

IDENTIFICACIÓN Y CONTROL EN TIEMPO REAL DE UN HORNO ELÉCTRICO

Burgos Flores Martín Luis¹, Del Llano Vizcaya Luis¹, Noriega Ponce Alfonso²

¹Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
Pie de la Cuesta #702 Desarrollo San Pablo.
C.P. 76130 Querétaro, Qro México.

²Universidad Autónoma de Querétaro.
Cerro de las Campanas S/N Centro Universitario.
C.P. 76010 Querétaro Qro. México
Emails: maburgos@avantel.net
anoriega@uaq.mx
lviscaya@cidesi.mx

Resumen

En este artículo, se presenta la utilización de algoritmos de identificación aplicados a un horno eléctrico con la finalidad de obtener su modelo matemático dinámico y poder así, simular el comportamiento del sistema térmico del horno ante el sistema de control propuesto. Dicha identificación fue hecha fuera de línea. Una vez identificado el modelo matemático del horno se utilizó dicho modelo en una serie de simulaciones en computadora destinadas a determinar los parámetros del algoritmo de control propuesto, en este caso un controlador Proporcional, Integral Derivativo (PID), los cuáles permitieron obtener el tipo de comportamiento deseado en el sistema. La respuesta de salida del algoritmo de control se entrega en forma de modulación ó también conocida como salida en tiempo proporcional. Esta técnica es comúnmente utilizado en aplicaciones de calentamiento e enfriamiento debido a su bajo costo. Finalmente la efectividad de los algoritmos de identificación recursiva fuera de línea ante sistemas de repuesta lenta queda demostrada como así lo avalan los datos presentados al final del artículo. Es en esta última parte donde se compara el resultado de la simulación en computadora del controlador PID contra la respuesta del sistema real del horno en tiempo real..

Palabras clave: MÍNIMOS CUADRADOS, PID, HORNO, TIEMPO, SALIDA DE TIEMPO PROPORCIONAL.

1. Introducción

En la mayoría de los proyectos en los que el CIDESI toma parte hay elementos o procesos que necesitan ser controlados, en la mayoría de los casos se recurren a controladores comerciales para dar solución a este problema; debido a que la propuesta de desarrollar un sistema de control no es una tarea fácil, requiriendo de un tiempo considerable. Sobre todo, cuando no se es un experto en la materia, para plantear un modelo basado en ecuaciones de balance de masa, y el principio de conservación de la energía.

El problema principal cuando se desarrolla cualquier tipo de control es conocer el modelo de la planta. Comúnmente se realiza un estudio preliminar del proceso y verificar su comportamiento ante un estímulo aplicado dicho estudio brinda información vital para el posterior desarrollo de los algoritmos o con los que se piensa controlar o en defecto aplicar alguna técnica de simulación con vistas a diseñar el sistema de control.

Actualmente con el uso del Procesador Digital de Señales (DSP) y la velocidad de procesamiento de las computadoras aplicados a sistemas de control, permiten el cálculo en tiempo real de las rutinas de identificación y control, pudiendo con ello realizar ajustes a los parámetros del regulador y compensar en el momento, los errores y perturbaciones acontecidas durante la actuación del control.

Otra aplicación que se puede realizar con la obtención modelo de la planta es el desarrollo del Predictor que permiten compensar los efectos del retardo puro o por transporte y de Conexión Anticipativa que mejoran la capacidad de regulación de variables sometidas a fuertes perturbaciones externas.

En la mayoría de las ocasiones el modelo obtenido del establecimiento de ecuaciones de balance de energía o masa resultan demasiado complejos y no lineales, debiendo ser sometidos a un proceso de simplificación y linealización para trabajar con este tipo de modelos. Por otra parte es importante considerar que se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso y este no siempre está disponible.

Dentro de este contexto la alternativa que se plantea para dar solución a este problema es el empleo de algoritmos de identificación recursiva basados principalmente en el método de mínimos cuadrados, basado en una estructura fija del modelo consistente en una ecuación de diferencias lineal, en otras palabras, el objetivo es obtener un modelo matemático de naturaleza discreta que sea fácilmente reproducible en una computadora o DSP.

