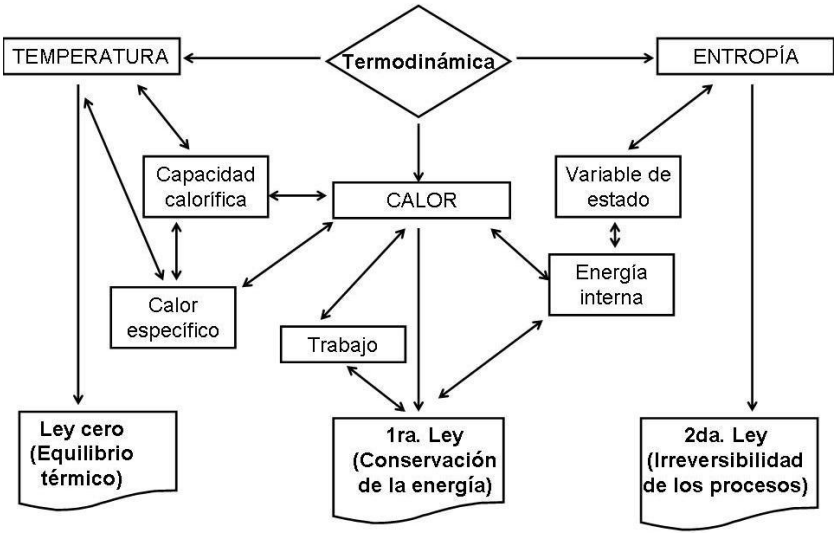


Fig. 3. Mapa conceptual para la uea Termodinámica

Sin embargo, aunque estos mapas conceptuales son buenos auxiliares en la preparación de una exposición y en la identificación de objetivos y metas para un programa de estudio, es importante hacer hincapié en que su uso en una clase debe realizarse cuando el alumno ya esté familiarizado con el tema de estudio. Conviene aquí recordar que en este nivel (nivel universitario) el primer agente del aprendizaje es el alumno mismo. Esto es que quien está obligado a realizar el mayor esfuerzo es el alumno, pues en la tarea educativa el profesor se enfrenta al problema de que se espera un alumno con interés de aprender y disposición para trabajar, y a cambio se tiene un alumno excesivamente dependiente del profesor, y con poco interés para enfrentar los retos que aparecen en el proceso.

También se enfrenta el problema de cumplir en un tiempo determinado un programa de estudio, pero puede suceder que precisamente el tipo de alumno que se tiene no permita el avance adecuado. Así, la planeación del curso (la uea en nuestro caso), resulta indispensable, y un recurso para hacerlo es el uso de los mapas conceptuales. Una vez que el alumno ha pasado por este "entrenamiento", podrá estar en condiciones no solo de entender un mapa conceptual, además podrá ser capaz de desarrollar su propio mapa conceptual, mostrando así su nivel de entendimiento de la materia que esté estudiando.

Conviene hacer notar que en la Universidad Autónoma Metropolitana el uso de los mapas conceptuales es una práctica muy usual, sobre todo en cuanto a la planeación de la currícula de las diferentes carreras que ofrece la Institución, los Diagramas de Seriación de las diferentes uea's (los "boligramas") que el alumno aspirante a obtener un Título Universitario debe aprobar. La adecuada utilización de estos diagramas de seriación permiten que el alumno de la Universidad tenga una preparación suficiente y adecuada para enfrentarse al mercado laboral.

CONCLUSIONES

Apoyados en estudios psicológicos se han desarrollado diversas teorías educativas, y modelos de melorar el proceso de enseñanza–aprendizaje. Estos van desde la enseñanza tradicional, con el uso de La Lección, centrada en el profesor, hasta el llamado "aprendizaje vivencial", centrado en el alumno. Pero independientemente de estos modelos, resulta indispensable la planeación del curso. Es en este sentido en el que tiene importancia la utilización de los mapas conceptuales, no como un mecanismo de exposición, sino como una herramienta de planeación, y posteriormente de refuerzo del aprendizaje obtenido por el alumno, cuando ya se ha agotado el tema, el tiempo dedicado a él, y se hace necesaria una recapitulación de la materia. El recurso puede traducirse en un modelo conductista, creando un condicionamiento que pone en juego tres elementos básicos como una relación de causa-efecto (Ayala-Velázquez 2001), a saber,

$$\text{Estímulo} \Rightarrow \text{respuesta} \Rightarrow \text{Refuerzo}$$

Por otro lado, podemos notar que aun cuando las proposiciones son dos o más conceptos ligados, (incluso con palabras), los mapas conceptuales ayudan a exteriorizar los conceptos y proposiciones de un conjunto de conocimientos de modo que representan una manera de organizar y expresar los significados cognoscitivos atribuidos a las relaciones entre esos conceptos, y pueden verse como un recurso para mostrar el entendimiento conceptual y proposicional que se tiene sobre un cierto conjunto de conocimientos.

ISBN 978-607-8242-11-5

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de sus respectivas Instituciones en el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

Ahumada, W.E., Mapas Conceituais como Instrumentos para Investigar a Estructura Cognitiva en Física, Disertacao de Maestrado nao publicada, Instituto de Física da UFRGS, Brasil (1983).

Ayala-Velázquez, Ma. De los D.; En Busca del método para Mejorar el Aprendizaje en la Enseñanza (Experimental). Parte I. Contactos 2001; III [41]: 30-44.

Bogden, C.A.; The Use of Concept Mapping as a Possible Strategy for Instructional Desing and Evaluation in College Genetics. Unpubhlised Ph. D. Thesis, Cornell University (1977).

http://cbi.azc.uam.mx/work/models/CBI/Documentos/TroncoGeneral/TNA_y_TG_Boligrama.pdf

Mancilla-Coello, I. y Ladino-Luna, D.; Aprendizaje de los Primeros Conceptos en Física. Contactos 1998; III [29]: 11-15.

Moreira, M. A.; Mapas Conceptuales en la Enseñanza de la Física. Contactos 1988; III [2], 38-57.

Novak, J.D.; A Theory of Education. Cornell University Press, Ithaca, N.Y. (1977). Traducción al castellano, Alianza Editorial, Madrid, (1982).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Retos y realidades de la implementación de las tecnologías de información y comunicación en la educación indígena en La Guajira Colombiana

María F. Giraldo Polanco[1] y Miryam Y. Arroyo-De La Ossa[2]
(1) Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad de La Guajira – Colombia
(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira – Colombia
mafegiraldo@uniguajira.edu.co – marroyo@uniguajira.edu.co

Resumen

Este trabajo presenta un análisis crítico de la implementación de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en la educación indígena en el contexto wayuu de La Guajira, colombiana. Se inicia con una breve reseña de las diferentes modalidades que ha asumido la educación indígena en La Guajira para señalar que cada una de ellas representa retos y necesidades particulares con respecto a las TIC. Así mismo, se abordan los tres principales enfoques teóricos que han analizado la relación entre cultura y tecnología para ubicar las posturas epistemológicas de las diferentes experiencias encontradas en el contexto wayuu: el sustantivismo o determinismo tecnológico, el instrumentalismo o neutralismo; y la teoría crítica de la tecnología.

Esta investigación fue abordado desde el enfoque cualitativo aplicando la etnografía multisituada como metodología. Esta implicó la ejecución de técnicas de recolección de información tales como: la revisión bibliográfica, la observación participante y las entrevistas semi-estructuradas. Se pudo establecer que en un contexto en el cual las TIC se vislumbran como escenario de lucha, como mediación para la reivindicación de derechos, y como mecanismo para cerrar las "brechas" en lugar de abrirlas; es de gran importancia trabajar de manera particular en cada contexto, pues las realidades de la educación indígena wayuu son tan diversas que exigen no solamente considerar las diferencias interétnicas sino también las intraétnicas realizando procesos de consulta y acompañamiento constantes. En este orden de ideas, las herramientas deben ser adaptadas para atender a las necesidades del contexto, la capacitación y acompañamiento a los docentes debe ser permanente y específico para atender sus demandas. Se concluye que, las TIC son un escenario de interacción cultural y educativa que debe apoyar los Sistemas de Educación Indígena Propios y fomentar la inclusión dadas sus potencialidades como herramientas generadoras de interculturalidad.

Referencias

Academy, N. S. (2007). *Is it possible to have Information Technology that reflects Indigenous Consciousness ? the Those who shared their knowledge : Tania Haerekitera Wolfgramm , Executive Director* (p. 24). New Mexico.
Bermudez, A., & Ochoa, R. (2013). Propuesta metodológica para la inclusión tecnológica de la Comunidad Indígena Wayuu. *Uni-Pluri/versidad*, *13*, 71–81.
Calcagno, S., & Hernandez, I. (2003). *Los pueblos indígenas y la sociedad de la información en América Latina y el Caribe: un marco para la acción* (pp. 1–18).
CONTCEPI. (2012). *Perfil del Sistema Educativo Indígena Propio - SEIP* - (pp. 1–141). Bogotá.
Dyson, E., Hendriks, M., & Grant, S. (Eds.). (2007). *Information Technology and Indigenous People*. London: INFOSCI.
Dyson, L. E. (2004). Cultural Issues in the Adoption of Information and Communication Technologies by Indigenous Australians. In S. & Ess (Ed.), *Proceeding Cultural Attitudes Towards Communication and Technology* (pp. 58–71). Sidney: Murdoch University.
Giuliano, G. (2008). Tecnología , desarrollo y democracia : hacia otra artificialidad posible. *Scientiae Studia*, *6*(3), 371–377.
Hunter, J. (2005). The Role of Information Technologies in Indigenous Knowledge Management. *Australian Academic & Research Libraries*, *36*(2), 109–124. doi:10.1080/00048623.2005.10721252
Maidana, C., Ottenheimer, A. C., & Rossi, E. (2011). Comunidades indígenas y apropiación de TIC: Un nuevo espacio en la producción de conocimiento conjunto. In *Antropología de los Nativos* (pp. 131–145).
Quero, S., & Madueño, L. (2006). Süchiki Walekerü: un ejemplo del uso de las TIC en escuelas indígenas, caso Wayuu. *Revista Educere*, *10*(34), 435–442.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Taylor, A. (2012). Information Communication Technologies and New Indigenous Mobilities ? Insights From Remote Northern Territory Communities. *Journal of Rural and Community Development*, *1*(7), 59–73.
Warschauer, M. (1998). Technology and Indigenous Language Revitalization: Analyzing the Experience of Hawai'i. *Canadian Modern Language Review/ La Revue Canadienne Des Langues Vivantes*, *55*(1), 139–159. doi:10.3138/cmlr.55.1.139

 ISBN 978-607-8242-11-5

Optimizando Estrategias de Negociación Comercial

Gerardo Manuell Cid,
Ph. D. Luis V. Montiel.

Departamento de Ingeniería Industria y Operaciones,
Instituto Tecnológico Autónomo de México – ITAM,
Rio Hondo 1, 01080 CDMX, México,
gmanuellcid@gmail.com, *luis.montiel@itam.mx*

6 de agosto de 2017

Resumen

Este trabajo presenta una metodología que permite encontrar la estrategia que maximiza la probabilidad de cerrar una negociación en escenarios cooperativos de utilidad transferible con fines comerciales. Esta metodología genera estrategias superiores a los métodos previamente establecidos en la literatura tal como *Shapley Value* (SV) y el *Core*, porque a diferencia de estos, nuestra propuesta siempre ofrece una solución *implementable* y proporciona una justificación al maximizar la probabilidad de cerrar la negociación exitosamente. Nuestro procedimiento mapea el *Core* del juego utilizando una herramienta de simulación multidimensional denominada JDSIM que genera una muestra representativa del *Core*. A partir de esta información se obtienen las funciones empíricas de probabilidad acumuladas de los pagos de cada actor y se determina la negociación que maximiza el producto de estas funciones. Este nuevo método propone una estrategia que siempre excede o iguala la probabilidad de las estrategias propuestas por SV y el Centroide del *Core* para cerrar una negociación de modo exitoso.
Palabras clave: Negociación, Simulación de Juegos, Shapley Value, Core, JDSIM.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una cantidad reducida de métodos para resolver esquemas de negociacién y casi ninguno de ellos se aplica para resolver problemas comerciales prácticos debido a la complejidad inherente a este tipo de juegos. Es por ello que en este trabajo presentamos un nuevo mecanismo que nos permita usar los principios básicos de la Teoría de Juegos para crear una herramienta robusta y de uso practico, con el fin de resolver negociaciones comerciales donde n actores requieren ponerse de acuerdo para obtener un beneficio.

La literatura plantea seis métodos principales para encontrar una distribución de pagos que motiven a los participantes a cerrar una negociación. Estos métodos son: Von Neumann-Morgenstern solution [von Neumann and Morgenstern, 1944], Shapley Value [Shapley, 1953], el *Core* [Shapley, 1952], *Bargaining Set* [Aumann and Maschler, 1961], el *Kernel* [Davis and Maschler, 1965] y el Nucleolo [Schmeidler, 1969].

De estos métodos, *Shapley Value* (SV) y el *Core* destacan por ser los mas populares debido a su intuición. En el caso de SV, el método calcula el pago promedio que cada jugador recibe de acuerdo a todos los posibles pagos que podría recibir en cada una de las permutaciones de la coalición en la que participan todos los jugadores (*Gran Coalición*, denominada como **N**), estos pagos se calculan en función de las contribuciónes marginales de cada jugador. A diferencia de SV, el *Core* se puede describir como el set de todas las posibles negociaciónes que son aceptables para todos los jugadores, considerando todas las subcoaliciones que se pueden formar entre los n participantes.

El problema estriba en que ninguno de estos dos métodos (SV y el *Core*) ofrecen soluciones confiables. En el caso de SV, la estrategia de negociación no siempre es *implementable*; es decir, en ciertas ocasiones SV propone una distribución de pagos en la que al menos un actor recibe menos beneficios que si optara por no participar en la *Gran Coalición*. En estos casos la propuesta de SV nos puede lleva a inferir que la cooperación

 ISBN 978-607-8242-11-5

entre los n jugadores no es posible ya que no existen incentivos suficientes que aseguren que los actores se mantendrán en la *Gran Coalición*. En el caso del *Core*, el problema estriba en que por lo general no existe una estrategia única. De modo que aunque todas las estrategias dentro del *Core* proveen los incentivos para que todos los actores participen en la *Gran Coalición*, resulta extremadamente difícil encontrar una distribución de los beneficios que sea justa a los ojos de todos los participantes. Un ejemplo de este problema se da con el centroide del *Core*, que aunque es una estrategia única e *implementable*, no existe un argumento claro para justificar que dicha distribución de pagos deba ser aceptada de igual modo por todos los n miembros de la *Gran Coalición*.

Otros métodos menos populares como Von Neumann-Morgenstern solution utiliza el concepto de *dominación* [von Neumann and Morgenstern, 1944] para definir un set de pagos **S** en donde una distribución de pagos x *domina* a otra y cuando cada uno de los miembros de la coalición obtiene un pago mayor dentro de la distribución de pagos x al que obtendría con la distribución y. Esto implica que ninguna distribución de pagos x contenida en **S** es dominada por otra distribución y contenida en **S**. Y que toda distribución de pagos x no contenida en **S** está dominada por alguna distribución y contenida en **S**. Sin embargo, el problema de este concepto estriba en que no es una solución fácil de calcular ni tampoco hay certeza de que el set **S** de un juego exista [Lucas, 1969] o sea único [Lucas, 1992].

Por otro lado, soluciones como el *Kernel* y el Nucleolo -además de ser complejas de calcular- pertenecen a la familia del *Bargaining Set*, que representan soluciónes alternativas que surgen a partir del concepto de la solución de Von Neumann-Morgenstern con la finalidad de definir un conjunto de soluciones *estables* en el sentido de que ningún jugador tenga un incentivo a salirse de una coalición, y por ende pueda contrarrestar cualquier *objeción* de otro jugador que pertenezca a la coalición con una *contra-objeción*. Sin embargo como explican Aumann y Drèze, la familia del de soluciones del *Bargaining Set* se calcula a partir de una subcoalición determinada, por lo que sus soluciones no involucran necesariamente a la *Gran Coalición*, que es el principal interés de este trabajo. Por estas razones nos enfocaremos en comparar nuestro método con las soluciones propuestas por SV y el *Core*, y consideraremos los otros métodos en un futuro cuando trabajemos en optimizar estrategias de negociación en escenarios donde la *Gran Coalición* no es implementable.

2. NEGOCIACIONES COMERCIALES

En esta sección nos interesa enfatizar el carácter de las negociaciones comerciales para poder diferenciarlas de aquellas con fines sociales. La diferencia entre estas se refiere *al punto de interés de cada una dentro del proceso de negociación*. Mientras que en negociaciones comerciales los participantes del juego pueden decidir si actúan de forma cooperativa generando un beneficio grupal o ejecutan el proyecto por su cuenta obteniendo un beneficio particular; en negociaciones sociales se requiere forzosamente que un cierto número de jugadores formen una coalición con suficientes votos para poder llevar a cabo el proyecto y distribuirse el beneficio, en tal caso los jugadores que quedan fuera de la coalición ganadora no reciben ningún beneficio, ni tienen posibilidad de generar algún beneficio de modo particular. Por esta razón, existe una mayor prioridad en la forma en la que cada jugador decide unirse o no a una coalición.

Dentro de las negociaciones comerciales es natural asumir que la utilidad es transferible, ya que es equivalente a generar transferencias monetarias entre los distintos actores para obtener el máximo beneficio posible para todos. De modo similar es posible asumir información perfecta, ya que la información imperfecta reduce la posibilidad de crear la *Gran Coalición*, lo que resulta en detrimento de todos los participantes.

Dentro del contexto de las negociaciones comerciales, definimos una *Negociación Implementable* como:

Definición 1. Llámese *Negociación Implementable* a toda distribución de pagos para **N** tal que cada subcoalición obtiene un beneficio mayor o igual al que tendría si actuara por su cuenta.

