

Fornari, Javier ; Grieco, Sebastián ; Parodi, Miguel ; Luccini, Eduardo

Análisis de líneas de producción utilizando técnicas tradicionales

Energieia, Año 8, N° 8, 2010

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central "San Benito Abad". Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Fornari, J. et al. Análisis de líneas de producción utilizando técnicas tradicionales [en línea]. *Energieia*, 8(8), 2010. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/analisis-lineas-produccion.pdf> [Fecha de consulta:]

Análisis de Líneas de Producción Utilizando Técnicas Tradicionales

Javier Fornari¹, Sebastián Grieco¹, Miguel Parodi^{1,2} y Eduardo Luccini^{1,2}

¹ Facultad de Química e Ingeniería "Fray Roger Bacon", Pontificia Universidad Católica Argentina, Rosario, Argentina.

² Grupo de Energía Solar, Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNRosario), Rosario, Argentina.

Resumen – En el contexto dinámico de producción de los procesos de manufactura modernos, los *eventos críticos*, que ocasionan inconvenientes, deben ser contemplados en el marco de la planificación y control de producción. Simular el impacto sobre la productividad ocasionado por un evento crítico, capturando la totalidad de los detalles operativos, se vuelve impráctico como herramienta de solución en tiempo real. Esta tarea se simplifica haciendo abstracciones operacionales del proceso mediante funciones analíticas, con lo cual se construye un *metamodelo*. Este trabajo propone una aplicación del metamodelo que describe el impacto operacional del evento *parada de una máquina "clave"* (máquina de control numérico computarizado, CNC) que afecta a la performance/productividad de la línea de producción en forma directa al número de partes demoradas e indirecta a las variables de respuesta dinámica. La incorporación de estos metamodelos en la toma de decisiones demuestra aportar una considerable mejora en la planificación del proceso de producción.

Palabras Clave: Procesos industriales, eventos críticos, planificación, optimización, metamodelo.

Abstract – Within the context of the modern dynamical manufacture production processes, the *critical events* causing difficulties must be considered in the frame of the production planning and control. Simulation of the impact due to a given critical event, taken into account the whole operative details, is impractical as a real time solution tool. Making operational abstractions within the processes, by means of analytical functions, simplify this task. This constitutes a *metamodel*. This work applies the metamodel describing the operational impact of an event *stop of a "key" machine* (a computing numerical control machine, CNC) affecting the performance/productivity of the production line in a direct way to the number of delayed parts and indirect to the dynamic response variables. The incorporation of these metamodels in the decision-making shows to constitute a significant improvement in the production process planning.

Keywords: Industrial processes, critical events, planning, optimization, metamodel.

1. Introducción

Una característica distintiva de los sistemas de manufactura modernos es la presencia de escenarios dinámicos de producción. Éstos son ocasionados por diversos *eventos críticos* (parada de máquina, merma en la provisión de materia prima, procesamiento de órdenes de alta prioridad,

modificaciones en el mix de producción, o la combinación de algunos de ellos⁵²). En este contexto dinámico de gestión, las funciones de planificación y control de producción (PCP) deben necesariamente contemplar la performance/productividad del proceso en condiciones transientes. Este hecho, se contradice con las técnicas de Programación Matemática [1-3] y Teoría de Colas [4-7] normalmente empleadas para la supervisión operativa del piso de planta. Estos modelos, suponen un comportamiento estacionario. Debido a la importancia del impacto del transiente en la planificación y en la programación, su tratamiento exige el uso de otras técnicas de solución [8-10]. Estas nuevas metodologías deberán proporcionar una adecuada estructura (definir un mecanismo preciso para relacionar las variables de decisión con la solución del problema) a los problemas operacionales asociados con este tipo de escenarios dinámicos, permitiendo una adecuada caracterización de estos escenarios anormales en el ámbito de la producción, generando información que posibilite una considerable mejora de la performance/productividad operativa. Con el objetivo de efectivizar la dirección del nivel operativo del piso de planta, factores claves asociados a la performance dinámica del proceso (número de partes en el sistema (L), tiempo en el sistema (W), value-in-process, etc.) necesitan ser identificados e interpretados. Disponer de esta información en tiempo real mejora el Proceso de Toma de Decisiones, a fin de minimizar el impacto del transiente en la línea de producción.