El diseñador busca satisfacer todas las especificaciones de desempeño mediante un estudio de comportamiento y optimización, mismo que sienta las bases para el posterior diseño del sistema de control. El proceso anterior puede ser hasta cierto punto iterativo ya que en cualquier momento el diseñador puede verificar si el diseño satisface todas las especificaciones de desempeño. Si no las cumple, repite el proceso de diseño hasta que se cumplan las especificaciones determinadas. [1]

En este caso el trabajo de identificación realizado fuera de línea fue hecho en MATLAB; la simulación, la adquisición de datos, el diseño y depuración del esquema de control, basado en un PID, fueron realizados utilizando el Windows CVI, el cual, es un lenguaje de programación visual.

Los programas y algoritmos hasta el momento realizados podrán ser aplicados a otros sistemas o procesos, lo que ayudará a reducir los tiempos de desarrollo en varios proyectos que actualmente se realizan en CIDESI.

El artículo se estructura de la siguiente manera:

- En la sección dos se presenta la descripción del sistema.
- En la tercera parte se describe los métodos de identificación y su aplicación en el horno eléctrico.
- En la última sección se presenta las conclusiones del trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la figura 1, se muestra un diagrama simplificado del sistema del horno, tanto para el control, como para la toma de muestras de la identificación fuera de línea. Este se compone por una computadora a la que se le programa el algoritmo

de control ó de identificación del sistema, la interfase con señal analógica de entrada y salida digital de control se realiza mediante una tarjeta de adquisición de datos; la temperatura del horno es monitoreada a través de un sensor RTD DIN PT 100 cuya señal a su vez es amplificada y compensada por un módulo transmisor. Un relevador de estado sólido y una resistencia eléctrica forman la etapa de potencia del sistema.

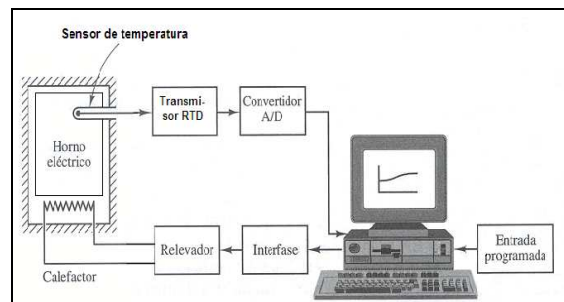


Fig. 1. Sistema de temperatura del Horno.

2.1 Descripción de los componentes.

Las características funcionales del horno son:

- ♦ Horno tipo estático, construido con paredes internas en acero inoxidable, capa de aislamiento térmico de lana mineral y cubierta exterior en lámina galvanizada. Capacidad volumétrica útil de 0.06732m^3 y una dimensión exterior de 0.60m (ancho), 0.54m (fondo) y 0.80m (altura). Diseñado para soportar una temperatura máxima de 200°C . Su modo de calentamiento por lote, la cual se realiza de manera indirecta a través de resistencia eléctrica de 1750Watts y tensión de entrada de 110VAC.
- ♦ El sensor es un RTD DIN PT100 con intervalo de medición de -200 a 500°C con una incertidumbre de $\pm 0.4^\circ\text{C}$.
- ♦ El transmisor RTD fue calibrado y programado para medir a un intervalo de temperatura 10 a 270°C , misma que genera una señal de 1.145 a 4.860 Voltios.
- ♦ La interfase de entrada analógica y la salida digital la forma una tarjeta multifunciones que cuenta con 16 entradas analógicas de 12 bits, cuyo intervalo de medición es de ± 0.5 a $\pm 10\text{V}$, así como 8 terminales de entrada o salida digital. Para esta aplicación sólo se utilizó una entrada analógica para la lectura de la señal del sensor, y una salida digital de 0 a 5 voltios encargada del control de la potencia disipada por la resistencia.