De modo que el *Core* de una negociación es el conjunto de todas las *negociación implementables*. Gillies [1959] presenta una definición equivalente descrita como "El espacio n-dimensional delimitado por todas las negociaciones que satisfacen las restricciones de la distribución del valor del juego entre los n-actores". Para ambas definiciones, el interés de este trabajo es encontrar una distribución de pagos que sea implementable, única, y que maximice el la intención de todos los involucrados en participar para garantizar el máximo beneficio posible.
Por ello, el valor de esta metodología radica en dos puntos principales:

 ISBN 978-607-8242-11-5

1. La negociación propuesta para **N** siempre está contenida dentro del *Core* y por ende, cada subcoalición siempre recibe un beneficio mayor o igual al beneficio que obtendría sí actuara por su cuenta haciendo así que la negociación sea *implementable* para negociaciones comerciales.
2. La negociación propuesta maximiza la probabilidad de que los jugadores cooperen entre sí y siempre es mayor a la probabilidad de las negociaciones que ofrecen SV y el Centroide del *Core*.

3. METODOS EXISTENTES

3.1. Shapley Value

Shapley Value es un número que busca representar el valor de un juego *esencial* para un jugador sintetizando todas las distintas alternativas a las que se puede enfrentar en un juego definido en forma de función característica [von Neumann and Morgenstern, 1944]: puede actuar por cuenta propia, cooperar con uno u otro jugador o colaborar con todos los jugadores del juego para formar **N**. Además, tiene la propiedad de ser el único valor que cumple con los siguientes 3 axiomas [Shapley, 1953, p.309]:

1. **Simetría:** El valor de un juego es esencialmente una propiedad del juego abstracto.
2. **Eficiencia:** El valor calculado del juego representa una distribución del valor total del juego.
3. **Ley de Agregación:** Para combinar dos juegos independientes sus valores se deben sumar jugador por jugador".

Al cumplir con estos 3 axiomas, Shapley Value permite evaluar de forma *a priori* el valor esperado de cada jugador al participar en el juego, considerando que todos los demás jugadores se unen a la coalición en forma completamente aleatoria pero igualmente probable. De modo que cada jugador demanda y recibe un pago de acuerdo a su contribución marginal promedio dentro del valor de cada coalición [Shapley, 1953].

Cabe destacar que Shapley Value utiliza el concepto de función característica $v : \mathbb{B}^n \rightarrow \mathbb{R}$ desarrollado por Von Neumann y Morgenstern para representar el valor de un juego con base en 3 propiedades fundamentales [Von Neumann y Morgenstern, 1944, p.241]:

$$v(\emptyset) = 0, \tag{3.1}$$

$$v(-\mathbf{S}) = -v(\mathbf{S}) \quad \text{para} \quad \mathbf{S} \subset \mathbf{N}, \tag{3.2}$$

$$v(\mathbf{S} \cup \mathbf{T}) \geq v(\mathbf{S}) + v(\mathbf{T}) \quad \text{si} \quad \mathbf{S} \cap \mathbf{T} = \emptyset \quad \text{para} \quad \mathbf{S}, \mathbf{T} \subset \mathbf{N}. \tag{3.3}$$

De estas tres propiedades, la ecuación 3.1 se refiere a que el valor de un juego con cero jugadores tiene un valor de cero; la ecuación 3.2 consiste en que el valor de la función característica evaluada en el complemento del set **S** es el mismo que el complemento de la función característica evaluada en **S**; finalmente, la ecuación 3.3 hace referencia a la necesidad de que la función característica sea *superaditiva* y obliga a que el valor de cualquier coalición genere por lo menos el mismo valor que el que obtiene cada jugador si actúa por su cuenta cuando se evalúan dos conjuntos disjuntos **S** y **T** con $\mathbf{S}, \mathbf{T} \subset \mathbf{N}$.

3.2. El *Core*

La idea del *Core* parte esencialmente de la Curva de Contrato [Edgeworth, 1881], en el sentido de que todas aquellos puntos que componen la curva y proponen una distribución de los bienes entre los actores de la economía son equivalentes a las negociaciones que componen el *Core* de un juego. Estos conceptos son equivalentes porque se refieren a todas aquellas negociaciones en las que ningún jugador puede beneficiarse sin necesariamente perjudicar al otro (son puntos eficientes en el sentido de Pareto) y la negociación final que ocurrirá entre los jugadores dependerá completamente del poder de negociación que cada uno tenga.

No obstante, la noción *moderna* del *Core* fue desarrollada por Shapley [Shapley, 1952] y Gillies [Gillies, 1959] que definen el *Core* como "el conjunto de negociaciones que no pueden ser mejoradas por otras negociaciones fuera del set" y cuenta con las siguientes características:

 ISBN 978-607-8242-11-5

1. **Asignaciones Eficientes:** La suma de los pagos de cualquier negociación que compone el set siempre es igual al valor total del juego.
2. **Set Cerrado y Convexo:** El set contiene todos sus puntos límite y es convexo.

Un tema específico de interés para este trabajo es la caracterización o *mapeo* del *Core* de un juego. Para ello se decidió utilizar el método JDSIM [Montiel and Bickel, 2012] por ser el único método que permite *mapear* adecuadamente y en un tiempo razonable un espacio n dimensional al irse incrementado el número de dimensiones. Otros métodos como aceptación-rechazo [Van Neuman, 1963], mapeo por combinaciones convexas de los vértices del politopo [Devroye, 1986] y mapeo a través de la descomposición del área de interés [Rubin, 1984]; mostraron volverse lentos e inestables a medida que incrementamos n.

Esta caracterización es importante por que permite conocer y explorar el *Core* de un juego más allá de las restricciones de la distribución de los pagos, para ofrecer una solución de mayor calidad.

3.3. Ejemplo Ilustrativo de las estrategias generadas por SV y el *Core*

A continuación se presenta un ejemplo para ilustrar las soluciones y respectivas fallas que ofrecen SV y el *Core*, dentro de un problema de distribución de costos.

Supóngase un juego de 3 jugadores (a), (b), (c) que se encuentran ubicados en el punto O de la Figura 3.1. El jugador (a) necesita desplazarse hasta el punto A, el jugador (b) al punto B, el jugador (c) al punto C.

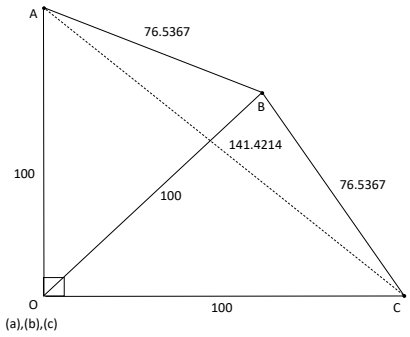


FIG. 3.1: Representación gráfica de un juego entre los jugadores (a), (b), y (c).

Asúmase un costo asociado de \$1 por unidad de distancia, de tal manera que si el jugador (a) necesita viajar 100 unidades, entonces el costo asociado con desplazarse esa distancia sería \$100. Siguiendo esta misma lógica, cada uno de los 3 jugadores está dispuesto a pagar \$100 para desplazarse a su destino final (el jugador (a) al punto A, el jugador (b) al punto B y el jugador (c) al punto C) y en consecuencia, el costo total del juego sería \$300. Sin embargo, si los 3 jugadores deciden cooperar entre sí podrían viajar juntos y tomar una ruta distinta, por ejemplo la ruta $\vec{OA}$ (\$100) más $\vec{AB}$ (\$76.5) más $\vec{BC}$ (\$76.5), que es la ruta que minimiza tanto la distancia como el costo comparado con el resto de las rutas que pasan por los puntos O, A, B y C. Nótese que para cualquier coalición, el costo total siempre es menor o igual que la suma de los costos cuando todos los jugadores actúan por su cuenta (Tabla 3.1).

El método Shapley Value consiste en calcular la distribución de los pagos en todas las permutaciones posibles de la coalición de 3 jugadores asumiendo que cada uno se unirá a la coalición en el orden definido en la permutación. Por ejemplo, en la coalición ABC, el jugador A es el primero en unirse, después el jugador B y finalmente el jugador C. Así pues, el primer jugador en unirse a la coalición estará dispuesto a pagar la misma cantidad que habría pagado si hubiera decidido viajar solo. El segundo jugador pagará el remanente del valor de la coalición formada por estos 2 jugadores y el tercer jugador pagará el remanente del valor de

 ISBN 978-607-8242-11-5

TAB. 3.1: Costo máximo por esquema de cooperación.

Coalición	Valor del Juego
(a)	\$100
(b)	\$100
(c)	\$100
(a,b)	\$176.5
(a,c)	\$241.4
(b,c)	\$176.5
(a,b,c)	\$ 253

la coalición formada por los 3 jugadores como se muestra en la Tabla 3.2. Por ejemplo, si (a) se une primero pagará \$100, que es la misma cantidad que habría pagado si hubiera viajado solo; si (b) se une después, entones (b) pagará únicamente el remanente del costo adicional que implicaría formar la coalición (a,b) que equivale a \$176.5-\$100=\$76.5. De tal manera que si (c) decide participar solo pagaría el remanente del costo de formar la coalición (a,b,c), es decir, \$253-\$176.5=\$76.5.

De esta forma SV intenta modelar todos los distintos escenarios de negociación que podrían surgir entre los 3 jugadores en función del orden en el que cada jugador se une a la coalición y con base en ello, calcula el pago promedio esperado de cada jugador. En otras palabras, SV estima el pago esperado de cada jugador considerando todos los escenarios de negociación en los que un jugador se puede ver involucrado como se muestra en la Tabla 3.2.

TAB. 3.2: Pagos para todas las permutaciones para un juego de tres actores.

Coalición	(a)	(b)	(c)
(a,b,c)	\$100	\$76.5	\$76.5
(a,c,b)	\$100	\$11.7	\$141.4
(b,a,c)	\$76.5	\$100	\$76.5
(b,c,a)	\$76.5	\$100	\$76.5
(c,a,b)	\$141.4	\$11.7	\$100
(c,b,a)	\$76.5	\$76.5	\$100
SV	\$95.1	\$62.8	\$95.1

Nótese que el costo total de todas las posibles coaliciones entre los 3 jugadores debe ser igual al costo total previamente calculado de \$253 en la Tabla 3.1. De acuerdo a los valores obtenidos con este método, los jugadores (a) y (c) pagan \$95.1 cada uno, mientras que el jugador (b) paga \$62.8.

Otra metodología que permite modelar este problema, y buscar una solución al juego, es definiendo el *Core* del juego. El *Core* consiste en el conjunto de todas las posibles negociaciones que pueden ocurrir entre los jugadores (a),(b) y (c) y está definido por las siguientes restricciones:

$$a \leq 100$$
$$b \leq 100$$
$$c \leq 100$$

$$a + b \leq 176.5$$
$$a + c \leq 241.4$$
$$b + c \leq 176.5$$
$$a + b + c = 253$$

A partir de estas restricciones, se puede ver que existe un infinito de negociaciones posibles que podrían ocurrir entre los integrantes de $\mathbf{N}$, como por ejemplo: $x = (\$100, \$70, \$83)$, $x = (\$80, \$90, \$83)$ y $x = (\$95, \$60, \$98)$, entre otras. Como el *Core* del juego no es único, la dificultad consiste en elegir una negociación de este infinito de negociaciones posibles y proponerla como una solución al juego junto con un argumento que la justifique.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Consideremos ahora modificar el ejemplo en la Figura 3.1 cambiando la segunda restricción, esto implica cambiar la distancia que recorrerá b a $b \leq 50$ obteniendo así el juego mostrado en la Figura 3.2.

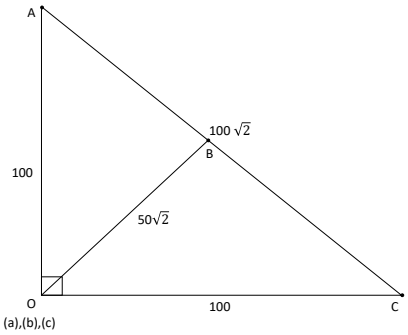


FIG. 3.2: Representación gráfica del juego modificado.

La Tabla 3.3 muestra los nuevos valores para el calculo de las permutaciones de SV, y el promedio de estas.

TAB. 3.3: Pagos modificados para todas las permutaciones de un juego de tres actores.

Coalición	(a)	(b)	(c)
(a,b,c)	\$100	\$41.4	\$100
(a,c,b)	\$100	\$0	\$141.4
(b,a,c)	\$70.7	\$70.7	\$100
(b,c,a)	\$100	\$70.7	\$70.7
(c,a,b)	\$141.4	\$0	\$100
(c,b,a)	\$100	\$41.4	\$100
SV	\$102	\$37.4	\$102

Como se puede observar en la Tabla 3.3, la negociación que propone Shapley Value no es *implementable* porque no se encuentra contenida dentro del *Core* del juego. Este problema surge a partir de la lógica en la que SV modela los escenarios de negociación que podrían ocurrir entre los miembros de **N**, ya que al ir definiendo los pagos de cada jugador dentro del juego solamente con base en los jugadores que ya forman parte de la coalición, se está perdiendo de vista a los jugadores que todavía no se unen. Esto provoca que cuando el último jugador se integra a la coalición, únicamente le toca pagar el "remanente" del costo total que aún no ha sido cubierto provocando así que SV ofrezca negociaciones que violan las restricciones del *Core*. Sin embargo, si existe una estrategia de negociación *implementable* $(\$100, \$41.4, \$100)$ que SV no es capaz de encontrar. Por esta razón es necesario desarrollar mecanismos más confiables que ofrezcan soluciones únicas e *implementables*. Y que, en caso de no encontrar una solución implementable, genere un certificado que nos garantíze que no existe ninguna estrategia de negociación posible.

4. ESTRATÉGIA DE MÁXIMA PROBABILIDAD

Con la finalidad de poder encontrar la negociación de máxima probabilidad para un juego cooperativo entre n-actores se propone la siguiente metodología:

1. Definir el valor de los pagos que reciben las $2^n - 1$ coaliciones que se pueden formar entre los n actores.
2. Definir el *Core* del juego **C**.

ISBN 978-607-8242-11-5

3. Generar una muestra representativa, uniformemente distribuida **M** del *Core* del juego en términos monetarios.
   (a) Si el *Core* está vacío la metodología indica que no existe negociación alguna que pueda cumplir con las resticciones del *Core* del juego.
   (b) Si el *Core* es único, la negociación encontrada es la negociación de máxima probabilidad x^*
   (c) Si el *Core* no está vacío ir al Paso 4.
4. Obtener las funciones empíricas de probabilidad acumuladas $F_i(x_i)$ de cada jugador y definir la Función de Probabilidad de Ocurrencia PP.
5. Establecer el problema de maximización que maximice la función PP.
6. Calcular la negociación de máxima probabilidad x^*.

4.1. Definición del valor de los pagos de cada coalición

Para representar el valor de un juego se hará uso de la función característica v con las mismas propiedades que definen Von Neumann y Morgenstern para juegos de n-actores presentadas en las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3. Donde $\mathbb{B}^n$ es el set de todos los subsets que se pueden formar de los miembros de **N**.

$$v : \mathbb{B}^n \to \mathbb{R}. \tag{4.1}$$

Esto quiere decir que para cada $\mathbf{T} \subset \mathbf{N}$ el valor de la coalición estará dado por $v(\mathbf{T})$ para una **N** finita. Al ser *superaditiva* (ecuación 3.3) v permite modelar adecuadamente el comportamiento de los pagos del juego al irse incrementando el número de jugadores. De tal forma que $v(\mathbf{N})$ provee mayores beneficios que cualquier otra coalición $\mathbf{S} \subset \mathbf{N}$ y en consecuencia cada jugador obtiene un beneficio mayor o igual al que hubiera obtenido en una coalición compuesta de menos miembros.

4.2. Definición del *Core* del juego

Para definir el *Core* del juego, basta con utilizar las ecuaciones de Eficiencia (ecuación 4.2) y Racionalidad (ecuación 4.3).

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} x_i = v(\mathbf{N}), \tag{4.2}$$

$$\sum_{i \in \mathbf{S}} x_i \leq v(\mathbf{S}) \quad \forall \mathbf{S} \subset \mathbf{N}. \tag{4.3}$$

4.3. Generación de una muestra representativa M de C en términos monetarios

Utilizando JDSIM se puede conocer un número suficientemente grande de negociaciones que cumplan con las restricciones del *Core* y permitan caracterizarlo relativamente rápido. El número mínimo de muestras requeridas se estima utilizando *fair-convergence* Montiel and Bickel [2012]. Para mayor detalle sobre JDSIM invitamos al lector a revisar Montiel and Bickel [2012].

4.4. Obtención de las funciones empíricas de probabilidad acumulada de cada jugador y la Función de Probabilidad de Ocurrencia

Una vez obtenida la muestra aleatoria uniformemente distribuida de **C**, se modela el comportamiento de los pagos que recibe cada jugador i en la j-esima muestra de **M** a través de la función empírica de probabilidad acumulada F_i $\forall x \in \mathbf{M}$.

$$F_i(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \mathbf{1}_{\{x_i^j \leq \mathrm{x}\}} \quad \forall i \in \mathbf{N}, \tag{4.4}$$

 ISBN 978-607-8242-11-5

donde $\mathbf{1}_{\{x_i^j \leq \mathrm{x}\}}$ es una función indicadora definida de la siguiente forma:

$$\mathbf{1}_{\{x_i^j \leq \mathrm{x}\}} = \begin{cases} 1 & x_i^j \leq \mathrm{x} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}. \tag{4.5}$$

Esta función permite calcular la probabilidad de que un jugador i reciba un pago menor o igual a un cierto pago x con base en las estrategias que componen **M**.

4.4.1. La Función de Probabilidad de Ocurrencia

Una vez obtenidas las funciones empíricas de probabilidad acumuladas de los pagos de los n jugadores, se propone seleccionar *aquella negociación x^* que maximice la probabilidad de que la negociación ocurra entre los n jugadores* ($PP(x)$). Para el caso de ganancias $PP(x)$ es:

$$PP(x) = \prod_{i=1}^{n} F_i(x_i), \tag{4.6}$$

y para el caso de costos es:

$$PP(x) = \prod_{i=1}^{n} (1 - F_i(x_i)). \tag{4.7}$$

Para que una negociación ocurra, cada actor necesita aceptar recibir un pago x_i. Entonces la probabilidad de aceptar es equivalente a la probabilidad de obtener un beneficio menor si la negociación se repitiera. Si asumimos que cada actor decide aceptar o rechazar considerando únicamente su beneficio económico, la probabilidad de que una negociación se concluya con éxito es igual al producto de las probabilidades de aceptar de cada actor.

