

Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de temperatura en un cuarto térmico

Javier Echeverría Andrade, Jorge Negrete Reyes y César Martín M.
Faculta 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

jjecheverria@fiec.espol.edu.ec, jxnegrete@fiec.espol.edu.ec, camartin@fiec.espol.edu.ec

Resumen

El presente estudio describe el diseño de un controlador para regular la temperatura en un cuarto térmico donde hay que considerar los elementos que intervienen como una caldera, un radiador, una electroválvula, una bomba de agua y la piscina donde se deposita los granos de cebada. Partimos de un modelo de la planta que es el resultado de un sistema de ecuaciones dinámicas y de estado estacionario que describen el funcionamiento del proceso industrial en estudio. A partir de eso se continuara con el procedimiento de identificación que es la base de nuestro estudio, para luego hacer el diseño del controlador del proceso mencionado donde es necesario cumplir un proceso metódico.

Palabras Claves: radiador, caldero, electroválvula, bomba, control, temperatura, identificación, sistema, proceso, industrial

Abstract

The actual study research describe the design of a controller to regulate the temperature in a thermal room where there is to consider the elements that are involved in a boiler, radiator, electronic valve, water pump, and a pool where grains of barley are deposited. We start with a model of a plant that resulted from dynamic equations form stationary condition that describes the industrial process in this study. From that point, the process of identification will continue, that is, the base of our study, after that, the making of the controller will be mentioned where is needed to fulfill a methodical process.

Keywords: radiator, boiler, solenoid, pump, control, temperature, identification, system, process, industry

1. Introducción

Con el avance de la tecnología y el crecimiento industrial acelerado que se vive día a día, el control automático nos brinda una gama de opciones y soluciones para hacer de nuestro proceso una precisa y eficiente obra de ingeniería. Actualmente la ciencia se basa en la construcción de modelos a partir de experimentos que permitan conocer y entender los fenómenos y procesos que se encuentran en el mundo real. Estos modelos (hipótesis, leyes de la naturaleza, paradigmas, etc.), pueden ser de carácter formal y se caracterizan básicamente porque dan una aproximación de la realidad dentro de parámetros establecidos. La modelización en forma general es encontrar modelos que representen los sistemas dinámicos. Estos modelos se puede obtener a través de dos formas: Modelización Matemática e Identificación de Sistemas. La modelización matemática es una aproximación analítica, que se basa en leyes físicas, para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o proceso. La identificación de sistemas es una aproximación experimental, donde se desarrollan algunos experimentos en el proceso y se determina un modelo, con parámetros asignados que no tienen un significado físico.

Para mejorar la respuesta del proceso en estudio se requiere del diseño de reguladores o controladores, que a su vez requieren del modelo del proceso como punto de partida. Con los conocimientos brindados por el control automático podemos diseñar un controlador, el cual dependiendo de las especificaciones de nuestro proceso y variables a controlar puede ser un controlador proporcional, proporcional integral o proporcional integral derivativo, el comúnmente conocido como un controlador PID.

2. Descripción del Proceso a Identificar

El proceso a identificar es una etapa importante en la elaboración de la cerveza, y lo que se logra es obtener la malta de cebada y el tostado de la misma. Maltear es básicamente iniciar la germinación y luego interrumpirla bajando la humedad del grano de cereal. El procedimiento que se utiliza para hacer la malta base, conocida como pilsener, es extender las semillas sobre una malla metálica en un colchón de aproximadamente 3 cm y se coloca abajo un sistema de calefacción compuesto por ventiladores industriales que toman el aire a temperatura ambiente y soplan a través de radiadores, el aire caliente pasa debajo de la malla metálica donde se encuentran los granos hasta la superficie de los mismos, es aquí se monitorea la temperatura de los mismos. La temperatura puede ser cambiada variando la velocidad de los ventiladores, la temperatura del radiador o incluso ambas. Es aquí donde se centra el proceso de

identificación. Para identificar las entradas y salidas de nuestro proceso describiremos el proceso completo. Comienza con la bomba que maneja un caudal de agua constante y a temperatura ambiente durante todo el proceso.

