

Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de Temperatura dentro de un horno industrial de resistencia

Víctor Hugo Guarochico Moreira
Mery Stefania Morán Alvarado
M.Sc. César Antonio Martín Moreno
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

vguaroch@fec.espol.edu.ec, msmoran@espol.edu.ec, camartin@fec.espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo muestra una metodología de identificación de sistemas (caja negra) aplicado a un proceso real. Dicho proceso consiste en un horno industrial de resistencia usado para el secado de transformadores, el cual debido a la problemática de la identificación se modeló virtualmente en base a ecuaciones dinámicas y de estado estacionario. El principal objetivo es el de mostrar la validez, utilidad y conveniencia de la identificación de sistemas, como paso previo para el diseño de controladores, es por esto que luego del proceso de identificación se continúa, en base a los resultados obtenidos, al diseño de un controlador para mantener la temperatura constante dentro del horno industrial. El modelado virtual, el proceso de identificación y el diseño del controlador es llevado a cabo en el software MATLAB/Simulink.

Palabras Claves: *identificación, caja negra, MATLAB/Simulink*

Abstract

The present work shows a methodology for system identification (black box) of a real process. The process consists of an industrial furnace of resistance used for drying transformer, which due to the problem of identification a virtual modeling is developed based on dynamics and steady-state equations. The main objective is to show the validity, utility and convenience of system identification, as a prelude to the design of controllers, which is why after the end of identification process, we proceeded, based on the results, to the design of a controller to maintain constant temperature inside the industrial furnace. Virtual modeling, process identification and controller design is carried out in the software MATLAB /Simulink.

Keywords: *identification, black box, MATLAB/Simulink.*

1. Introducción

El objetivo de todo proceso industrial es la obtención de un producto final que cumpla con las especificaciones y niveles de calidad exigidos por el mercado. Esta constancia en las propiedades del producto puede ser posible gracias a un control de las condiciones de operación, debido a que tanto la alimentación al proceso como las condiciones del entorno son variables en el tiempo.

Al momento de diseñar un sistema de control es indispensable conocer y entender la dinámica de la planta. Una de las etapas trascendentales en el diseño de la planta es la identificación de la misma, porque con ésta el modelo tendrá el comportamiento exacto del proceso. Para modelar un sistema de control se debe describir por medio de ecuaciones matemáticas

la relación de la variable de salida, variable que se desea controlar, con la entrada del sistema.

La identificación de sistemas consiste en tratar al sistema como una caja negra y excitarlo con varias señales de entrada y observar el comportamiento del mismo, es decir, las salidas producidas por las múltiples entradas de prueba.

El trabajo que se presenta es la identificación de sistema del proceso para regular la temperatura de un horno industrial de resistencias, en el que se calientan transformadores eléctricos para recuperar las propiedades que perdieron al momento de su elaboración. Se usará el modelamiento matemático virtual porque no se dispone de la planta para hacer las pruebas necesarias para obtener la identificación de la misma y es importante mencionar que el enfoque

de este trabajo está en la identificación de la planta más no en el modelado de la misma.

Una vez obtenida la identificación idónea de la planta, se continua con el diseño de un controlador para mejorar su rendimiento, teniendo presente al momento de implementarlo las características y limitaciones reales del sistema.

2. Descripciones generales

2.1 Descripción del proceso a identificar

La fabricación de transformadores eléctricos tiene varias etapas, una de ellas es el secado preliminar. Este proceso consiste en introducir al conjunto activo núcleo-bobinas, a un horno eléctrico de resistencias (figura 1) para la deshidratación de componentes como los aislamientos: madera, papel y cartón, con el objetivo de mejorar el aislamiento del transformador eléctrico.

El proceso que se va a identificar es el que se lleva a cabo dentro del horno de resistencia para que el transformador conserve sus propiedades, en otras palabras la planta es en sí el horno y lo que se busca es la relación que existe entre la potencia ingresada al horno y la temperatura en su interior.



Figura 1. Horno industrial de resistencia eléctrica

Un horno es un equipo utilizado en la industria, en los que se calientan elementos en su interior por encima de la temperatura ambiente. La manera de calentar los elementos en su interior clasifica a los hornos en diferentes tipos, nuestro proceso utiliza resistencias de tal manera que la potencia eléctrica suministrada a dichas resistencias calienta el interior del horno por el efecto Joule.

Debido a lo mencionado en el párrafo de arriba a los hornos industriales de resistencia se los nombra generalmente con la potencia que consumen, en nuestro caso el horno es de 40 kW (valor de placa),

pero se midió en el proceso real que la potencia consumida por las resistencias es de aproximadamente 36 kW.

La figura 2 muestra un bosquejo del horno, el cual consta de paredes aisladas térmicamente, con el objeto de minimizar las pérdidas de calor a través de ellas y además de mantener en las paredes externas una temperatura en el rango de 30 a 40 °C para así evitar el riesgo de algún daño a personas que tengan contacto con el exterior del horno durante el proceso de secado.

Consta también de resistencias de 4 kW, dispuestas en 3 niveles (cada nivel consta de 3 resistencias conectadas en delta), un ventilador junto a un túnel de recirculación hacen que el aire circule a través del horno de tal manera de conseguir una uniformidad de la temperatura dentro del horno y por último el panel de control donde se encuentra las conexiones de las resistencias, el ventilador y la línea, en este panel se encuentra el controlador ON/OFF y toda la lógica cableada que se necesita.

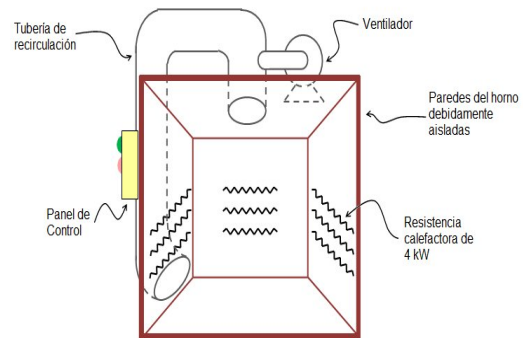


Figura 2. Bosquejo general de la planta

2.2 Modelo de la planta a considerar para la identificación

Para realizar el modelo matemático de la planta, al cual se le aplicará el proceso de identificación, se utilizará una simplificación de la planta real la cual se muestra en la figura 3.

De modo que se considera que la entrada del sistema es la potencia eléctrica (P_i) consumida por las resistencias, esta potencia se convierte en potencia calorífica en el aire dentro del horno (\dot{Q}_{aire}), en la carga (\dot{Q}_{carga}) y a través de las paredes ($\dot{Q}_{paredes}$), los cuales dependerán del calor específico del aire (c_{aire}), calor específico de la carga (c_{carga}) y de la conductividad térmica de la pared (k_{pared}) respectivamente.

