

**Boffa, Guillermo ; Casiello, Francisco ; Galaretto, Oscar ;
Farias, Ana María ; Giannico, Fernando ; Herrera Luis
Alberto ; Castagnini Germán**

*Estudio de los procesos de transferencia de masa,
cantidad de movimiento y energía en el secado de
granos de origen agrícola*

Energieia, Año 14, N° 14, 2016

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 [en línea]. *Energieia*, 14(14), 2016.

Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/transferencia-masa-movimiento-energia-granos.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.

Boffa, Guillermo; Casiello, Francisco; Galaretto, Oscar; Farías, Ana María; Giannico, Fernando; Herrera, Luis Alberto; Castagnani, Germán

Departamento de Investigación Institucional – Facultad de Química e Ingeniería “Fray Rogelio Bacon”
Pontificia Universidad Católica Argentina – Campus Rosario

Resumen. *En el presente trabajo se analiza el problema de la regulación de la temperatura de entrada del aire, en función de las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente. Se analiza cuál sería el gasto de vapor necesario para esas condiciones de proceso, bajo condiciones ideales, a los efectos de tener un valor de referencia. Estos valores, basados en una comprensión más profunda de los fenómenos de transferencia involucrados debe ayudar a lograr diseños y procesos que tengan como objetivo el ahorro de energía que, como se sabe, es muy importante en esta etapa de la industrialización de granos. Adicionalmente, en este trabajo desarrollamos en detalle la obtención de los parámetros de un controlador PID en base a las especificaciones de diseño propias del secado industrial de granos y aplicamos la metodología de auto sintonización para un modelo ideal de la secadora como planta lineal de segundo orden. Además mostramos la forma de aplicación de conceptos de redes neuronales artificiales a sistemas de control y también ilustramos como se pueden utilizar en combinación con algoritmos de control clásico.*

Palabras clave: *secadoras industriales, optimización energética, auto-sintonización de sistemas de control, control por redes neuronales.*

Abstract. *In this paper the problem of regulation of air inlet temperature is analyzed, as a function of the dry and wet bulb temperatures of the ambient air. The vapor expenditure necessary for those process conditions is determined, under ideal conditions, in order to have reference values. These values, based on a deeper understanding of the transfer phenomena involved, should help to achieve designs and processes aimed at saving energy, which is known to be very important at this stage of grain industrialization. Additionally, in this work we tune the parameters of a PID controller based on the design specifications of the industrial grain dryers applying auto tuning for an ideal model of the dryer as a second order linear plant. We also show how artificial neural networks concepts can be applied to control systems and also we illustrate how they can be used in combination with classical control algorithms.*

Keywords: *industrial driers, energy optimization, self-tuning of control systems, control by neural networks.*

I.- Planta Piloto – Diseño Básico y Estado Actual del Proyecto

1.- Antecedentes

El estudio de los balances de masa y energía en los procesos de secado de granos realizado hasta el momento nos ha permitido desarrollar herramientas de cálculo que pueden ser aplicadas, por ejemplo en un secadero continuo, para regular el caudal de aire de secado y el vapor de calefacción en función de una depresión de bulbo húmedo del aire de salida y una temperatura de entrada del aire al equipo, ambas especificadas.

Una aplicación algo más elaborada permitiría regular la temperatura de entrada del aire, no ya en un valor constante, sino en función de las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente, que varían grandemente a lo largo de un mismo día, y gastar solo el vapor necesario para esas condiciones particulares de proceso (un aire más seco admite menor temperatura para la misma depresión de bulbo húmedo a la salida del calentador).

Sin embargo, debe notarse que los resultados de nuestros cálculos se basan en balances de masa y energía entre estados de equilibrio y para su aplicación se necesitan especificaciones adicionales que no pueden inferirse de nuestro estudio.

Por ejemplo, la especificación de la temperatura de entrada se fija con el criterio de que debe ser lo más alta posible, pero sin dañar a la semilla y por su parte, el grado de saturación del aire de salida debe ser elevado para su mejor aprovechamiento, pero que asegure el secado final satisfactorio del material, ambos criterios fijados por la experiencia.

También es cierto que el propio fabricante del secadero se ha basado principalmente en la experiencia para construirlo, tomando como base modelos anteriores e introduciendo mejoras en el diseño, pero sin estudios rigurosos de los fenómenos que ocurren. Resumiendo, esta es una rama de la ingeniería con un muy alto componente empírico en su desarrollo