4.5. Determinación del problema de maximización

Una vez determinada la Función de Probabilidad de Ocurrencia, se puede definir el problema que maximice $PP(x)$ con base en las restricciones que definen el *Core* del juego.

$$\begin{array}{lll} \text{Max} & PP(x), & \\ \text{s.a} & \displaystyle\sum_{i \in \mathbf{S}} x_i \leq v(\mathbf{S}) & \forall \mathbf{S} \subset \mathbf{N}, \\ & \displaystyle\sum_{i \in \mathbf{N}} x_i = v(\mathbf{N}), & \\ & x_i \geq 0 & \forall i \in \mathbf{N}. \end{array} \tag{4.8}$$

4.6. Negociación de máxima probabilidad

A partir de la resolución del problema de maximización se obtiene el vector $x^* \in \mathbb{R}$ que especifica la distribución de los pagos que maximiza la probabilidad de que la negociación suceda.

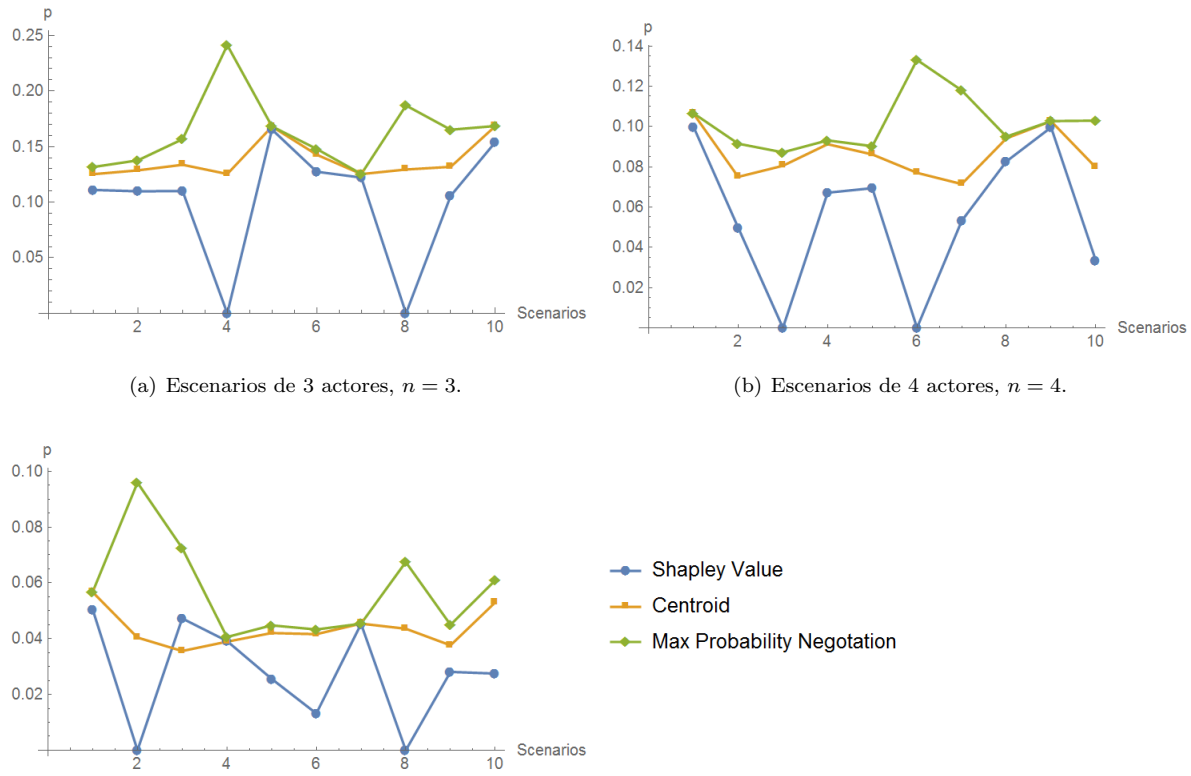
5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar nuestro modelo creamos 30 escenarios aleatorios que replican el ejemplo ilustrativo del la sección §3.3, en los que la *Gran Coalición* pudiese ser alcanzada. Acomodamos de modo aleatorio las direcciones de n actores partiendo de un punto de origen común, asumiendo que cada actor quiere llegar desde un origen O a su destino. Cada actor pagará un monto equivalente a la distancia recorrida, pero pueden generar un beneficio adicional si viajan juntos. Para cada escenario se calcularon las distancias entre

ISBN 978-607-8242-11-5

los destinos finales y se calcularon las rutas óptimas para cada subcoalisión. En cada caso, se calculo la solución generada por SV, el Centroide del *Core*, y la estrategia generada por $PP(x)$.

La Figura 5.1 muestra la probabilidad de cerrar una negociación para los escenarios considerados. Se puede observar que el nuevo método siempre genera estrategias que proveén un mayor incentivo para que los n actores acepten el pago que se les propone.



(a) Escenarios de 3 actores, $n = 3$.

(b) Escenarios de 4 actores, $n = 4$.

(c) Escenarios de 5 actores, $n = 5$.

FIG. 5.1: Comparativo de SV, el Centroide del *Core* y la Negociación de Máxima Probabilidad, para diez escenarios generados de modo aleatorio considerando 3, 4, y 5 actores.

Podemos observar que para seis escenarios, SV genera estrategias para las que $PP(SV) = 0$, esto sucede cuando la estrategia propuesta por SV esta fuera del *Core*, por lo que no es implementable. De modo similar, existen escenarios en los que los tres métodos tienen una $PP(\cdot)$ muy similar, esto se explica por la existencia de un *Core* muy reducido con la estructura de un juego convexo que asegura SV$\in$*Core*. Sin embargo, es claro que el nuevo método genera consistentemente estrategias que superan las propuestas por alternativas anteriores.

6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se presenta un método fácil de calcular y con una fuerte justificación racional para desarrollar estrategias de distribución de beneficios en negociaciónes comerciales de n actores. Dados los experimentos realizados, este nuevo método supera a los métodos anteriores al proponer una solución única (a diferencia del *Core*), que es siempre implementable (a diferencia de SV), y que ofrece una fuerte justificación racional (a diferencia del Centroide del *Core*).

El nuevo método es suficientemente flexible para incluir o remover restricciones adicionales o para considerar diversas funciones de utilidad que permitan compensar por aversión al riesgo. Y tiene el potencial para, en un futuro, ofrecer una alternativa a aquellos métodos que no consideran a la *Gran Coalición* tal

ISBN 978-607-8242-11-5

como es el caso del *Bargaining Set* y métodos relacionados.

En un futuro tenemos planeado trabajar en aspectos de análisis con respecto a este nuevo método, y mejorar la eficiencia del algoritmo para hacerlo practico y fácil de utilizar en instancias de mayor tamaño. Sin embargo, estamos confiados que los negociadores en la práctica encontraran esta nueva herramienta extremadamente útil, y los académicos encontraran un campo muevo para hacer desarrollos en el campo de teoría de negociaciónes.

Referencias

Aumann, R. J. and Maschler, M. (1961). *The bargaining set for cooperative games*. Princeton University.

Davis, M. and Maschler, M. (1965). The kernel of a cooperative game. *Naval Research Logistics (NRL)*, 12(3):223–259.

Devroye, L. (1986). *Non-uniform random variate generation*. Number 1 in Probability Theory and Stochastic Processes. Springer-Verlag New York.

Edgeworth, F. Y. (1881). *Mathematical psychics: An essay on the application of mathematics to the moral sciences*, volume 10. Kegan Paul.

Gillies, D. B. (1959). Solutions to general non-zero-sum games. *Contributions to the Theory of Games*, 4(40):47–85.

Lucas, W. F. (1969). The proof that a game may not have a solution. *Transactions of the American Mathematical Society*, 137:219–229.

Lucas, W. F. (1992). von neumann-morgenstern stable sets. *Handbook of game theory with economic applications*, 1:543–590.

Montiel, L. V. and Bickel, J. E. (2012). Generating a random collection of discrete joint probability distributions subject to partial information. *Methodology and Computing in Applied Probability*, pages 1–17.

Rubin, P. A. (1984). Generating random points in a polytope. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 13(3):375–396.

Schmeidler, D. (1969). The nucleolus of a characteristic function game. *SIAM Journal on applied mathematics*, 17(6):1163–1170.

Shapley, L. S. (1952). *Notes on the n-person game, III: Some variants of the von Neumann-Morgenstern definition of solution*. Rand Corporation.

Shapley, L. S. (1953). A value for n person games. *Contributions to the Theory of Games*, 2:307–317.

Van Neuman, J. (1963). *Various techniques used in connection with random digits, Collected Works*, volume 5. Pergamon Press, New York.

von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1 edition.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Clasificación de Entidades con los Tiempos de Eventos de un Proceso No Homogéneo de Poisson para Simulación

Héctor R. Gómez Márquez[1], Rafael López Bracho[1] y Adrián Ramírez Nafarrate[2]
(1) Posgrado en Optimización, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Pablo 180, CDMX-México
(2) Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones, ITAM, Río Hondo 1, CDMX-México
E-mail: speed_nation@hotmail.com; rlb@correo.azc.uam.mx; adrian.ramirez@itam.mx

Resumen

En simulación de eventos discretos a veces existe la necesidad de clasificar una entidad de acuerdo con algún criterio o característica. En muchos procesos de servicios la característica más fácil de observar es el tiempo en el que ocurre cierto evento, y éste es incluido de manera intrínseca dentro de la tasa de arribos de un proceso de Poisson para después obtener la distribución de probabilidad y hacer predicciones. En este documento se muestra que también se puede obtener una estimación de densidad de los arribos condicionada en el tiempo durante todo el periodo del proceso Poisson la cuál puede ser multimodal y mediante un clasificador bayesiano realizar un muestreo para hacer la clasificación. Los resultados muestran que después de hacer la clasificación, los eventos convergen en la proporción *a priori* deseada, esto se observa con una gráfica de medias acumuladas, además que la distribución de probabilidad o verosimilitud observada de los datos originales se mantiene en los eventos clasificados.

Entity Classification based on Time of Events of Non-homogeneous Poisson Process for Simulation

Abstract

In simulation of discrete events sometimes there is a need to classify an entity according to some criterion or characteristic. In many service processes the easiest feature to observe is the time in which a certain event occurs and is included intrinsically within the arrival rate of a Poisson process, this to obtain the probability distribution and make predictions. This document shows that it is also possible to obtain a density estimate of the arrivals conditioned over time during the entire period of the Poisson process which can be multimodal and a Bayesian classifier is used to perform sampling to do the classification. The results show that after the classification, the events converge in the desired *a priori* proportion, this is observed with a graph of accumulated means, in addition that the probability distribution or observed likelihood of the original data is maintained in the classified events.

Keywords: Classification, Bayes, non-homogeneous Poisson Process, Simulation.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

En la simulación de eventos discretos de diferentes sistemas es común modelar arribos de entidades a través de un proceso no homogéneo de Poisson (Law, 2014) y a su vez estas entidades pueden clasificarse o enviarse a otro proceso con base en una probabilidad condicionada en el tiempo. Un ejemplo son los sistemas de bicicletas compartidas donde los usuarios que buscan obtener una bicicleta llegan a una estación de acuerdo con un patrón cambiante a través del tiempo y posteriormente se dirigen a otra estación destino. La probabilidad de elegir una determinada estación depende también del tiempo (O' Mahony, 2015).

Esta elección condicionada en el tiempo se ha resuelto utilizando las tasas de los procesos de Poisson de los posibles destinos, homogéneos o no homogéneos (Ross, 2014), mediante la discretización del tiempo en intervalos significantes lo más pequeños posibles y normalizando las tasas en el tiempo donde ocurre la decisión para así obtener una función de densidad multinomial con la cual se realiza un muestreo mediante ruleta y se elige el destino o proceso siguiente (Jian et al., 2016).

En este artículo exploramos otra alternativa que consiste en que el periodo de tiempo del proceso de Poisson se utilice como variable aleatoria y que la densidad estimada de cada destino durante este tiempo sirva como una parametrización tal que, con base en el teorema de Bayes (Barber, 2012), se obtengan las probabilidades condicionales de cada tipo de evento en el tiempo y para finalizar se realiza un muestreo de la distribución conjunta resultante en los momentos discretos del tiempo donde se requiere tomar la decisión de clasificación.

Este proyecto de investigación se encuentra en proceso, por lo que los resultados aquí mencionados sirven para ilustrar la metodología.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se tiene un sistema en el que se generan entidades en un intervalo de tiempo (personas que llegan a un banco, llamadas telefónicas a un centro de atención, usuarios que usarán un servicio de transporte). Este comportamiento varía dependiendo la hora, existen horas pico y horas de descanso o de mucho tráfico. Una vez dentro del sistema esta entidad afecta otros procesos, estas interacciones posibles son finitas y mutuamente excluyentes y se observa también que dependen principalmente del tiempo. Se desea conocer qué tipo de interacción puede realizar el evento y su probabilidad para poder simular esta interacción dentro del sistema a través del tiempo. En este sentido, definimos los siguientes términos relacionados con el problema:

Entidades: Son los elementos dinámicos del sistema, se mueven a través del modelo durante la simulación para finalmente abandonarlo. Éstas cambian de estado, afectan y son afectadas por otras entidades y por el estado del sistema, afectando las medidas de eficiencia de éste.

Clasificación: Es el problema de identificar, de un conjunto de categorías posibles, a qué categoría pertenece una nueva observación, tomando en cuenta la información obtenida de observaciones con su respectiva categoría conocida.

Probabilidad condicional de clase: Es la probabilidad de pertenecer a cierta clase y se calcula con el teorema de Bayes, el cual establece que:

$$P(A_i \mid B) = \frac{P(B \mid A_i)P(A_i)}{\sum P(B \mid A_i)P(A_i)} \quad (1)$$

donde:

$P(A_i)$ indica el grado inicial de la creencia que tenemos para cada categoría.

$P(A_i \mid B)$ indica la probabilidad de observar la categoría A_i dadala ocurrencia de *B*.

$P(B \mid A_i)$ denota la verosimilitud.

ISBN 978-607-8242-11-5

ALGORITMO DE CLASIFICACIÓN USANDO SIMULACIÓN

1. Generar las entidades que entran al sistema por medio de un proceso de Poisson.

2. Con base en datos estadísticos calcular las densidades $\hat{f}_t$ donde $\hat{f}_t$ está acotada dentro del periodo del proceso Poisson. Se puede usar cualquier método no paramétrico para estimar esta densidad (Silverman,1986) .

3. Encontrar las probabilidades condicionales con respecto al tiempo *t* donde se decidirá el tipo de interacción usando el teorema de Bayes.

4. Muestrear de la distribución condicional conjunta encontrada en el paso 3.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Supóngase que se quiere simular el comportamiento de las personas que llegan a un centro comercial. Dentro del centro comercial existen 4 establecimientos: el de comida, *C*, deportes, *D*, música, *M*, y ropa, *R,* entonces *E = { A, D, M, R }*. La plaza presta sus servicios de 5:00 am a 12:00pm, por lo cual el periodo de tiempo abierto es de 19 horas. Utilizando datos estadísticos sacamos el promedio diario de personas que vienen a la plaza a cada establecimiento,

$$\overline{x}_C = 20, \overline{x}_D = 60, \overline{x}_M = 60, \overline{x}_R = 100,$$

Con los tiempos de las personas que llegan a comprar a cada establecimiento se obtiene una aproximación de la densidad en el tiempo, por ejemplo, los tiempos de llegada de un día (en horas absolutas) de usuarios que entran a la plaza y van a la tienda de deportes son:

2.098767 2.610483 3.155810 3.295498 3.483017 3.616464 3.793837 4.246284 4.356137 4.373381
4.400040 4.487757 4.904489 4.952196 4.964892 4.995274 5.038742 5.124419 5.133624 5.273788
5.524308 5.571262 5.656434 5.719851 5.761020 5.770399 5.813164 5.877619 5.883435 5.929772
5.968548 5.984606 6.007735 6.097533 6.172309 6.176320 6.258409 6.319319 6.352001 6.386754
6.471034 6.556761 6.615050 6.623945 6.776483 6.784005 6.896805 6.942079 7.003266 7.101830
7.109512 7.138109 7.225956 7.332284 7.355641 7.440792 7.958812 8.091812 9.461566 9.656488

Para tener una idea de la distribución de los datos se grafican en una línea de tiempo.

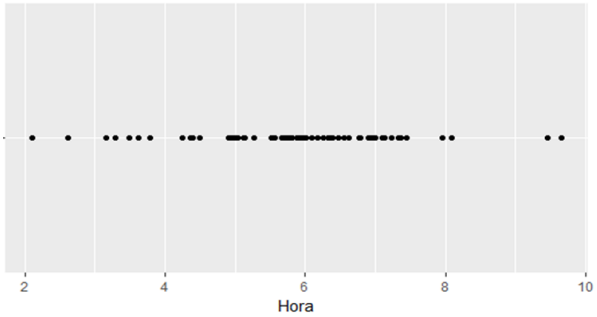


Fig. 1: Línea de tiempo con los arribos a *D*

Ahora estimamos la densidad $\hat{f}_x$ de forma no paramétrica con el método de logsplines de Stone (1997). En esencia, este método utiliza lengüetas polinomiales para modelar los principales efectos y sus productos tensoriales para modelar cualquier interacción que sea incluida. La metodología incluye mínimos cuadrados y estimación de máxima verosimilitud, adición por partes de funciones base usando el criterio de puntuación (gradiente de la función log-verosimilitud), eliminación por partes de nudos usando el estadístico de Wald y selección del modelo mediante el criterio de información de Akaike. La Fig. 2 muestra la densidad estimada de las personas que se dirigen a la tienda de deportes.