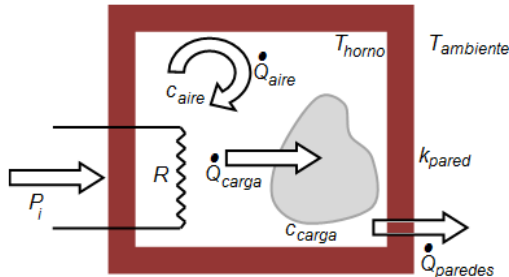


Figura 3. Simplificación de la planta real para el modelado

Como se ha mencionado anteriormente, la temperatura dentro del horno se considerará uniforme, y la temperatura del exterior constante e igual a la temperatura ambiente.

2.3 Razones para controlar el proceso

Algunos libros de fabricación de transformadores mencionan que se debe introducir al conjunto núcleo-bobina dentro de un horno a 100°C para su secado por un lapso de tiempo de aproximadamente 18 horas. En la empresa se deja al núcleo por un lapso de un día o un día y medio, y se especula que se debe a que no se logra obtener una temperatura estable de 100°C , de modo que es importante el poder conseguir la temperatura adecuada.

Otra de las razones para controlar la temperatura dentro del horno, es que como la carga consta de papel y cartón, si la temperatura se eleva por encima de la temperatura de ignición (230°C) existirá pérdida de materia prima.

2.4 Control del proceso

El control de temperatura del horno es ON/OFF con una banda diferencial de 80°C a 120°C , y se logra prendiendo y apagando un solo nivel cuando la temperatura se encuentra en el rango de la banda diferencial, esto debido a que se quiere que la temperatura evolucione lentamente consumiendo la menor cantidad de energía.

Uno de los objetivos de trabajo es el de diseñar un controlador que permite estabilizar la temperatura a un valor deseado, por lo que más adelante se hablará sobre un controlador continuo el cual pueda reemplazar al controlador actual, así mismo se menciona el uso de un actuador diferente.

3. Fundamentos teóricos

3.1 Transferencia de calor

Es un proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que se encuentran a distintas temperaturas.

El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

3.2 Identificación de sistemas

Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio (figura 4).

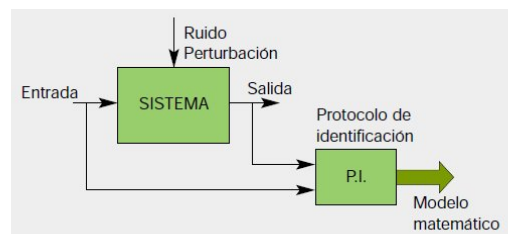


Figura 4. Proceso de identificación

Identificación es la determinación, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, al cual el sistema probado es equivalente.

3.2.1 Identificación no paramétrica. Los métodos de identificación no paramétricos permiten obtener modelos o representaciones no paramétricas de la planta bajo estudio.

3.2.1.1 Identificación no paramétrica en el dominio del tiempo. Mediante esta técnica de identificación se pretende obtener la respuesta al impulso del sistema, o bien la respuesta al escalón del mismo y para ello, debe registrarse la evolución temporal de la salida del sistema tras la aplicación de una señal impulso o escalón.

Obviamente, la imposibilidad de conseguir este tipo de señales en la práctica lleva a utilizar un método indirecto para obtener la respuesta impulsiva, conocido como análisis de la correlación.

3.2.1.2 Identificación no paramétrica en el dominio de la frecuencia. En este caso, el modelo resultante es una representación de la respuesta en frecuencia del sistema, obtenida mediante la aplicación de señales de entrada sinusoidales de distintas frecuencias.

Cuando no sea posible aplicar este tipo de entradas, puede recurrirse a la aplicación de un ruido blanco, que permite obtener la respuesta en frecuencia

mediante el conocido análisis espectral. Este análisis se basa en la realización de la transformada de Fourier de las funciones de covarianza de la entrada y la salida y la correlación entre la entrada y la salida.

3.2.2 Identificación paramétrica. Los modelos paramétricos, a diferencia de los anteriores, quedan descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema (entradas, salida y perturbaciones).

Generalmente los modelos paramétricos se describen en el dominio discreto, puesto que los datos que sirven de base para la identificación se obtienen por muestreo. En el caso de que se requiera un modelo continuo, siempre es posible realizar una transformación del dominio discreto al continuo.

La expresión más general de un modelo discreto es del tipo:

$$s(t) = \eta(t) + \omega(t) \quad (1)$$

donde $\omega(t)$ es el término que modela la salida debida a las perturbaciones, $\eta(t)$ la salida debida a la entrada, y $s(t)$ la salida medible del sistema. Cada uno de estos términos puede desarrollarse de la siguiente forma:

$$\eta(t) = G(q^{-1}, \theta)\mu(t) \quad (2)$$

$$\omega(t) = H(q^{-1}, \theta)e(t) \quad (3)$$

$$s(t) = A(q^{-1}, \theta)y(t) \quad (4)$$

donde q^{-1} es el operador retardo, θ representa un vector de parámetros, $\mu(t)$ y $e(t)$ son la entrada al sistema y el ruido de entrada al mismo respectivamente e $y(t)$ es la salida de interés del sistema (que puede no coincidir con la salida medible). Tanto $G(q^{-1}, \theta)$ como $H(q^{-1}, \theta)$ son cocientes de polinomios del tipo:

$$G(q^{-1}, \theta) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} = \frac{b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-nk-1} + \dots + b_{nb} q^{-nk-nb+1}}{1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf}} \quad (5)$$

$$H(q^{-1}, \theta) = \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} = \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}}{1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd}} \quad (6)$$

y $A(q^{-1}, \theta)$ un polinomio del tipo:

$$A(q^{-1}, \theta) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (7)$$

el vector de parámetros θ contiene los coeficientes a_i, b_i, c_i, d_i y f_i de las funciones de transferencia anteriores. La estructura genérica de estos modelos es por tanto:

$$A(q^{-1}, \theta)y(t) = G(q^{-1}, \theta)\mu(t) + H(q^{-1}, \theta)e(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}\mu(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t) \quad (8)$$

para elegir la estructura de este tipo de modelos hay que determinar el orden de cada uno de los polinomios anteriores, es decir na, nb, nc, nd, nf y el retardo entre la entrada y la salida nk . Una vez elegidos estos valores, sólo queda determinar el vector θ de coeficientes (a_i, b_i, c_i, d_i y f_i) que hacen que el modelo se ajuste a los datos de entrada - salida del sistema real.