- ♦ La parte de potencia utilizó un relevador de estado sólido de cruce por cero de 25A a 240VAC con entrada de 3-32VDC.

2.2 Salida de tiempo proporcional [2].

La salida de un algoritmo de control PID u otro algoritmo de control lineal nos entrega un valor numérico, misma que se emplea ordinariamente, para entregar una salida de tipo analógico. Utilizar un actuador que maneje este tipo de señal para esta aplicación resultaría muy costoso. Por ello tratándose de una aplicación de calentamiento recurrimos a convertir la salida de la variable de control en una salida de tiempo proporcional que resulta ser una salida de tipo digital (0 ó 1). Esta medida simplifica sustancialmente la etapa de potencia y por ende su costo.

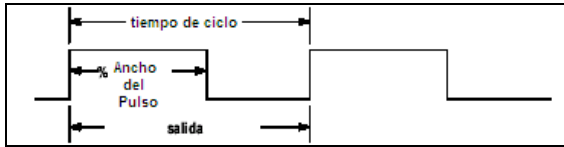


Fig. 2. Salida de Tiempo Proporcional

Una salida de tiempo proporcional es básicamente una modulación por ancho de pulso (PWM), en el cual, uno define el tiempo del ciclo y la variable de control define el ancho del pulso del ciclo de trabajo que se especifica, tal como se muestra en la figura 2.

3. MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN

El método de identificación recursiva está basado principalmente sobre el método de mínimos cuadrados con alguna modificación. Dicho método asume una estructura fija del modelo consistente en una ecuación de diferencias lineal, Ecuación (1). Además como el modelo que se obtiene es de naturaleza discreta permite que la implementación, prueba y simulación en sistemas basados en procesadores digitales resulte sencillo y económico.

$$y(k) = \sum_{j=1}^n a_j y(k-j) + \sum_{j=0}^n b_j u(k-j) \quad (1)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, t \quad a_j, b_j \in \mathfrak{R}$$

Esta ecuación esta formada por los valores de anteriores de la salida desde $y(k-1)$ hasta $y(k-n)$, así como una suma de valores previos de entrada de $u(k)$

hasta $u(k-n)$. Y las a_j, b_j son los parámetros del sistema, así como n es el orden del sistema.

3.1 Método de Mínimos Cuadrados.[3]

Partiendo del modelo anterior (1) ahora representado en su forma algebraica:

$$y_k = \phi_k^T \theta \quad (2)$$

donde:

(Vector de Regresiones)

$$\phi_k^T = [y_{k-1}, y_{k-2}, \dots, y_{k-n}, u_k, u_{k-1}, \dots, u_{k-n}]$$

(Vector de Parámetros)

$$\theta = [a_{k-1}, a_{k-2}, \dots, a_{k-n}, b_k, b_{k-1}, \dots, b_{k-n}]^T$$

Se propone que el error de la identificación del modelo sea:

$$E_k = y_k - \phi_k^T \theta \quad (3)$$

Es necesario que $\{y_k, \phi_k^T\}$ sean físicamente medibles. Para encontrar la ecuación de la estimación de parámetros contenidos en θ , utilizando el método de mínimos cuadrados, se propone la ecuación (4) y se trata de minimizarla.

$$J(\theta) = E^T(t)E(t) = \sum_{k=1}^N e_k^2, \quad \min_{\theta \in \mathfrak{R}} J(\theta) \quad (4)$$

N = número de muestras

El resultado analítico de la minimización del criterio de J se obtiene que el estimador mínimo cuadrático es:

$$\theta^* = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y \quad (5)$$

donde :

$$\phi = [\phi_1^T, \phi_2^T, \dots, \phi_N^T]^T \quad Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$$

El estimador está condicionado a que $(\phi^T \phi)^{-1}$ sea inversible, lo cual depende de los datos de entrada. Así que en caso de que no sea inversible se tiene que variar más la señal de entrada para que está perturbe la frecuencia fundamental del sistema [3].