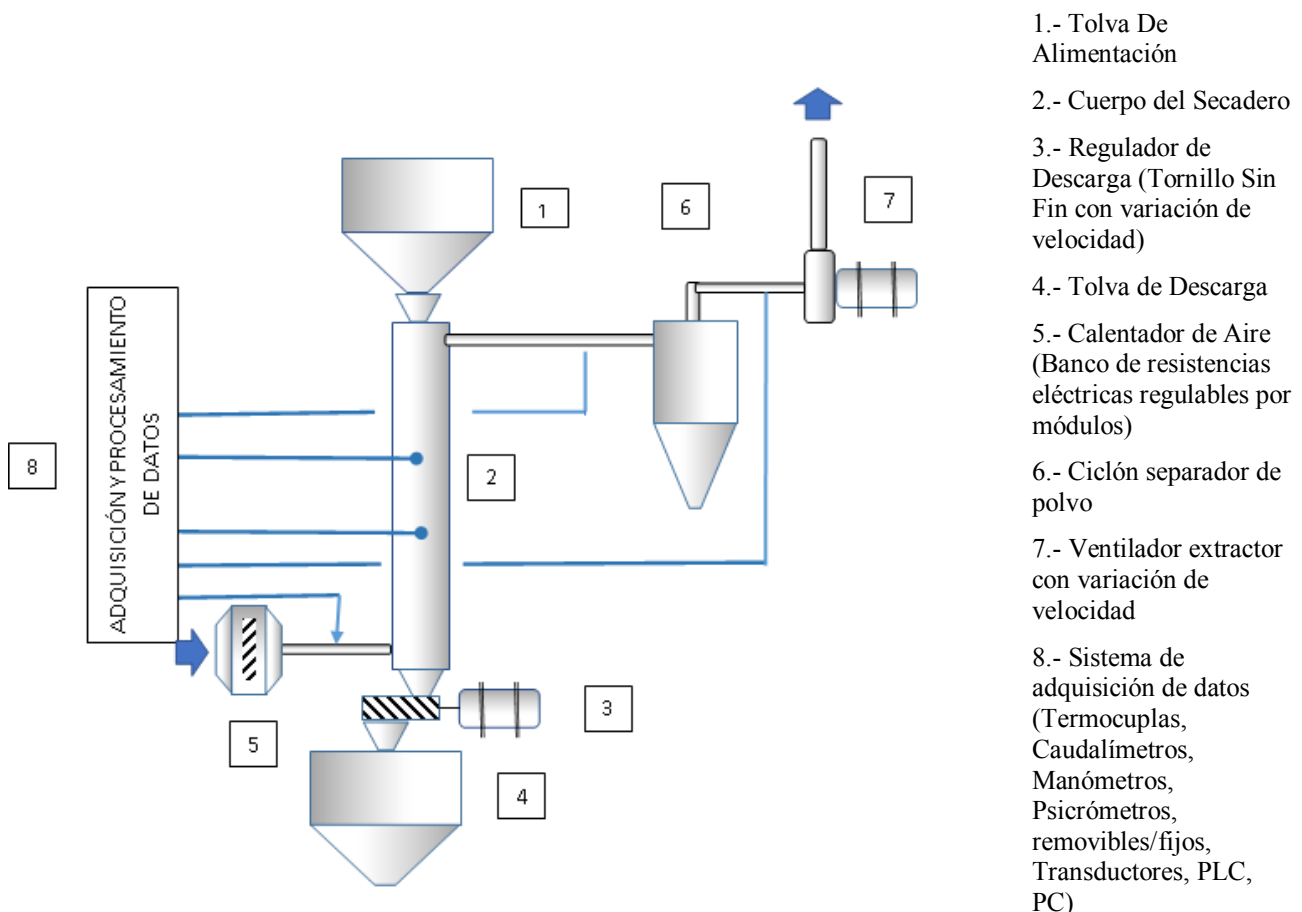
Nuestro enfoque es que una comprensión más profunda de los fenómenos de transferencia involucrados debe ayudar a lograr diseños y procesos que tengan como objetivo el ahorro de energía que, como se sabe, es muy importante en esta etapa de la industrialización de granos.

Debe existir, según pensamos, una “Ecuación de la Energía” que contenga elementos de diseño y de proceso que posiblemente presente un mínimo para un conjunto determinado de valores de estos parámetros o al menos muestre una tendencia que indique en qué sentido deben dirigirse los esfuerzos.

Seguramente esta relación es compleja debida a sus muchos grados de libertad y amerita un abordaje por análisis de redes neuronales y también por análisis dimensional. En ambos casos, la información a procesar será la obtenida de la experimentación a escala piloto planteada como siguiente etapa de nuestro trabajo de investigación.







2.- Planta Piloto

2.1.- Diseño Básico / Componentes



2.2.- Descripción de equipos existentes

Se cuenta con varios componentes utilizables en la construcción de la instalación, donados por una empresa industrial de la zona. (Relevamiento realizado por FG y GC)