Se presentan distintos enfoques en la literatura como posibles soluciones a esta situación. Algunos, extrapolan experiencias del supervisor en predecir la performance del proceso. Otros utilizan Análisis de Valores Medios para ver qué ocurre en promedio en el proceso, donde cada operación toma la misma cantidad de tiempo. Empleo de modelos analíticos (Cadenas de Markov, Teoría de Colas, etc. [11]) para describir los transientes operacionales. Estas técnicas no son aplicables a sistemas de manufactura complejos, considerando: condiciones estacionarias, procesos invariantes, imposición de suposiciones poco aceptables (por ej.: arribo tipo Poisson [12,13]). Como una alternativa más conveniente, surge la simulación de eventos discretos [14], actualmente muy aplicada en la evaluación de procesos productivos [15, 16], y a la disponibilidad de una variedad de software comerciales. En este tipo de metodología, toda la complejidad operativa del proceso puede incorporarse en la descripción simulada de la planta; sirviendo como soporte en aplicaciones como: disposición del layout, seguimientos de órdenes de producción, análisis de eficiencia de una estación de trabajo, predecir la performance/productividad del proceso existente o proyectado, balanceo de línea, análisis de programas de mantenimientos preventivos, seguimiento del flujo de materiales por la planta, planificación de instalaciones, evaluar el rendimiento de la mano de obra, etc. Sería imaginable utilizar la simulación para modelar el impacto de la productividad ocasionado por el comportamiento transiente de un evento crítico, capturando la totalidad de los detalles operativos. Sin embargo, la información que genera la simulación es excesivamente cuantitativa y voluminosa, y el consumo de tiempo en la duración de las réplicas, hacen que la simulación no pueda ser utilizada como herramienta de solución en tiempo real. Para que esta información pueda ser incorporada en el marco de los sistemas para el soporte de decisiones, es necesario hacer abstracciones operacionales del proceso (o tratamiento de pos-simulación) mediante funciones analíticas. Estas funciones se soportan sobre índices de performance típicos de la simulación (value-in-process, tiempo en el sistema, números de partes en el sistema, etc.), lo que permite estudiar el impacto de los transientes en la línea de producción. Esta combinación de la simulación con modelos analíticos se denomina *metamodelo*. Los metamodelos, son funciones matemáticas características de cada uno de los eventos críticos. Su uso implica grandes beneficios para la gestión operativa del proceso, tales como: (i) predicción del impacto en la productividad del evento crítico, (ii) usos en el diseño de esquemas operativos y planificación de capacidad que proporcionen flexibilidad y robustez al proceso desde la óptica de la performance/productividad y (iii) evaluación de acciones correctivas en línea. Permitiendo flexibilidad y agilidad en el desarrollo de protocolos de producción y optimización de la performance.

A los fines de enfatizar el uso de los metamodelos en el piso de planta, el trabajo propone una aplicación del metamodelo que describe el impacto operacional del evento parada de máquina "clave" (máquina de control numérico computarizado, CNC) que afecta a la performance/productividad de la línea de producción, en forma directa al *número de partes demoradas* e indirecta a las variables de respuesta dinámica (L , W). La eventual incorporación de estos metamodelos en la toma de decisiones, posibilita una considerable mejora del "scheduling" y planificación del proceso.

2. Experimentos y Modelo de Simulación de la Línea de Producción

⁵² En el APÉNDICE 2 se muestran algunos de los metamodelos correspondientes a dichos eventos individuales, siendo los combinados motivo de otro trabajo.

Como caso de estudio, se construye un modelo de una fila de partes arribando a un multi-servidor (estación de trabajo = CNC, con cuatro campos de trabajo)⁵³ usando simulación de eventos discretos. (ver figura 1).

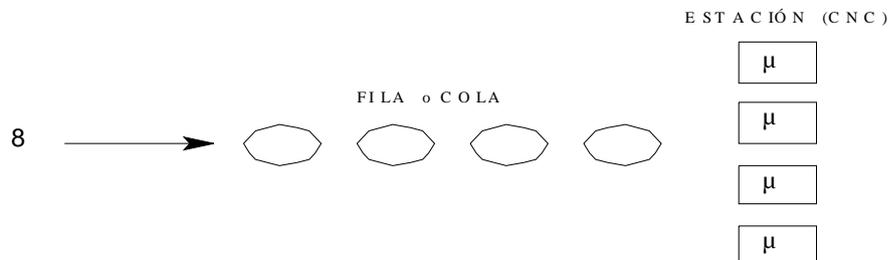


Figura 1: Fila con multi-servidores.

Cualquier evento, por ejemplo, una parada de máquina, se simula efectuando la detención de la operación⁵⁴ de uno o más campos de trabajo de la estación “clave” por algún período de tiempo especificado, en el marco de diseño experimental. Las variables de respuesta dinámica seleccionadas para el estudio del comportamiento transiente de la línea de producción son: *número de partes en el sistema (L)* y *tiempo en el sistema (W)*.