ISBN 978-607-8242-11-5

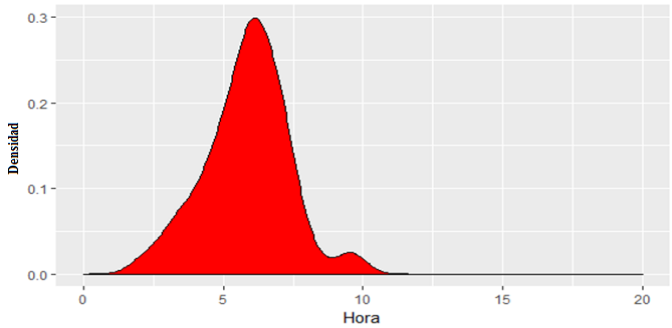


Fig. 2: Densidad estimada de las personas de *D*

El procedimiento para simular a las personas que llegan a la plaza es mediante un proceso Poisson no homogéneo. El procedimiento para simular las acciones que tomarán los usuarios se muestra con el siguiente ejemplo: Supongamos que llegó una persona al tiempo *t* = *4.01960854.* Entonces calculamos las densidades en el tiempo *t*:

Tabla 1: Densidad en el tiempo *t* = 4.01960854

Llegada	$\hat{f}_C(t)$	$\hat{f}_D(t)$	$\hat{f}_M(t)$	$\hat{f}_R(t)$
4.019609	0.05	0.111253	0.08729328	0.002419769

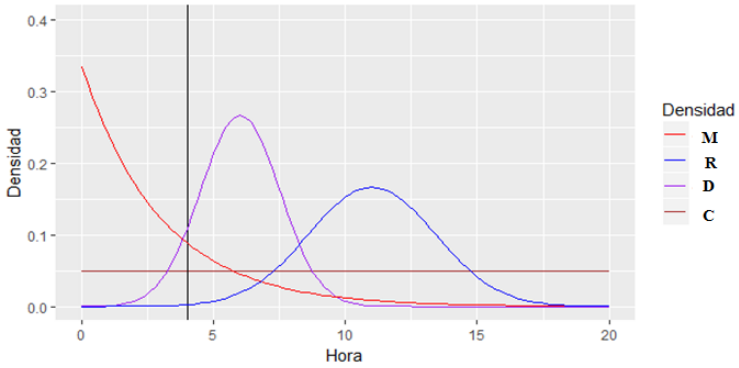


Fig. 3: Densidades de los destinos, la línea vertical es el tiempo *t* = 4.01969854

Dado que todas las áreas bajo las densidades suman uno cada una, es necesario hacer un escalamiento tomando en cuenta la población con la que cada densidad fue creada, por ejemplo, si comparamos $\overline{x}_C = 20$ en contra de $\overline{x}_D = 60$, las proporción de personas que van al área de deportes es tres veces más grande que la proporción de personas que va al área de comida. Entonces debemos multiplicar por tres la densidad de *D*.

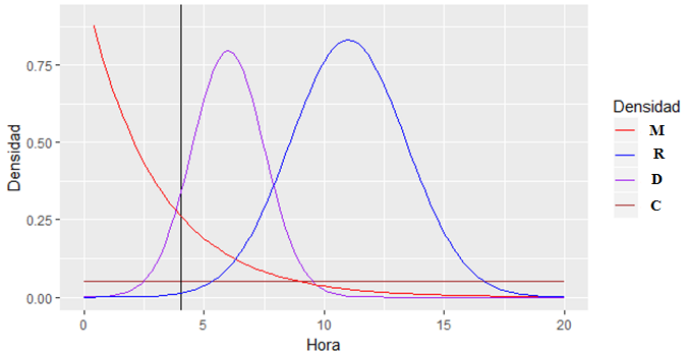


Fig. 4: Densidades escaladas con base en su proporción

Ahora normalizamos las densidades y tenemos una distribución multinomial en el tiempo *t.* O dicho de otra manera es como si en ese instante tomáramos una foto de las probabilidades de que un arribo ocurrido en ese tiempo sea clasificado en cada uno de los cuatro destinos.

ISBN 978-607-8242-11-5

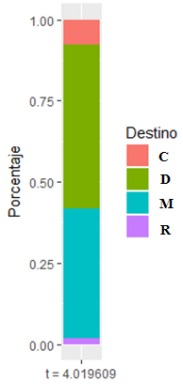


Fig. 5: Probabilidades condicionales en el tiempo t = 4.019609

Debido a que estamos tomando todo el horizonte de tiempo como nuestra variable aleatoria también podemos generar una aproximación de las probabilidades conjuntas en el todo el periodo del tiempo. O sea será nuestro mapa para muestrear cuando un individuo llegue a la plaza.

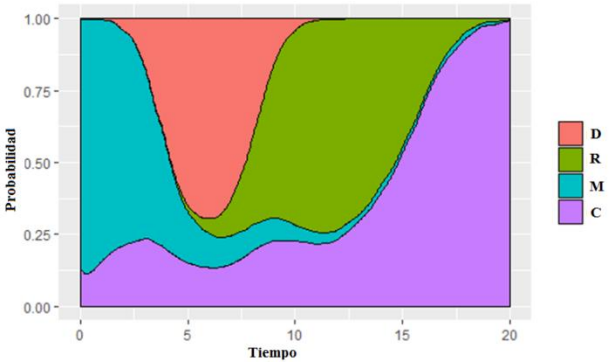


Fig. 6: Gráfica de probabilidad conjunta

Los resultados de las medias acumuladas al hacer 1000 realizaciones con este modelo de generación de clientes a través de un proceso no homogéneo de Poisson y enviarlo mediante sus probabilidades según el tiempo a cada establecimiento se muestran en la Fig. 7. En la gráfica se puede observar que en el límite el número de personas que se envían a cada establecimiento son las personas que en promedio se observan al día.

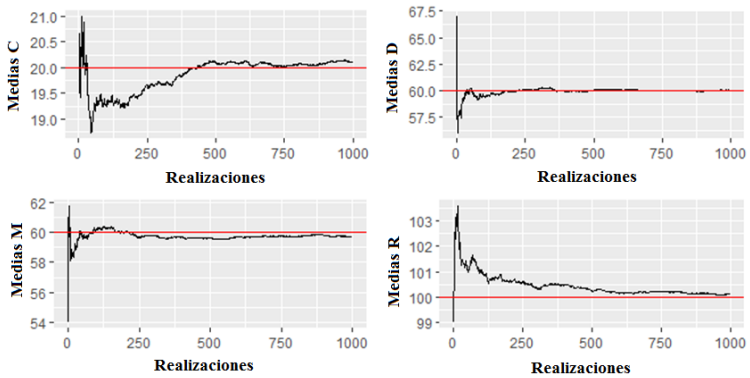


Fig. 7:Gráfica de medias acumuladas del número de personas enviado a cada establecimiento

Lo siguiente a analizar es si las personas enviadas a cada establecimiento se comportan como el patrón observado de los datos. En la Fig. 8 se muestra el gráfico de las personas enviadas durante 1000 días al área de Deportes. La curva que se observa son las personas simuladas que llegan a la plaza y se dirigen al área de deportes. Comparando la Figura 8 con el patrón correspondiente mostrado en la Fig. 3 se observa que los datos simulados siguen el comportamiento observado de los datos históricos (o pseudo-históricos).

ISBN 978-607-8242-11-5

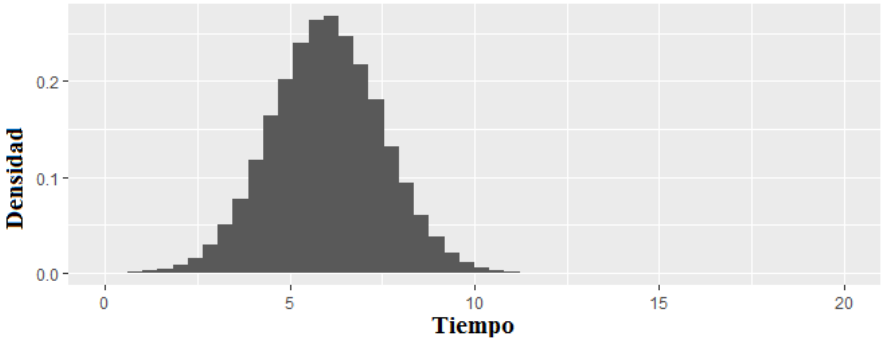


Fig. 8: Densidad de las personas enviadas durante 1000 realizaciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra que un método no paramétrico alternativo a usar una función de intensidad Poisson para estimar probabilidades condicionales es estimar la densidad de los eventos con respecto al tiempo y muestrear de la probabilidad conjunta de este para hacer la clasificación. Dado que la función de intensidad es una función del tiempo y la estimación de densidad se realiza con base en el tiempo esto indica que ambos métodos podrían estar relacionados y compartir ciertos atributos o indicar que pueden utilizar herramientas de ambos método.

REFERENCIAS

Barber, D, "*Bayesian Reasoning and Machine Learning"*, Cambridge University Press, UK (2012).

Jian, N., D. Freund, H.M. Wiberg y S.G. Henderson, "*Simulation Optimization for a Large-Scale Bike-Sharing System*", Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, 602-613 (2016).

Law, M., "*Simulation Modeling and Analysis*", McGraw - Hill Education (2014).

O' Mahony, E., "*Smarter Tools for City Bike Sharing*", Tesis Doctoral, Cornell University-USA (2015).

Ross, M.S., "*Introduction to Probability Models"*, Academic Press (2014).

Silverman, B.W., "*Density Estimation for Statistics and Data Analysis*", Vol 26, CRC Press (1986).

Stone, C.J., M.H. Hansen, C. Kooperberg yY.K. Truong,"*Polynomial Splines and Their Tensor Products in Extended Linear Modeling: 1994 Wald Memorial Lecture*",Ann. Stat., 25(4), 1371-1470 (1997).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Propuesta de un dispositivo portátil para monitorear ondas cerebrales para su presentación en LCD, con ayuda de Matlab

A. De la Barrera G. [1,2], Josué V. Cervantes B.[1], Omar Jiménez R.[2], Víctor H. Ortiz F.[1] César U. Castellanos D.[1]
(1) Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca, Carretera Ixtapaluca-Coatepec Km7, Ixtapaluca Estado de México. e-mail: alfredogz1@hotmail.com, josue_cb@gmail.com , cesar_ucd95@hotmail.com
(2) Instituto Politécnico Nacional, Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México. e-mail: adelabarrera@ipn.mx ojimenezr@ipn.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un dispositivo portátil con un circuito electrónico capaz de detectar y filtrar cada una de las ondas cerebrales que genera el ser humano, la detección se hace utilizando un amplificador diferencial con ganancia en voltaje, y una etapa adicional de amplificación, con filtros pasa banda para separar cada señal que se sintonizan con ayuda de Matlab, un selector analógico controlado digitalmente y un microcontrolador que direcciona la selección de la señal, se hace pasar por un detector de pico de voltaje, el CAD del microcontrolador la mide y posteriormente se despliega la amplitud detectada en un display de LCD. La programación del microcontrolador se hace con un compilador de lenguaje C.

Proposal of a portable device to monitor brain waves for presentation on LCD, with the help of Matlab

Abstract

This paper present a portable device with an electronic circuit to detect and filter signals from human brain, the detection does by using an differential amplifier with a voltage gain and an additional amplifier stage, installed with pass band filters to separate each signal to tune in with Matlab helping, an analogue selector which is digitally controlled and a microcontroller to addressing the selected signal, then the signal goes throw to a voltage peak detector, the CAD in the microcontroller measure it, and show in a LCD display. The microcontroller programming is done with a C language compiler.

Keywords: Brain waves, amplifiers, Matlab, analog filters, microcontroller.

 ISBN 978-607-8242-11-5

INTRODUCCIÓN

Las ondas cerebrales son señales eléctricas producidas por la actividad cerebral del ser humano, la amplitud de cada una de estas señales caracterizan el estado mental, anímico y de salud de una persona, midiendo los voltajes y frecuencias que manejan cada una de ellas. En este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico se presenta el cuadro con la frecuencia y amplitud de cada señal, así como el diseño del circuito electrónico sintonizando los filtros pasa banda con ayuda del programa Matlab, para que el microcontrolador mida cada una de las señales previamente acondicionadas y sean presentadas en un una pantalla de texto tipo LCD.
El cerebro humano produce impulsos eléctricos que viajan a través de nuestras neuronas; estos impulsos eléctricos producen ritmos que son conocidos como ondas cerebrales, los impulsos eléctricos son información que viaja de neurona a neurona haciendo uso de cientos de miles de ellas para lograr transportarse y ejecutar una función determinada. Existen cinco tipos principales de ondas cerebrales como se menciona en medicina Holística General (2015) y Star Viewer Team (2011), que son: delta, theta, alfa, beta y gamma, las que se describen brevemente en orden ascendente en frecuencia.
Delta: Se detecta desde los 0.5 y hasta los 4 Hz y está asociada al sueño profundo pero sin sueños y en un estado donde la conciencia está completamente separada.
Theta: Se detecta desde 4 a 7.5 Hz, estas ondas cerebrales están presentes durante la meditación profunda y el sueño ligero.
Alfa: Se detecta desde los 7.5 hasta los 14 Hz y se presenta en las profundas relajaciones con los ojos cerrados y por lo general, mientras se sueña despierto, se relaciona con la concentración y la meditación.
Beta: Esta señal se detecta desde los 14 a los 40 Hz, está asociada con la conciencia normal de vigilia y un estado mayor de alerta, la lógica y el razonamiento crítico.
Gamma: Se detecta por encima de los 40 Hz y hasta 80Hz, se dice que esta onda está en relación con explosiones de perspicacia y de alto nivel de procesamiento de la información.

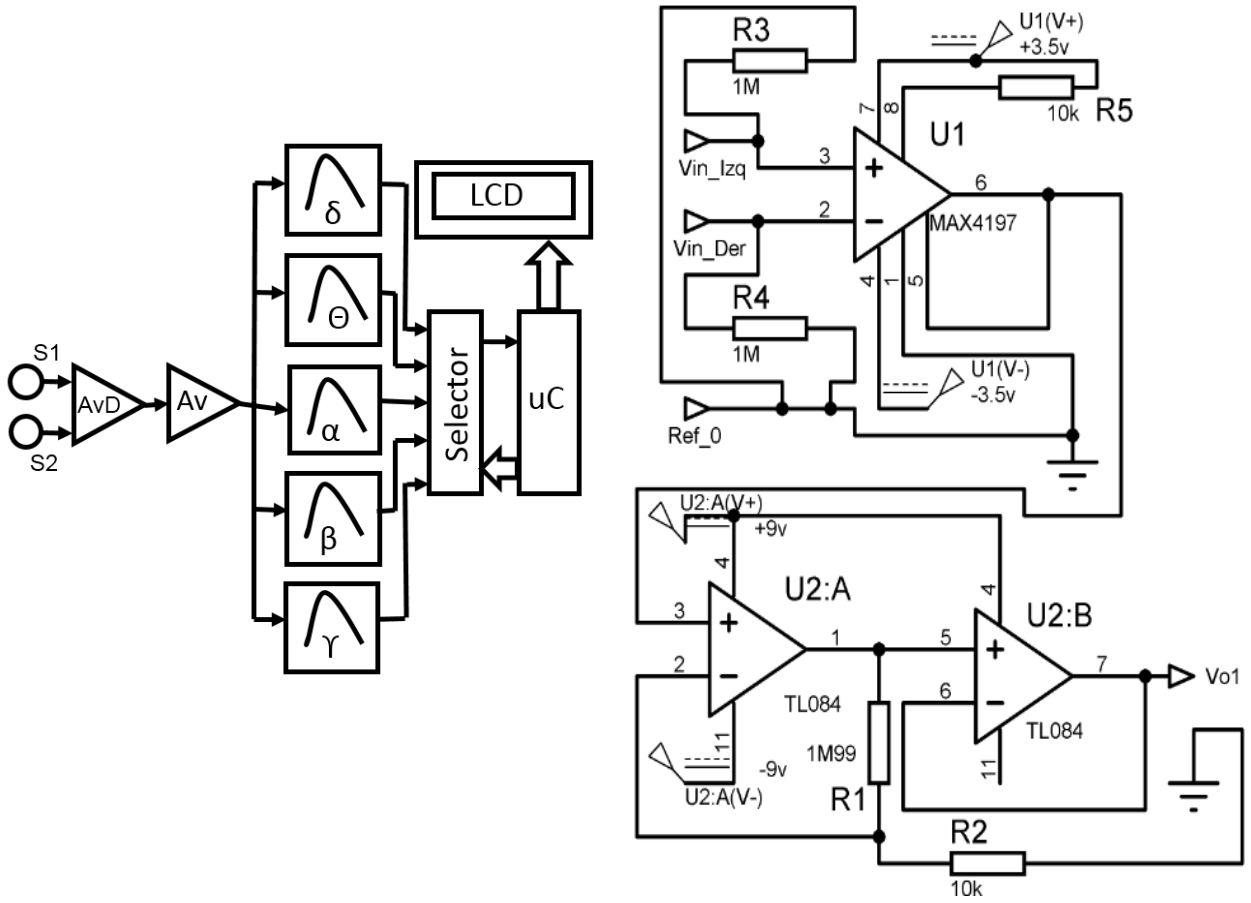
La amplitud de estas señales, van desde los 10micro volts hasta de los 200micro volts. El diseño del circuito para la detección de estas señales se presenta en un diagrama de bloques en la figura 1A, para posteriormente diseñar cada uno de los circuitos, que al conjuntarse en uno solo dan la funcionalidad de la detección de las señales de la actividad cerebral del ser humano.
Se muestran los sensores S1 y S2 son los que se conectan en la parte occipital de la cabeza de la persona a quien se le tomará la medición de las señales cerebrales, estas señales son amplificadas por una etapa de amplificación diferencial de instrumentación con ganancia en voltaje AvD, la característica principal de este, es la de suprimir el posible ruido eléctrico inducido, la señal obtenida es amplificada por una etapa que acondiciona la señal a una amplitud máxima de 4v, esta señal se hace pasar por filtros analógicos con frecuencia de resonancia de acuerdo a la señal que se quiere obtener su separación, estas señales se seleccionan cada una y se hace pasar por un detector de pico de voltaje para cuantificarlas con el Convertidor de Analógico a Digital (CAD) de un micro controlador que a su vez presenta las mediciones en una pantalla tipo LCD.

