

**Boffa, Guillermo ; Farías, Ana María ; Galaretto, Oscar ;
Giannico, Fernando ; Herrera, Luis ; Casiello, Francisco ;
Scuracchio, Pablo**

Estudio de los procesos de transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía en el secado de granos de origen agrícola. Desarrollo de herramientas de cálculo aplicables al diseño de equipos y control de procesos

Energeia, Año 12, N° 12, 2014

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:

Boffa, G., et al. Estudio de los procesos de transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía en el secado de granos de origen agrícola : desarrollo de herramientas de cálculo aplicables al diseño de equipos y control de procesos [en línea]. *Energeia*, 12(12), 2014. Disponible en:
<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/estudio-procesos-transferencia-masa.pdf> [Fecha de consulta:]

Estudio de los procesos de transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía en el secado de granos de origen agrícola. Desarrollo de herramientas de cálculo aplicables al diseño de equipos y control de procesos

Boffa, Guillermo; Farías, Ana María; Galaretto, Oscar; Giannico Fernando; Herrera, Luis; Casiello, Francisco; Scuracchio Pablo.

Facultad de Química e Ingeniería Fray Rogelio Bacon de Rosario
Universidad Católica Argentina.
Av. Pellegrini 3314 Rosario 2000 / ingeniería_rosario@uca.edu.ar

Resumen. El estudio sobre secado de granos de origen agrícola forma parte de un proyecto amplio de investigación institucional dirigido a desarrollar temas vinculados a la actividad industrial en la zona núcleo agropecuaria, donde se encuentra ubicada la Facultad. El interés por estudiar la problemática de esta actividad proviene de advertir que, en la literatura especializada se admite como, normal un consumo de 1500 a 2000 kcal/kg de agua eliminada mientras que el necesario para evaporar 1 kg de agua es del orden de 550 kcal. Aun admitiendo que la ruptura de enlaces a nivel molecular pueden requerir mayor energía que la de una evaporación simple, la diferencia amerita intentar un abordaje sistemático del tema para identificar posibles ahorros de energía. En el presente trabajo se introduce la problemática asociada al secado de granos utilizando gases de combustión en lugar de aire, lo que le confiere una mayor complejidad por tratarse de un gas de composición y peso molecular variables. Además se analizan cuestiones de implementación del sistema de control empleando redes neuronales.

Palabras Clave: Energía; Procesos; Secado; Termodinámica

Abstract. This article concerns agricultural grain drying processes and is part of a broader research project related to industrial activity in the agricultural core zone around Rosario in Argentina, where the School of Engineering of the Catholic University of Argentina, Campus Rosario, is located. The interest in studying these problems arise from the fact that it is commonly accepted in the literature a consumption from 1500 to 2000 kcal / kg of water removed from grain, while the need to evaporate 1 kg of water is about 550 kcal. While admitting that breaking bonds at the molecular level may require more energy than a simple evaporation, the difference warrants a systematic approach to try to identify the topic potential energy savings. This paper also introduces the issue of grain drying using flue gas instead of air, a problem of greater complexity because it is a gas of varying composition and molecular weight. Furthermore, implementation issues of control systems using neural networks are analyzed.

Keywords: Energy; processes; Drying; Thermodynamics

BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA SISTEMAS DE SECADO CON GASES DE COMBUSTIÓN

1.1.- Configuración del sistema

La figura (1) muestra un esquema típico de secaderos que utilizan gases de combustión en lugar de aire en el proceso. El proceso es sencillo y consiste en quemar un combustible en una masa de aire que es posteriormente puesta en contacto con el material. El combustible que se utiliza casi exclusivamente es el GN, ya que otros tales como el fuel oil puede dejar residuos indeseables en el material.