Para nuestra planta la entrada es el porcentaje en el que se abre la electroválvula diverter, esta válvula tiene la función de dividir el caudal proveniente de la bomba en dos caudales con diferentes funciones. El caudal que va directo a la caldera tiene la función de elevar la temperatura del radiador, el caudal que se desvía directo al radiador tiene la función de bajar la temperatura del radiador, ambos caudales se mezclan y entran al radiador. De esta forma variamos la temperatura del aire que entra por debajo de rejilla de la piscina que contiene los granos.

Durante todo el proceso de tostación los ventiladores industriales que se encuentran entre el radiador y la piscina de granos toman aire a temperatura ambiente y lo empujan a través del radiador con un caudal constante, es decir que los ventiladores funcionan a velocidad constante.

La salida de nuestro proceso es la temperatura del aire sobre los granos, para esto se utiliza sensores de temperatura, con este seguimiento a la variable de importancia de nuestro proceso cerramos el lazo de realimentación y así realizar una acción de control.

3. Transferencia de calor

La transferencia de energía que se da exclusivamente por una diferencia de temperatura se llama flujo de calor o transferencia de calor, y la energía así transferida se llama calor. La cantidad Q de calor necesaria para hacer variar la temperatura de un sistema es proporcional a la masa m de este y al cambio de temperatura, ΔT . Esto se expresa en la ecuación

$$Q = m\zeta\Delta T$$

En la que ζ es una cantidad característica del material, llamada calor específico (o capacidad calorífica). El calor específico de un material siempre depende un poco de la temperatura inicial y del intervalo de temperatura.

4. Mecanismo de transferencia de calor

La transferencia de calor por conducción se produce cuando dos sistemas de diferentes temperaturas entran en contacto directo hasta alcanzar la misma temperatura. En el intercambiador de calor la conducción se realiza entre un fluido y la pared del recipiente que lo contiene donde la capacidad para

transferir calor es regulado por la conductividad térmica de la pared.

La transferencia de calor por convección se realiza a través de un material fluido, este fluido es forzado a transportar calor. El fluido caliente disminuye su densidad al ser calentado pero como no todo el fluido se calienta la parte fría al poseer mayor densidad desplazará a la parte caliente generando corrientes ascendentes y descendentes.

La transferencia de calor por radiación se realiza por medio de la radiación electromagnética que emite un cuerpo, tanto los fluidos fríos como calientes emiten radiación, entonces para que exista transferencia de calor no se requiere de ningún medio. En intercambiadores de calor el fenómeno de radiación es mínimo pero debe tomarse en cuenta debido a las pérdidas que genera.

5. Intercambiadores de calor

Es un dispositivo diseñado para la transferencia de calor entre dos fluidos, el proceso de transferencia de calor se realiza entre dos fluidos de diferentes temperaturas con el fin de variar sus temperaturas hasta alcanzar el equilibrio térmico.

6. Técnicas de Identificación

La identificación de sistemas se puede definir como el arte de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales, sean estos datos la entrada y la salida del sistema. Como disciplina científica data de los primeros intentos de modelar series de tiempo usando técnicas AR, Auto-Regresivo. Aunque una parte sustancial del desarrollo de las técnicas está ligado a la Comunidad de Control, está básicamente construida a partir de técnicas estadísticas, en particular en los métodos de regresión lineal y no-lineal.

Construir modelos para sistemas desconocidos es un objetivo importante de la Ingeniería de control. Estos modelos necesitan simular el comportamiento real en los casos en que existe un conocimiento previo limitado de la estructura del sistema.

7. Modelamiento matemático

En vista que de este proceso existe un gran número de variables, se han realizado ciertas consideraciones con las cuales lograremos modelar nuestro proceso, respetando los principios físicos que rigen el comportamiento de nuestro sistema, pero teniendo una buena aproximación del proceso en estudio. El proceso comienza con el caudal de agua que la bomba envía a la válvula de desvío para que un

porcentaje de la misma pase por una caldera, como se muestra en la figura 1.