DESARROLLO

De la figura 1A, los sensores S1 y S2 son los que se conectan en la parte occipital de la cabeza de la persona a quien se le tomará la medición de las señales cerebrales, estas señales son amplificadas por un amplificador diferencial de instrumentación con ganancia en voltaje AvD, la señal obtenida es amplificada por una etapa que acondiciona la señal a una amplitud máxima de 4v, es decir para la señal de 200micro volts se obtienen 4v, por lo que estas etapas proporcionan una ganancia en voltaje de Av=(4v/200μv), Av=20,000v/v, esta amplificación se hace en 2 etapas, seleccionando el amplificador de instrumentación MAX4197 como se menciona en Maxim (MAX4197) el cual tiene una ganancia AvD=100v/v, pre ajustada de fábrica con un CMRR=115dB, por lo que Av=AvD*Av1, donde Av1 es la ganancia de un amplificador no inversor para el que se selecciona el circuito TL084 como se menciona en Texas Instruments (2017) con Av1=200v/v, así como la conexión de un amplificador seguidor de voltaje para aumentar la ganancia en corriente; estas etapas de amplificación se muestran en la figura 1B.
La siguiente etapa es la separación de cada una de las señales por filtros analógicos de banda angosta, como el mostrado en la figura 2, de donde se obtiene la función de transferencia como se menciona en Katsuhiko Ogata (2010) aplicando LKC y considerando que C1=C2=C, queda entonces, con la función de transferencia se obtienen los criterios de diseño presentados en Coughlin y Driscoll (1993) y en A. Pertence (et. al).

$$\frac{V_o}{V_i} = -\left(\frac{R_3}{2R_1}\right)\frac{\frac{2}{R_3C}s}{\frac{R_2+R_1}{R_1R_2R_3C^2}+\frac{2}{R_3C}s+s^2} \qquad (1)$$

ISBN 978-607-8242-11-5



A) B)

Fig. 1: A) Diagrama a bloques del detector de señales de actividad cerebral. B) Diagrama de la sección de amplificación de las señales cerebrales

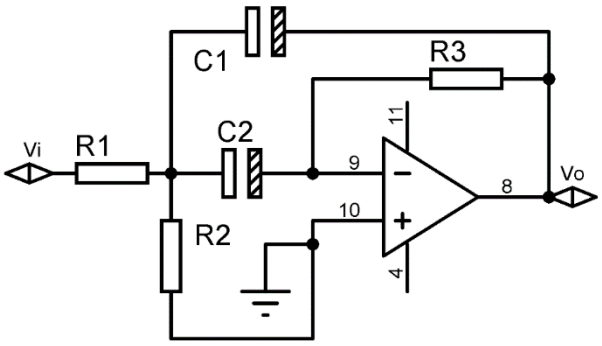


Fig. 2: Diagrama del filtro pasa bandas de banda angosta, con C1=C2.

$$fr = \sqrt{fL * fH} \tag{2}$$

$$B = fH - fL \tag{3}$$

$$Q = \frac{fr}{B} \tag{4}$$

$$R1 = \frac{0.1591}{BC1} \tag{5}$$

ISBN 978-607-8242-11-5

$$R3 = 2R1 \tag{6}$$

$$R2 = \frac{R1}{2Q^2 - 1} \tag{7}$$

Donde:
fr es la frecuencia de resonancia, *B* es el ancho de banda, *fH* es la frecuencia alta de corte, *fL* es la frecuencia baja de corte y *Q* es el factor de calidad. *R1, R2* y *R3* son resistencias del circuito del filtro analógico y *C* es el capacitor.
Utilizando el software matemático Matlab, se calculan los componentes para cada uno de los filtros como se muestra en el listado 1 de código que es de acuerdo a la función de transferencia de (1) y se obtiene el diagrama de Bode como se muestra en las figuras 4A y 4B, para cada una de las señales que se pretenden detectar, superponiendo cada una de las respuestas de los filtros como se muestra en la figura 4B, los valores calculados con Matlab para cada uno de los filtros, se muestran en la tabla 1.

```
%Delta
fL=0.5;
fH=4;
fr=sqrt(fL*fH)
B=fL-fH;
Q=fr/B;
C=2.2e-6
R3=Q/(pi*fr*C)
R1=R3/2
R2=R3/(2*(2*Q*Q-1))
num=[0,-1/(C*R1),0];
den=[1, (2/(C*R3)), (1/(C*C*R3))*(1/(R1)+1/(R2))];
G_s=tf(num,den)
bode(G_s)
hold on
```

Listado 1. Código de Matlab para el cálculo de componentes y respuesta en frecuencia de los filtros

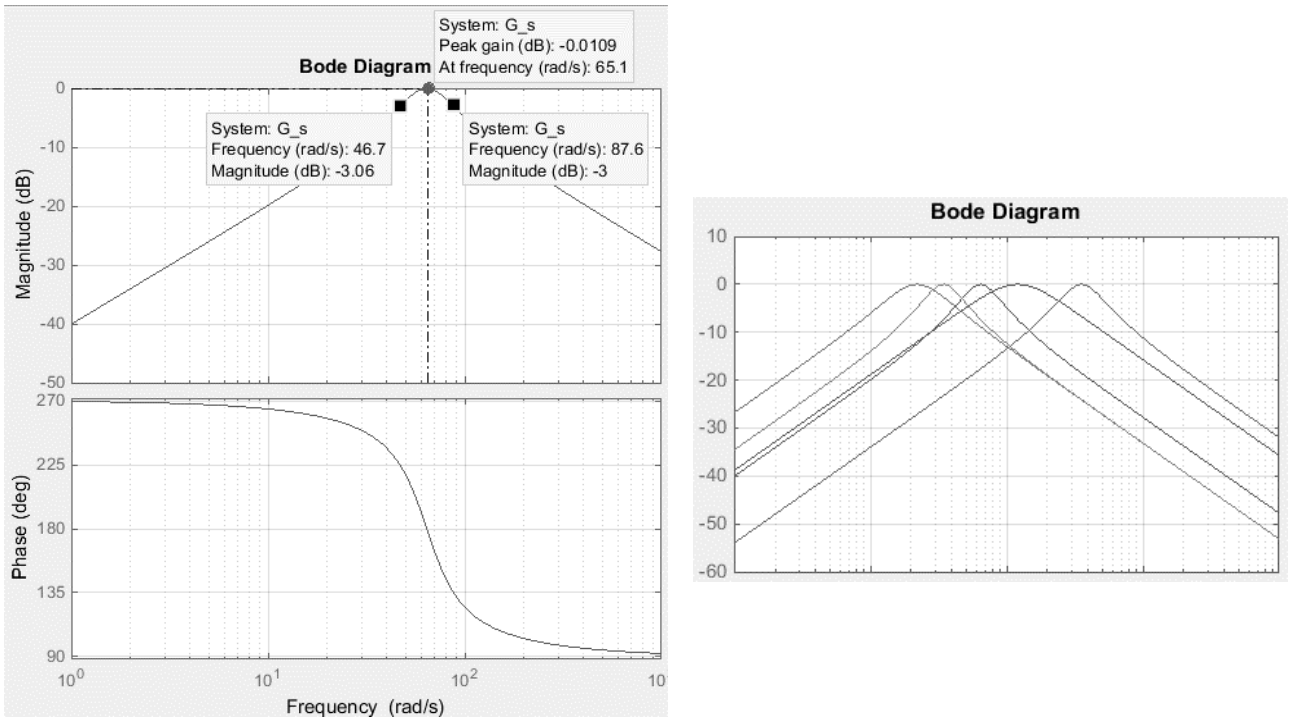
Tabla 1. Valores de componentes para cada señal

Señal	Fr Hz	BW Hz	C µF	R1 kΩ	R2 kΩ	R3 kΩ
Delta	3.5	3.5	2.2	20.7	20.7	41.3
Theta	5.5	3.5	2.2	20.7	5.32	41.3
Alfa	10.2	6.5	2.2	11.1	2.81	22.3
Beta	19.1	26	3.3	1.85	24.1	3.71
Gamma	56.6	40	1.0	3.98	1.32	7.96

Con los valores calculados con Matlab para los componentes, se arman los filtros para cada señal, como se muestra en el circuito de la figura 6, donde se aprecia que se tiene una entrada única que proviene de la etapa de amplificación y se tienen 5 salidas, una por cada señal separada.
Estas señales se seleccionan una a una mediante un selector analógico de selección digital mediante la utilización de un circuito integrado MAX4051 como se menciona en Maxim (MAX4051), el cual selecciona solo una de las señales mediante el código de un microcontrolador, este selector hace pasar la señal por un circuito detector de pico para obtener el valor máximo de la señal, tal como se muestra en la figura 5A, la salida *Vpico* se cuantifica con el CAD del micro controlador para ser mostrada su amplitud en una pantalla tipo LCD, tal como se muestra en la figura 5B.
El micro controlador que se utilizó en este trabajo es el PIC16F883, que tiene 3 puertos de 8 bits, 1 CAD de 10 bits con 11 canales, oscilador interno de 8MHz, 4kW para programa, 368B de RAM, como se indica en Microchip (2017).
El listado 2, corresponde al código del compilador de lenguaje C, PIC-C como se menciona en CCS (2017); el segmento de `main()` configura la frecuencia de inicio del oscilador interno a 8MHz, configura el CAD para que trabaje con su oscilador interno, configura el uso del canal 0 (ADC0) e inicializa el uso del LCD, el código dentro de `while(true)`, se repite de forma infinita y pone la dirección para seleccionar cada señal, debido a que las señales son de baja frecuencia, se espera un tiempo de 1 segundo para que se estabilice el detector

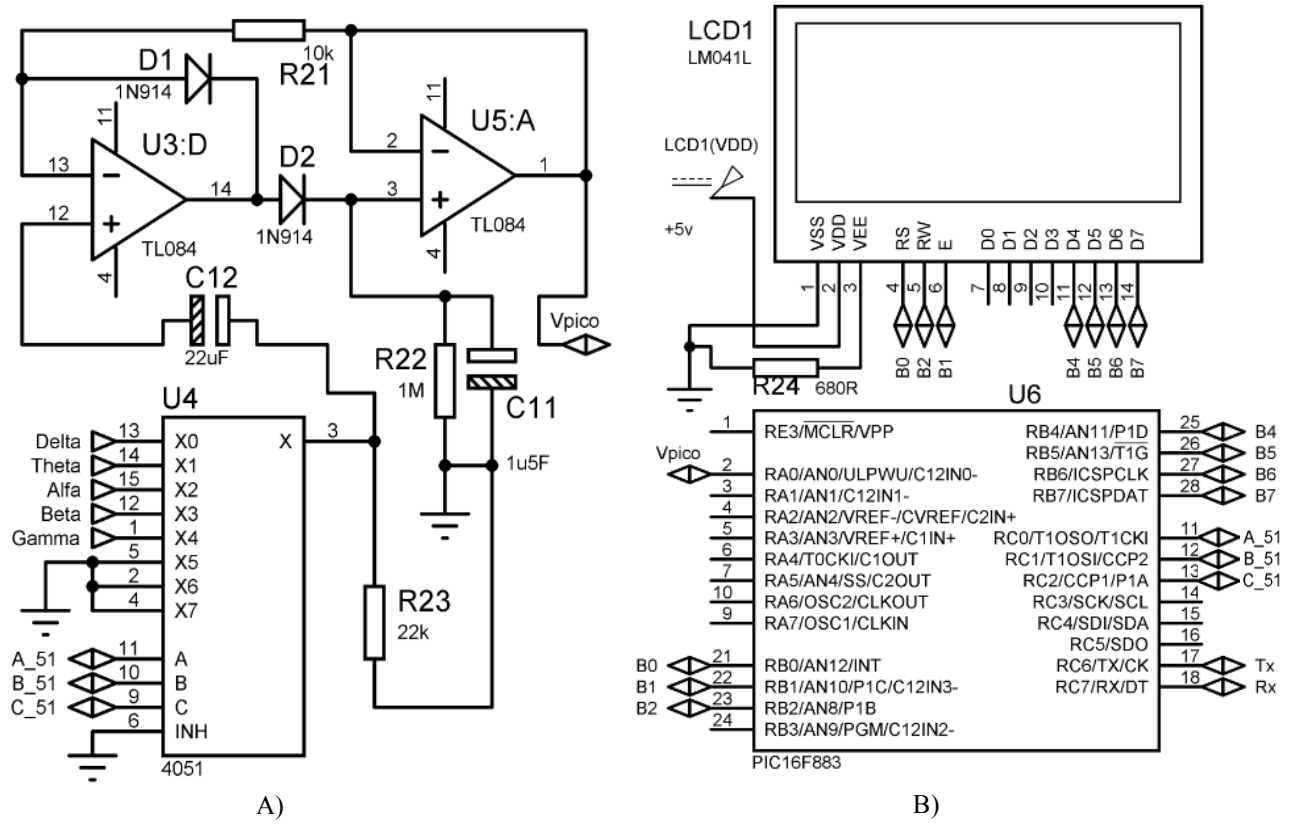
 ISBN 978-607-8242-11-5

de pico y entonces se cuantifica su amplitud con el canal 0 del CAD, este valor es mostrado en la pantalla LCD.



A) B)

Fig. 4: A) Diagrama de Bode de la respuesta del filtro, para la señal alfa. B) Diagrama de Bode de la superposición de la respuesta de los cinco filtros.



A) B)

Fig. 5: A) Diagrama del selector de señales y el detector de pico de voltaje. B) Diagrama del micro controlador y el LCD

ISBN 978-607-8242-11-5

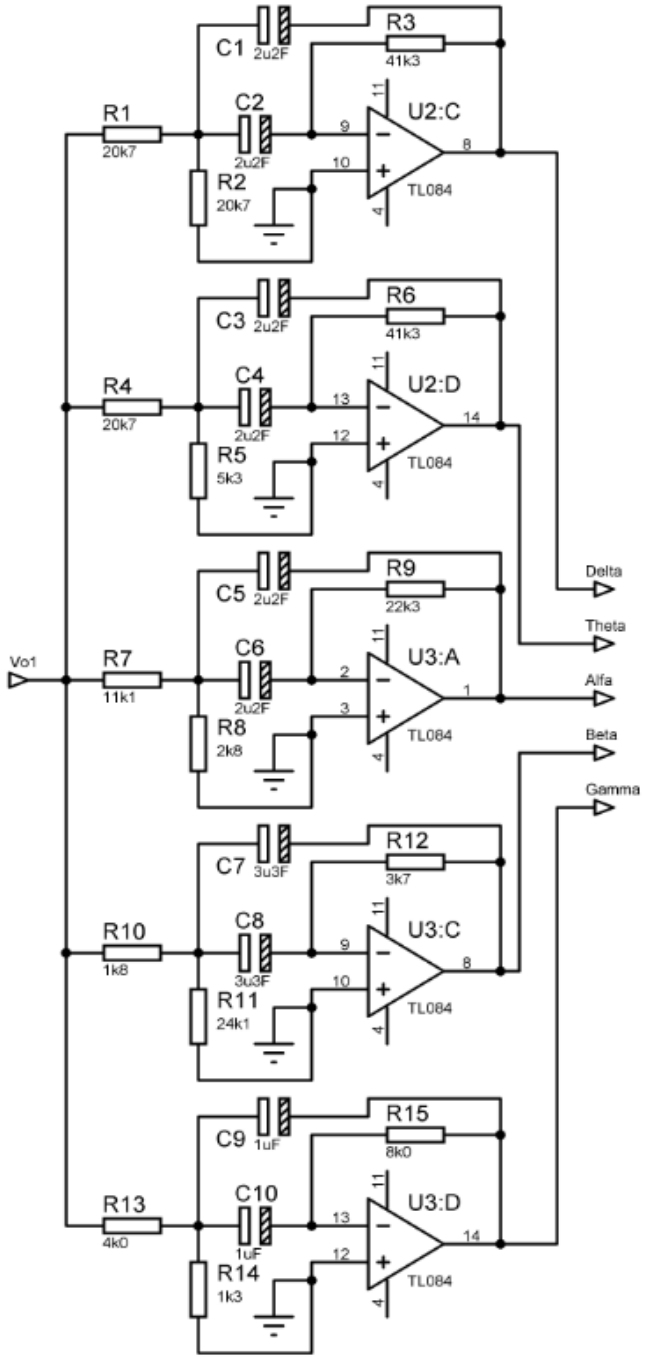


Fig. 6: Diagrama electrónico de los cinco filtros

```
#include <16F883.h>
#fuses intrc, nomclr, put, nolvp,
nowdt, protect
#device ADC = 10;
#use delay(clock=8M)
#include <lcd1.c>
int16 dato;
float dato1
void main (){
setup_oscillator(OSC_8MHZ);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL );
setup_adc_ports(sAN0);
set_adc_channel(0);
lcd_init();
printf(lcd_putc, "\fTecnologico de
");
printf(lcd_putc, "\r Estudios ");
printf(lcd_putc, "\r Superiores de
");
printf(lcd_putc, "\r IXTAPALUCA ");
delay_ms(1000);
printf(lcd_putc, "\fSensor de
señales");
printf(lcd_putc, "\r CEREBRALES
");
printf(lcd_putc, "\r ");
printf(lcd_putc, "\r IXTAPALUCA ");
delay_ms(1000);

while (true){
output_C(0); //Delta
delay_ms(1000);
dato=read_adc();
dato1=dato*5.0/(20*1023.0);
printf(lcd_putc,"\f1Delta:v=%3lu",da
to1);

output_C(1); //Theta
delay_ms(1000);
dato=read_adc();
dato1=dato*5.0/(20*1023.0);
printf(lcd_putc,"\r2Theta:v=%3lu",
dato1);

output_C(2); //Alfa
delay_ms(1000);
dato=read_adc();
dato1=dato*5.0/(20*1023.0);
printf(lcd_putc,"\r3Alfa, v=%3lu”,
dato1);

output_C(3); //Beta
delay_ms(1000);
dato=read_adc();
dato1=dato*5.0/(20*1023.0);
printf(lcd_putc,"\r4Beta,
v=%3lu",dato1);

output_C(4); //Gamma
delay_ms(1000);
dato=read_adc();
dato1=dato*5.0/(20*1023.0);
printf(lcd_putc,"\f5Gamma,v=%3lu
",dato1);
delay_ms(1000);
 } }
```

Listado 2. Código de programa para el microcontrolador PIC16F886.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el análisis en que se hizo en Matlab, los circuitos diseñados y la programación del micro controlador, se obtuvieron las mediciones de las cinco señales detectadas como se muestra en la figura 7, tal como se había

 ISBN 978-607-8242-11-5

previsto. Con estos resultados se proyecta complementar el presente trabajo de investigación, para que el dispositivo pueda inducir, de forma retroalimentada, ciertos estados anímicos de la persona que se puedan pre establecer, utilizando señales binaurales como se menciona en Eprints (2017).