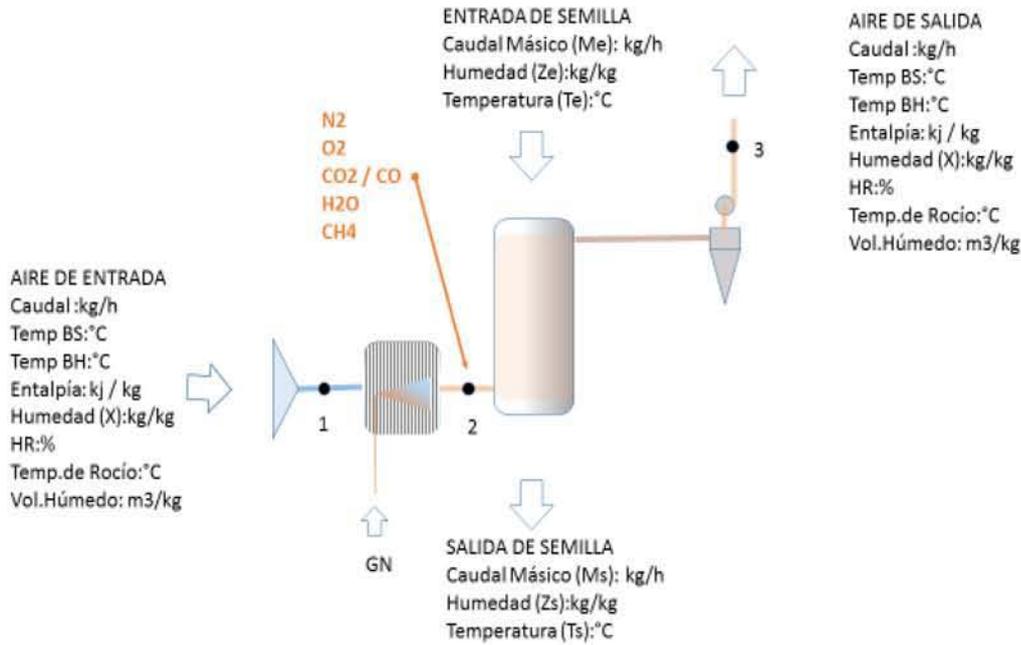
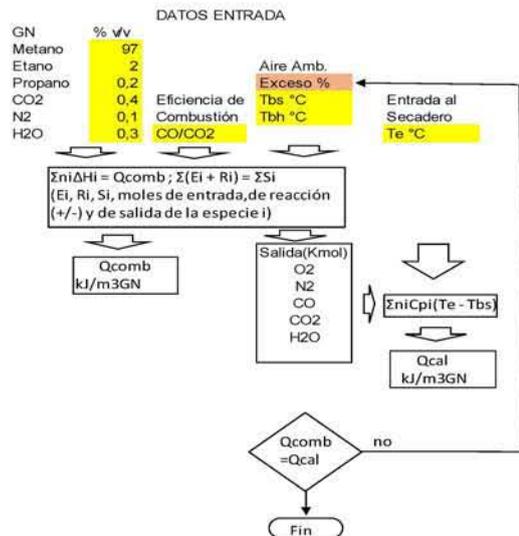


Figura 1. Esquema de secado de granos con gases de combustión. Fuente: elaboración propia.

1.2.- Cálculo de la proporción Aire/GN para conseguir una temperatura dada en la entrada al secadero

La temperatura de entrada al secadero es una de las principales variables del proceso, se fija con criterios de eficiencia de secado y preservación del material, normalmente no exceden los 75°C. El GN se combustiona en un gran exceso de aire para conseguir una mezcla de gases de entrada al secadero con la temperatura especificada. Utilizando planillas de cálculo convencionales se estableció la siguiente estrategia de cálculo aplicada a la cámara de combustión, indicada en la figura (2).

Figura 2. Estrategia de cálculo para obtener la relación aire/GN y la composición de los gases de secado. Fuente: elaboración propia.



1.3.- Obtención de los parámetros psicrométricos del gas de entrada al secadero

La diferencia de sistemas que utilizan gases de combustión con los que utilizan aire calentado en forma indirecta, es que la composición del gas será variable y función de la proporción aire/GN. Debe mencionarse también que, en rigor, no son aplicables a estos cálculos los valores de Humedad Relativa que proveen los instrumentos convencionales de medición de parámetros psicrométricos del aire húmedo porque estrictamente no darán el valor real de humedad debido

a que el peso molecular ya no corresponde al del aire puro, sí pueden utilizarse los valores de Temperatura de Bulbo Húmedo que proveen estos aparatos. Entonces deben introducirse modificaciones en los cálculos que tengan en cuenta esta circunstancia. El primer paso es calcular el Peso Molecular Medio de la mezcla (excluido el vapor de agua) en función de la composición de los gases de entrada al secadero obtenida de acuerdo a la proporción Aire/GN que satisface la condición de temperatura especificada.

$$PMg = \sum x_i \cdot PM_i$$

Con x_i y PM_i fracción molar y peso molecular de la especie i respectivamente. Con este valor se calculan X , X_s humedad absoluta actual y de saturación respectivamente a T_e y finalmente el grado de saturación en %.

$$X = \frac{PMv}{PMg} \cdot \frac{P_v}{(P_t - P_v)}$$

$$X_s = \frac{PMv}{PMg} \cdot \frac{P_s}{(P_t - P_s)}$$

$$HR = \frac{X}{X_s} \%$$

* El valor X se obtiene directamente conociendo la humedad absoluta del aire ambiente y la masa de vapor de H₂O producido por combustión. Para determinar el resto de los parámetros psicrométricos debe calcularse todavía la entalpía de la mezcla mediante la fórmula

$$h = C_{pgt} + (C_{pvt} + \lambda)X$$

Donde C_{pg} es el calor específico medio de la mezcla excluido el vapor de agua, variable y función de la relación Aire/GN. Con los datos especificados puede entonces calcularse el resto de los parámetros psicrométricos tales como punto de rocío y volumen húmedo, aplicando las correlaciones polinómicas de las propiedades termodinámicas del agua obtenidas con anterioridad y las ecuaciones propias del aire húmedo, atendiendo a las modificaciones especificadas en este trabajo.