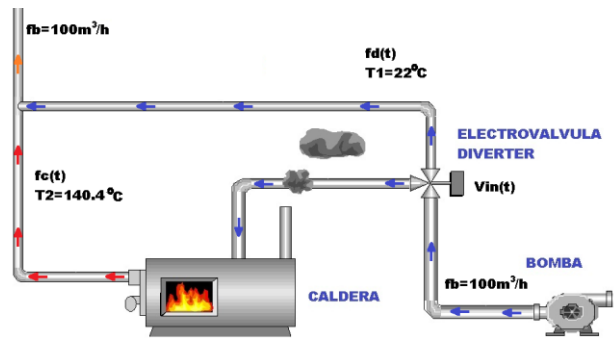


Figure 1

EL voltaje de entrada de la electroválvula de tres vías, $V_{in}(t)$, puede tomar valores desde 0 hasta 10 voltios, que es el rango convencional de alimentación para estos actuadores. El análisis de los datos proporcionados por el equipo técnico de la planta cervecera, nos muestran que los valores de accionamiento de la electroválvula, varían entre 0.5 y 7.43 voltios. A un mayor valor de $V_{in}(t)$ mayor será el caudal que ingresa a la caldera, $f_c(t)$, y en consecuencia disminuirá el caudal de desvío, $f_d(t)$, y viceversa. La bomba genera un flujo de agua de $100\text{m}^3/\text{h}$, que mediante métodos de conversión de unidades obtenemos un valor de 27.7778 lt/seg . Al unirse los dos caudales, $f_d(t)$ y $f_c(t)$, obtengo nuevamente un caudal de $.7778\text{ lt/seg}$. Lo anteriormente mencionado se muestra implementado en un diagrama de bloques desarrollado en Matlab Simulink en la figura 2.

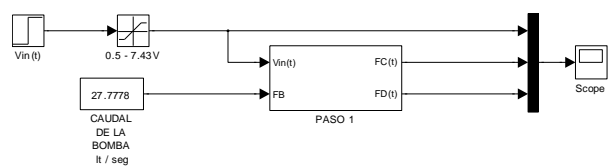


Figure 2

Continuando con el proceso el caudal de desvío y el caudal que sale de la caldera se mezclan e ingresan al radiador tal como muestra la figura 3.

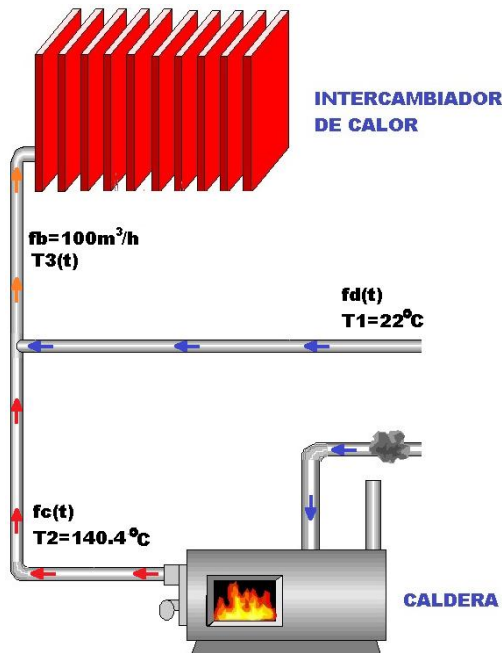


Figure 3

Los caudales de desvío y caldera varían, pero mantienen su temperatura constante, ambos caudales se mezclan turbulentamente en el tramo de tubería que comienza en la intersección de dichos caudales y termina con el ingreso de agua al radiador. En este tramo notamos que el flujo es constante pero su temperatura, $T3(t)$, varía en función del tiempo y depende de los caudales de la caldera y caudal de desvío.

Para hacer el modelo de los procesos industriales generalmente se comienza con el balance de una cantidad que se conserva: masa o energía, este balance se puede escribir como:

$$\begin{array}{ccc} \text{Flujo de} & & \text{Tasa de} \\ \text{masa/energía} & & \text{acumulación de} \\ \text{de entrada al} & - & \text{masa/energía en el} \\ \text{proceso} & & \text{proceso} \end{array} =$$

El modelo de este paso está descrito por las siguientes ecuaciones y con los siguientes datos:

$$fd(t) + fc(t) = fb$$

$$T1 = 22^\circ\text{C}$$

$$T2 = 104.4^\circ\text{C}$$

$$fb = \frac{100 \text{ m}^3}{\text{h}}$$

$$\frac{100 \text{ m}^3}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ lt}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ seg}} = 27,78 \text{ lt/seg}$$