3.2 Identificación del horno basado en Mínimos Cuadrados.

La configuración del experimento de identificación se muestra en la figura 3. En este caso se desea conocer la función de transferencia de todo el sistema incluyendo la parte de potencia (formado por la salida digital de tiempo proporcional y el relevador) y la lectura de la temperatura (que consta del sensor RTD, transmisor RTD y el convertidor A/D). La entrada $u(t)$ es la señal de control a la parte

de potencia y la salida del sistema $y(t)$ es la temperatura del horno expresada en grados Celsius.

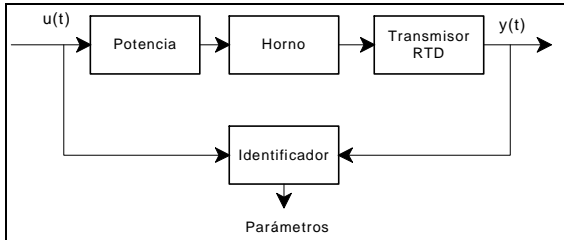


Fig. 3 Diagrama de Bloques de la identificación del Sistema del Horno.

La estructura del modelo que se fijó para la identificación fue de segundo orden, tal como se muestran en la ecuación (6).

$$y_k = a_1 y_{k-1} + a_2 y_{k-2} + b_0 u_k + b_1 u_{k-1} \quad (6)$$

Recordemos que la respuesta de un sistema térmico es básicamente lento con respecto a otros sistemas, así el tiempo de muestreo utilizado es de 20 segundos, para los cálculos se tomaron aproximadamente 7300 muestras de $y(t)$ y de $u(t)$ muestras bajo este intervalo. Bajo esta condiciones el sistema fue perturbado con tres pulsos al 30%, 10% y 20% de la salida de tiempo proporcional.

El resultado de la identificación se expresa en la ecuación (7)

$$y_k = 1.6149 y_{k-1} - 0.6455 y_{k-2} + 0.0849 u_k + 0.0421 u_{k-1} \quad (7)$$

En la figura 4 comparamos gráficamente los resultados de la planta real y del modelo identificado ante los tres pulsos aplicados.

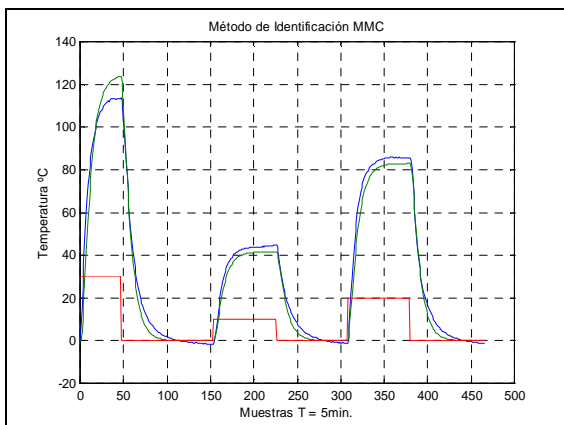


Fig. 4 Respuesta de la planta real y estimada con los tres escalones de 30%, 20% y 10% método de MMC.

Los resultados obtenidos con el algoritmo de mínimos cuadrados en forma recursiva. [3]

$$y_k = 1.62 y_{k-1} - 0.6505 y_{k-2} + 0.0036 u_k + 0.12871 u_{k-1} \quad (8)$$

Y en la figura 5 se expresa de manera gráfica la comparación de la planta real y el sistema identificado.

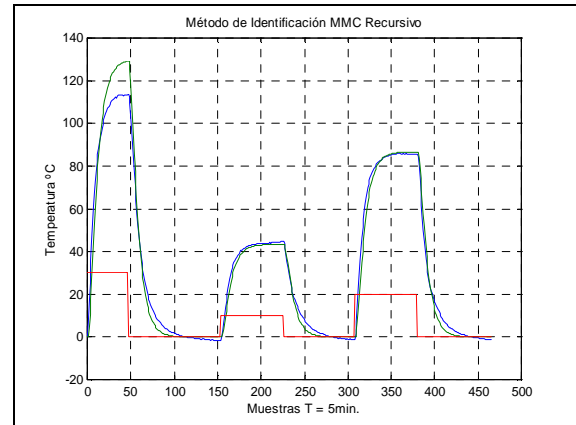


Fig. 5 Respuesta de la planta real y estimada con el método MMC Recursivo.