En muchos casos, alguno de los polinomios anteriores no se incluye en la descripción del modelo, dando lugar a los siguientes casos particulares, entre otros:

Tabla 1. Diferentes estructuras de modelos paramétricos

Tipo de Modelo	Condición	Estructura Resultante
ARX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = C(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\mu(t) + e(t)$
Output error (OE)	$C(q^{-1}) = D(q^{-1}) = A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}\mu(t) + e(t)$
ARMAX	$F(q^{-1}) = D(q^{-1}) = 1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\mu(t) + C(q^{-1})e(t)$
Box Jenkins (BJ)	$A(q^{-1}) = 1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}\mu(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t)$

En la figura 5 se muestra el procedimiento para realizar la identificación paramétrica a un proceso.

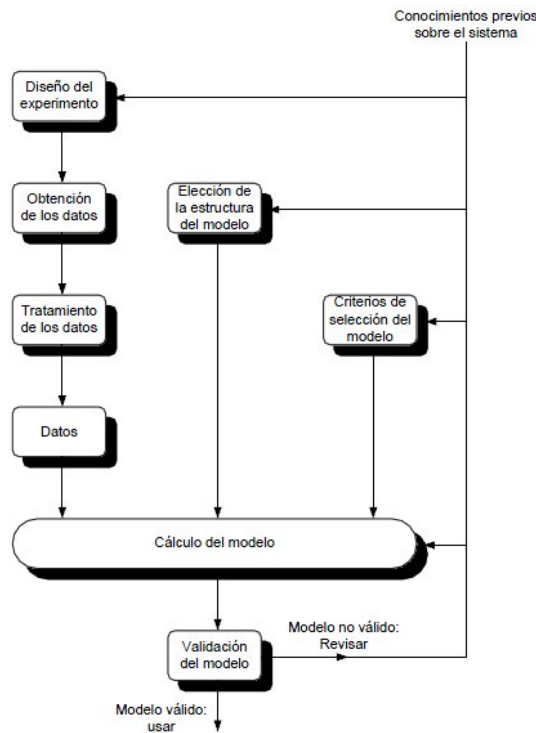


Figura 5. Procedimiento de la identificación paramétrica

3.3 Herramienta para la identificación

El proceso de identificación se simplifica utilizando una herramienta implementada en Matlab mediante la ayuda del módulo System Identification (ident). Ident cuenta con una serie de funciones para realizar la siguiente secuencia de operaciones:

- Carga archivo de datos como datos registrados en un osciloscopio por ejemplo.
- Organiza y filtra los datos, removiendo los valores medios, tendencias y filtrando el ruido. Adicionalmente separa los datos para la identificación y validación
- Realiza el análisis de correlación y espectral.
- Aplica método predictor de error, mediante un modelo paramétrico lineal.
- Realiza proceso de validación, comparando gráficamente los resultados, Adicionalmente entrega la respuesta al escalón, al impulso, respuesta de frecuencia y el análisis de residuos.

4. Diseño de la Solución

En muchas ocasiones la identificación de un proceso no se puede realizar experimentalmente, debido a factores tales como el tiempo de la prueba que significará pérdida en la producción, o la puesta

en marcha utilizando una señal de entrada aleatoria, entre otros. Debido a esto, en tales casos se opta por realizar una simulación matemática, la cual encierre la dinámica del sistema a identificar.

4.1 Modelado matemático de la planta

Para describir procesos físicos, se recurre a la conservación de la energía. La condición de equilibrio de los sistemas térmicos establece que el calor administrado a un sistema es igual al calor almacenado por el sistema más el calor liberado por el sistema y mas las pérdidas del sistema.

$$\left\{ \begin{matrix} \text{energía} \\ \text{entrada} \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \text{energía} \\ \text{salida} \end{matrix} \right\} - \{ \text{pérdidas} \} = \left\{ \begin{matrix} \text{energía} \\ \text{acumulada} \\ \text{sistema} \end{matrix} \right\}$$

Considerando ésta expresión para un intervalo de tiempo se tiene que:

$$\left\{ \begin{matrix} \text{Potencia} \\ \text{entrada} \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \text{Potencia} \\ \text{salida} \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \text{Potencia} \\ \text{perdida} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \text{Potencia} \\ \text{acumulada} \\ \text{sistema} \end{matrix} \right\}$$

algunas de las consideraciones a tenerse en cuenta para efectuar dicha expresión en este proceso son las que se presentan a continuación:

4.1.1 Potencia de entrada. Es la potencia que se le suministra a las resistencias. El horno tiene como dato de placa una potencia de 40 kW, pero solamente una parte de ésta van a las resistencias, como se mencionó en el capítulo uno.

Las resistencias son de 4 kW cada uno, y ya que el horno contiene 9 resistencias, en total consumirán 36 kW y éste valor es el que se considera como la entrada al modelo matemático.

4.1.2 Potencia de salida. Es la potencia que se le suministra a la carga dentro del horno, para nuestro caso esta carga consiste en 72 conjuntos nucleo-bobinas, los cuales en su mayoría constan de hierro y cobre, y debido a que presentan diferentes calores específicos, es necesario obtener el valor de la masa de cada uno.

Cada conjunto tiene una masa de 35 kg, y por su estructura se puede aproximar la relación de los volúmenes del cobre y del hierro a:

$$\frac{V_{\text{COBRE}}}{V_{\text{HIERRO}}} \approx \frac{4}{5} \approx 0.8 \quad (9)$$

por lo tanto para hallar la masa del cobre y del hierro se utilizará lo siguiente:

$$\begin{aligned} m_{COBRE} + m_{HIERRO} &\approx m_{TOTAL} \\ \rho_{COBRE} V_{COBRE} + \rho_{HIERRO} V_{HIERRO} &\approx m_{TOTAL} \\ \rho_{COBRE} V_{COBRE} + \rho_{HIERRO} (0.8V_{COBRE}) &\approx m_{TOTAL} \\ V_{COBRE} &\approx \frac{m_{TOTAL}}{\rho_{COBRE} + 0.8\rho_{HIERRO}} \\ V_{COBRE} &\approx \frac{35}{7874 + 0.8(8960)} \\ V_{COBRE} &\approx 2.33 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} m_{COBRE} &= \rho_{COBRE} V_{COBRE} \\ m_{COBRE} &\approx (7874)(2.33 \times 10^{-3}) \approx 18.35 \text{ kg} \\ m_{HIERRO} &\approx m_{TOTAL} - m_{COBRE} \approx 16.65 \text{ kg} \end{aligned} \quad (11)$$

de modo que el calor transferido a la carga será:

$$Q = N(m_{COBRE} c_{COBRE} + m_{HIERRO} c_{HIERRO}) \Delta T \quad [\text{J}] \quad (12)$$

donde:

Q : Cantidad de calor absorbido por la carga en Joules (J).