Siguiendo la ecuación de balance de masa y energía tenemos:

$$fd(t) \cdot \rho \cdot C \cdot T1 + fc(t) \cdot \rho \cdot C \cdot T2 - fb \cdot \rho \cdot C \cdot t3(t) = \frac{d(V \cdot \rho \cdot C \cdot t3(t))}{dt}$$

$$fd(t) \cdot T1 + fc(t) \cdot T2 - fb \cdot t3(t) = \frac{d(V \cdot t3(t))}{dt}$$

Escribimos la ecuación en estado estacionario:

$$\bar{f}d \cdot T1 + \bar{f}c \cdot T2 - fb \cdot \bar{T}3 = 0$$

$$(fd(t) - \bar{f}d) \cdot T1 + (fc(t) - \bar{f}c) \cdot T2 - fb \cdot (t3(t) - \bar{T}3) = \frac{d(V \cdot t3(t))}{dt}$$

$$Fd(t) \cdot T1 + Fc(t) \cdot T2 - fb \cdot T3(t) = \frac{d(V \cdot t3(t))}{dt}$$

$$Fd(s) \cdot T1 + Fc(s) \cdot T2 - fb \cdot T3(s) = T3(s) \cdot V \cdot s + V \cdot T3(0)$$

$$T3(0) = 0$$

$$Fd(s) \cdot T1 + Fc(s) \cdot T2 = T3(s) \cdot V \cdot s + fb \cdot T3(s)$$

$$Fd(s) \cdot T1 + Fc(s) \cdot T2 = T3(s) \cdot (V \cdot s + fb)$$

$$Fd(s) \times \frac{T1/fb}{\frac{V}{fb}s + 1} + Fc(s) \times \frac{T2/fb}{\frac{V}{fb}s + 1} = T3(s)$$

Obteniendo el siguiente diagrama de bloques para el segundo paso

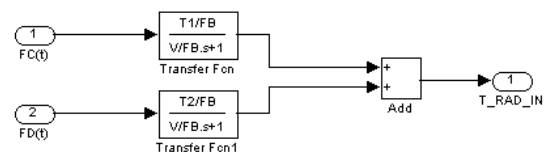


Figure 4

Finalmente se procede a modelar la etapa final del proceso que consiste en tener como entrada del sistema la temperatura del agua que entra en el radiador y como salida la temperatura del cuarto térmico, variable final de estudio.

Con los datos obtenidos de la fábrica real estimamos una función lineal para el radiador y para la piscina de granos, con lo que obtenemos el siguiente diagrama de bloques.

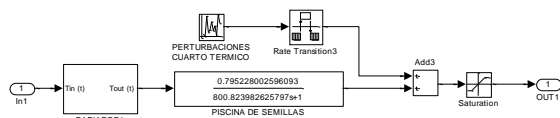


Figure 5

Con todas las etapas del proceso modeladas procedemos a crear un subsistema que las contenga y frente a una entrada igual a la de la planta real, validamos el modelo al comparar el error y τ_{dom} dominante de nuestro modelo con el de la planta real, como se muestra en la figura 6.

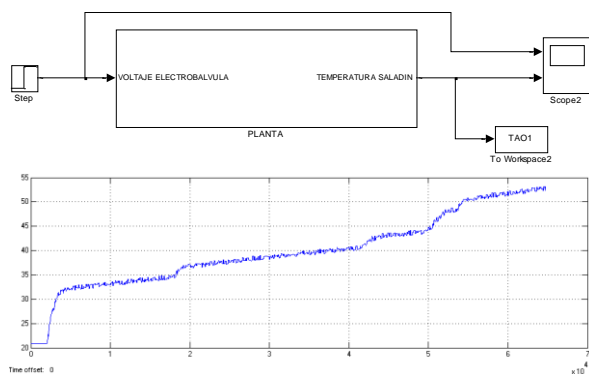


Figure 6

8. Diseño de la señal multiseno.

Dada la naturaleza de nuestra planta, basándonos en los datos proporcionados por la fábrica local, concluimos que la mejor señal de entrada para identificar nuestra planta es una señal tipo multiseno. Donde nuestra señal multiseno tendrá un tiempo de muestreo o tiempo de cambio de 1200 segundos y un valor de α igual a 2.