<p>Ventilador extractor (existente)</p> <p>Dimensiones cuerpo voluta: $\varnothing 300$ - ancho 150 - salida cuadrada 150 x 150 – Entrada $\varnothing 150$</p> <p>Material: Acero carbono</p>		<p>Debe agregarse un variador de velocidad al motor.</p>
<p>Tolva de Alimentación (existente)</p> <p>Dimensiones cuerpo cilíndrico: $\varnothing 500$ - altura 500 - salida $\varnothing 100$</p> <p>Material: Acero inoxidable.</p>		<p>Esta tolva demandara trabajo de calderería / Montaje sobre el cono de para adaptar a la entrada del lecho.</p>
<p>Cuerpo del Calentador (existente)</p> <p>Dimensiones cuerpo Cuadrada 500 x 500 – ancho 200 –</p> <p>Material: Acero al carbono galvanizado.</p>		<p>También demandara trabajo de calderería / Montaje sobre cuerpo – Conos de entrada y salida.</p>
<p>Caja de resistencias eléctricas (existente)</p> <p>Dimensiones cuerpo Cuadrado 400 x 400 – ancho 200 – entrada / salida $\varnothing 150$ – resistencias eléctricas con disipadores aletados.</p>		<p>Falta verificar como es por dentro para poder profundizar cantidad de resistencias disponibles, características y Conexionados. También demandara trabajo de calderería / Montaje sobre cuerpo y así adaptar a sector de calentamientos en estructura principal.</p>
<p>Sistema de transporte helicoidal de salida (existente)</p> <p>Motor: 2 HP trifásico</p> <p>Rosca helicoidal $\varnothing 150$ – Largo: 400 – Terminal de toma / boquilla.</p> <p>Material: Acero inoxidable.</p>		<p>Demandará trabajo de calderería / Montaje sobre boquilla y helicoidal para adaptarlo al largo del lecho en salida de granos. Faltaría evaluar como controlamos la velocidad del helicoidal para evitar de evacue más rápido que lo necesario. (Variable de proceso).</p>
<p>Separador ciclónico de partículas suspendidas (existente)</p> <p>Dimensiones cuerpo cilíndrico: $\varnothing 300$ - altura 300 – Altura total 600 - salida $\varnothing 100$</p> <p>Material: Acero carbono</p>		<p>Demandará trabajo de calderería / Montaje sobre cuerpo en entrada y salida de flujo.</p>

2.3.- Utilización

La Planta Piloto, tal como está concebida, se puede utilizar en dos tipos principales de ensayos, en Secado en Lecho Fijo y en Secado Continuo, en el primer caso se carga el secadero con el material en estudio, se establece el flujo de aire, se habilitan las resistencias, se fijan las condiciones de proceso en general y se realizan las determinaciones. Para ensayos de Secado Continuo se habilita además el tornillo helicoidal de descarga para establecer el flujo de material deseado, mientras se mantiene la tolva de alimentación con material suficiente para evitar que se vacíe el lecho.

2.4.- Fundamentos del Programa de Trabajo

Una aplicación inmediata de la instalación es realizar ensayos de secado en lecho fijo, tanto por la sencillez de la operación como por la calidad de la información que se obtiene de las curvas de secado y calentamiento del material investigado. Muchas de las conclusiones son aplicables a regimenes estacionarios, ya que los cambios que se producen con el tiempo en un elemento de volumen fijo pueden asimilarse a los que sufriría el mismo elemento al desplazarse una distancia z a una velocidad v a través del lecho de un secadero continuo.

Efectivamente, la curva de secado en lecho fijo permite determinar algunos parámetros básicos de diseño de un secadero continuo, como la profundidad del lecho para un dado régimen de alimentación. Otros elementos, asociados a factores dinámicos como pérdidas de carga, o calentamientos localizados, deben sin embargo estudiarse en ensayos específicos de secado continuo.

Las siguientes figuras ilustran una operación de secado en lecho fijo. La Fig.(1) es una curva de contenido de humedad del material vs. tiempo en una operación en "Condiciones constantes de secado" (igual temperatura y humedad del aire de entrada).

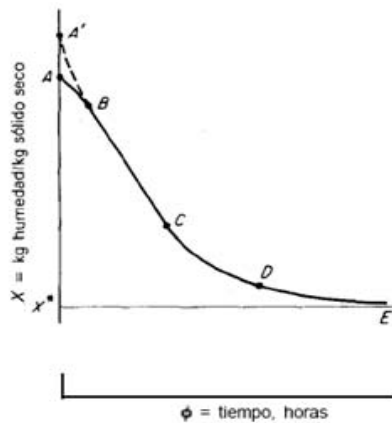


Figura (1) Secado discontinuo, condiciones constantes de secado (Fuente: R.E.Treybal *Operaciones con Transferencia de Masa*)

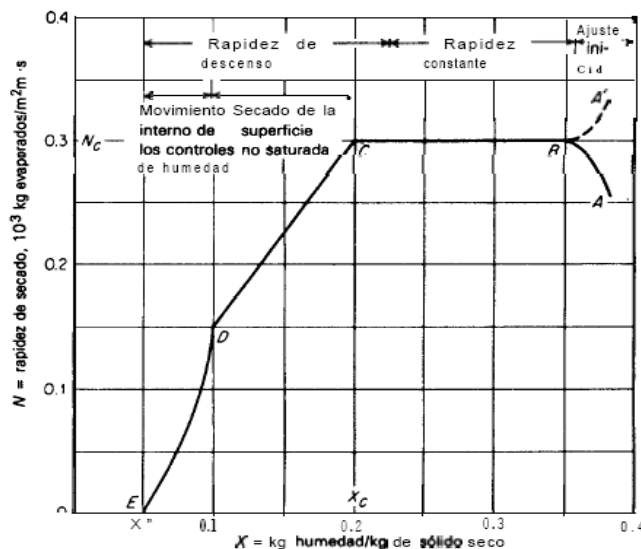


Figura (2) Curva típica del régimen de secado, condiciones constantes de secado (Fuente: R.E.Treybal *Operaciones con Transferencia de Masa*)

Teniendo en cuenta que la pendiente de la tangente a cada punto de la curva representa el régimen instantáneo de dehumidificación, se puede construir otra curva (Fig.(2)) con la velocidad de eliminación de humedad vs. La humedad del grano.