Aplicando el algoritmo de REDCO [3] que es un método que mejora las propiedades numéricas del algoritmo MMC, consistente en interpretar la estimación de θ^* como una solución de un sistema sobredeterminado de ecuaciones, ya que en general, el número de observaciones k puede hacerse arbitrariamente más grande y siempre mayor que el número de parámetros a identificar. La solución de este tipo de sistemas se consigue mediante el método de transformaciones ortogonales. Evitando con ello calcular la inversa de $(\phi^T \phi)^{-1}$, que es una operación costosa en términos de procesamiento de cálculo.

La identificación del modelo obtenida un el método REDCO está en la ecuación (9).

$$y_k = 1.5869 y_{k-1} - 0.6196 y_{k-2} + 0.0043 u_k + 0.1377 u_{k-1} \quad (9)$$

La figura 6 se expresa gráficamente la comparación entre el resultado de la planta real y el modelo identificado.

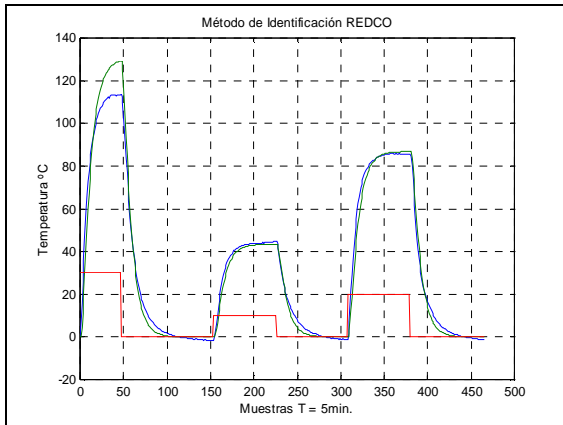


Fig. 6 Respuesta de la planta real y estimada con el método REDCO.

Veamos ahora una tabla comparativa con los resultados obtenidos de estos tres algoritmos utilizados.

	MMC	MMCR	REDCO	Media	$S(x_i)$
a1	1.6149	1.62	1.5869	1.6072	0.017
a2	-0.6465	-0.6505	-0.6196	-0.638	0.016
b0	0.0849	0.0036	0.0043	0.0309	0.046
b1	0.0421	0.1287	0.1377	0.1028	0.052

Media=media aritmética, $S(X_i)$ =Desviación Estándar

Tabla 1. Identificación de parámetros del Sistema

3.3 Trabajo de Simulación con el Sistema de Identificación del horno.

Como se mencionó anteriormente la programación de los algoritmos de identificación así como las rutinas de control se realizó con la ayuda de un programa en lenguaje C bajo el software de Windows CVI que lo hace bastante atractivo por su entorno gráfico. El algoritmo de control consistió en un regulador PID discreto propuesto por [3] y [4] para controlar el horno eléctrico basado en el modelo identificado, con la finalidad de probar la respuesta del sistema ante la regulación del compensador PID.

Con el modelo de la planta obtenido de la identificación se realizó la simulación del sistema de control, logrando con ello la sintonización del controlador, que fue aplicado al controlador en tiempo real del horno.

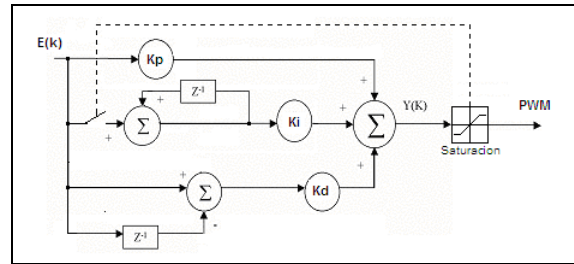


Fig. 7 Implementación del PID Discreto.