Fig. 7: Desplegado de la medición de las señales en la pantalla de LCD

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos del análisis en Matlab y el prototipo elaborado, se pueden indicar las siguientes conclusiones: 1) Se apreció que la detección de las señales que produce la actividad cerebral, puede manifestar el estado anímico de una persona. 2) Es posible la construcción de un dispositivo portátil para la detección de las señales cerebrales.

REFERENCIAS

Medicina Holística General *"https://medicinaholisticageneral.com/2015/11/10/"* Consultada en marzo del 2017

Star Viewer Team *"https://starviewerteam.com/2011/08/20/"* Consultada en marzo del 2017

Eprints *"http://eprints.ucm.es/21680/1/T34524.pdf*" Consultada en marzo del 2017

Maxim MAX4197 *"https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4194-MAX4197.pdf*" Hoja de datos. Consultada en mayo del 2017

Texas Instruments TL084 *"http://www.ti.com/product/TL084*", Hoja de datos. Consultada en mayo del 2017

Katsuhiko Ogata, "*Ingeniería de control moderna*", Ed. Pearson Educación, 5a edición 2010.

Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll "*Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados*". Prentice Hall, 4a Ed. México 1993

Antonio Pertence J. "*Amplificadores Operacionales y Filtros Activos*", Mc Graw Hill

Matlab "*https://www.mathworks.com/programs/trials/trial_request.html?ref= ggl&s_eid=ppc_43027454329&q =matlab"* Consultada en marzo del 2017

Maxim MAX4051 "*https://www.maximintegrated.com/en/datasheet/index.mvp/id/1352*" Hoja de datos, consultada en mayo del 2017

Microchip "*http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291D.pdf*" Hoja de datos del PIC16F886. Consultada en marzo del 2017

CCS PIC-C "*http://www.ccsinfo.com/ccsfreedemo.php*" Consultada en marzo del 2017

 ISBN 978-607-8242-11-5

Caracterización de aleaciones de Aluminio con nanotubos de carbono decorados con Plata

Juan A.Alcántara[1, 2], David Muñoz.[1] José F.Chavez[3], Rodrigo.Salazar.[2], Manuel Medina[2], Gamaliel A. Cruz.[2]
(1) Departamento de Ingeniería Industrial, Río Hondo #1 Col. Progreso Tizapán CP. 01080. Álvaro Obregón, Ciudad de México
(2) Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Av. Emiliano Zapata S/N, El Trafico, 54400 Villa Nicolás Romero, Méx.
(3) Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, Instituto Politécnico Nacional (ESIQIE-IPN), México City, c.p. 07738, México.
E-mail: jaacotrebla@gmail.com

Resumen

En recientes años se ha incrementado el interés en el desarrollo de nuevos materiales en este caso compositos, ya que estos materiales más avanzados pueden realizar mejor su trabajo que los materiales convencionales (K.Morsi, A. Esawi.,, 2006).
En el presente trabajo se analiza el efecto de la adición de nanotubos de carbono incorporando nano partículas de plata para aumentar tanto sus propiedades eléctricas como mecánicas. La realización de aleaciones de Aluminio con nanotubos de carbono utilizando molienda de baja energía con una velocidad de 140 rpm y durante un periodo de 24 horas de molienda, partiendo de aluminio al 98% se realizó una aleación con 0.35 de nanotubos de carbono, la molienda se realizó para obtener una buena homogenización ya que la distribución afecta al comportamiento de las propiedades (Amirhossein Javadi, 2013),además de la reducción de partícula y finalmente la incorporación de nanotubos de carbono adicionando nanopartículas de plata por la reducción con borohidruro de sodio por medio de la punta ultrasónica, Las aleaciones obtenidas fueron caracterizadas por Microscopia electrónica de barrido (MEB), Análisis de Difracción de Rayos X, se realizaron pruebas de dureza y finalmente se realizaron pruebas de conductividad eléctrica.
Palabras clave: Composito, Nanotubos de Carbono, Mecanosíntesis

Characterization of aluminum alloys with carbon nanotubes decorated with silver

In recent years has increased interest in the development of new materials in this case composites, as these more advanced materials can perform their work better than conventional materials. (K.Morsi, A. Esawi.,, 2006).
In the present work we analyze the effect of the addition of carbon nanotubes incorporating nano silver particles to increase both their electrical and mechanical properties. The performance of aluminum alloys with carbon nanotubes using low energy grinding with a speed of 140 rpm and during a period of 24 hours of grinding, starting from 98% aluminum, an alloy was made with 0.35 carbon nanotubes, grinding (Amirhossein Javadi, 2013), in addition to the reduction of particle and finally the incorporation of carbon nanotubes by adding silver nanoparticles by the reduction with sodium borohydride by Medium of the ultrasonic tip. The obtained alloys were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction Analysis, hardness tests were performed and electrical conductivity tests were finally carried out.

***Keywords: Composite, Carbon nanotubes,* Mechanosynthesis**

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio tienen características muy diversas que las hacen especialmente interesantes para el desarrollo de aleaciones de altas propiedades. (Knipling, 2006)
Además, estos materiales son bien conocidos por su baja densidad, buena calidad química y térmica estabilidades y características físicas interesantes. Por lo tanto, han recibido considerables como materiales de refuerzo prometedores para el fortalecimiento de matriz, especialmente nanocompuestos de Al basados en fibras reforzadas de tamaño nanométrico. (F. Khodabakhshi, 2017)

 ISBN 978-607-8242-11-5

Existe una selección de métodos para fabricar nanopartículas metálicas con nanotubos de carbono mediante métodos electroquímicos, en los que, más comúnmente, el precursor metálico inorgánico se reduce en la superficie de nanotubos de carbono por electrones. Esto puede hacerse mediante un enfoque denominado deposición utiliza reacción química redox en lugar de electrones (Xiao-ning HAO, 2014). Cada uno de ellos tiene sus propios méritos, pero la diferencia es que, aunque la deposición sin electrolitos es más fácil de llevar a cabo desde el punto de vista práctico, estamos limitadas a iones metálicos, que tienen mayor potencial redox que los nanotubos de carbono. Además, los nanotubos de carbono pueden ser decorados con nanopartículas metálicas por covalente y técnicas no covalentes, tales como π-apilamiento, la atracción electrostática e interacciones hidrofóbicas. Por otro lado, en contraste con las relativamente difíciles de ejecutar los citados de medio líquido de deposición de metales, métodos de decoración física tales como irradiación de haz de iones / electrones, sputtering y la deposición de evaporación ofrece una ruta fácil y verde hacia las nanopartículas metálicas. En particular, la pulverización catódica de metal es fácil de controlar y no requiere medios líquidos, lo que contaminación de residuos y debe ser eliminado después del proceso. Debido a un creciente interés en la preparación de materiales de nanopartículas metálicas con los nanotubos de carbono, ya que queremos analizar la aleación de nanopartículas de plata decorando a los nanotubos de carbono. (Koziol, 2016)
Utilizando el método de oxido reducción (REDOX) se elaboran las nanopartículas de plata usando borohi0druro de sodio (NaBH4) y nitrato de plata (AgNO3), para posteriormente meter las nanopartículas en baño ultrasónico con los nanotubos de carbono e incorporar por el método de mecanosíntesis después del secado con el aluminio.

Desarrollo Experimental

Para obtener las nanopartículas de plata se realizó el método de oxido-reducción partiendo de Nitrato de Plata (AgNO3). Esto para obtener nanopartículas de plata para lo cual se preparó una solución con concentración 0.001M de $AgNO_3$, y se preparó una solución 0.002 M de NaBH4 en 30 ml. esta sirvió como agente reductor para la Ag
Se agregó 30ml de Borohidruro de sodio en un vaso de precipitados posteriormente se agregaron 10ml de solución de $AgNO_3$ la cual se agregó gota a gota hasta obtener un vire en la solución a color amarillo el cual indica la presencia de nanopartículas de plata. (A. L. González, 2014)
Se debe de mantener en una cama de hielo y en agitación el $NaBH_4$ y se agregara por goteo el $AgNO_3$. Así al término de la agregación del $AgNO_3$ se observa cómo se empiezan a crear las nanopartículas de Ag.
Ya obtenidas las NP's en solución de 30.5ml se pesó 0.075g de NTC para agregarse en la solución. Una vez agregados los NTC a la solución se coloca en la punta ultrasónica a 450 Hz (1Hz = 1v/s) y se programa a 10 min. Esto es para lograr la incorporación de los NTC con las NP's
de Ag
Posteriormente de la punta ultrasónica se observa como las NP's fueron adheridas a los NTC. Después de esto se centrifugo nuestra solución 20 min. Lo que se obtuvo del centrifugado lo ponemos a secar en foco ultra violeta a 24 horas.
La molienda mecánica es una técnica de procesamiento de polvos en el que los mismos son mezclados en un molino de bolas, donde el polvo es sujeto a colisiones a alta energía con las bolas. El proceso generalmente se lleva a cabo en una atmósfera inerte. Durante la molienda mecánica se involucra la soldadura y fractura de las partículas de manera repetitiva un número elevado de veces en un molino de bolas de alta energía. (L.Lü, 1995).
Se pesaron 14.75g del polvo de aluminio y 0.75g de NTC para meter al vial de molienda durante un periodo de 24 horas.
Se prepara el contenedor para su uso. En este caso por el tipo de material se va a realizar una molienda en condiciones húmedas. Así que a 15g se le agrego 3 ml de Alcohol Isopropílico a 160r/m a 24 horas.
En el proceso del empastillado la pieza adquiere la resistencia y fuerza para realizar su función. El sinterizado implica la fusión de las partículas, la reducción de volumen, disminución de porosidad y el aumento de tamaño de grano. (Anonimo, 2009) Posteriormente se pesa 3g de polvo para compactar y obtener la pastilla la cual se somete a 1500Kg/cm^2. Posteriormente se sinteriza en un horno con atmosfera controlada la cual se inyecto argón para evitar su oxidación de la muestra a una temperatura de 610 °C por un tiempo de 2 horas.
Las muestras fueron lijadas con lija 600, pulidas con alúmina de 1 micra para posteriormente ser observadas en el microscopio óptico también analizados por medio del microscopio electrónico de barrido, posteriormente se analizaron por medio de difracción de rayos X y finalmente se realizó prueba de dureza en un microdurómetro obteniendo dureza Vickers.
.

 ISBN 978-607-8242-11-5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se observa la micrografía obtenida de los nanotubos de carbono en el cual se puede apreciar claramente los nanotubos de carbono de tamaño nanométricos además de que se pueden observar la nanopartículas de plata incorporadas a los nanotubos con la principal meta de aumentar las propiedades de este material y una de ellas es las propiedades mecánicas además de aumentar su propiedad de conducción eléctrica, por lo que la molienda debe de ser adecuada para una buena dispersión de estos en toda la matriz.

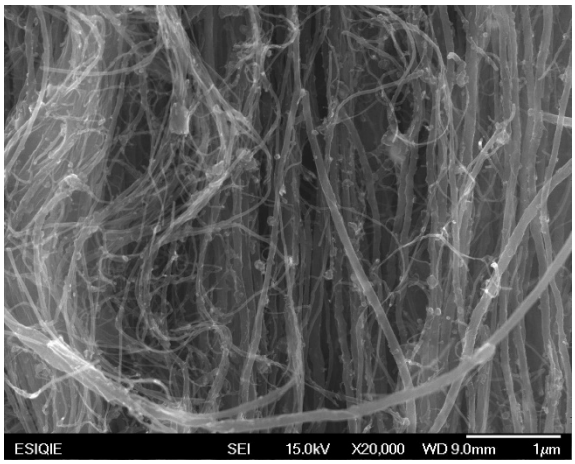


Figura 1. Micrografía nanotubos de carbono con incorporación de nanopartículas de plata.

Análisis superficial

El análisis superficial se realizó en un microscopio metalográfico en el cual la muestra fue atacada con un reactivo a base de ácido fluorhídrico para revelar la microestructura en el cual la muestra con aluminio sin aleantes se observan los límites de grano de forma muy irregular pero no se llega a observar discontinuidades o porosidades muy grandes en la superficie del material esto se muestra en la figura 2a. Por otro lado en la figura 2b se muestra la aleación con nanotubos de carbono con la incorporación de nanopartículas de plata, en la cual se muestra una aglomeración de los nanotubos de carbono lo cual no es ideal para mejorar sus propiedades, al igual que la otra muestra se llegan a observar los límites de grano de forma irregular.

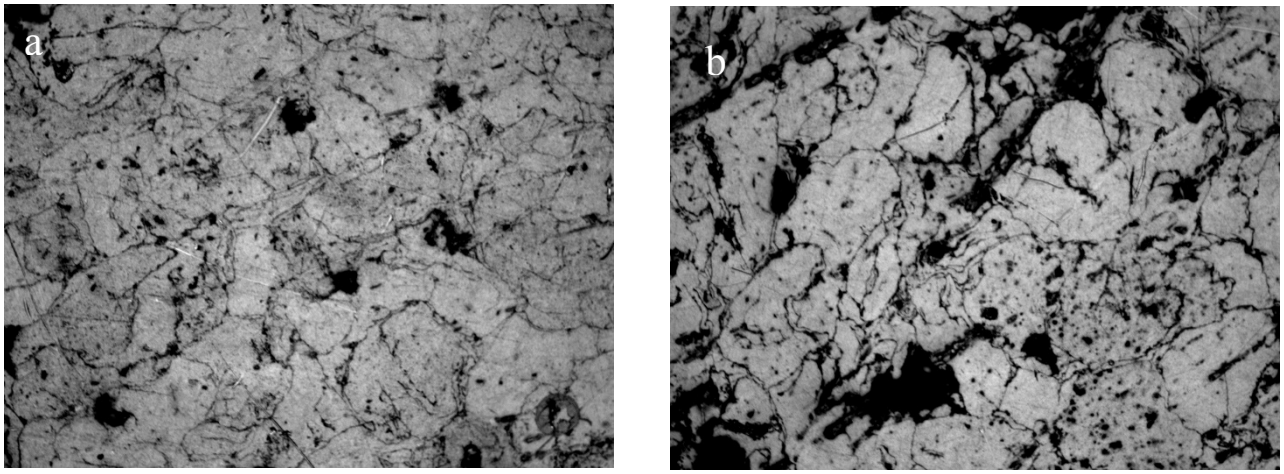


Figura 2. Micrografías obtenidas por microscopia óptica de las muestras a) Aluminio puro, Aleación con nanotubos de carbono nanopartículas de plata.

ISBN 978-607-8242-11-5

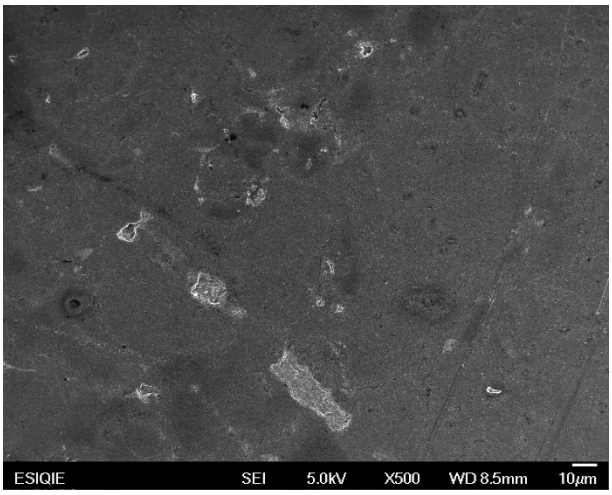


Figura 3. Micrografía superficial de pastilla de Aluminio.

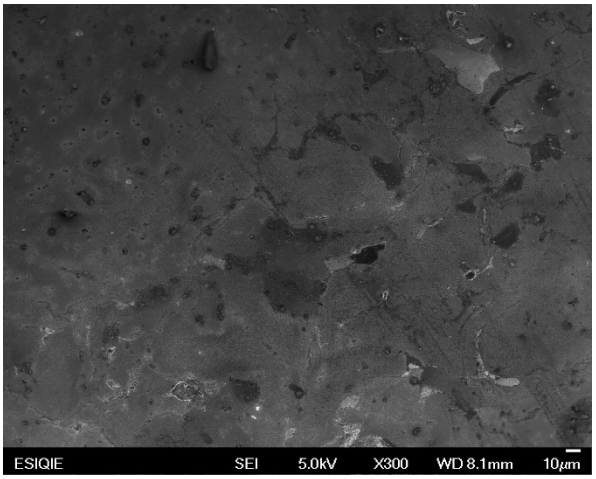


Figura 4. Micrografía superficial de la aleación Aluminio- Nanotubos de carbono-Ag.

En las micrografías de la figura 4 se puede observar claramente la presencia de una segunda fase más obscura la cual al realizar un análisis puntual el cual se muestra en la figura 5 resultando la presencia de aluminio y carbono en una relación estequiométrica de 50 % Al y 40% de C el porcentaje faltante fue detectado de Oxigeno que es normal debido a que la muestra se oxida lo cual indica la posible formación de un carburo de aluminio esto es corroborado con el análisis de DRX la presencia de este carburo de Aluminio.

Análisis de DRX

En la figura 5 se muestra el análisis de DRX de la muestra inicial sin elementos de aleación observándose primordialmente los picos característicos del Aluminio puro esto con el fin de tener un punto de comparación con la muestra aleada con Nanotubos de Carbono-Ag.