La observación de las curvas permite identificar diferentes etapas dentro del proceso, cuyas particularidades se encuentran abundantemente descriptas en la bibliografía [5].

También es posible, con similares justificaciones, construir una curva de calentamiento Temperatura del grano vs. tiempo y en base a ésta, incorporando valores de masa y calor específico, obtener una curva de régimen de intercambio de calor en función de la temperatura del grano (u otra variable intensiva que identifique el mismo estado) .

Pero lo interesante de destacar es que, en un instante dado del proceso, un elemento de volumen se encontrará en un estado identificado por el valor de sus parámetros termodinámicos, y particularmente la temperatura del grano y su humedad, determinadas por ecuaciones del tipo:

$$T = T_i + \Delta T (1 - e^{-t/\Theta_T}) \quad \text{Ecuación 2.4.1}$$

$$X = X_i + \Delta X (1 - e^{-t/\Theta_X}) \quad \text{Ecuación 2.4.2}$$

Donde Θ representa la constante de tiempo del sistema en relación a la variable especificada. En el caso de la temperatura es $\Theta_T = mC_p/UA$ y en el de la humedad $\Theta_X = m/KA$. Tanto U como K son coeficientes globales de transferencia, el primero de calor y el segundo de masa, y de acuerdo a los puntos entre los que se considere el fenómeno toman formas más específicas, por ejemplo, si se considera exclusivamente la transferencia entre la superficie de los granos y el aire de secado, los coeficientes globales se reducen a los coeficientes peliculares que representan esa única resistencia,

$$\text{Transferencia de calor: } Q[\text{Joule/h}] = haA(t - t_s) \quad \text{Ecuación 2.4.3}$$

$$\text{Transferencia de masa: } M[\text{kg/h}] = kaA(X_s - X) \quad \text{Ecuación 2.4.4}$$

Ambos coeficientes peliculares son bien conocidos desde hace tiempo y con justificaciones teóricas rigurosas para una multitud de casos [5]. Particularmente para el secado de superficies humedecidas con agua se obtiene una relación interesante si se multiplica la Ec. 2.4.4 por el calor de vaporización del agua, igualando así el flujo de calor que fluye por convección del aire al material (Ec.2.4.3) con el calor latente que pierde debido a la masa evaporada. Si el material es un sólido poroso que envuelve al bulbo de un termómetro común, se obtiene la “Depresión de Bulbo Húmedo” que es la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo y que permite calcular todos los parámetros termodinámicos del aire.

$$(T_{bs} - T_{bh}) = ka\lambda/h (X_s - X) \quad \text{Ecuación 2.4.6}$$

Pero en su forma más general la Ec. 2.4.3 reordenada puede expresarse como:

$$Q/A\Delta T = U = 1/(1/ha + 1/hr + R_i) \quad \text{Ecuación 2.4.7}$$

Donde ha es el coeficiente pelicular de convección, hr un coeficiente que considere la radiación y R_i un término que tenga en cuenta el fenómeno de transmisión interna de calor dentro del grano.

Para la transferencia de masa, la Ec. 2.4.4 generalizada queda:

$$M/A\Delta X = K = 1/(1/ka + R_d) \quad \text{Ecuación 2.4.8}$$

Con ka el coeficiente pelicular de transferencia de masa entre la superficie del grano y el aire de secado y R_d un término que representa las resistencias a la migración de la humedad desde el interior del grano hacia su superficie y que seguramente estará determinado por mecanismos de difusión molecular, fuerzas de Van Der Waals, efectos superpuestos de gradiente térmico y de concentración y otros factores particulares para cada tipo de grano y contenido de humedad.

2.5.- Interpretación de Resultados y Conclusiones

Todas las variables que permiten obtener las curvas de secado y calentamiento en lecho fijo, pueden ser determinadas con toda razonabilidad en los ensayos y en consecuencia calcular los parámetros que de ellas dependen.

Resumiendo, se pueden obtener $\Theta_T = mC_p/UA$ y $\Theta_X = m/KA$ despejadas de las ecuaciones 2.4.1 y 2.4.2 y de ellas U y K , en función de variables termodinámicas, dinámicas y de diseño y determinar correlaciones entre ellas que permitan identificar situaciones favorables respecto al consumo de energía.

Un tratamiento posible es considerar el análisis dimensional, ya que el cociente Θ_T / Θ_X es un número adimensional $Ad = U/KC_p$ que puede ser evaluado en relación a otros números adimensionales como el Reynolds, por ejemplo, para valorar su sensibilidad al tipo de flujo o con dimensiones características del tipo x/L_o y z/L_o para incorporar como variables en el análisis las dimensiones y forma del lecho. Otras variables a considerar son las relacionadas con el tipo de contacto (en corrientes paralelas, contracorriente o de flujo cruzado) y obtener relaciones del tipo:

$$U/KCp = \alpha \cdot \pi_1^a \cdot \pi_2^b \cdot \pi_3^c \dots \text{Ecuación 2.5.1}$$

Donde los π_i son grupos adimensionales considerados relevantes y α , a , b c constante y exponentes que deben determinarse en la serie de ensayos.