CUESTIONES DE IMPLEMENTACIÓN Y ESTABILIDAD DEL SISTEMA DE CONTROL

2.1.- Los sistemas de control modernos (CNS):

La estabilidad dinámica de cualquier sistema de control es un tema crítico. A modo de un simple ejemplo, si consideramos un sistema de control digital realimentado, como el de la figura (3), una componente importante de un diseño satisfactorio es obtener una respuesta natural que presente un decaimiento asintótico rápido y con buen comportamiento.

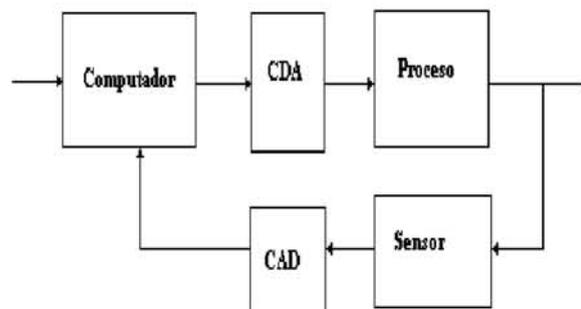


Figura 3. Estructura de un sistema de control digital realimentado. Fuente: elaboración propia.

Si la respuesta natural no decae, el efecto se observa como una pérdida de la acción de control deseada. Podemos decir además que la manifestación normal de la inestabilidad es una respuesta natural que presenta una magnitud que

aumenta exponencialmente o una oscilación con una magnitud que aumenta exponencialmente, de esta forma, dependiendo de la aplicación, el comportamiento inestable puede producir una situación peligrosa o un fallo catastrófico.

La compleja relación que existe entre la estabilidad del sistema y la forma en que se utiliza la realimentación resulta ser uno de los aspectos más importantes del diseño del sistema de control. De esta forma, una configuración realimentada mal diseñada puede producir una situación de inestabilidad cuando se aplica al control de una planta estable. Por otro lado, una configuración realimentada bien concebida puede producir una actuación estable cuando se aplica a una planta inestable. Teniendo en cuenta estas cuestiones cruciales a la hora de la implementación de los neuro/controladores, desarrollaremos algunos criterios fundamentales vinculados a la estabilidad del sistema de control neuronal y a cuestiones de implementación de los controladores en un entorno de control moderno (control montado sobre una red de comunicación), tal como es requerido en los procesos de secado de granos.

Un sistema de control realimentado cuyos lazos de control son cerrados a través de una red de comunicación es llamado Sistema de Control en Red (Networked Control System - NCS). Así, sensores, actuadores y controladores son interconectados vía redes de comunicación, esto hace más fácil su instalación y mantenimiento. Las principales ventajas de este tipo de sistemas son su bajo costo, pequeño volumen de cableado, procesamiento distribuido, instalación simple, fácil mantenimiento y alta fiabilidad. Todas estas ventajas mencionadas hacen a esta tecnología (NCS) muy apropiada para el proceso de secado de granos. Restaría entonces analizar la posibilidad de implementar los neuro/controladores sobre un entorno de trabajo NCS.

En un NCS uno de los factores clave que afectan el desempeño del sistema son los retardos de tiempo. Los retardos pueden ser constantes, variantes en el tiempo o aleatorios, esto depende del tipo de red, sistemas operativos, etc. Cuando el retardo de tiempo es menor que el tiempo de muestreo del NCS, algunos resultados indican que los efectos son mínimos en cuanto al desempeño del sistema de control. Sin embargo, cuando el retardo de tiempo es más grande que el tiempo de muestreo, esto suele reducir la eficiencia del NCS. Por lo tanto, analizar los retardos de tiempo así como desarrollar métodos eficientes para reducir sus efectos, resulta ser una tarea de fundamental importancia a resolver.

Uno de los primeros en investigar los retardos de tiempo en NCS fue Nilsson [6] su trabajo de Tesis Doctoral, introduce modelos para retardos en NCS, como retardo constante, como retardo aleatorios independientes y finalmente como un proceso de Markov, además desarrolla teoremas de control estocástico óptimo para NCSs basados en los modelos aleatorios independientes y procesos de Markov. A partir de este trabajo, trabajos posteriores introducen pautas de planificación (estática y dinámica) para la transmisión de datos del sensor en sistemas LTI en tiempo continuo, también se introduce la noción de Intervalo de Transferencia Máximo Conocido (Maximum Allowable Transfer Interval - MATI) que es el máximo tiempo en el que el dato del sensor debe ser transmitido. Así se pueden establecer cotas para el MATI y asegurar que el NCS es estable.