ISBN 978-607-8242-11-5

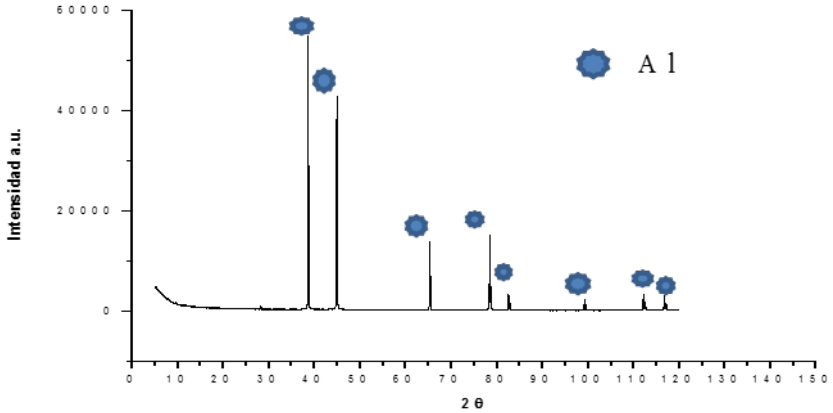


Figura 5. Difractograma de la muestra sin elementos de aleación.

Por otra parte, se puede observar en la Figura 6. El difractograma de la aleación de Aluminio-Nanotubos de carbono-Ag en el cual se muestra la presencia del carburo de Aluminio el cual se pudo formar en la parte de la molienda mecánica.

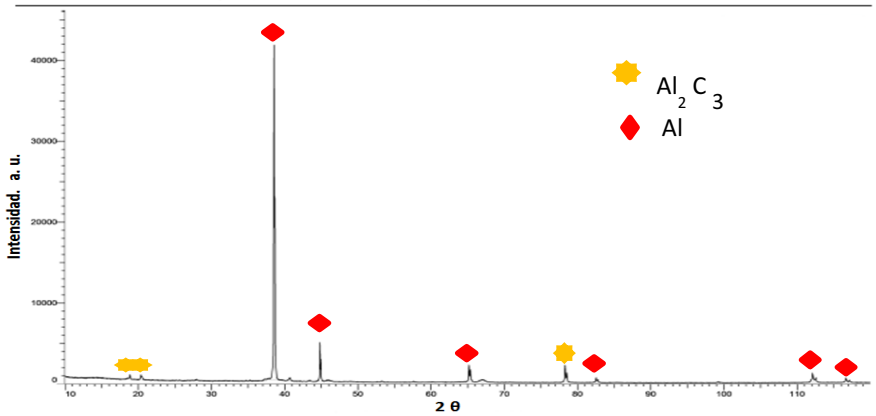


Figura 6. Difractograma de la muestra con Aluminio Nanotubos de carbono-Ag.

Microdureza (HV)

Al realizar las pruebas de Microdureza a alas muestras se puede observar que al realizar la aleación con nanotubos de carbono si hubo un incremento en la dureza del material obteniéndose durezas con aluminio puro de 25HV en promedio y con la aleación de nanotubos de carbono 35HV el incremento fue de 10 unidades dureza Vickers lo cual puede observarse en la figura 7.

ISBN 978-607-8242-11-5

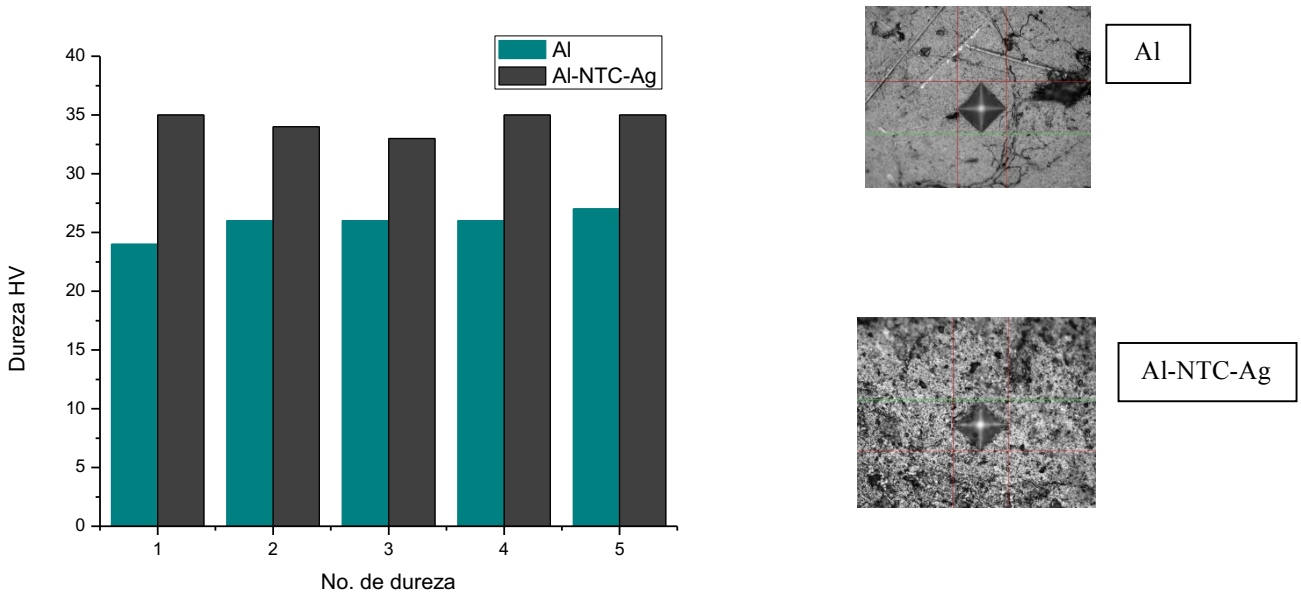


Figura 7. Grafica Microdureza de las muestras aluminio puro y aluminio-NTC-Ag

CONCLUSIONES:

Se logró obtener una aleación con mejores propiedades mecánicas por medio de aleado Mecanico por mecanosíntesis en un molino vertical fabricado en forma manual, además de que la aleación obtenida no presento discontinuidades las cuales se pudieron observar en las micrografías realizadas en microscopia electrónica y microscopia óptica. Finalmente la aleación obtenida incremento en 10 unidades de dureza HV.

REFERENCIAS

Bird, R., W. Stewart y E. Lightfoot, "*Fenómenos de Transporte",* Reverté, México (1964).

Catchpole, O.J. y M.B. King, *"Measurement and Correlation of Binary Diffusion Coefficients in Near-Critical Fluids"*, Ind. Eng. Chem. Res., 33,1828-1837 (1994).

Crank, J, *"The Mathematics of Diffusion",* Oxford University Press, New York (1964).

Cremasco, M.A, *"Fundamentos de Transferencia de Masa"*, Campinas, Editora da Unicamp, Brasil (1998).

Kong, C.Y. y S. Kagei, "*Infinite Dilution Binary Diffusion Coefficients for Unsaturated Fatty Acids and its Derivatives in Supercritical CO_2",* 6th Int. Symposium on Supercritical Fluids, Versailles-Francia (2003).

Liu, H. y E. Ruckenstein, *"Predicting the Diffusion Coefficients in Supercritical Fluids"*, Ind. Eng. Chem. Res., 36(3), 888-895 (1997).

Razeai, K.A. y F. Temelli, "Using Supercritical Fluid Chromatography to Determine Diffusion Coefficients of Lipids in Supercritical CO_2", J. Sup. Fluids. 17, 35-44 (2000).

Roy, C.B., M. Goto y T. Hirose, *"Extraction of Ginger Oil with Supercritical Carbon Dioxide. Experiments and Modeling"*, Ind. Eng. Chem. Res., 35(2), 607-611 (1996).

Xiao-ning, Y., L.A.F. Coelho y M.A. Mattews, "*Near-Critical Behavior of Mutual Diffusion Coefficients for Five Solutes in Supercritical CO_2*", Ind. Eng. Chem. Res., 39, 3059-3068 (2000).

Zapata, C. y M.A. Meireles, *"The Effective Diffusivity of Clove (Eugenia caryophyllus) Essential Oil in Pressurized CO_2 "*, Cienc. Tecnol. Aliment., 17(4), 393-398 (1997).

Zapata, C, "*Determinacao Da Difusividade Mássica Efetiva do Óleo Essencial de Cravo Da Índia (Eugenia caryophyllus), em CO_2 Líquido, a Diferentes Condicoes de Pressao e Temperatura'*", Tesis de Magister, Dpto. Eng. Alimentos, UNICAMP-Brasil (1998).

 ISBN 978-607-8242-11-5

Prevención de metal dusting en acero inoxidable 304 L por medio de recubrimientos de óxido de cromo

Dulce V. Melo-Máximo[1], Juan A. Alcántara[2], Joaquín Oseguera[1], Fernando Gomez[2], David. Muñoz[3],Adán. Lopez[3]

(1)Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Estado de México, Av. Lago de Guadalupe 3.5 Km, Margarita Maza de Juárez, 52926 Cd López Mateos, Méx.
(2)Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Av. Emiliano Zapata S/N, El Trafico, 54400 Villa Nicolás Romero
(3) Departamento de Ingeniería Industrial, Río Hondo #1 Col. Progreso Tizapán CP. 01080. Álvaro Obregón, Ciudad de México
E-mail: virimelo@itesm.mx

Resumen

Se recubrió un acero inoxidable austenítico 304 L con una capa de óxido de cromo por medio de la técnica de evaporación catódica reactiva. Se prepararon los recubrimientos de óxido de cromo sobre los sustratos de acero por la técnica de PVD. Las muestras se ensayaron en atmosferas de metano más hidrogeno en una termobalanza durante 20 horas de exposición a 800 °C. Con el fin de justificar si este recubrimiento es funcional o no se caracterizaron las muestras antes y después de las pruebas de corrosión por medio de Microscopia Electrónica de Barrido.

Prevention of metal dusting in 304 L stainless steel with chromium oxide coatings

Abstract

A 304 L austenitic stainless steel was coated with a layer of chromium oxide by reactive evaporation technique. The coatings were prepared on the steel substrates by the PVD technique. The samples were tested in the atmospheres of methane plus hydrogen in a thermobalance for 20 hours of exposure at 800 ° C. To justify this coating is functional the samples were characterized by SEM.

Keywords: corrosion, stainless steel, thin films

INTRODUCCIÓN

El uso de algunos metales se ve limitado por los procesos de corrosión que se desarrollan en medios agresivos, existen diferentes vías para incrementar la resistencia a la corrosión, una de las alternativas más comunes es la modificación superficial del metal mediante el uso de recubrimientos protectores, que son capaces de crear una barrera física que impide el contacto del metal con el medio que le rodea.

En la actualidad el uso de nuevos materiales debe cumplir las exigencias de las cada vez más estrictas condiciones de trabajo a nivel industrial. (Agüero, 2007)

Justificación

La falla en componentes por corrosión genera grave problema en distintas aplicaciones a alta temperatura, estas utilizan aleaciones base hierro para cumplir esta función. Se busca la industria limpia de fabricación de recubrimientos. Se busca también un sistema que permita proteger las aleaciones base hierro de los efectos corrosivos de las atmosferas ricas en carbono a altas temperaturas.
1.2 Problema

 ISBN 978-607-8242-11-5

El acero inoxidable austenitico 304 L es un material que tiene una potencial aplicacion en la industria de los interconectores de las celdas de combustible solido; la principal desventaja de su aplicación es la aparicion del fenomeno de corrosion conocido como metal dusting.

Objetivo General

Se busca un sistema que permita proteger aceros inoxidables de atmosferas corrosivas susceptibles a metal dusting por medio de un recubrimiento de óxido de cromo obtenido por evaporación catódica reactiva.

Objetivos específicos

Recubrir un acero inoxidable austenítico con una capa de óxido de cromo nanoestructurado por medio de evaporación catódica reactiva(RMS)
Evaluar el comportamiento de los dos aceros inoxidables en una atmosfera simulada con condiciones de metal dusting en metano a una temperatura de 800 ˚C.
Comprobar la efectividad de la aplicación de este tipo de recubrimientos.

Marco Teórico

La carburización y la carburización catastrófica o Metal Dusting por su traducción al inglés, es un proceso de corrosión causado por la deposición y difusión de carbono al interior de aleaciones expuestas en atmósferas carbónicas a altas temperaturas. Las condiciones bajo las que ambos ocurren y los efectos producidos por ambos procesos son diferentes (Grabke, 2003) (Pippel, 2003). En síntesis, la carburización, como proceso corrosivo, ocurre entre 800 °C y 1200 °C en presencia de atmósferas donde la actividad de carbono es menor que uno, y el Metal Dusting entre 400 °C y 900 °C en actividades carbónicas muchos mayores a uno.
Los daños causados por la carburización se manifiestan en cambios estructurales que demeritan las propiedades superficiales de los materiales. Una característica del metal dusting es que, además, produce la desintegración de las aleaciones en una mezcla pulverizada de coque y partículas metálicas, y por ello se le referencia como “carburización catastrófica”.

EXPERIMENTACIÓN

Tres sustratos de acero inoxidable austenítico 304 L fueron desbastadas con papel de lija SiC grano 1000 y pulidas con pasta de diamante de 6 μm hasta obtener acabado espejo. Previo a la deposición se realizó la limpieza de cada muestra con alcohol etílico.

Las muestras fueron introducidas a una cámara de Deposición Física de Vapores (PVD) que cuenta con una fuente de corriente directa y cuyo vacío fino es obtenido mediante una bomba tubomolecular que permite obtener una presión de vacío 5x10-5 Torr.

Se introdujo argón de ultra alta pureza fue introducido a la cámara para ajustar la presión de trabajo. Las deposiciones se realizaron a potencias constantes de trabajo durante 60 minutos. La presión de trabajo durante las deposiciones fue de 1.2 Pa. Se introdujo oxígeno en la cámara con un flujo de 5 sccm.

Las muestras recubiertas y sin recubrir fueron llevadas a pruebas de corrosión en una atmosfera de metano en una termobalanza con 20 h. Se obtuvo un registro de la ganancia en peso durante todo el experimento.

RESULTADOS

Para los ensayos de formación de oxidos se obtuvieron muestras recubiertas a tres potencias de trabajo diferentes, 100, 150 y 200 W, la figura 6 muestra las muestras recubiertas de acero 304 L.
Los recubrimientos se realizaron en muestras pulidas a espejo de 1 pulgada de diámetro y 2 milímetros de espesor.

ISBN 978-607-8242-11-5

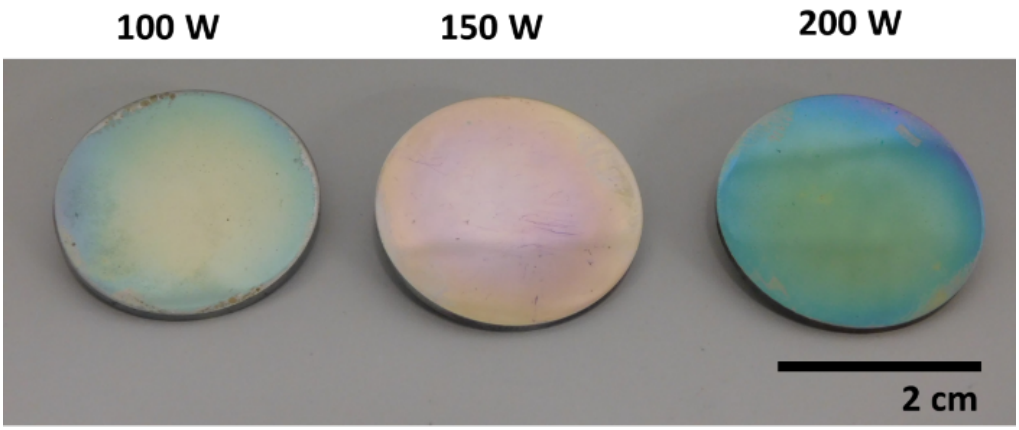


Figura 1. Recubrimientos de óxido de cromo a 100, 150 y 200 W.

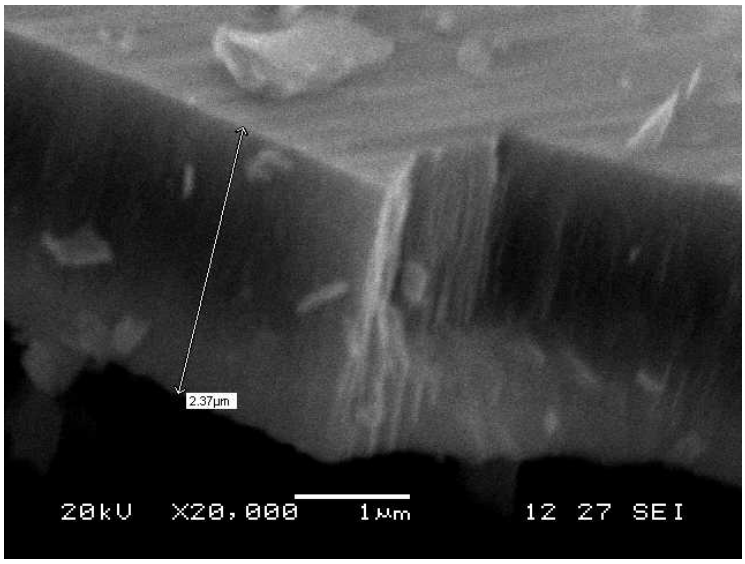


Figura 2. Espesor de la película de óxido de cromo fabricada a 200 W.

La figura 2 muestra los resultados de difracción de rayos X para cada una de las muestras, se observa la presencia de los picos de sustrato que corresponde a hierro en su fase austenita, así como la presencia de los picos de Cr2O3. Junto al pico principal de austenita se encuentra un pico de Cr que puede provenir de la capa de adhesión. La mayor cantidad de óxido de cromo se encuentra en la muestra preparada a 200 W.