L se relaciona directamente con el nivel de inventario de trabajo en proceso. La Teoría de Colas [11], para una fila o cola con multi-servidores operando a un nivel de utilización menor a uno, asegura una solución para el estado estacionario de la variable. Cuando ocurre la parada de un campo de trabajo, la cantidad de recursos del sistema disminuye (además, baja la eficiencia de la estación de trabajo), ésto demora la finalización del ensamblaje en punta de línea, y causa que *W* se incremente. Si el sistema con la máquina parada permanece sin modificaciones en equilibrio, luego, existe un nuevo estado estacionario, y el valor de *W* gradualmente se aproximará a un nuevo estado estacionario medio⁵⁵, (ver figura 2).

La otra variable de respuesta dinámica, *L*, es también de utilidad. La fórmula de Little correspondiente a la Teoría de Colas sostiene que, *el valor medio de número de partes en el sistema es igual al factor de arribo medio multiplicado por el tiempo medio en el sistema*. Sin comprobación matemática, los experimentos de simulación indican que *esta relación también se cumple para los valores transientes* [18]. Por ejemplo, este resultado es útil para determinar el número de *partes demoradas* (como una función del tiempo) debido a la parada de máquina(s), (ver SECCIÓN 4).

En el trabajo se realiza simulación finita o limitada [19]. En orden de obtener resultados estadísticos significativos, se ejecutaron más de treinta (30) réplicas.

3. Ejemplo: Comportamiento Transiente para una Parada de Máquina

En la figura 2 se muestran los resultados de simulación para un típico problema de parada de máquina en un sistema de línea de producción con arribo general, servicio general y múltiples servidores (G/G/C).

⁵³ Caso de aplicación. Ver SECCIÓN 5.

⁵⁴ Tipos de fallas: neumáticas, eléctricas, rotura, etc.

⁵⁵ También se puede considerar el caso donde no se llega al nuevo estado estacionario.

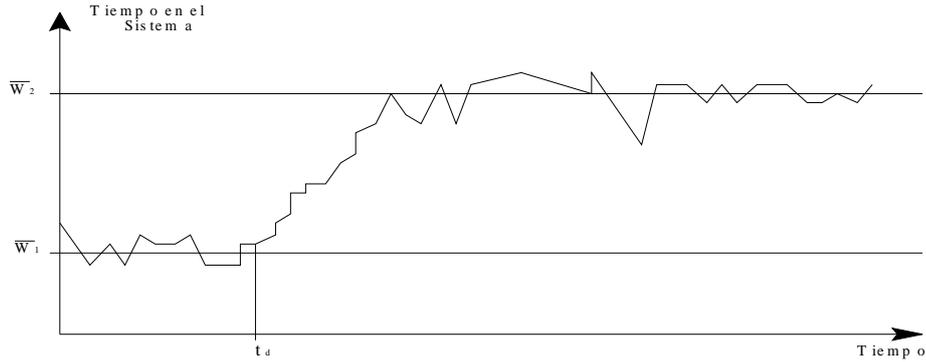


Figura 2: G/G/C Queues con una máquina parada.

Recordar que cada punto de esta curva es un valor promedio de las treinta (30) réplicas. En la figura se puede observar que, después de un cierto período transiente, el valor de *tiempo en el sistema* se desplaza desde un estado estacionario \bar{W}_1 hacia un nuevo estado estacionario \bar{W}_2 . Las variables de respuesta dinámica gradualmente se aproximan a un nuevo estado estacionario. Si más máquinas están disponibles en cada estación de trabajo y el nivel de utilización es bajo, el *tiempo de espera de la parte* debe ser corto, en consecuencia, el *tiempo en el sistema* también.

Para describir la situación de la figura 2, Steudel H.[20] sugiere un modelo de primer orden.

$$y = Y * \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right) \quad (1)$$

donde:

y: variable de respuesta dinámica.

Y: valor de **y** en estado estacionario.

τ : constante de tiempo. Tiempo que se demora en alcanzar el nuevo estado estacionario.

Esta función matemática es más representativa que los modelos de regresión, debido a que estos últimos se independizan del factor tiempo.

Usando la función matemática de primer orden y agregando una constante para las condiciones iniciales, se encuentra que la descripción de la respuesta transiente ante una ocurrencia de parada de máquina, es:

$$W = \bar{W}_1 + (\bar{W}_2 - \bar{W}_1) \left[1 - e^{-\left(\frac{t - (t_d + t_{Dd})}{\tau_d}\right)} \right] \quad (2)$$

donde:

\bar{W}_1 : es el valor medio en estado estacionario de *tiempo en el sistema* sin maquinas paradas en la línea.

\bar{W}_2 : es el valor medio en estado estacionario de *tiempo en el sistema* con una maquina parada.

t_d : es el tiempo al cual la máquina comienza a fallar.

t_{Dd} : es el tiempo de demora de respuesta debido a la ubicación física de la máquina en la línea de producción.