Varios autores han sugerido esquemas de control con configuraciones de tiempo ligeramente diferente. Las diferentes configuraciones provienen de si un nodo de red es conducido por evento o por tiempo.

Por conducido por evento se entiende que el nodo comienza su actividad cuando ocurre un evento, por ejemplo, cuando recibe información de otro nodo a través de la red. Por conducido por tiempo se entiende que el nodo comienza su actividad en un momento preestablecido, por ejemplo, el nodo puede correr periódicamente. Hay tres tipos esenciales de retrasos en el sistema:

- Retraso de la comunicación entre el sensor y el controlador τ_k^{sc} .
- Retraso computacional o de cálculo en el controlador τ_k^c .
- Retraso de la comunicación entre el controlador y el activador τ_k^{ca} .

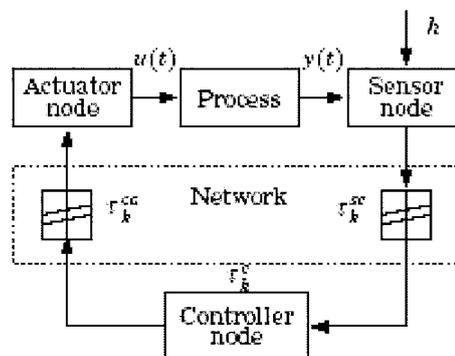


Figura 4. Sistema de control digital distribuido con retardos inducidos, τ_k^{sc} y τ_k^{ca} . El retardo en el nodo controlador, τ_k^c , es también indicado. Fuente: Nilsson (1998).

El subíndice k es usado para indicar una posible dependencia del tiempo de los retrasos.

El *retraso de control*, τ_k , para el sistema de control, es el tiempo desde cuando una señal medida es obtenida hasta cuando es usada en el activador y es igual a la suma de esos retrasos, es decir, $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^c + \tau_k^{ca}$.

Una forma para librarse de las variaciones temporales es introducir buffers sobre la entrada en el nodo controlador y en el nodo activador. Si estos buffers son elegidos suficientemente grandes, más grandes que el peor caso de retraso, el retraso en la transferencia entre los dos nodos es determinístico. La introducción de buffers en el bucle significa que a veces estamos usando más información de la necesaria.

Desde la perspectiva de control de datos muestreados es natural muestrear la salida del proceso equi-distante con un periodo de muestreo h . Es también natural mantener el retraso de control tan corto como sea posible. La razón es que, los retrasos dan lugar a retrasos de la fase, lo cual degenera la estabilidad del sistema. Esta motivación sugiere una configuración de sistemas, con nodos controladores conducidos por eventos y nodos activadores conducidos por eventos, lo cual significa que el cálculo de nuevas señales del control toma lugar tan pronto como la nueva información llega a partir de los nodos sensores y de los nodos controladores respectivamente.

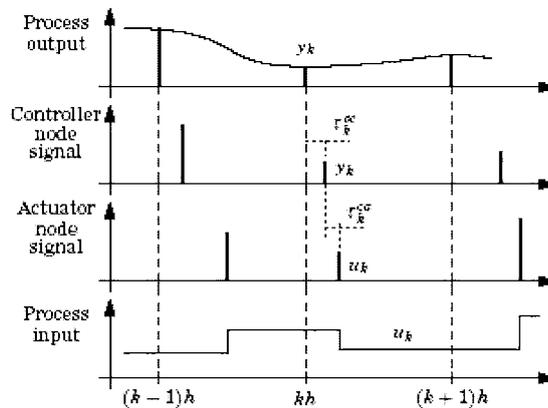


Figura 5. Representación de las señales de tiempo en el sistema de control. El primer diagrama ilustra la salida del proceso y los instantes de muestreo, el segundo ilustra la señal dentro del nodo controlador, el tercero ilustra la señal dentro del nodo activador, el cuarto diagrama ilustra la llegada al proceso. Fuente: Nilsson (1998).

El inconveniente con esta configuración es que el sistema se vuelve variante en el tiempo, esto se muestra en la figura (6), con intervalos de tiempo irregulares. Desde el punto de vista del control, un diseño normal usualmente tiene $0.2 \leq \omega h \leq 0.6$, donde h es el periodo de muestreo y ω es la frecuencia natural del sistema de bucle cerrado.

Con un retraso igual a una muestra este diseño tiene un retraso en la fase inducido por el controlador, Φ_{lc} , de $11^\circ \leq \Phi_{lc} \leq 34^\circ$. Un retraso grande en la fase podría hacer a muchos procesos difícil de controlar. Si se tiene un retraso de control más grande que el período de muestreo h , el muestreo podría conducir a un orden no cronológico de los nodos activadores. Esto a su vez, podría hacer un tanto complicado la implementación de algoritmos de control como al análisis de la estabilidad del sistema. Ahora bien, la condición de que el retraso de control sea menor que h , puede ser reemplazada por el supuesto de que el retraso de control no varía más que h , lo cual también garantiza que el muestreo conduce a un orden cronológico.