ISBN 978-607-8242-11-5

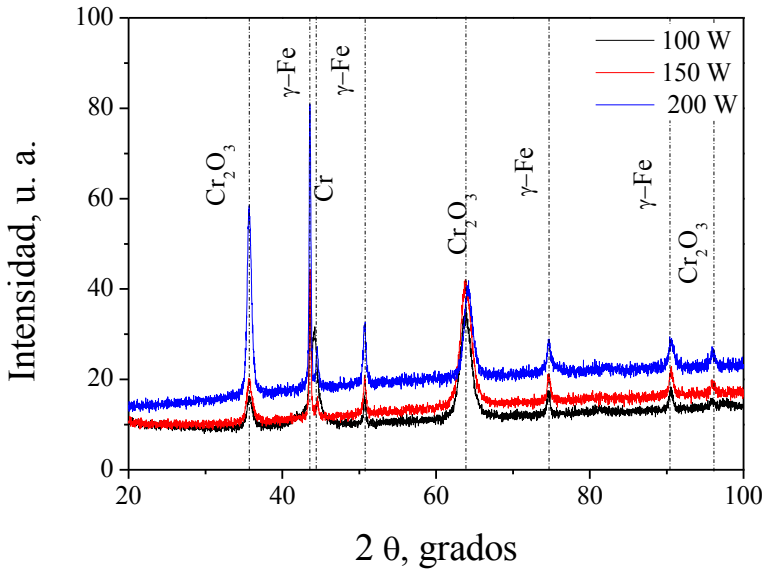


Figura 3. Resultados de difracción de rayos X

Los resultados del análisis termogravimétrico indican que la muestra de acero sin recubrir tiene una ganancia en peso de 8 miligramos después de 20 horas debido a los productos de corrosión que se forman en la superficie de la muestra. Se observa que la ganancia en peso de la muestra recubierta con oxido de cromo es mucho menor, cercano a 1 miligramo, en este caso los productos de corrosión están presentes en menor cantidad.

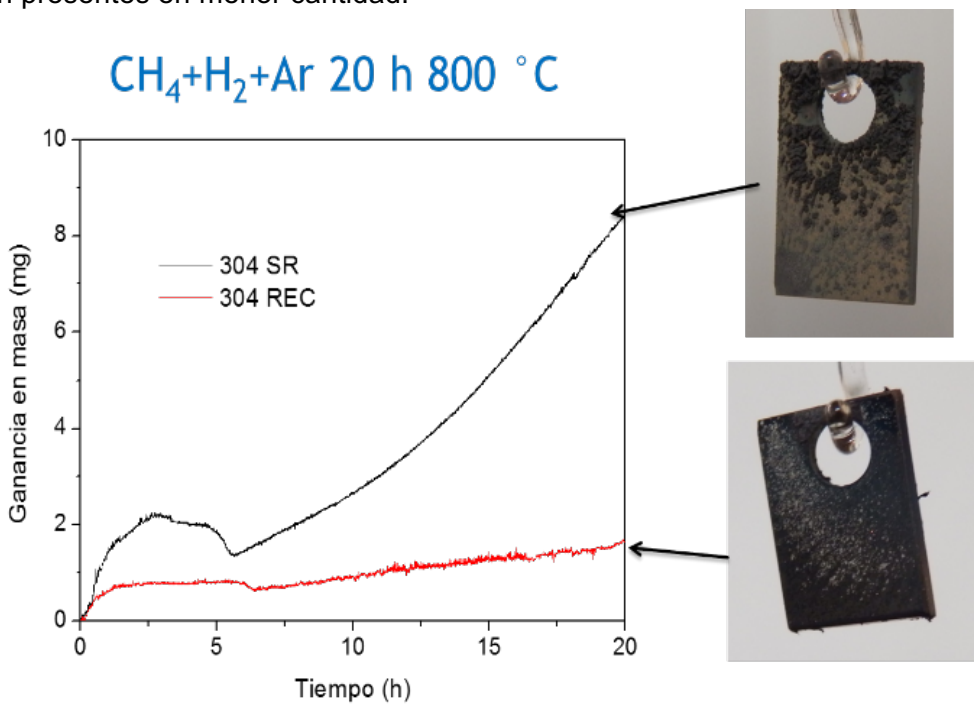


Figura 4 Resultados del análisis termogravimétrico de la muestra de acero 304 L con y sin recubrimiento.

ISBN 978-607-8242-11-5

CONCLUSIONES

Se recubrieron sustratos de acero 304 L con una película de óxido de cromo con el fin de evaluar su potencial como recubrimiento protector en atmosferas de Metal Dusting. Se observo que la potencia de trabajo tiene una influencia importante en la formación de óxidos de cromo densos y bien adheridos a la superficie del sustrato. Los recubrimientos de óxido de cromo ofrecen protección contra la corrosión de acero 304 L.

REFERENCIAS

Agüero. (2007). Recubrimientos contra la corrosión a alta temperatura para componentes. REVISTA DE METALURGIA, 384-398.
Grabke, H. (2003)., 54, pág. 736.
Pippel. (2003). Materials Corrosion, 54, págs. 747-751.

 ISBN 978-607-8242-11-5

Índice alfabético

Álvarez, Joseph , 47

Aarón Gonzalvez, Marlin A., 83, 86
Acle, Yussef G. I., 6, 60, 70
Acosta, Luis , 99
Aguirre, Pío , 90
Alarcón Aldana, Andrea C., 107
Alcántara, Juan A., 143, 144
Alcibar, M. F., 58
Aldana Rico, Andres F., 27
Alfonso, Damián , 41, 46
Alvarado, Roberto , 11, 17
Alvarez, Dolores , 104, 106
Alvarez, Santiago , 19
Alveal, Maximiliano , 95, 96
Amico, Franco , 114
Andrade, Fabiano F., 85
Angulo, Luis C., 4
ArbelÁez CastaÑo, Paula E., 39, 40
Arista-Jalife, Antonio , 34, 78
Arregoces, Heli A., 4, 11, 17
Arreola-Villa, Sixtos A., 75, 76
Arrues, Osmín T., 119
Arzate, Guillermo , 48, 49
Avila, Rafael , 83
Ayala, Fernando , 80, 120

Bálsamo, Nancy , 104
Barraza, Néstor , 14
Basantes Andrade, Andrea V., 103
Becerra, Francisco , 99
Belman, Israel , 10
Beltrán, Romina , 8
Bermudes, Armando , 42, 43
Blas Cajas, Michael A., 109
Botero, Santiago , 53
Bou, Jordi J., 133
Bracho, Rafael , 141
Brilla, Igor , 16
Bula Silvera, Antonio J., 63

Cárdenas Guerra, J. C., 77, 79
Cailloux, Jonathan , 133
Calderón, John , 117
Callejas-Cuervo, Mauro , 21, 107
Camargo, C.Celso , 84
Carabajal, Roberto , 95, 96
Carabalí, Alexis , 54
Carbajal, Marco , 48, 49
Cardona, Diego , 65, 66
Cardona, Esteban , 37
Cardoso, Fredner , 85
Carrasco, Félix , 133
Casas Botero, Ana E., 98
Castañeda-Miranda, Alejandro , 111, 112
Castillo, Herbert , 110, 113, 115
Castro, Salvador , 79
Cazarez-Castro, Nohe , 20
Cejas, Lilian , 95, 96
Celi-Pinzón, Jorge L., 1
Cervantes Bazan, Josué V., 93, 142
Cevallos Amaguay, Jherry F., 108
Chávez-Campos, Gerardo , 75
Chavez, José F., 143
Chirife, Jorge , 118
Choles, Patricia E., 86

Cid, Gerardo M., 140
Cifuentes Bernal, Andres M., 25
Coelho, Gonçalo M., 84
Coelho, Jorge , 84, 85
Cohen Manrique, Carlos S., 42–44
Concho, Ileana , 126
Contreras, Jose L., 82
Cortes, Hugo , 74
Crivello, Mónica , 104
Cruz, Gmaliel A., 143
Cuesta, Rosalba , 86

Daza, Alcides , 54
Daza, Francisney , 94
Daza-Wittinghan, William A., 21
De La Ossa, Miryam , 30, 139
De La Torre, Florencio , 36
Delgado, Edith , 119–123
Di Mare Pareja, Leonardo A., 62, 63
Dobrosz-Gómez, Izabela , 39, 40, 53, 55, 67, 68, 73
Domínguez, Lisandra , 46
Duarte-Villaseñor, Miguel , 20
Durango, Edison , 97

Echeverría, César , 95, 96
Escobar Villanueva, Jairo R., 24
Escoto, Héctor , 79
Estrada-Sentí, Vivian , 41, 57

Febles Rodríguez, Juan P., 51
Fernandez, Tomas , 69
Ferro, Victor R., 132
Figueroa, Anabel , 82
Fiol, Nuria , 36
Forero, Luis , 61
Frómeta Moreno, Yoiler J., 51
Fragozo Arevalo, Jose M., 24
Francesconi, Micaela , 106
Freitas, Francisco , 6, 60, 70
Fuentes, Gustavo A., 82
Fuentes, Mauren , 90

G. Teive, Raimundo C., 84, 85
Gómez Márquez, Héctor R., 141
Gómez, Armando , 83
Gómez, Cesar , 83
Gómez, Jesús , 122
Gómez-GarcÍa, Miguel A., 39, 40, 53, 55, 67, 68, 73
Galindo, Ivan , 18
Garcés, Héctor , 92
Garcés, Ingrid , 9
García, Arturo , 41, 46
García-Nonoal, Zaira , 34
Garcia, Cristian , 126
Garibaldi Covarrubias, Roberto F., 26
Gaviria, Guillermo , 67
Gerstenmaier, Susana , 79
Gilpavas, Edison , 39, 40, 53, 55, 67, 68, 73
Giraldo García, Jaime A., 28, 37, 38, 71
Giraldo Plaza, Jorge E., 2
Giraldo Polanco, María F., 139
Giraldo, Edgar L., 38
Gomez Atehortua, Carlos M., 39, 40
Gomez, Fernando , 144
González, Peggy , 47
González-Santos, Leopoldo , 88
Gonzalez, Aleida , 123
Gonzalez, Ernesto , 121
Guerra Reyes, Frank E., 103
Guevara Vega, Cathy P., 108
Gutierrez Monsalve, Paula A., 97
Gutierrez, Emmanuel , 26
Gutierrez-Segura, Flabio , 1
Guzmán, Gerardo , 23, 50, 52
Guzman Hernandez, Manuel A., 10

Heard, Christopher , 80
Hernández Carreón, Carlos A., 124, 125
Hernández Simón, Luis M., 119

Hernández, Ingrid , 56, 59
Hernandez, Leobardo , 48, 49
Hernandez, Lizzeth , 69
Hernandez, Miguel , 124
Herrejón-Escutia, Martín , 75, 76
Hill, Josephine , 73
Hinostroza, Victor , 92
Hossian, Alejandro , 95, 96
Hurtado, Mariana , 135

Ibadango Angamarca, Daniela K., 103
Ibarra, Harold , 53, 68
Ibarra-Guel, Francisco J., 111
Imbaquingo Esparza, Daisy E., 108

Jacome Leon, Jose G., 108
Jaime-Mirabal, Gloria M., 137, 138
Jaramillo, Diego , 99
Jiménez, Martha , 56, 58, 59
Jiménez-Carrión, Miguel , 1
Jiménez-Placer, Gustavo , 14

Kliger, Luis , 104, 106

López González, Julián D., 37
López, Edgar , 130
López, Pedro , 93
López-Martínez, Edgar , 76
La Barrera Gonzalez, Alfredo , 93, 142
Ladino-Luna, Delfino , 136–138
Lagos Acosta, Mario A., 23, 50, 52
Lenis Rodas, Yuhan A., 62, 72
Lio, Guillermo , 14
Loaiza Miranda, Walter G., 115
Lopez, Ádan, 144

Márquez Baños, Valaur E., 81, 101
Mancilla Tolama, Juana E., 124, 125
Manrique, Carlos , 45
Marrero, Rogej , 122
Martínez de Jesús, Gastón M., 101
Martínez Hurtado, Jose E., 71
Martínez, Antonio , 46
Martinez, Ernesto , 7
Martins, Eduardo L., 84
Maspoch, Maria L., 133
Mateus, Sandra , 91
Maury, Johnnys , 27
Mechán Llontop, Luis A., 110
Medina Arroyave, Jose D., 39, 40
Medina, Edgar , 107
Medina, Manuel A., 143
Melo-Máximo, Dulce, 144
Mendoza, Yoma , 11
Mendoza-Soto, José L., 74
Meyer, Jeancarlos , 83
Miranda, Francisco , 69
Modai, Enrique , 94
Modesti, Mario , 104, 106
Moncada, Jose , 91
Moncayo-Martinez, Luis A., 64, 116, 131
Monroy, Anderson , 56, 58, 59
Montes González, Juan F., 37
Montiel Cendejas, Luis V., 130, 140
Montoya, Luis F., 97
Montufar, Marco A., 89
Mora Gutiérrez, Roman A., 13
Mora, Daniel , 113
Morales, Annia , 51
Morejón-Valdes, Maylevis , 57
Muñoz, David F., 89, 116, 128, 143, 144
Mussoi, Fernando , 85

Nakano, Mariko , 34, 78
Naranjo Toro, Miguel E., 103
Narciso, Flor , 35, 47
Nardini, Andrea G., 22, 105
Neto, Edison , 84, 85
Nuño, Leticia , 82

Ojeda Toro, Juan C., 55

Olaya Montesino, Yulenis Y., 22
Oliva, Diego , 90
Olivares-Vera, Daniel A., 112
Olivera Guerrero, Francisco J., 26
Olivera, Verónica , 95, 96
Olivera-Fuentes, Claudio , 12
Ordosgoitia, Rodrigo , 44, 45
Oseguera, Joaquín, 144
Ovalle Carranza, Demetrio A., 2, 3, 19
Oviedo Lopera, Juan C., 97, 98, 100, 102

Páez-Hernández, Ricardo T., 136
Pérez Montiel, Jhonny I., 22, 24, 105
Pérez, Darien , 51
Pérez, Gabriel , 78
Pérez, Román , 101, 105
Pacheco Medero, María L., 122
Parra, Jessica , 71
Parra-Guevara, David , 15
Parreira, João , 84, 85
Perez, Marlen , 5
Perez-Isaac, Pamela , 12
Pineda-Rojas, Jairo , 21
Poch, Jordi , 36
Pomales, Alfredo , 47
Ponce, Carolina , 32
Ponsich, Antonin , 13
Portnoy de La Ossa, Iván D., 62, 72
Puerta Ramírez, Jorge E., 28

Quintana, Berenice , 82
Quiroga, Arturo , 63
Quiroz, Thomás , 3

Ríos, Rosario , 120, 121, 123
Ríos-Bolívar, Addison , 35, 47
Ramírez, Abraham , 78
Ramírez, Alejandro , 125
Ramírez-Muñoz, Jorge , 81, 101, 105
Ramírez-Pérez, José-Felipe , 57
Ramirez Carmona, Margarita E., 100
Ramirez, Omar , 93, 142
Ramirez-Nafarrate, Adrian , 64, 141
Rese, Alex L. R., 84, 85
Restrepo, Gloria , 4
Rincón, Elizabeth , 61
Rodríguez Manrique, Jhonatan A., 42–45
Rodríguez, Nelson , 54
Rodríguez, Rosendo , 109, 110, 113–115
Rodríguez, Tania , 5
Rodriguez Campos, Juan C., 10
Rojano, Roberto E., 4
Rojas, Bayron , 32
Romero-Meléndez, Cutberto , 88
Rondón Cárdenas, Daniel S., 25
Rosales, Roberto , 69
Rosario, Elda , 69
Rossano, Miguel , 5, 18
Rubio, Hugo , 26
Rudolf, Thomas M., 129

Sánchez Rangel, Francisco J., 23, 50, 52
Sánchez, Caridad , 120, 121, 123
Sánchez-Ortiz, Alejandra , 34
Sánchez-Soto, Miguel , 133
Salazar Ospina, Oscar M., 3
Salazar, Oscar , 19
Salazar, Rodrigo , 143
Salmones, Jose , 82
Sanjuan Mejía, Marco E., 72
Sansinena, Marina , 118
Santa, Camilo , 73
Santana, Orlando O., 133
Santoro, Flavia , 2
Santos, María , 117, 118
Serrano, Dayana , 121
Silva Canizalez, Diego E., 134, 135
Silvera, Antonio , 27

Skiba, Yuri , 15
Solano, Andrés D., 86
Solorio-Díaz, Gildardo , 75, 76
Soto Sumuano, Jesus L., 26
Suarez, Edisson , 100

Téllez Macías, Ángel D., 13
Tabares Lopez, Mari L., 28
Tapia Vargas, Víctor N., 23, 50, 52
Tapia, Carlos , 82
Tlacuilo Parra, Jose A., 26
Torres, Mauricio , 25
Toselli, Luis , 7, 8
Toselli, Paula , 7, 8
Tost, Gerard , 55

Vázquez-Gómez, Octavio , 75, 76
Valderrama, Jorge A., 38
Valderrama, Jose , 9, 29, 31, 33
Valdez, Guadalupe , 125
Valencia M, Jaime A., 98
Valencia, J J., 80, 81
Valverde Guzmán, Quino M., 114
Vazquez, Ana K., 18
Vega Luna, José I., 23, 50, 52
Velásquez, Jorge , 61
Vengoechea, Alejandra , 17
Vergara, Mary , 126
Vergara-Hernández, Héctor J., 75, 76
Villaescusa, Isabel , 36
Villalobos, Arnaldo , 62, 63, 72
Villegas, Damian , 69

Williams, Gerardo S., 64

Yáñez, Adrían , 105
Yupa Villanueva, Renatto M., 113, 114

Zambrano, Daniel , 14
Zapata Ruiz, Diego L., 98, 102
Zaritzky, Noemí , 117, 118
Zeifert, Beatriz , 82
Zuñiga-Alvarez, Francisco , 20

–¿Qué te parece desto, Sancho? – Dijo Don Quijote –
Bien podrán los encantadores quitarme la ventura,
pero el esfuerzo y el ánimo, será imposible.

Segunda parte del Ingenioso Caballero
Don Quijote de la Mancha
Miguel de Cervantes

–Buena está – dijo Sancho –; fírmela vuestra merced.
–No es menester firmarla – dijo Don Quijote–,
sino solamente poner mi rúbrica.

Primera parte del Ingenioso Caballero
Don Quijote de la Mancha
Miguel de Cervantes