Los valores de amplitud y bias obedecerán a las limitaciones de funcionamiento de la planta en estudio, es decir, que el rango de valores que tomara la señal deberá estar entre 0.5 y 7 voltios, que son los valores máximo y mínimo en el que nuestro proceso se desarrolla. Evitando así tener un modelo que obedece a respuestas no saturables, es decir que el modelo generara respuestas que están fuera del rango de funcionamiento de la planta. Razón por la cual

elegimos un bias igual a 3.75 voltios y una amplitud de 3.25 voltios. Lo que conseguiremos es una señal que oscilará entre 0.5 y 7 voltios.

Realizamos varias señales de entrada para la identificación de nuestra planta como se muestra en la siguiente tabla:

| Prueba | Beta | τ_{dom}^L [seg] | τ_{dom}^H [seg] | Tiempo de cambio [seg] | No. de ciclos | No. de sinusoides | Duración de la prueba [seg] |
|--------|------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 | 3 | 880 | 1000 | 1200 | 1 | 1 | 19200 |
| 2 | 4 | 880 | 1000 | 1200 | 1 | 1 | 26400 |
| 3 | 3 | 880 | 1000 | 1200 | 2 | 1 | 38400 |
| 4 | 4 | 880 | 1000 | 1200 | 2 | 1 | 52800 |
| 5 | 3 | 880 | 1000 | 1200 | 1 | 2 | 19200 |
| 6 | 4 | 880 | 1000 | 1200 | 1 | 2 | 26400 |
| 7 | 3 | 880 | 1000 | 1200 | 2 | 2 | 38400 |
| 8 | 4 | 880 | 1000 | 1200 | 2 | 2 | 52800 |

Seleccionamos la que más se asemeje al ruido blanco, para esto hacemos el análisis de correlación y como muestra la figura 7 la señal seleccionada para la identificación es lo más parecido a un ruido blanco.

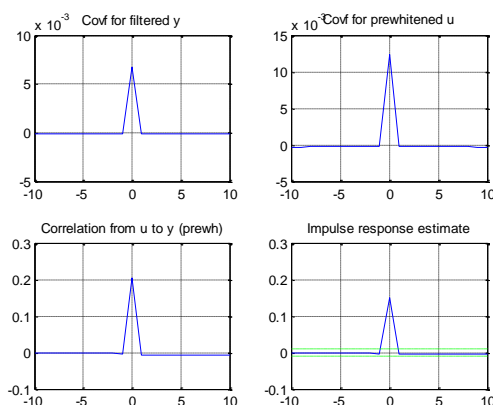


Figure 7

La cual tiene la siguiente forma:

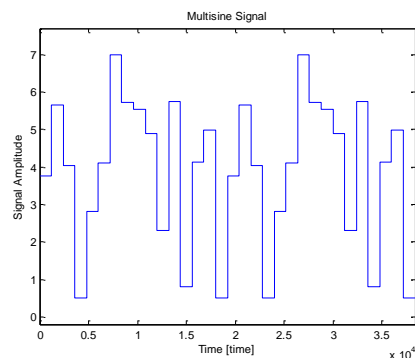


Figure 8

9. Implementación de la identificación.

De la señal multiseno en formato struct que nos generó el programa Input Design Gui tomamos los arreglos que comprenden los valores de ganancia y tiempo de cambio de la señal. Para esto nos ayudamos de un bloque llamado from workspace, al dar clic en el botón play podremos generar un arreglo que contenga los datos de entrada y salida de nuestro sistema. Para guardar estos archivos nos ayudamos del bloque to workspace como muestra la figura 9.

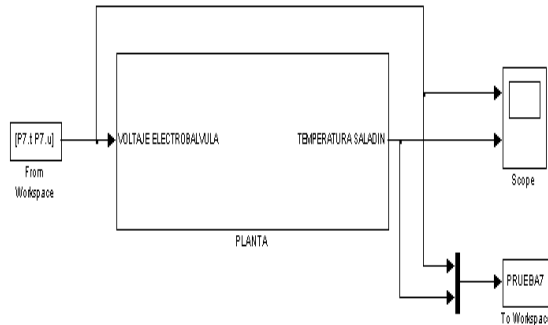


Figure 9

Se procede a simular y los resultados de entrada y salida que se generan el workspace se muestran en la figura 10.