N : Número de transformadores.

m_{COBRE} : Masa del cobre del conjunto en kilogramos (kg).

c_{COBRE} : Calor específico del cobre (J/kg°C).

m_{HIERRO} : Masa del hierro del conjunto en kilogramos (kg).

c_{HIERRO} : Calor específico del hierro (J/kg°C).

ΔT : Cambio en la temperatura de la carga.

por lo que la potencia de salida estará dada por:

$$\dot{Q}_{SAL} = N(m_{COBRE} c_{COBRE} + m_{HIERRO} c_{HIERRO}) \frac{dT}{dt} \quad [\text{W}] \quad (13)$$

4.1.3 Pérdidas. Debido a que la finalidad de este trabajo no es adentrarnos en el modelado matemático de procesos sino a la aplicación de la identificación de sistemas, se considerarán sólo las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes, las demás se asumirán despreciables.

La Transferencia de calor a través de las paredes es una medición del calor que fluye a través de las paredes del horno del interior hacia el exterior. Ya que no se dispone de ningún aislamiento perfecto, habrá una cantidad de calor que está pasando del interior al exterior, debido a la diferencia de temperaturas.

Se tienen en cuenta la pérdida de calor a través de todas las paredes y el techo, no se incluye el conducto

de recirculación ni el piso (se desprecia la pérdida de calor a través de ellos):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{PERD} &= [Q_{PAREDES} + Q_{TECHO}] \\ \dot{Q}_{PERD} &= k \frac{A}{L} (T - T_{EXT}) \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (14)$$

donde:

A : Área de la superficie por la cual se efectúa la transferencia de calor (m²).

k : Conductividad térmica (W/m°C).

L : Espesor de la superficie (m).

T : Temperatura del horno en °C.

T_{EXT} : Temperatura exterior en °C (se asume constante).

\dot{Q}_{PERD} : Potencia transferida desde el interior del horno al exterior.

Para simplificar el modelo matemático, se asume que las paredes del horno están constituidas de una sola capa de ladrillo aislante cuya constante térmica depende de la temperatura según la siguiente expresión:

$$k = 0.13173 + 0.00013 T \quad [\text{W/m} \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (15)$$

por lo que la potencia pérdida será:

$$\dot{Q}_{PERD} = \frac{A}{L} (0.13173 + 0.00013 T) (T - T_{EXT}) \quad [\text{W}] \quad (16)$$

4.1.4 Potencia acumulada en el sistema. Es la potencia necesaria para calentar el aire, de tal manera que éste pueda transferir calor a la carga. Al calentarse el aire, su densidad disminuye de tal manera que éste asciende e ingresa al ducto de recirculación.

Conectado a éste ducto existe un ventilador centrífugo que conduce al aire caliente de nuevo al horno, introduciéndola en la parte de abajo, para obtener una uniformidad en la temperatura del horno.

El calor transferido al aire esta dado por:

$$\begin{aligned} Q &= m_{AIRE} c_{AIRE} \Delta T \\ Q &= \rho_{AIRE} V_{HORNO} c_{AIRE} \Delta T \quad [\text{J}] \end{aligned} \quad (17)$$

donde:

Q : Cantidad de calor absorbido por el aire en Joules (J).

ρ_{AIRE} : Densidad del aire (kg/m³).

c_{AIRE} : Calor específico del aire (J/kg°C).

V_{HORNO} : Volumen del horno incluido el ductor de recirculación (m3).

ΔT : Cambio en la temperatura de la carga.

De modo que la potencia almacenada en el sistema será:

$$\dot{Q}_{ALM} = \rho_{AIRE} V_{HORNO} c_{AIRE} \frac{dT}{dt} \quad [W] \quad (18)$$

aplicando el principio de conservación de la energía se tiene:

$$P_{ENT} - \dot{Q}_{SAL} - \dot{Q}_{PERD} = \dot{Q}_{ACM} \quad (19)$$

$$T = \int \left[\frac{P_{ENT} - \frac{A}{L}(0.13173 + 0.00013T)(T - T_{EXT})}{\rho_{AIRE} V_{HORNO} c_{AIRE} + N(m_{COBRE} c_{COBRE} + m_{HIERRO} c_{COBRE})} \right] dt + T_0 \quad (20)$$

donde:

T : Temperatura del horno (variable a controlar) [°C]

T_0 : Temperatura inicial del horno.

Esta ecuación servirá para la simulación del proceso de calentamiento del conjunto núcleo-bobina dentro del horno de resistencias. El modelo que se lograría con las ecuaciones anteriores sería un modelo teórico, por lo tanto se deben agregar ciertos elementos que hagan al modelo parecido al proceso real, para nuestro caso dichos elementos serán un bloque de ruido y un bloque de saturación.

4.2 Diseño del modelo matemático en Simulink

Luego de obtener nuestro modelo matemático del proceso se hace uso de la herramienta Simulink de MATLAB para simular el proceso y hacer las pruebas correspondientes.

De acuerdo a la ecuación obtenida del modelo matemático se puede desarrollar la siguiente simulación:

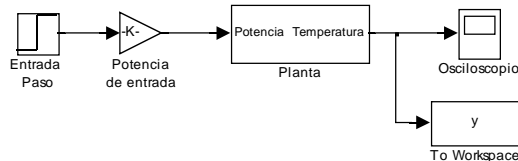


Figura 6. Simulación de la planta - Simulink

el bloque Planta es un bloque embebido que contiene la ecuación que describe la dinámica del proceso representada en la figura 7.

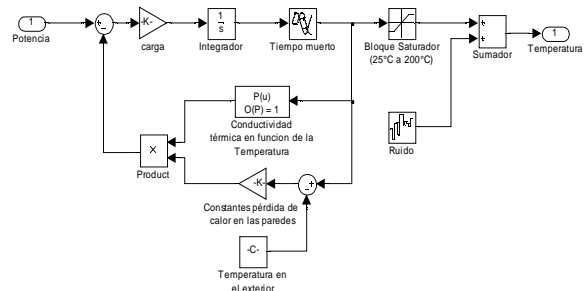


Figura 7. Bloque Planta - Simulink

4.3 Obtención de la dinámica general del sistema

La identificación de sistemas consiste en el análisis de datos de entrada y salida de un proceso, pero para que la identificación sea efectiva, dichos datos deben contener la dinámica del sistema, y para ello la señal de entrada (datos de entrada) debe ser diseñada para lograr dicho objetivo.