Aquí observamos en la figura 8, la importancia de haber hecho la identificación de la planta, pues podemos ver los efectos de la sintonización realizada en el programa.

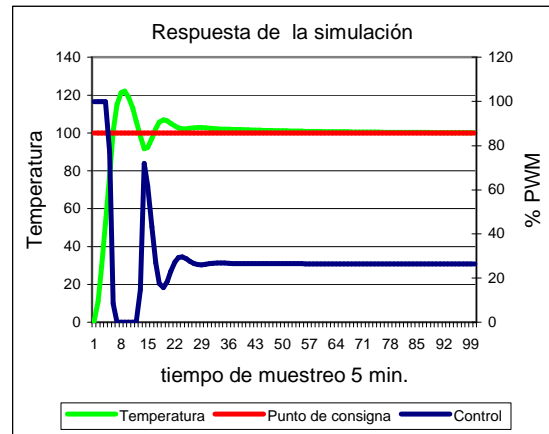


Fig. 8 Simulación del Control del Horno con PID Discreto

En esta simulación se aplicó un punto de ajuste de 100°C, y se muestra la respuesta de la temperatura del horno y la respuesta de la salida del control.

Finalmente se presentan los resultados del regulador PID discreto con los del sistema del horno, aunque aquí la salida de control fue limitada a un intervalo de 0 a 100%. La salida de tiempo proporcional tiene un tiempo de ciclo de 18 segundos. Estos resultados se pueden observar en la figura 9, donde se establece un punto de ajuste de 100°C y se muestran la respuesta de la temperatura del horno así como la respuesta de la salida del control. El tiempo de control es igual al tiempo de muestreo.

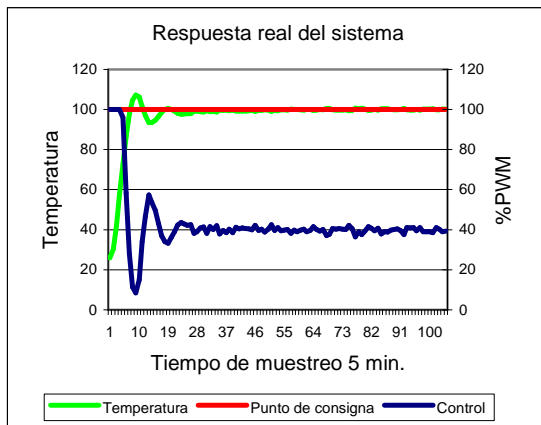


Fig. 9 Respuesta Real del Control del Horno con PID Discreto

4. Conclusiones

Sea logrado identificar la planta a través de los algoritmos de identificación recursiva, que nos ha permitido hacer un estudio preliminar con el sistema térmico de un horno eléctrico y verificar su comportamiento ante el método de control PID discreto en una simulación en computadora, para

posteriormente implementar los resultados en el sistema real.

Se continúa trabajando ahora para aplicar este modelo bajo un esquema de predicción <<predictor>>, para compensar los efectos del retardo en este tipo de sistema. Y por último usar estos algoritmos de identificación recursiva para ajustar dinámicamente los parámetros del regulador, es decir, proponer un tipo de control adaptativo.

Referencias

- [1] Ogata K. *“Ingeniería de control moderna”*, Prentice Hall, University of Minnesota , 3ª Ed., 1998.
- [2] Bradley-A. *“Juego de Instrucciones del SLC 500”*, Allen Bradley Company, Inc., USA, Publication 1747-6.15ES , 1996.
- [3] Aguado A. *“Temas de identificación y control adaptable”*, Instituto de Cibernética, Matemática y Física, Cuba, 1ª edición, 2000.
- [4] Ogata, K *“Sistemas de Control en Tiempo Discreto”*, Prentice Hall, USA, 2ª edición, 1996.