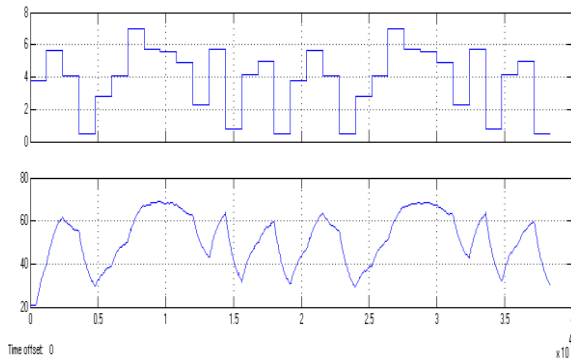


Figure 10

Una vez importados los datos, procedemos a quitar la media, seleccionando la opción remove means del menú Preprocess (gráfica color verde). Luego del mismo menú seleccionamos la opción select range, donde seleccionaremos dos rangos de datos con dos fines diferentes, los datos desde el primer segundo hasta el segundo 25000 (gráfica color rojo) se utilizarán para realizar las estimaciones del modelo para esto arrastramos dichos datos al espacio Working Data, y los datos desde el segundo 25001 hasta el segundo 38400 (gráfica color celeste) se utilizarán para validar nuestro modelo razón por la cual

arrastramos los datos al espacio Validation data. Todos estos cambios los podemos observar al seleccionar la opción time plot como se muestra en la figura 11.

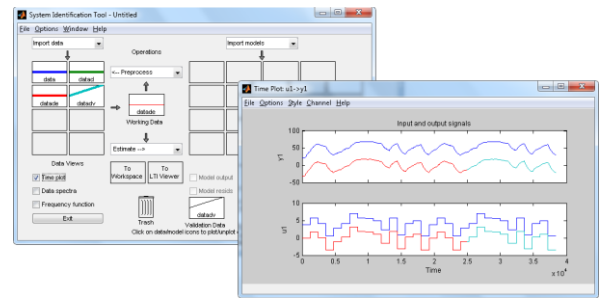


Figure 11

Con la herramienta Ident procedemos a realizar la aproximación con los modelos ARX, ARMAX, BJ (box Jenkins) y OE (Output Error), en la siguiente tabla se muestran los porcentajes de aproximación cada modelo.

| Modelo | % aproximación |
|-----------|----------------|
| ARX10101 | 85,1 |
| ARMAX5552 | 85,15 |
| OE442 | 89,39 |
| BJ55331 | 89.45 |

Para seleccionar el modelo se utilizan más criterios como la respuesta al escalón unitario, el modelo seleccionado se muestra en las gráficas de color rosado, como se muestra en la figura 12.

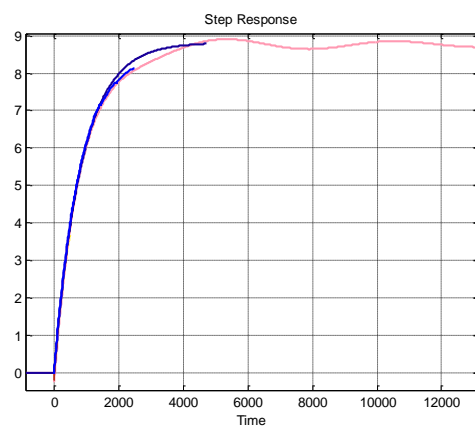


Figure 12

El análisis residual de auto correlación muestra que el modelo BJ55331, de color rosado, no excede los límites de confianza por lo tanto no posee auto correlación, es decir que no depende de instantes pasados, los otros modelos poseen auto correlación. Como se muestra en la figura 13.

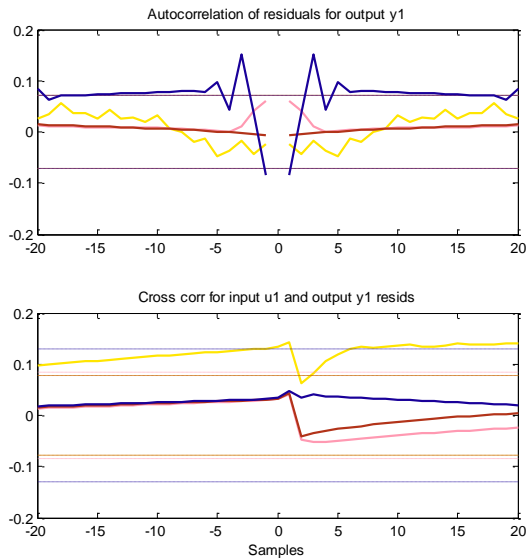


Figure 13

10. Validación del modelo.

Como podemos observar en la figura 14 la respuesta de la simulación de nuestro modelo con la planta se muestra en el scope donde la respuesta de la planta en estudio es de color azul y la del modelo obtenido en la identificación es de color verde.