Para este diseño es necesario obtener información acerca de la dinámica del sistema, y esto se logra produciendo un cambio escalón en la entrada del proceso en lazo abierto, de tal manera de registrar y analizar su respuesta (figura 8).

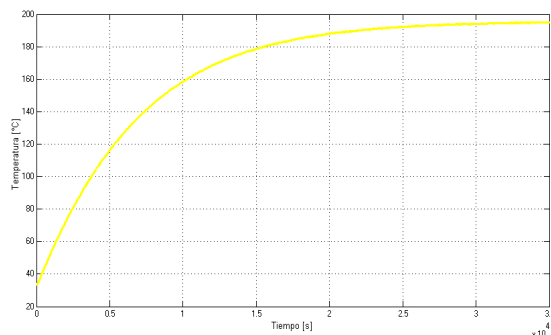


Figura 8. Respuesta a entrada paso en lazo abierto – Planta Simulada

En ocasiones es difícil saber el valor exacto del orden del sistema, por otro lado a veces es posible realizar un análisis físico de tal manera de tener una idea de cuál es el orden del sistema.

En cualquiera de los dos casos, es de mucha utilidad aproximar la respuesta del sistema a la respuesta de un sistema de primer orden con retardo de tiempo θ , de tal manera de obtener la constante de tiempo dominante del sistema.

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (21)$$

$$\tau_{DOM} \cong \tau + \frac{\theta}{2} \quad (22)$$

Utilizando el método de Smith (basado en dos puntos de la curva de reacción) se obtiene como constante de tiempo dominante:

$$\tau_{DOM} \cong \tau + \frac{\theta}{2} = 6750 + 60 = 6810 \text{ s}$$

4.4 Diseño de la señal de entrada

Después de obtener información sobre la respuesta de nuestra planta a una entrada paso, se realizará el diseño de la señal de entrada. Para obtener una señal de entrada que sea amigable con la planta, la señal necesita cumplir con los siguientes requerimientos:

- Ser tan corta como sea posible
- No llevar a los actuadores a los límites o exceder las restricciones de movimiento.
- Causar la mínima interrupción a las variables controladas (baja varianza, pequeñas desviaciones del set point).

Para nuestro caso, como señal de entrada se escogió una señal PRBS, ya que el horno como se ha dicho anteriormente trabaja mediante un sistema de control de lógica cableada (ON/OFF).

Los parámetros para el diseño de una señal pseudo aleatoria binaria (PRBS) son:

- Tiempo de muestreo (T)
- Tiempo de conmutación (T_{sw})
- Duración del ciclo (N_s)
- Número de registros a desplazar (n_r)
- Amplitud de la señal

Seleccionar el período de muestreo se ha convertido más en un arte que una ciencia. Algunos criterios que se utilizan se basan en el tipo de variable física a controlar ó en la respuesta en lazo abierto a una entrada escalón, en nuestro caso se utilizará este último.

Teniendo conocimiento que el proceso se puede modelar como un sistema de primer orden con retardo de tiempo, se puede utilizar el siguiente criterio:

$$0.2 < \frac{T}{\theta} < 1 \quad (23)$$

donde:

T es el tiempo de muestreo y θ es el tiempo muerto.

Para nuestro caso el tiempo muerto es aproximadamente 120 s por lo que:

$$24 < T < 120 \quad (24)$$

elegimos entonces nuestro tiempo de muestro como $T = 100 \text{ s}$.

Una vez elegido el tipo de señal y el tiempo de muestreo se procede a diseñar y validar varias señales de entrada, esto se debe a que es necesario conocer si los datos de salida que se obtengan a partir de la excitación de la planta con la señal de entrada, son válidos para la identificación.

El procedimiento para el diseño que se propone en este trabajo es el siguiente:

- Determinar la duración de la señal de entrada como lo sugiere el mayor proveedor de software para el control de procesos, con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Duración de la prueba (valor sugerido)} &= (6 \dots 8) * (\text{Tiempo de estabilización} \\ &\text{estimada}) * (\text{Número de las variables} \\ &\text{independientes}) \end{aligned}$$

En nuestro caso se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{Duración de la señal} &= (7) * (4 * \tau_{DOM}) * (1) \\ &= (7) * (4) * (6810) * (1) \\ &= 190680 \text{ s} \\ &= 2.2 \text{ días} \end{aligned}$$

- Considerando fijo el número de registro n_r y con base en esto se calcula el Tiempo de conmutación T_{sw} mediante:

$$\text{Duración de la señal PRBS} = (\# \text{ de ciclos}) * (N_s) * (T_{sw})$$

- Verificar que TSW sea múltiplo del tiempo de muestreo
- Verificar que la banda de frecuencia de interés quede cubierta con la selección de T_{sw} , mediante:

$$\frac{2\pi}{N_s T_{sw}} \leq \omega \leq \frac{2.8}{T_{sw}} \quad (25)$$

Para nuestro caso la frecuencia dominante del sistema es:

$$\omega_{DOM} = \frac{1}{\tau_{DOM}} = 1.50 \times 10^{-4} \text{ rad/s} \quad (26)$$

- Por el tipo de planta a simular la señal tendrá una amplitud de 0.5 y con un desfase de 0.5, con lo que se logra que la señal este entre 1 y 0, esto porque el control es ON/OFF y por esta razón estos son los valores que debe tener la señal PRBS
- Se realiza la validación de la señal de entrada, y si no cumple se cambia el valor de n_r .

4.5 Validación de la señal de entrada

Para esta validación se seguirá el siguiente procedimiento:

- Una vez diseñada la señal de entrada, se excita a la planta con dicha señal. La figura 9 muestra la simulación en la que se ingresa la señal PRBS

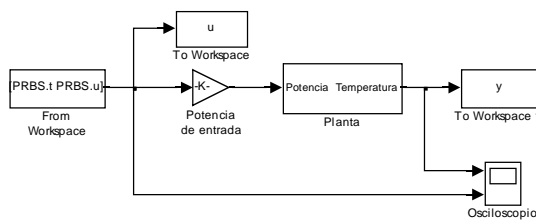


Figura 9. Simulación de la planta con la señal de entrada PRBS

- Con el uso de `ident`, se recogen y tratan los datos.
- En Matlab se ejecuta la función `cra` y se verifica que exista relación entre los datos de entrada y salida.
- Con `ident` se realiza el análisis de correlación y espectral y se analizan las graficas obtenidas.

La siguiente tabla muestra las diferentes señales de entradas diseñadas y comentarios acerca de su respectiva validación.