τ_d : constante de tiempo para el transiente ante la ocurrencia de una parada de máquina⁵⁶.

Las condiciones iniciales para los valores de *tiempo en el sistema* en estado estacionario, son:

$$\begin{aligned} W &= \bar{W}_1 \\ t &= t_d + t_{Dd} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} W &= \bar{W}_2 \\ t &\rightarrow \infty \end{aligned} \quad (4)$$

La figura 3 muestra la función demora de primer orden extendida sobre los resultados de la simulación.

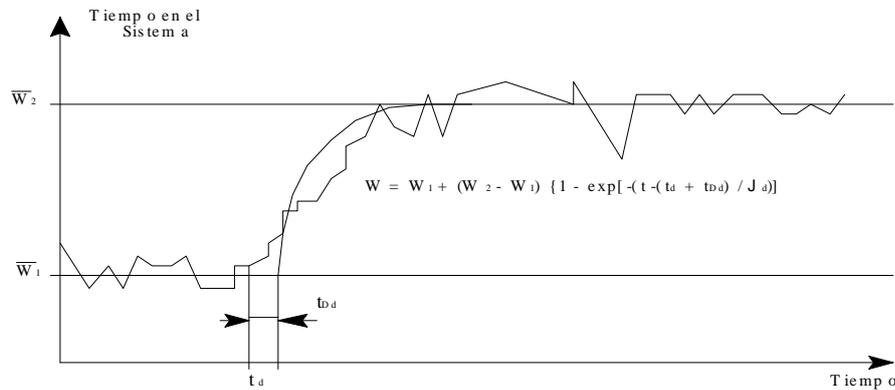


Figura 3: Metamodelo para la dinámica de parada de máquina.

Luego que la máquina permanece detenida durante un cierto periodo de tiempo, ésta se repara y retoma su operación normal. En otras circunstancias, podemos agregar otra máquina o incrementar la capacidad de operación de las instalaciones. El tratamiento de estudio es similar a la dinámica de parada de máquina. Para la dinámica de recuperación de máquina, se obtiene el siguiente metamodelo:

$$W' = \bar{W}_1 + (\bar{W}_2 + \bar{W}_1) \left[e^{-\left(\frac{t - (t_u + T_{Du})}{\tau_u}\right)} \right] \quad (5)$$

donde:

W' : *tiempo en el sistema* durante la dinámica de recuperación de la maquina.

t_u : tiempo al cual se recupera la maquina y reasume a su operación.

t_{Du} : tiempo de demora de respuesta debido a la ubicación física de la máquina en la línea de producción.

⁵⁶ Su cálculo se verá en la SECCIÓN 5.

τ_u : constante de tiempo ante la recuperación de la máquina.

El tiempo de demora de respuesta (t_{Dd}), se debe a la distancia física entre la máquina en cuestión con respecto al final de la línea de producción. Y es aquí, donde se miden los valores de las variables de respuesta dinámica partes que se convierten en producto terminado. Por ejemplo, si la parada de máquina ocurre en la última operación de la línea de producción, el tiempo de demora de respuesta es nulo.

4. Aplicación a un Problema con Solución en Tiempo Real

Los metamodelos son importantes en un ambiente de decisiones en tiempo real; la dirección necesita afrontar eventos dinámicos inesperados. Luego, el control de acción está basado en programas de producción y consecuencias de los eventos dinámicos.

El supervisor se interesa acerca de la habilidad para finalizar el trabajo de ensamblado en el sistema línea de producción, según programa de producción. Por ejemplo, *¿cuántas partes finalizarán retrasadas después de un cierto tiempo?*, durante el cuál, el sistema estaba afectado por un evento crítico dinámico. Supongamos que uno de los campos de trabajo de la máquina "clave" (CNC) falla. Aquí empleamos el metamodelo correspondiente, y así se obtienen los resultados en tiempo real.

Considerando las siguientes variables:

t_d : tiempo al cual ocurre la parada de máquina.

t_{brk} : tiempo necesario para la reparación de la máquina (según datos históricos).

$t_u = t_d + t_{Dd} + t_{brk}$: tiempo al cual se reasume la operación.

T : tiempo que se plantea el supervisor. Pueden presentarse las siguientes opciones:

$$* t_d + t_{Dd} < T < t_u + t_{Du}$$

$$* T = t_u + t_{Du}$$

$$* T > t_u + t_{Du}$$

N_d : número de partes demoradas. Partes que finalizarán tarde debido a la ocurrencia de la parada de máquina.

L : números de partes en el sistema durante el período transiente.

\bar{L} : número de partes en el sistema en estado estacionario.

\bar{L}_1 : número de partes en el sistema con una máquina parada en estado estacionario.