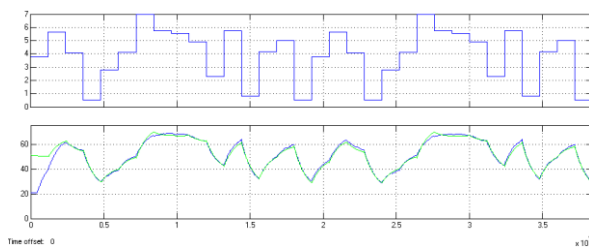


Figure 14

Para encontrar el valor del error relativo entre el modelo identificado y la planta utilizamos un m-file que nos ayude a evaluar el arreglo o matriz generado en la simulación con el nombre VARIANZA. Dato a dato desde el segundo 5000 se compara el error relativo y al final promediamos dichos valores, con el fin de eliminar el desfase de las señales al inicio de la simulación, conciencia de remover la media en la identificación de la planta. Como se muestra en la figura 15

```

ACUM=0;
for i=5000:1:38401
    VARIANZA(i,1)=abs(VALIDACION(i,1)-VALIDACION(i,2))/VALIDACION(i,1);
    ACUM=ACUM+VARIANZA(i,1);
end
APROX=(ACUM/33401)*100
    
```

Figure 15

El resultado obtenido es un error relativo de 1.74 por ciento.

11. Diseño del controlador

Para hallar las constantes proporcional, integral y derivativa de nuestro proceso partiendo del modelo BJ55331 utilizamos la herramienta sisotool. Es un GUI diseñado para hallar un controlador de forma interactiva para sistemas con una entrada (Single Input) y una salida (Single Output) utilizando diagramas de trayectoria de las raíces, diagramas de bode en lazo abierto y lazo cerrado, técnicas de Nichols y Nyquist incluso hallarlo automáticamente.

Para hacerlo escribimos sisotool(d2c(bj55331)), d2c se utiliza para pasar nuestro modelo de discreto a continuo, luego se procede a diseñar el controlador. Por defecto aparece el gráfico de la trayectoria de las raíces y el diagrama de bode de lazo abierto, como se muestra en la figura 16.

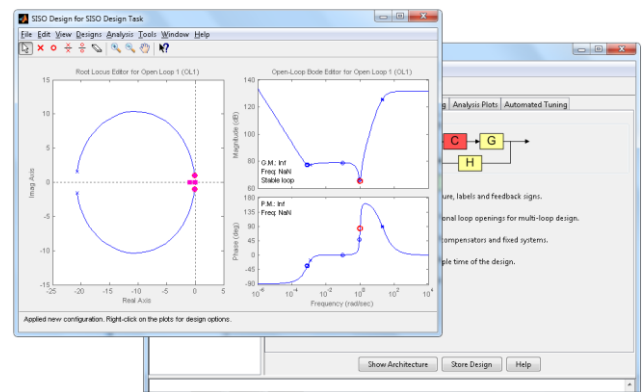


Figure 16

Insertamos los requerimientos para mejorar el desempeño de nuestro proceso en estudio como son un tiempo de estabilización de 1000 segundos y un sobrenivel porcentual inferior al 10%. Como muestra la figura 17.