Tabla 2. Diferentes señales de entrada PRBS

Número de registros	Número de ciclos	Tiempo de conmutación (s)	Tiempo de duración (s)	Comentarios
8	1	700	178500	Buena aproximación de parámetros. No se estabiliza.
7	1	1500	190500	Mala aproximación de parámetros. No se estabiliza. Poca ganancia.
6	1	3000	189000	Buena aproximación de parámetros. Aparente estabilización. Poca ganancia.
5	1	6200	192200	Buena aproximación. Poco de exceso en la ganancia. Aparente estabilización.

Para realizar identificación se elige la señal PRBS con $n_r = 5$, ya que presentó mejores resultados en cuanto a la respuesta escalón y la respuesta de frecuencia.

5. Identificación y validación de los modelos paramétricos

Las figuras 9 y 10 muestran la simulación de la planta y los datos obtenidos para la identificación

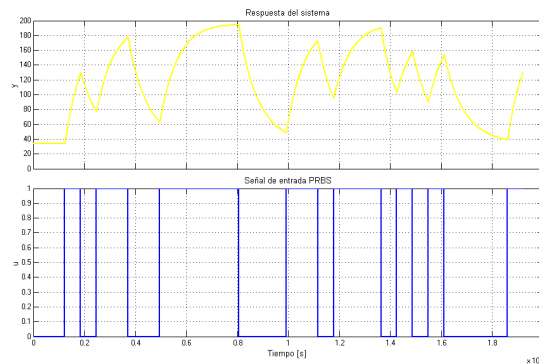


Figura 10. Respuesta del sistema a la señal PRBS ($n_r = 5$)

Estos datos son cargados a `ident` y se extrae la media y las tendencias. Adicionalmente los separa de tal manera que 50% se utilizan para la identificación y 50% para la validación.

Con `ident` se procede a realizar las estimaciones con los diferentes modelos paramétricos, y se realiza la validación basándose en los siguientes criterios:

- Salida del modelo: Donde se compara los datos de validación con los valores del modelo.
- Análisis de residuos: Los residuos son la parte de los datos (del conjunto de validación) que el modelo no puede predecir. Estos deben tener una autocorrelación similar a la del ruido blanco y no estar relacionado con los datos de entrada.
- Respuesta del modelo: Se analiza la respuesta al escalón y la respuesta de frecuencia.
- Parsimonia: Hallar una representación sencilla del modelo que tenga una buena

aproximación al comportamiento de la planta real

La tabla 3 muestra los diferentes modelos paramétricos así como también algunos comentarios sobre ellos.

Tabla 3. Diferentes modelos paramétricos

Estructura Paramétrica	Estructura Escogida	Aproximación	Comentarios
$arx[na\ nb\ nk]$	$arx342$	94.87%	Muy buena aproximación con el sistema real. La autocorrelación de los residuos excede los intervalos de confianza
$armax[na\ nb\ nc\ nk]$	$armx3232$	94.93%	Muy buena aproximación con el sistema real. La respuesta a una entrada paso presenta una diferencia de 3°C con respecto al sistema real.
$oe[nb\ nf\ nk]$	$oe122$	94.74%	Muy buena aproximación con el sistema real. El modelo no procura proporcionar una estimación al ruido, esto puede tener un efecto negativo al momento de la simulación.
$bj[nb\ nc\ nd\ nf\ nk]$	$bj12222$	94.57%	Muy buena aproximación al modelo real.

5.1 Elección y análisis del modelo de la planta

Se elige el modelo $bj12222$, para representar al sistema bajo estudio. A este modelo se podrán realizar diferentes experimentos sin tener que acceder a la planta real.

Las siguientes figuras muestran dos criterios de validación del modelo elegido

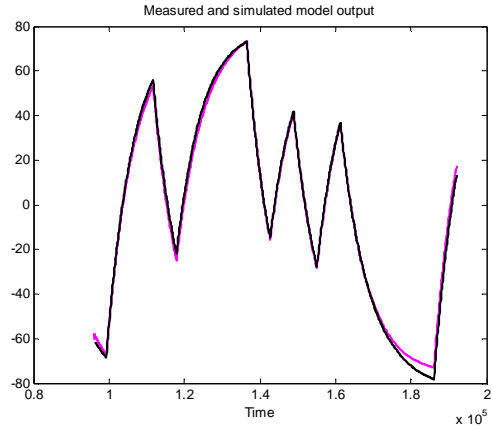


Figura 11. Salida del modelo BJ12222.

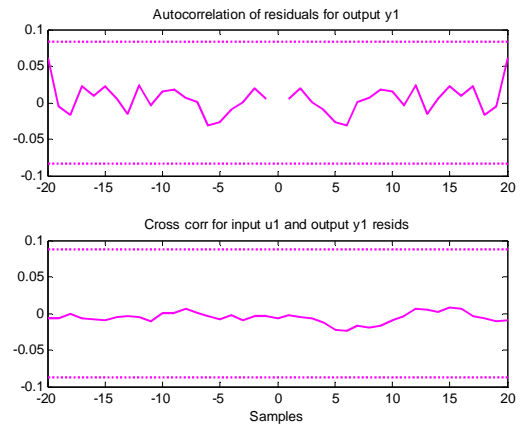


Figura 12. Análisis de residuos BJ12222

5.2 Función de transferencia del modelo

$$G(s) = \frac{0.027486(s + 0.01821)}{(s + 0.02218)(s + 0.0001398)} e^{-100s} \quad (27)$$

El siguiente paso de este trabajo es utilizar el modelo $bj12222$ para diseñar un controlador que mantenga la temperatura a 100°C.

6. Diseño del controlador

Para el diseño del controlador, se debe cambiar el actuador actual del horno, el cual es ON/OFF.

En este trabajo se propone usar un controlador de voltaje alterno (convertidor ca-ca), que se logra conmutando tiristores de manera de variar el flujo de potencia a la carga (resistencias). La figura 13 muestra la conexión de este tipo de actuadores.

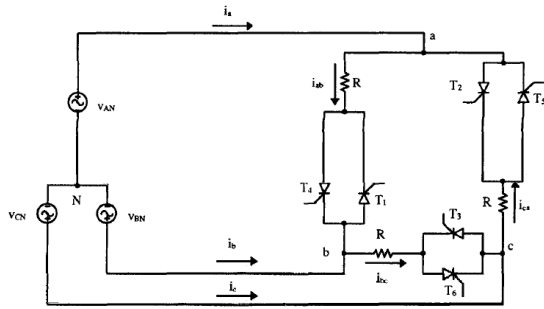


Figura 13. Controlador de corriente alterna trifásica bidireccional con carga resistiva en delta.

Se utiliza un control del tipo todo o nada para conmutador a los tiristores, de tal manera que existe una relación proporcional entre el voltaje de control y la potencia en la carga.