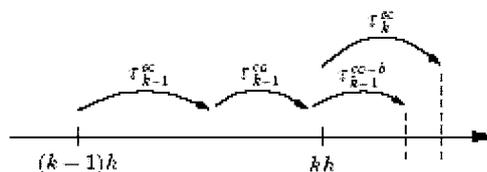


Figura 6. Gráfico de tiempo que muestra los retrasos durante un ciclo de reloj. Fuente: Nilsson (1998).

Usando tiempos sincronizados en los nodos, la información de retrasos puede ser extraída, incluyendo el tiempo de generación (marcas de reloj) de cada uno de los mensajes. La información del retraso puede ser usada en el nodo controlador. Las marcas de reloj dirán al controlador cual es el retraso de la medida recibida. Esta información puede entonces ser usada por el controlador en el cálculo de las señales de control.

El nodo controlador puede fácilmente calcular τ_k^{sc} comparando las marcas de reloj de las medidas con los tiempos internos del nodo controlador. El controlador puede también obtener información acerca de τ_{k-1}^{ca} .

En muchas implementaciones de redes es posible obtener información a partir de la interfase de la red cuando la última señal de control fue enviada a la red. Si esta información está disponible, el retraso en la transferencia τ_{k-1}^{ca} es conocido cuando u_k es calculado. Otra forma de realizar la propagación de τ_{k-1}^{ca} al controlador, es enviar, inmediatamente, un

mensaje desde el nodo activador al controlador conteniendo el tiempo de transferencia τ_{k-1}^{ca} . Sin embargo no es seguro que el controlador vaya a recibir este mensaje cuando la señal de control siguiente esta por ser calculada.

El tiempo para el sistema de control entre el cálculo de dos señales de control es mostrado en la figura (3). Ahí hemos introducido el retraso en la transferencia τ_k^{ca-b} para el tiempo de transferencia de enviar la información de τ_k^{ca} al controlador. La condición de que τ_{k-1}^{ca} es conocida, cuando calculamos la señal de control puede, en un caso general ser escrita como:

$$T_{k-1}^{sc} + \tau_{k-1}^{ca} + \tau_{k-1}^{ca-b} < T_k^{sc} + h$$

Se asumirá que la suma de los retrasos en un ciclo de control, es menor que el intervalo de muestreo h.

Como el retraso de control es la suma de τ_k^{sc} y τ_k^{ca} , es razonable asumir que cada uno de los retrasos está distribuido sobre $[0, \alpha h]$, donde $\alpha < 0.5$. Analizamos a continuación el problema de conocimiento garantizado de los retrasos anteriores para algunos casos especiales de comportamiento de las redes de comunicación.

Aleatoriedad total: si la red de comunicación da retrasos que son aleatorios e independientes, la condición de distribución de los retrasos es $\alpha < 1/3$.

Orden total: si añadimos el requerimiento de que los mensajes de la red son transmitidos en el orden en que fueron generados, el mensaje conteniendo la duración de τ_k^{ca} será siempre enviado antes de la próxima medición si $\alpha < 1/2$. La implementación de tal sistema requeriría algo como una cola global para los mensajes que serán enviados en la red.

Prioridad: algunas redes de comunicación tienen la posibilidad de dar prioridades a los mensajes y de garantizar que los mensajes en espera son enviados en orden de prioridad. En tal sistema nosotros podemos dar al mensaje que contiene a τ_{k-1}^{ca} una mayor prioridad que al mensaje que contiene la nueva medición y_k . Esto garantiza el conocimiento de τ_{k-1}^{ca} si $\alpha < 1/2$.

A partir de los razonamientos anteriores podemos concluir con los siguientes supuestos acerca de nuestro sistema de control en red:

- El nodo sensor es conducido por tiempo. La salida del proceso es muestreada periódicamente sin ningún disturbio. El período de muestreo es h.
- El nodo controlador es conducido por evento. La señal de control es calculada tan pronto como los datos del sensor llegan al nodo controlador.
- El nodo activador es conducido por evento. La señal de control es aplicada al proceso tan pronto como los datos llegan al nodo activador.
- Los retrasos de comunicación τ_k^{sc} y τ_k^{ca} son aleatoriamente variables con propiedades estocásticas conocidas. La variación del retraso total $\tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$, es menor que un intervalo de muestreo.
- Las duraciones de los retrasos pasados son conocidas por el controlador.

2.2.- Los sistemas de tiempo invariante (LTI)

En Nilsson [6], el sistema a lazo cerrado es transformado a un sistema invariante de tiempo por, la introducción de búferes en los nodos de controlador y activador, tal como podemos visualizar en la figura (7). Todos los nodos son cronometrados y sincronizados.