Caso 1: $t_d + t_{Dd} < T < t_u + t_{Du}$

$$N_d = \text{Int}[L - \bar{L}]$$

$$N_d = \text{Int} \left\{ \left(\bar{L}_1 - \bar{L} \right) \left[1 - e^{-\left(\frac{t - (t_d + t_{Dd})}{\tau_d} \right)} \right] \right\} \quad (6)$$

En la fórmula (6), se determina el número de partes a ser finalizadas tarde, por medio de la función número de partes en el sistema ($L=f(t)$); evaluando en $t = T$, menos el valor de la función en estado estacionario. La interpretación aquí, es que, si el sistema está en equilibrio, mantiene un cierto número de partes elaborándose en condiciones estacionarias, luego, ante la ocurrencia del evento (disminución de recursos servidores en el sistema), causa un incremento de la variable L , es decir, que

el número de partes finalizadas disminuye. Se obtuvo, combinando el metamodelo correspondiente a parada de máquina (su función de demora exponencial) con la ecuación de Little.

Caso 2: $T = t_u + t_{Du}$

$$N_{d,Max.} = Int[\Delta L_{b,Max.}]$$

$$N_{d,Max.} = Int\left\{(\bar{L}_1 - \bar{L}) \left[1 - e^{-\left(\frac{t_u - t_d}{\tau_d}\right)}\right]\right\} \quad (7)$$

Caso 3: $T > t_u + t_{Du}$

$$N_d = Int(L - \bar{L})$$

$$N_d = Int\left[\Delta L_{d,Max.} * e^{-\left(\frac{t - (t_u + t_{Du})}{\tau_u}\right)}\right] \quad (8)$$

5. Caso de Estudio

5.1. Descripción del Proceso en la Fábrica de Fornitura

La fábrica que se toma como caso aplicación, es una manufacturera del tipo “por órdenes”. Consta de cuatro departamentos de producción, ellos son: Maquinado, Lija Manual-Fondo, Ensamblado-Terminación y Expedición. La materia prima ingresa al sector de Maquinado (donde se efectúan cuatro sub-procesos: fenólico, madera maciza, terciado, enchapado), el sector cuenta con un elenco de máquinas y equipos de nivel tecnológico considerable (prensa, CNC, escuadradora simple y doble, lijadoras de contacto y de banda, garlopa, tupí, etc.). En el sector siguiente, se le aplica un lijado manual y un recubrimiento como fondo; al pasar al sector de Ensamblado se arma el mueble con un posterior acabado superficial; y por último la etapa de Expedición, que es donde se lo embala para su posterior traslado al cliente. El turno de producción dura 480 [min.].

Se analizará una porción del proceso de producción en el sector de Maquinado, donde interviene una estación de trabajo (CNC con cuatro campos de trabajo) común para los cuatro sub-procesos arriba mencionados. En planta se realizaron estudios de tiempos, resultando: una cinta transportadora provee una pieza según ley Exponencial de media 0.6 [min.], la toma un operario que la coloca en uno de los cuatro campos de trabajo del CNC, con un tiempo de operación según ley Normal de media 2 [min.] y desviación estándar de 0.15 [min.], el mismo operario toma la pieza procesada y la deposita en un buffer; con fines prácticos se modela una falla de unos de los campos de trabajo del CNC. Este evento impacta en la productividad de la línea, debido a la disminución de recursos servidores, ocasionando un aumento en los valores de las variables de respuesta dinámica (L y W) y una disminución de la *eficiencia* de la estación de trabajo.

5.2. Aplicación del Metamodelo

A continuación se muestra el comportamiento de la variable de respuesta dinámica *tiempo en el sistema* obtenida del modelo riguroso y la curva originada por el metamodelo correspondiente.

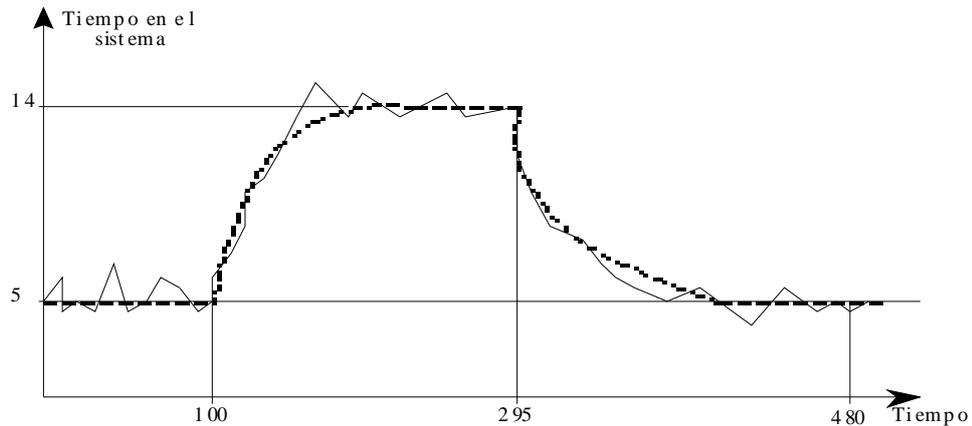


Figura 5: Comparación entre los resultados de la simulación y del metamodelo.