Para concluir, una observación que merece mencionarse es que a partir de las Ec.2.4.7 y 2.4.8, (debido a que los coeficientes globales y peliculares pueden determinarse con razonable precisión), pueden evaluarse R_i y R_d , las resistencias internas del grano a los flujos de calor y masa, y analizar qué modelos de transferencia y con qué justificaciones teóricas se explica la evolución real de estas propiedades.

II.- Aplicación de redes neuronales al control de procesos de secado.

1.- Introducción:

En el informe anterior [1] estuvimos desarrollando un diseño del control de procesos de secado de granos a partir de un controlador clásico (PID) con las especificaciones dadas de margen de ganancia y de fase. En la sección siguiente de este informe, detallamos el método utilizado para sintonizar ese controlador PID (método del Relé) y presentamos algunas simulaciones, analizando su desempeño y finalmente analizamos la estrategia de mejorar el funcionamiento del PID acoplándole un módulo que compense las dinámicas no modeladas y las perturbaciones externas. Este módulo consta de una red neuronal entrenada con datos del proceso a controlar.

2.- La auto-sintonización del Control (Método del Relé)

La realimentación con Relé (conmutador), fue propuesta por Astrom y Hagglund [2]. Este método se ha utilizado en numerosos sectores de la industria y ha resultado ser uno de los más importantes métodos difundidos comercialmente, dado que ahorra tiempo en la sintonización debido a que es un proceso de auto-ajuste o auto sintonización (no se tiene la necesidad de supervisar el proceso de sintonización). Este método se basa en implementar una realimentación a relé del sistema en lugar del regulador durante el tiempo que dure la identificación para, luego de completada la sintonía de éste, conectarlo nuevamente. En la siguiente figura se muestra un esquema, aplicado a un regulador PID ordinario:

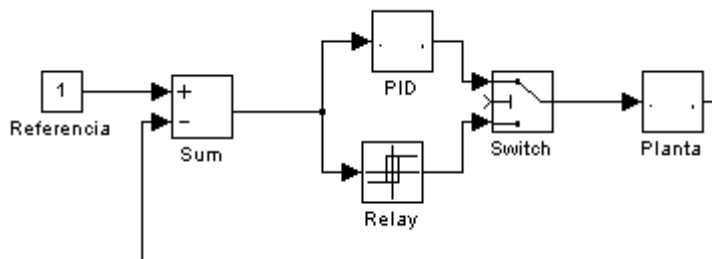


Figura 3. Esquema de Auto-sintonización por el método del Relé (Elaboración propia)

La idea se basa en la observación de que un sistema con un retardo de fase de al menos 180° en altas frecuencias puede oscilar al ser realimentado a relé. Esto hace que el sistema quede exactamente en el punto de cruce de su curva de Nyquist con el eje real negativo, que es el punto que se busca conocer para diseñar la sintonía. La frecuencia de oscilación es la llamada “frecuencia de última” y la “ganancia de última”, requerida para aplicar la Regla de Ziegler-Nichols, se obtiene de la amplitud de la oscilación y de la amplitud de la salida del relé.

El sistema se encarga de proveer la excitación adecuada para poder llevar a cabo las mediciones. El método es inmune a errores de modelado y perturbaciones, por lo cual resulta ser robusto. Veremos que se basa en el uso de la Función Descriptiva para poder completar la identificación de la planta, por lo cual haremos un resumen del uso y características de la misma. Un punto importante a tener en cuenta es que, como se verá más adelante, la amplitud de la oscilación puede ser cambiada actuando sobre la amplitud del relé, de modo que en implementaciones más elaboradas se puede utilizar un lazo que la controle.

Esto le da al método un potencial muy interesante desde el punto de vista del uso práctico, dado que se puede armar todo de modo que la oscilación obtenida sea de baja amplitud y no perturbe el proceso.

Respecto del relé a utilizar, puede ser uno del tipo más simple o pueden ser utilizados otros más complejos tales como relés con histéresis (que dan una buena inmunidad a ruidos), etc. La elección del relé puede estar condicionada por el tipo de planta a identificar; existen ciertos casos en los cuales se requiere de histéresis a fin de conseguir una oscilación.