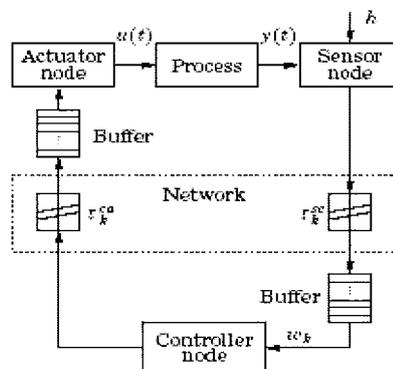


Figura 7. Los búferes son introducidos después de que los retrasos de comunicación variantes hagan el sistema de tiempo invariante. Fuente: Nilsson (1998).

Siguiendo ahora el planteo de Zhang [8], consideraremos un sistema muestreado compuesto de una planta lineal, invariante en el tiempo (LTI) y, un controlador por realimentación completa de los estados de dicha planta, con ganancia constante K , conectado a través de la red. El modelo de la planta en el espacio de estados viene dado por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (1)$$

Donde, $x(t) \in \mathfrak{R}^n$, es el vector de estados y, $u(t) \in \mathfrak{R}^m$, es la acción de control. Se supone que se miden todos los estados de la planta sólo en los instantes de muestreo,

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_k \dots, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} t_k = \infty$$

El objetivo es hallar un controlador digital por realimentación de estados dado por

$$u(t) = Kx(t_k), \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \quad (2)$$

que estabilice el sistema en lazo cerrado.

Se asume además que

$$t_{k+1} - t_k \leq h_{\max}, \quad \forall k \geq 0, \quad (3)$$

para algún $h_{\max} > 0$ conocido.

Este esquema resultante nos permite así representar un controlador genérico NCS. También Zhang [9] ha desarrollado una serie de teoremas que asegura la existencia de una función de Lyapunov para un sistema LTI en tiempo discreto, con lo cual analiza la estabilidad de este sistema realimentado y llega a determinar diferentes márgenes de estabilidad para distintos de NCS. Posteriormente Wang y ot. [5], toman en consideración los retardos de tiempo inducidos por la red y los retardos de la planta y proponen un diseño de controlador dependiente del retardo. Así recurren a una función apropiada de Lyapunov para obtener un controlador robusto, el cual es obtenido resolviendo un conjunto de desigualdades matriciales lineales (Linear Matrix Inequalities LMIs).

2.3.- Los neuro/controladores en un entorno CNS:

Podemos decir que, específicamente las redes neuronales en un sistema de control en red, presentan las siguientes características importantes:

- 1) Sistemas no lineales: las redes neuronales son una gran promesa en el campo de los problemas de control no lineal, esto se debe a su capacidad de aproximar mapeos no lineales arbitrarios.
- 2) Procesamiento paralelo distribuido: Las redes neuronales tienen una estructura sumamente paralela que les permiten inmediatamente realizar cualquier tipo de implementación paralela, con tal implementación puede esperarse alcanzar un mayor grado de tolerancia a errores que en los esquemas convencionales.
- 3) Implementación en hardware: Este punto está muy relacionado con el punto anterior. Las redes neuronales no sólo pueden ser implementadas en paralelo, actualmente se han introducido en el mercado, implementaciones utilizando hardware dedicado VLSI. Esto proporciona mayor compatibilidad con los sistemas de control en red e incrementa el número de redes neuronales que puedan ser implementadas.
- 4) Aprendizaje y adaptación: Las redes neuronales son entrenadas utilizando datos pasados del sistema en estudio. Una red apropiadamente entrenada tiene la habilidad de generalizar cuando se le introducen datos diferentes a los utilizados para su entrenamiento. Las redes pueden ser además adaptadas en línea.
- 5) Fusión de datos: Las redes neuronales pueden operar simultáneamente con datos cualitativos y cuantitativos, cuestión que permite utilizar distintos canales de información, propios de la red donde opera el sistema de control.
- 6) Sistemas multivariados: Las redes neuronales naturalmente procesan muchas entradas y tienen muchas salidas, de allí que puedan naturalmente ser aplicadas en sistemas multivariados.

Finalmente es importante tener presente que el control con redes neuronales ha sido utilizado satisfactoriamente en procesos no lineales de intercambiadores de calor [4].

Recordemos que el análisis de sistemas de control de temperatura a nivel industrial es importante, además, estos sistemas presentan características como constantes de tiempo grandes y efectos de acople fuertes. Además, en otros tipos de procesos industriales, tal como en máquinas de inyección de plástico se también se han diseñado controles PID con redes neuronales, que alcanzaron alto desempeño [3].