Datos numéricos de la figura: $\bar{W}_1 = 5$. $\bar{W}_2 = 14$. $t_d = 100$. $t_u = 295$. Para el cálculo de la constante de tiempo, se puede ver [21]. Además, según la Ley de Little, el *número de partes en el sistema* es: $\bar{L} = 8,3$. $\bar{L}_1 = 23,24$. Aplicando la fórmula (7): $N_{d, \text{máx.}} = 14$.

Se debe enfatizar que esta predicción no puede realizarse utilizando solamente la simulación o el método analítico independientes uno del otro. El metamodelo requiere resultados pre-simulados y tiene evidentes ventajas en velocidad computacional. En nuestros experimentos de simulación, debido al gran número de réplicas requeridas para cada simulación, simulando todas las combinaciones de falla de los distintos campos de trabajo del CNC, se evidencia que no satisface la condición de respuesta en tiempo real para la toma de decisiones.

6. Conclusiones

En este trabajo, se estudió en detalle mediante modelado por computadora el comportamiento transiente de un sistema de línea de producción multi-servidor. La simulación de eventos discretos provee una gran potencia de modelación no disponible en los métodos analíticos debido a las características complejas del sistema.

Los resultados de la simulación del comportamiento transiente se modelaron mediante el metamodelo dinámico correspondiente a la forma de una función de demora exponencial continua de primer orden, las cuales son solución de la ecuación diferencial de primer orden.

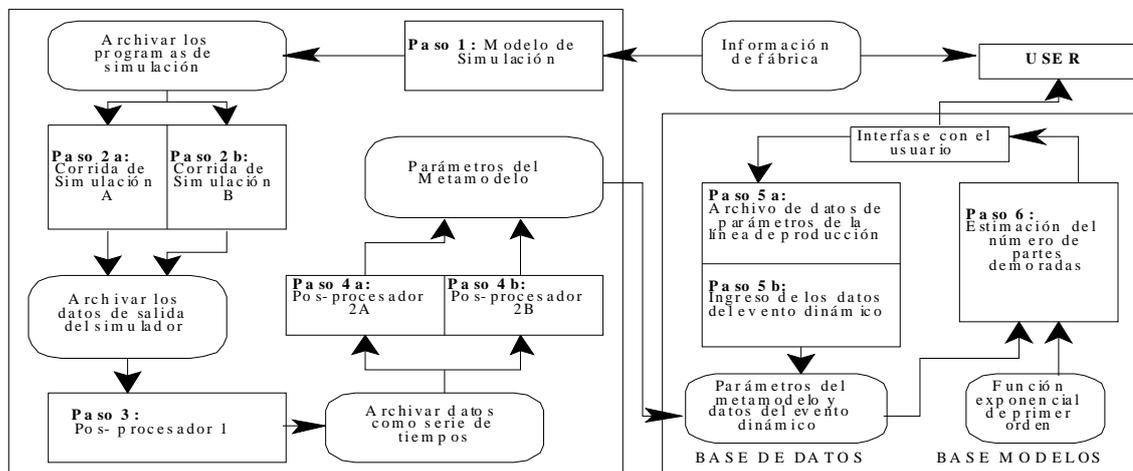
Mediante el metamodelo es fácil y rápido determinar el *número de partes demoradas* debido a la ocurrencia del evento, siendo de utilidad para el control de producción de planta (según fórmula (7)).

El enfoque integrador se demuestra por medio de la simulación (modelar detalladamente el sistema) y el aporte de los métodos analíticos (describir el comportamiento transiente), resultando una metodología poderosa para el análisis de un sistema complejo de gran escala, se considera también un método viable para el modelado y análisis de otros tipos de sistemas de manufactura. Recursos futuros se centran sobre el desarrollo de controles dinámicos basados en metamodelos que describen el comportamiento transiente del sistema.

En el presente trabajo (ver APÉNDICE 1) se deja planteado el desarrollo de un *Sistema Soporte de Decisión*, siendo beneficioso para el PCP de planta, por ejemplo: predecir el impacto del evento dinámico asociando el número de partes que serán demoradas. Esta información sería útil para la supervisión del piso de planta y facilita el efectivo control de producción en tiempo real.