Tanto el actuador como el sensor son diseñados en simulink, además de un bloque que convertirá la referencia de temperatura a voltaje. Con todo esto se obtiene la siguiente simulación:

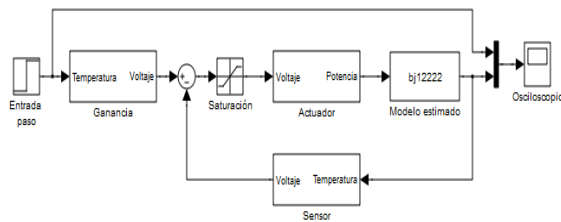


Figura 14. Modelo estimado en lazo cerrado.

Y la siguiente respuesta:

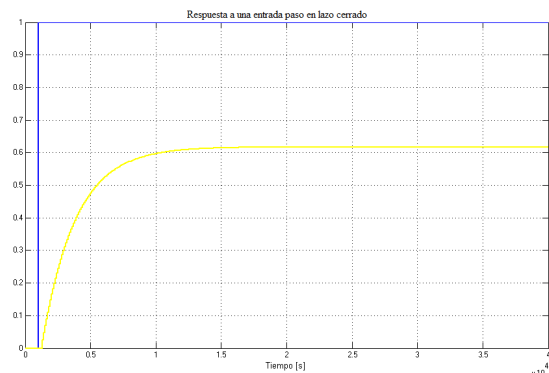


Figura 15. Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado.

6.1 Obtención del controlador

En nuestro caso la principal tarea para el controlador será estabilizar la temperatura en el valor de la referencia, se prestará menor importancia en el tiempo de estabilización debido a que el tiempo de trabajo del horno es mucho mayor que el tiempo de estabilización hallado en lazo abierto.

Se utilizó la herramienta Sisotool, y se trabajó con el lugar de las raíces de tal manera de obtener el siguiente controlador PI:

$$G_c(s) = \frac{0.00019872(1 + 7.2 \times 10^3 s)}{s} \quad (28)$$

Y se pueden obtener los parámetros K_p y T_i :

$$k_p = 1.43$$

$$T_i = 7.2 \times 10^3$$

La siguiente figura muestra la respuesta del modelo estimado en lazo cerrado con el controlador PI.

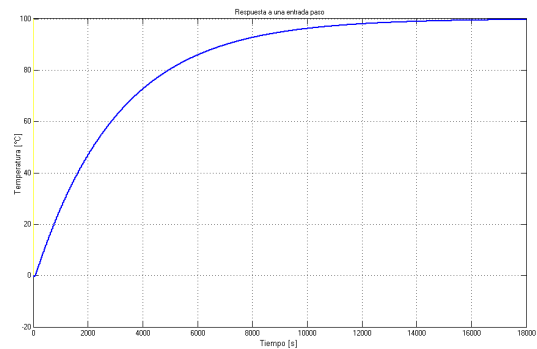


Figura 16. Respuesta a una entrada paso en lazo cerrado con controlador PI.

6.2 Pruebas al controlador

A continuación se realizarán dos pruebas en las cuales se evaluará al controlador elegido. Estas pruebas consisten en analizar la respuesta del sistema ante una perturbación y a una variación del set point.

La figura 17 muestra la respuesta a una perturbación que consiste en la adición de -50°C una vez que el sistema se haya estabilizado.

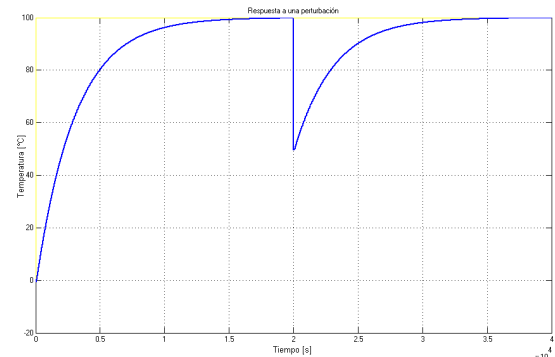


Figura 17. Respuesta ante una perturbación.

La figura 18 por otro lado muestra la respuesta ante una perturbación que consiste en la desconexión del actuador

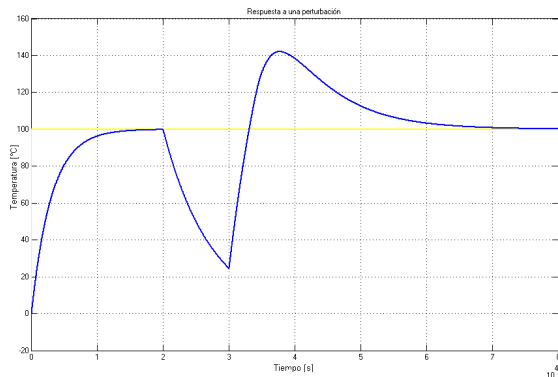


Figura 18. Respuesta ante una perturbación en el actuador.

Por ultimo la figura 19 muestra la respuesta del sistema ante un cambio del valor de la referencia.

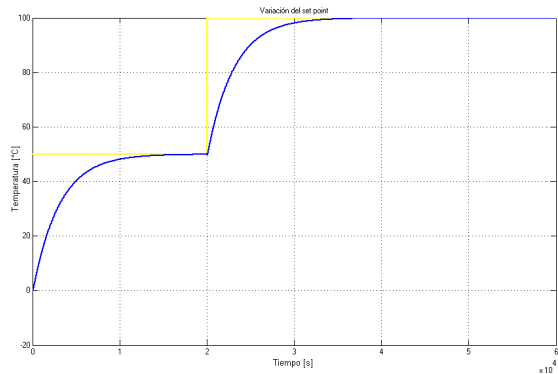


Figura 19. Respuesta ante un cambio en la referencia.

7. Análisis de resultados

En esta parte, probaremos el controlador PI con la simulación de la planta, tal como si fuera a implementarse en el horno, para así analizar que resultados presenta.

La figura 20 muestra la respuesta del modelo virtual del horno con el controlador PI, para una referencia de 100°C.

Como podemos observar el sistema se estabiliza en 100°C en un tiempo de 2.2 horas el cual es mucho menor que el tiempo que se mantiene en funcionamiento el horno.