2.4.- Control neuronal directo vs. Control indirecto:

En el informe anterior [1], señalábamos que en la literatura sobre redes neuronales aplicadas en el control han sido propuestas y usadas una gran cantidad de estructuras de control, pero se han destacado dos, que a continuación detallamos:

- 1) Control directo: En esta estructura el neuro/controlador es entrenado sin tener el modelo de planta, en este esquema se busca que el resultado del lazo cerrado que contiene a la planta y al sistema dé como resultado un mapeo identidad. La acción de control busca que la planta siga la señal de referencia.
- 2) Control indirecto: en esta estructura primero un neuro/identificador estima el comportamiento de la planta, usando como información la entrada/salida de la misma, luego el neuro/controlador es diseñado tomando como base el modelo identificado, en este caso la acción de control busca que la planta siga la señal de referencia.

En el control neuronal indirecto, el controlador se basa en la identificación del sistema no lineal, por lo que el proceso de identificación se convierte en parte central de la construcción del neuro/controlador. En esta dirección existen dos tipos de estructuras, el modelo serie-paralelo y el modelo paralelo.

En nuestro caso utilizamos en modelo paralelo, dado que resulta muy útil cuando se trabaja con sistemas con ruido (este modelo elimina los problemas de bias causados por el ruido generado por la salida del sistema real). Además dado que la identificación de un modelo usualmente se realiza fuera de línea, el modelo paralelo es más adecuado. La primera etapa entonces consiste en realizar una identificación de la planta, en este caso a través de un neuro/identificador, el cual asimila la dinámica propia de la planta:

En donde tenemos el vector de parámetros del neuro/identificador:

$$Y_{\text{mod}}(K, U_{\text{cont}}, P) = [w_i, v_i] \quad (5)$$

En este proceso de identificación también debemos garantizar que la sensibilidad del modelo sea semejante a la sensibilidad de la planta, tal como queda manifestado con la siguiente expresión:

$$\frac{dY_{\text{mod}}(K, U_{\text{cont}}, P)}{dU_{\text{cont}}} \approx \frac{dY_{\text{plan}}(K, U_{\text{cont}})}{dU_{\text{cont}}} \quad (6)$$

El neuro/identificador ajusta sus parámetros en base a un índice de desempeño o criterio de error que está dado por la diferencia de la salida de la planta y la salida del modelo, según la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{\text{mod}} = \frac{1}{2} (Y_{\text{mod}}(K, U_{\text{cont}}, P) - Y_{\text{plan}}(K, U_{\text{cont}}))^2 \quad (7)$$

La segunda etapa consiste en encontrar una ley adecuada de control, a través del neuro/controlador, de forma tal que la salida de la planta siga una referencia deseada, es decir:

$$Y_{\text{plan}}(K, U_{\text{cont}}) = \text{refer}(K) \quad (8)$$

El objetivo del control queda definido de la siguiente forma:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\text{refer}(K) - Y_{\text{mod}}(K, U_{\text{cont}}, P)\| \leq \varepsilon \quad (9)$$

Donde el criterio del error, puede ser definido como un error cuadrático medio. En este trabajo seguimos el esquema de control planteado por Levin y Narendra [5]. Así, dado un sistema no lineal, se usa una red neuronal para identificar el sistema (neuro/identificador) y con base al resultado de esta identificación se diseña el neuro/controlador. Vemos, en la figura (8), una simulación de la salida del sistema de control con redes neuronales, y para una referencia determinada:

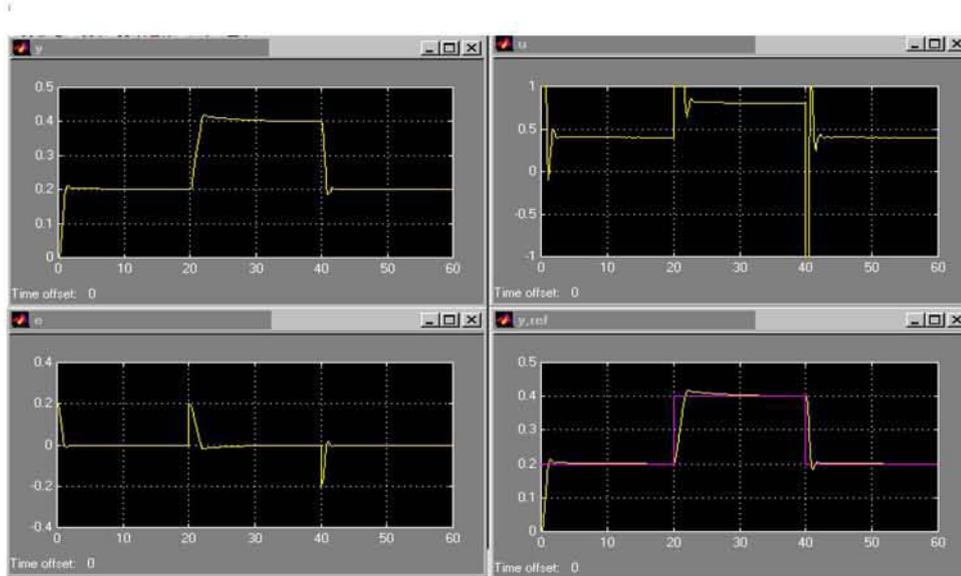


Figura 8. Simulación del Sistema de Control con Redes Neuronales. Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

3.1.- Sistemas de secado que utilizan gases de combustión

Se han adaptado las herramientas de cálculo utilizables en balances de masa y energía a sistemas de composición variable, extendiendo su campo de aplicación.