Apéndice 1: Construcción y Aplicación del Metamodelo

A continuación se describe el procedimiento detallado para la estimación de los parámetros de los metamodelos, construcción dinámica de los metamodelos y la ejecución del programa de aplicación:



1) Modelo de simulación de un sistema de línea de producción: Se construye un modelo de simulación de un sistema de línea de producción. El modelo es validado en los pasos 2(a), 2(b) y (6).

2-a) Estimación de los parámetros en estado estacionario del metamodelo correspondiente a trabajos de alta prioridad: Se realizan dos conjuntos de corridas de simulación para estimar todos los parámetros asociados con la condición en estado estacionario, con ninguna máquina parada pero involucrando trabajos de alta prioridad.

2-b) Corrida de simulación con máquina parada: Para aquellas operaciones claves, se simula una parada de máquina para obtener el correspondiente valor de *tiempo en el sistema* en estado estacionario con una máquina parada para cada estación de trabajo.

3) Procesamiento de los resultados de la simulación: Se procesan los resultados de la simulación para generar dos archivos de series de tiempos, para W y otro para L , respectivamente. Los archivos representan las respuestas transientes para los eventos dinámicos.

4-a) Estimación de los parámetros en estado estacionario y procesando trabajos de alta prioridad: Un programa pos-procesador lee los archivos que contienen los datos de serie de tiempos anteriores desde los resultados de la simulación obtenidos en 2(a) para estimar los parámetros del metamodelo, incluyendo \bar{W} , \bar{L} , P_h y P_r .

4-b) Estimación de los parámetros de parada de máquina: Un segundo programa pos-procesador usará los archivos de datos de serie de tiempos del punto 2(b) para estimar los valores medios en estado estacionario con una máquina parada y la correspondiente constante de tiempo. \bar{W}_1 , \bar{L}_1 , para cada estación cuello de botella.

5) Interfase del usuario para el programa de aplicación: ingreso de los valores de: t_{brk} , t_d , t_s , t_{sht} , t_h , S_h , etc.

6) Estimación del *número de partes demoradas*: El metamodelo estimará el número de partes demoradas con el fin de predecir el impacto del evento dinámico, basado en las fórmulas (7-9).

Apéndice 2: Metamodelos Correspondientes a Eventos Dinámicos

1) Merma en la provisión de partes:

Solamente se usa (L) como medida de performance.

(a) Durante el período de insuficiencia:

$$L = \bar{L} - \Phi(t - t_s) \quad (\text{A2.1})$$

correspondiente a $t_s < t \bullet t_r < t^*$

donde:

Φ : relación de proceso medio de la línea de armado.

t_s : tiempo de la insuficiencia de partes.

$t_r = t_s + t_{sht}$: en el tiempo al cual se vuelve a la provisión normal de partes.

t_{sht} : duración de la insuficiencia de partes.

t^* : condición límite cuando el sistema comienza a vaciarse.

(b) Insuficiencia máxima (mínimo número de partes en el sistema): El número de ensamblers alcanza su más bajo nivel por encima de $t_r = t_s + t_{sht}$:

$$L_{Min} = \bar{L} - \Phi(t_r - t_s) = \bar{L} - \Phi * t_{sht} \quad (\text{A2.2})$$

con $L_{Min} > 0$

(c) Condición límite: Para determinar la condición límite, por ejemplo: $L(t^*) = 0$, hacemos:

$$\bar{L} - \Phi(t^* - t_s) = 0 \quad (\text{A2.3})$$

luego,

$$t^* = \frac{\bar{L} - \Phi * t_s}{\Phi} \quad (\text{A2.4})$$

de esta manera se asegura que $L_{Min} > 0$

(d) Período de recuperación: Cuando se recupera la provisión normal de partes, se sigue una función exponencial:

$$L = L_{Min} + (\bar{L} - L_{Min}) \left[1 - e^{-\left(\frac{t-t_r}{\tau_s}\right)} \right] \quad (\text{A2.5})$$

$$L = \bar{L} - (\bar{L} - L_{Min}) \left[e^{-\left(\frac{t-t_r}{\tau_s}\right)} \right] \quad (\text{A2.6})$$

donde τ_s es la constante de tiempo asociada con este momento transiente.

2) Procesamiento de órdenes de alta prioridad:

Para este tipo de eventos, el número total de ensamblés (L) no se ve afectado por los cambios de órdenes de procesamiento, solo influye en el W (tiempo en el sistema).

(a) Tiempo de finalización del ensamble de las órdenes de alta prioridad:

$$W_h = \bar{W} - P_h * e^{-\left(\frac{t-t_h}{\tau_h}\right)} \quad (\text{A2.7})$$

con $t_h < t < t_n$

donde:

\bar{W} : tiempo de ensamble en estado estacionario.

P_h : máximo decremento en el tiempo de ensamble para órdenes de alta prioridad. Por ejemplo: tiempo de finalización del primer ensamble de alta prioridad.