Una vez cerrado el lazo con el relé y establecida la oscilación se debe proceder a medir la amplitud y frecuencia (o período) de ésta; esto resulta sencillo desde el punto de vista práctico ya que implica detecciones de cruce por cero y de

amplitud pico de una señal periódica. Para incrementar la exactitud de la medición se pueden realizar varias mediciones y promediarlas a fin de compensar el ruido. Algunas consideraciones adicionales, a tener en cuenta son las siguientes:

2.1.- Función Descriptiva:

Como se describió anteriormente, el método se basa en implementar un control discontinuo por relé de una planta lineal, por lo cual resultan válidas para el análisis todas las herramientas del Control Discontinuo; entre ellas, una de las más útiles es la Función Descriptiva, Para visualizar esta afirmación suponemos ahora un sistema como el de la siguiente figura:

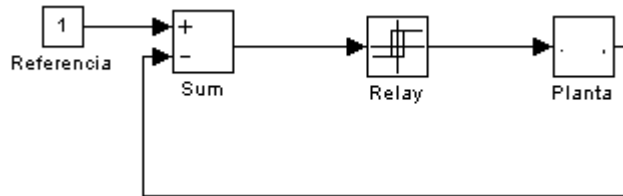


Figura 4. Esquema básico de funcionamiento (Elaboración propia)

Suponemos además que el sistema oscila, en este caso a la entrada y a la salida de la planta habrá una señal periódica, cuyo período es el de oscilación natural del sistema; a la entrada del relé, considerando una señal de referencia constante, la señal será también periódica y a la salida del relé la señal será una cuadrada con período igual al de oscilación del sistema. Esta señal, por ser periódica tendrá un desarrollo en Serie de Fourier, cuyo primer armónico será, precisamente, el que corresponde a la frecuencia de oscilación; si consideramos que la planta tiene características de filtro pasa bajos, solo el primer armónico aparecerá significativamente a la salida, siendo el contenido de las restantes armónicas despreciable.

En este caso la salida es prácticamente una onda sinusoidal, por lo cual también lo es la entrada al relé. Teniendo en cuenta esto podemos considerar al relé como un sistema lineal cuya salida frente a un estímulo sinusoidal es la armónica fundamental de la salida real (cuadrada); para esto se debe calcular el armónico fundamental de la salida y obtener la relación de amplitudes entre esta y la entrada al relé, esta será la ganancia del sistema lineal equivalente, cuya fase es cero si el relé es simétrico. Este valor hallado es función, en general, de la amplitud de la entrada y a veces de la frecuencia (en general no), y es lo que se denomina “Función Descriptiva”. Hecha esta aproximación, el sistema resultante es así:

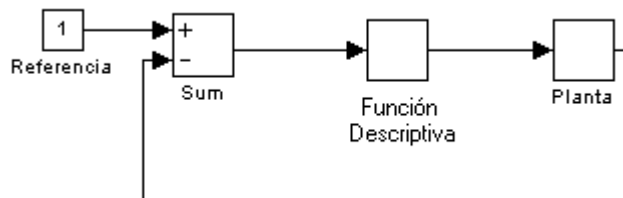


Figura 5. Aproximación de la Función Transferencia (Elaboración propia)

Donde se ve que se trata de un sistema completamente lineal, que puede ser analizado con las herramientas propias para este tipo de sistemas.

2.2.- Función de transferencia de un sistema muestreado

Supóngase un sistema lineal con actuación a tiempos discretos y cuya salida es muestreada a periodos iguales y sincrónicos con los cambios de la actuación. El actuador está seguido de un bloqueador de orden cero que congela el valor de la actuación durante el período entre muestras. Tal conjunto se esquematiza a continuación:

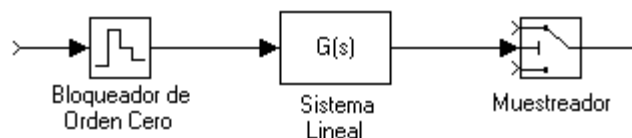


Figura 6. Función Transferencia del Sistema Muestreado (Elaboración propia)

Se intenta calcular la función de transferencia equivalente desde la entrada y la salida (de tiempo discreto). Esta función lo será de las variables z (compleja) y T (período de muestreo), y resulta ser:

$$H(z, T) = (1 - 1/z) * \sum_{\text{Polos}(G(s)/s)} \text{Re } s [G(s) / (s * (1 - \exp(sT) / z))] \quad (1)$$

Resulta útil esta herramienta ya que el sistema con el relé conectado, en oscilación permanente, puede considerarse como uno excitado por un actuador muestreado con bloqueador, puesto que la actuación del relé mantiene el valor constante entre dos cruces de la señal de entrada por los umbrales del relé y el valor de la salida solo importa, para la realimentación, en esos instantes. Esta función nos permite hacer el análisis exacto de un sistema. Ahora aplicaremos el método a la siguiente planta que representa, según el informe [3], en forma genérica el proceso de secado de granos:

$$G(s) = b / (s + a) * \exp(-s * t_0) \quad (2)$$

Simularemos, a partir del esquema de la figura (5) y para los valores para los parámetros del PID calculados, la auto sintonización y la respuesta del sistema.