3.2.- Sistema de control con redes neuronales

Hemos revisado algunos elementos que hacen al diseño e implementación de un sistema de control de procesos de secado de granos empleando redes neuronales. Analizamos los efectos del retardo tanto en la planta como en la red de comunicación soporte del sistema de control y visualizamos también la conveniencia de transformar al sistema real en un sistema de tiempo invariante (LTI). También visualizamos la conveniencia de utilizar un control con redes neuronales en un sistema de control en red (NCS). Analizamos también las variantes adaptivas del control (modo directo, modo indirecto), estrategias importantes a la hora de considerar los retardos propios de la planta, las no linealidades presentes y las posibles perturbaciones aleatorias, analizamos también la implementación de controladores adaptivos con redes neuronales mediante estrategias que recurren al entrenamiento de la red neuronal fuera de línea (neuro/identificador) y el empleo de una red neuronal para diseñar el control necesario (neuro/controlador).

ACCIONES FUTURAS

4.1. Balance de masa y energía

Se está elaborando y se completará un paquete de planillas de cálculo aplicable a sistemas que utilicen gases de combustión como corriente de secado. En forma adicional se está desarrollando en laboratorio y con la intervención de adscriptos alumnos, dos métodos de determinación de densidad real de materiales granulados y pulverulentos, uno mediante la utilización de picnómetros en fases líquidas y el otro por volumetría de gases. La densidad real y la aparente se utilizan en la determinación del parámetro ϵ (*volumen vacío o porosidad*) que forma parte de cálculos de pérdidas de carga en lechos de secado fijos y móviles en la ecuación de Ergun (una de las más utilizadas en este tipo de cálculos):

$$\Delta p = \frac{150\mu(1-\epsilon)^2V_sL}{\epsilon^3D_p^2} + \frac{1.75(1-\epsilon)\rho V_s^2L}{\epsilon^3D_p}$$

4.2. Neurocontroladores

Finalmente, como trabajo futuro estamos explorando en detalle este esquema de controlador adaptivo con redes neuronales para el caso MIMO, dado que los procesos de secado de granos son multivariables, aquí las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del secado de granos, en la representación de espacio de estado, incluido los retardos de tiempo mencionados en el punto 3.2.-, son:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k)\end{aligned}$$

De esta forma el sistema queda totalmente representado por la triada de matrices: A, B, C.

Dado que los controladores diseñados en espacio de estados requieren el empleo de observadores para la estimación del estado cuando este no es medible, también se está estudiando diferentes soluciones al problema de la estimación con redes neuronales en forma alternativa a la estimación clásica con el filtro de Kalman.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA) y a la Facultad de Química e Ingeniería (Fray Roger Bacon), por financiar este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Boffa, Guillermo; Casiello, Francisco; Farías, Ana María; Galaretto, Oscar: Revista Energeia - Número Aniversario – Año 10 / 2012 – 2013 ISSN 1668 -1622,
- [2] Boffa, Guillermo; Casiello, Francisco; Farías, Ana María; Galaretto, Oscar; Giannico Fernando; Herrera, Luis; Scuracchio Pablo. COINI 2014 (Presentación en) VII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL.
- [3] Huailin S. and Youguo P. (2005), **Decoupled Temperature Control System based on PID neuronal network**, *ACSE 05 Conference*, 19-21 December 2005, CICC, Cairo, Egypt.
- [4] Jalili Kharaajool, M and Babak, N (2004), **Neural network base predictive control of a exchanger nonlinear process** *Journal electrical & electronics engineering* vol. 4 pp. 1219-1226.
- [5] Levin U. and Narendra K. (1993), **Control of nonlinear dynamical systems using neural networks: controlability and stabilization**, *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 4, no. 2, pp. 192-206.
- [6] Nilsson J. (1998), *Real/Time Control Systems with Delays*, Ph.D. Thesis, Lund Institute of Technology.
- [7] Wang Y, Reza Karimi H, and Xiang Z (2013), *Delay-Dependent H_∞ Control for Networked Control Systems with Large Delays*, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2013, Art. ID 643174.
- [8] Zhang W. (2001), *Stability Analysis of Networked Control Systems*, Ph.D. Thesis, Case Western Reserve University.
- [9] Zhang W. y M. S. Branicky (2001), *Stability of networked control systems with time-varying transmission period*, *Allerton Conf. Communication, Contr. and Computing*, Urbana, pp. 1205-1214.