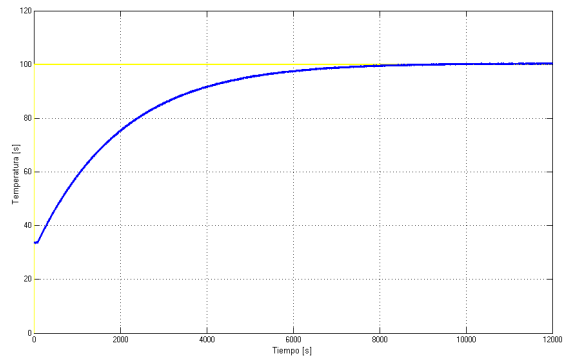


Figura 20. Respuesta del modelo virtual de la planta con controlador PI.

8. Conclusiones

1. Se ha propuesto una metodología en la identificación de sistemas (caja negra), de la cual se han obtenido resultados satisfactorios en cuanto al modelado del sistema y al posterior diseño del controlador.
2. Por las restricciones a la planta, se diseñó un modelo matemático en base a las leyes físicas que dominan el proceso, lo cual es muy utilizado en la ingeniería de control.
3. En base a los porcentajes obtenidos y a la función de transferencia del modelo estimado, se concluye que la identificación de sistemas es un método válido y útil para lograr el conocimiento de la dinámica de un sistema o proceso industrial a cualquier entrada. Esto último debido a que se excita a la planta con una señal aleatoria.
4. Los resultados satisfactorios, no justifican el hecho de que la metodología propuesta en esta tesis sea la mejor elección para el diseño de un modelo, esto depende mucho del sistema y de los requerimientos del mismo, para este caso es muy probable que una metodología más sencilla pueda lograr buenos resultados.
5. La metodología propuesta incluye programas implementados en Matlab que contienen las funciones necesarias y recomendadas para realizar el proceso de identificación y el diseño del controlador de forma ágil, lo cual simplifica el manejo matemático.
6. En base a los conocimientos adquiridos en la realización de este trabajo, se puede decir que los pasos críticos para realizar una buena identificación son la elección del tiempo de muestreo y el diseño de la señal de entrada.

7. La metodología de identificación realizada en esta tesina se orienta a los sistemas lineales invariantes en el tiempo, por lo que se debe tener mucho cuidado al momento de analizar el sistema. Existen métodos de identificación para sistemas no lineales pero están fuera de los objetivos de esta tesina.
8. En este trabajo se presenta una introducción a la identificación de sistemas aplicado a un proceso real. La utilización de estos conocimientos para uso industrial debe ser realizado por diseñadores con experiencia, ya que se debe tener mucha paciencia y cuidado a la hora de realizar las pruebas y adquisición de datos, y de igual manera al calcular los valores y hacer los ajustes adecuados que el sistema requiera para el diseño del controlador
9. Se realizó todo el proceso de identificación al modelo matemático como si fuera el proceso real de tal manera de percibir cuales serian los procedimientos a efectuar si se hubiese tenido la posibilidad de experimentar con la planta real.

9. Recomendaciones

1. Se recomienda analizar detalladamente el sistema con el fin de poder obtener un modelo matemático similar al real.
2. Generalmente en textos y artículos académicos se encuentran sugerencias sobre la elección del tiempo de muestreo según el proceso que se quiere identificar, es recomendable tener noción de estas sugerencias que pueden ser de mucha utilidad al momento del proceso de identificación.
3. En este trabajo se utilizó una señal PRBS como señal de entrada, la razón radica en que el horno presenta un accionamiento on/off, se recomienda si se tiene la posibilidad utilizar como señal de entrada una señal multiseno.
4. Si se tiene la posibilidad de trabajar con el proceso real en lazo abierto es recomendable dejar que el sistema llegue a su punto de equilibrio, y desde este punto aplicar una señal de entrada que produzca un pequeño cambio (en porcentaje) a partir de dicho punto.
5. Se debe tener un poco de conocimiento sobre el programa Matlab; ya que este cuenta con

muchas herramientas de desarrollo, con las que el usuario puede relacionarse y así mostrar los resultados de una manera más técnica.

10. Referencias

- [1] Moisés F. Hurtado Ortiz y Mtro. Isidro M. A. Cristóbal Vásquez. "Aplicación del Modelo para Períodos Fijos de Tiempo con Existencias de Reserva en Materias Primas Críticas de Transformadores de Distribución en la Empresa Voltran S.A. de C.V.". Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional México, DF. Junio del 2010.
- [2] Pedro Avelino Pérez. "Transformadores de distribución. Teoría, cálculo, construcción y pruebas". 2da edición 2001. México editorial Reverté, S.A.
- [3] Katsuhiko Ogata. "Ingeniería de Control Moderna". Prentice Hall, 2003.
- [4] Nise, Norman S. "Sistemas de Control para Ingeniería". 3ra edición. CECSA, 2002
- [5] Katsuhiko Ogata. "Sistemas de control en tiempo discreto". Pearson Educación, 1996.
- [6] L. A. Zadeh. "From circuit theory to system theory". In Proc. IRE 50, pages 856–865, 1962.
- [7] Rivera, D.E. and M.W. Braun. "System Identification for Process Applications". Arizona State University. 2005.
- [8] Julio Astigarraga y José Luis Aguirre. "Hornos industriales de resistencia eléctrica". 6ta edición 1999. España: Mc Graw Hill.
- [9] National Research Council Canada, Institute for research in construction. "Thermal Properties & Building Materials at Elevated Temperatures" Internal report No. 643, March 1993
- [10] Lennart Ljung. "System Identification: Theory for the User". Prentice-Hall, 1987.
- [11] Lennart Ljung, Torkel Glad. "Modeling of Dynamic Systems". Prentice-Hall, 1994.
- [12] Héctor Botero y José Ramírez. "IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN: ANÁLISIS DETALLADO DE METODOLOGÍA Y RESULTADOS". Artículo académico, Dyna, Año 75, Nro. 156, pp. 65-77. Medellín, Noviembre de 2008. ISSN 0012-7353

- [13] L. Ljung, "Matlab User's Guide: System Identification Toolbox". Prentice Hall, 1988
- [14] R. C. Dorf, R. H. Bishop. "Sistemas de control moderno", 10ma edición, Pearson-Prentice Hall, 2005
- [15] Muhammad H. Rashid. "Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones ". 2da edición 1995. México: Prentice Hall Hispanoamerica, S.A.
- [16] J. M. Benavent, A. Abellán, E. Figueres. "Electrónica de Potencia. Teoría y Aplicaciones".
- [17] Vulka. Galeria de fotos de hornos industriales
http://galeria.vulka.es/foto/hornos-de-secado-motores-y-trafos_13441.html
fecha de consulta: Noviembre del 2011.
- [18] Monografía. Nelson Diaz Tapia. "Transferencia de calor".
<http://www.monografias.com/trabajos15/transf-calor/transf-calor.shtml>
fecha de consulta: Noviembre del 2011.