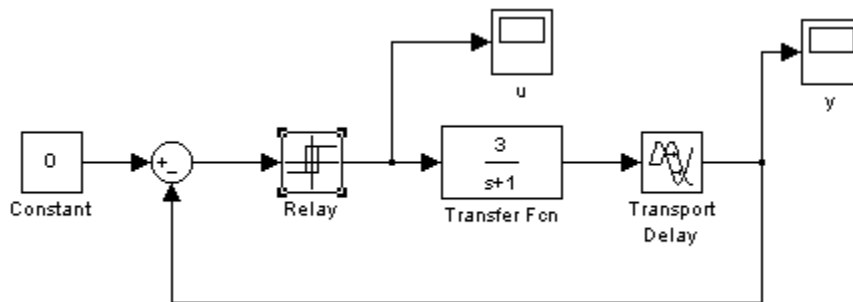


Figura 7. Esquema básico para la simulación (Elaboración propia)

Mostramos a continuación las formas de onda resultantes:

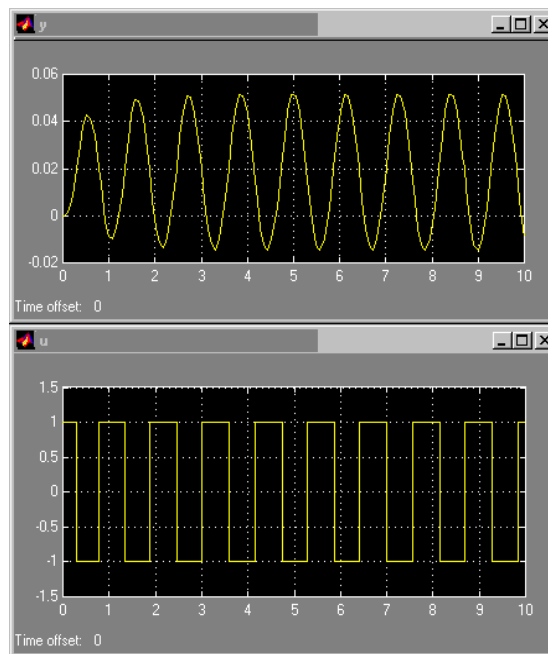


Figura 8. Entrada – Salida en la Auto Sintonización del PID (Elaboración propia)

De los parámetros del PID calculados anteriormente:

$$P = 19,5$$

$$I = 0,2$$

$$D = 0,182$$

Vemos ahora el resultado de nuestro diseño en la respuesta al escalón:

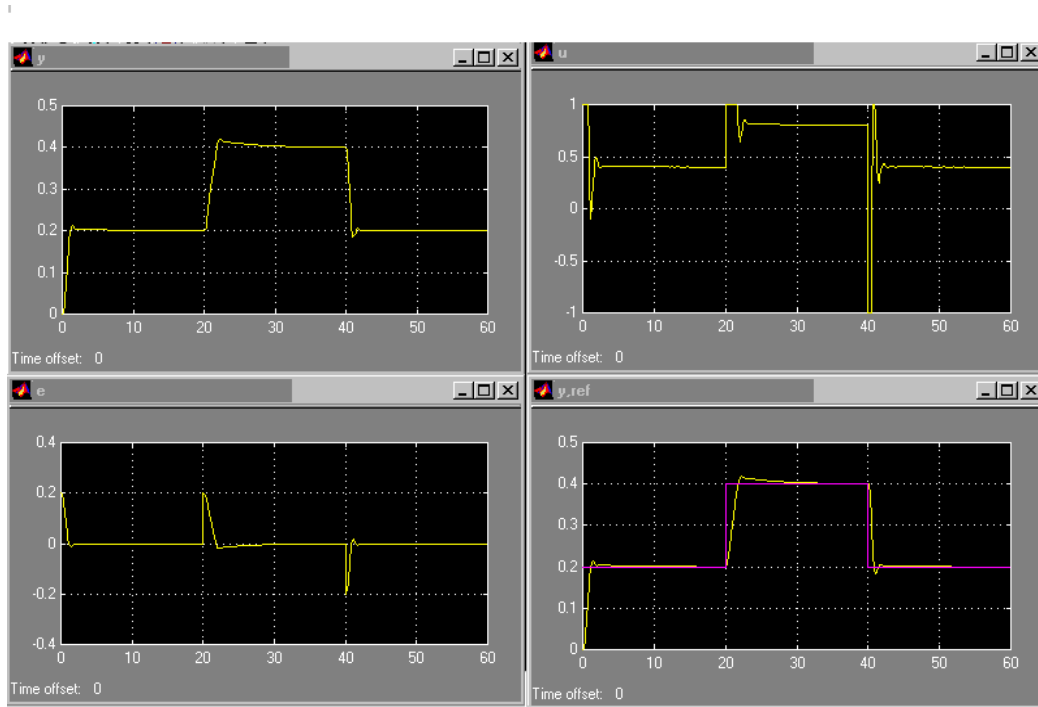


Figura 9. Simulación de la respuesta del Diseño del PID (Elaboración propia)

3.- El Controlador PID combinado con las Redes Neuronales:

Los controladores PID se utilizan ampliamente en la industria y en ausencia del conocimiento de la dinámica de la planta pueden ser una buena elección, ya que estos controladores están libres del modelo y sus parámetros se pueden ajustar por separado y de manera relativamente sencilla. Con frecuencia, un integrador en un controlador PID reduce el ancho de banda del sistema en lazo cerrado, con el fin de eliminar el error en estado estable causado por las incertidumbres y el ruido puede aumentar la ganancia del integrador, esto nos permite tener un estado deseado sin afectar la estabilidad.