τ_h : constante de tiempo para este proceso transiente.

t_h : es el tiempo al cual comienza a procesarse el lote de alta prioridad.

$t_n = t_h + t_{lote}$: es el tiempo cuando todo ensamble de alta prioridad se finaliza y el sistema reasume a su procesamiento regular.

t_{lote} : tiempo total para el procesamiento de órdenes (o ensamblés) de alta prioridad.

(b) Tiempo de finalización de un ensamble general:

Los ensamblés generales serán demorados, su tiempo de ensamble está dado por:

$$W_r = \bar{W} + P_r * e^{-\left(\frac{t-t_n}{\tau_r}\right)} \quad (\text{A2.8})$$

para $t > t_n$

donde:

P_r : es el máximo incremento de tiempo de ensamble desde un valor promedio (en estado estacionario).

τ_r : Es la constante tiempo para el proceso transiente.

Referencias

- [1] POURBABAI B.. "A production planning and scheduling model for flexible manufacturing". *Proc. 2nd ORSA/TIMS Conf. on Flexible Manufacturing Systems*. Elsevier. Amsterdam. 1986.
- [2] VILLA A. and ARCOSTANZO M.. "DOPP - Dynamical optimized production planning". *Int. J. Prod. Res.*. Vol. 26. No. 10. 1988. pp. 1267 - 1283.
- [3] LASHKARI R., DUTTA S. and PADHYE. "A new formulation of operation allocation problem in flexible manufacturing systems: Mathematical modelling and computational experience". *Int. J. Prod. Res.*. Vol. 25. No. 9. 1987. pp. 1267 - 1283.
- [4] CHRYSSOLOURIS G., WRIGHT K., PIERCE J. and COBB W.. "Manufacturing systems operation: Dispatch rules versus intelligent control". *Robot. Comput. Integr. Manuf.*. Vol. 4. No. 3 - 4. 1988. pp. 531 - 544.
- [5] O'GRADY P. and MENON U.. "A concise review of flexible manufacturing systems and FMS literature". *Computers in Industry*. Vol. 7. 1986. pp. 155 - 167.
- [6] BUZACOTT J. and SHANTHIKUMAR J.. "Models for understanding flexible manufacturing systems". *Am. Inst. Ind. Eng. Trans.*. Vol. 3. 1980. pp. 259 - 264.
- [7] GROSS D. and HARRIS C.. *Fundamentals of Queueing Theory*. New York: Wiley. 1985.
- [8] FRIEDMAN L. and FRIEDMAN H.. "Statistical considerations of computer simulation". *Journal of Statistical Computer Simulation*. Vol. 19. 1984. pp. 237 - 263.
- [9] BUZACOTT J.. "Modeling manufacturing systems". *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 2. 1985. pp. 25 - 32.
- [10] BLANNING R.. "The construction and implementation of metamodels". *Simulation*. Vol. 24. 1975. pp. 177 - 184.
- [11] TAHA, HAMDY. *Operational Research*. McGraw-Hill. New York. 1987.
- [12] MAINON O.. "Real - time operational control of flexible operational systems". *J. Manuf. Syst.*. Vol. 6. No. 2. 1987. pp. 125 - 136.
- [13] MINNICH H. and BULA H.. "Manufacturing control system at IBM tracks product movement through semiconductor line". *Ind. Eng.*. Vol. 19. No. 11. 1985. pp. 82 - 92.
- [14] GARZIA R. and GARZIA M.. "Discrete - event simulation". *IEEE Spectrum*. December 1986. pp. 32 - 36.
- [15] CROWLEY D., BARD J. and JENSEN P.. "Using flow ratio analysis and discrete event simulation to design a medium volume production facility". *Computers Industrial Eng.*. Vol. 28. No. 2. 1995. pp. 379 - 397.
- [16] BENJAAFAR S.. "Intelligent simulation for flexible manufacturing systems: An integrated approach". *Computers Ind. Eng.*. Vol. 22. No. 3. 1992. pp. 297 - 311.
- [17] CACI INC.. *Simulation with SIMFACTORY II.5* - Release 6.2. CACI Inc., Arlington. Virginia. 1994.
- [18] LIN L.. "Metamodels of assembly line systems transient behavior for selected dynamic events". *PhD. Dissertation*. Arizona State University. Tempe. Arizona. 1989.
- [19] LAW A. and KELTON W.. *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill Book Company. 1990.
- [20] STEUDEL H. and WU S.. "A time series approach to queueing systems with application for modeling job-shop in-process inventories". *Management Science*. Vol. 23. 1977. pp. 745 - 755.
- [21] GUPTA Y.. "A method for incorporating process nonlinearities in model predictive control calculations". *Computers in Industry*. Vol. 16. 1991. pp. 367 - 375.