Aunque mayoritariamente los controladores son PID lineales, no está garantizada la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Ahora bien, la combinación de un controlador PID industrial lineal más un compensador que contenga el modelo inverso de la planta y que esté basado en redes neuronales, podría superar en desempeño al simple PID lineal. Podemos ver en la figura (8) un esquema donde se observa un sistema de control clásico PID al cual se le ha agregado el modelo inverso de la planta (red Neuronal). En este caso el modelo inverso de la planta se ha generado a partir del entrenamiento de la red neuronal con datos propios de la dinámica de la planta.

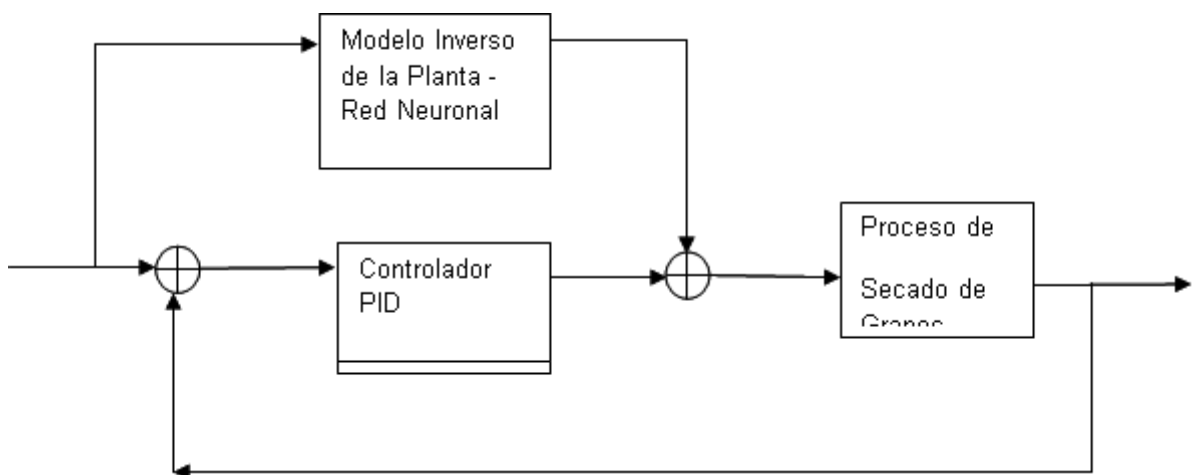


Figura 10. Controlador PID - RNA (Elaboración propia)

Si el modelo inverso es estable, la introducción del controlador anticipativo no cambiara las propiedades de estabilidad del sistema de control a lazo cerrado. Nos restaría analizar, entonces, si el modelo inverso de la planta es estable.

Una alternativa posible a esta cuestión, según Suykens, Vandewalle y De Moor [4], la podemos desarrollar en base al conocimiento que tengamos de la planta. Si bien la planta real es un sistema no lineal, a los efectos de diseño del PID hemos tomado la planta linealizada alrededor de un punto de equilibrio. Bastaría entonces analizar la estabilidad de la inversa de este sistema lineal representativo de la planta, con algunas herramientas de control, tal como lo son el primer y segundo método de Lyapunov.

Al analizar el sistema linealizado alrededor de un punto de equilibrio y aplicando el método indirecto de Lyapunov podemos analizar la estabilidad del sistema real (no lineal) a través del estudio de la estabilidad de este sistema linealizado, pero tendremos resultados locales y nos quedaría por determinar el rango donde la aproximación lineal del sistema sigue siendo válida.

4.- Conclusiones

En este trabajo hemos desarrollado en detalle la obtención de los parámetros del controlador PID en base a las especificaciones de diseño propias del secado industrial de granos y hemos aplicado la metodología de auto sintonización con el Relé, además hemos mostrado la forma de aplicación de conceptos de redes neuronales artificiales a sistemas de control y también se ha ilustrado como se pueden utilizar en combinación con algoritmos de control clásico como el control PID. Como trabajos futuros nos queda ajustar el entrenamiento de las redes neuronales a esta posible combinación PID–NN y además profundizar los fundamentos teóricos sobre la estabilidad de este esquema de control.

5.- Agradecimientos

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

6.- Referencias:

- [1] Boffa, Guillermo; Casiello, Francisco; Fariás Ana María; Galaretto, Oscar; Giannico, Fernando; Herrera, Luis. Revista Energeia –Año 13 – N°13 – 2015 ISSN 1668 – 1622.
- [2] Astrom K. and Hagglund T., *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1995.
- [3] Boffa, Guillermo; Casiello, Francisco; Fariás, Ana María; Galaretto. Oscar; Giannico Fernando; Herrera, Luis; Scuracchio Pablo. COINI 2014 (Presentación en) VII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL.
- [4] Suykens J., Vandewalle J. and De Moor B., *Artificial Neural Networks for Modelling and Control of Non-linear Systems*, Ed. Springer Science, 1996.
- [5] Robert E.Treybal, *Operaciones Con Transferencia de Masa*, Ed.Hispano Americana, 1970