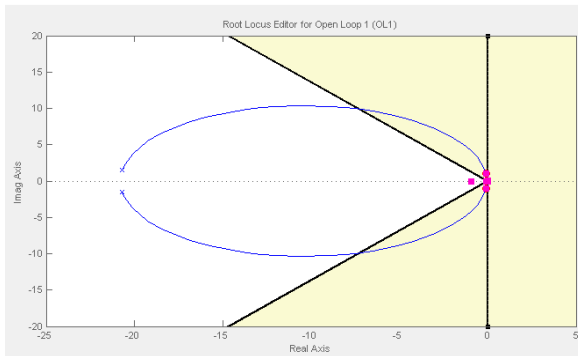


Figure 17

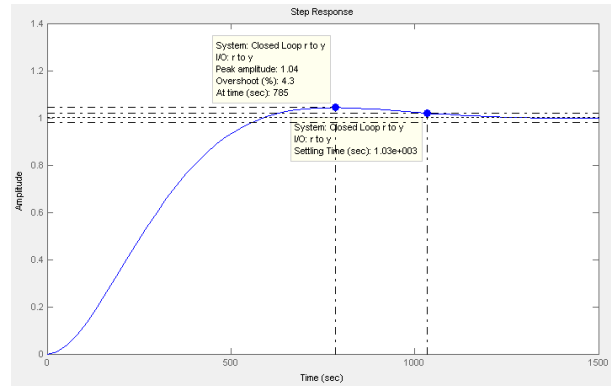


Figure 19

En la pestaña compensator editor damos click derecho e insertamos un integrador, luego variamos la ganancia hasta buscar que las raíces dominantes coincidan con los la intersección de los requerimientos, como se muestra en la figura 18.

El controlador obtenido es:

$$C = 7.02 \times \frac{(s + 0.0021)}{s}$$

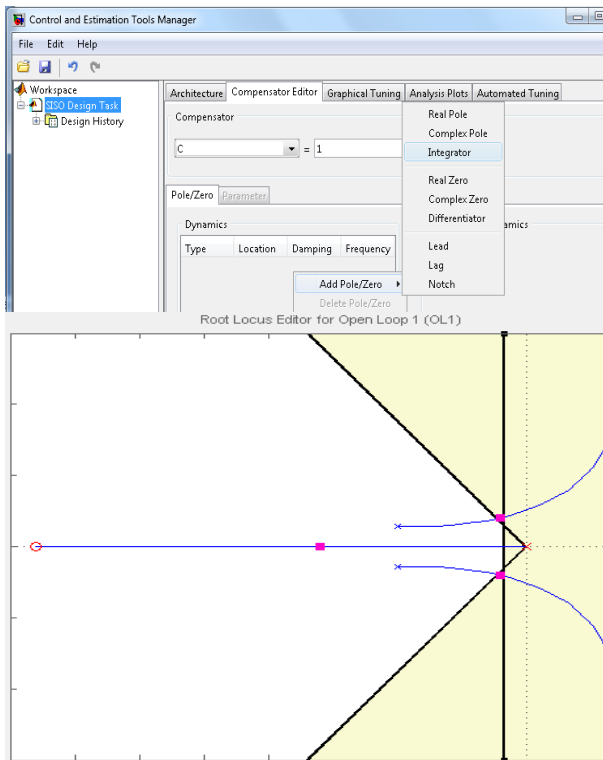


Figure 18

El resultado lo podemos observar en la pestaña compensator y verificar al ver su respuesta al escalón con la herramienta Response to step Command como se muestra en la figura 19.

12. Conclusiones

1. El modelado es un proceso mediante el cual se elabora una representación matemática que simboliza de manera simplificada un sistema real, y de esta manera, poder analizar su comportamiento, el mismo que es fundamental a la hora de tomar decisiones, tanto para su perfeccionamiento como para el control de alguna función específica.
2. Se demostró que el método de identificación de sistemas analizado en el presente trabajo, es una herramienta muy eficiente y de gran ayuda cuando se precisa determinar un modelo matemático de un sistema dinámico real.
3. Un aspecto fundamental del proceso de identificación es la validación del modelo, se hace con base en pruebas de blancura de ruido, es decir, si una señal posee total independencia estadística de sus valores en diferentes periodo de tiempo, se dice que el modelo se ajusta perfectamente a los datos, por tanto, se considera válido.
4. El diseño para el controlador de un sistema industrial real, es de fundamental importancia, ya que de él depende un correcto y eficiente funcionamiento del sistema.

13. Recomendaciones

1. Se recomienda tomar mediciones dentro del rango de funcionamiento de la planta para tener una mejor perspectiva de su funcionamiento.
2. Se recomienda leer manuales de Matlab-Simulink para poder realizar todos los procesos y simulaciones pertinentes en este ambiente tan complejo de programación.
3. Realizar varias pruebas con varias señales de entrada para seleccionar la señal que nos favorece a encontrar un modelo óptimo.
4. Para seleccionar o descartar un modelo no solo hay que basarse en el porcentaje de aproximación, sino también realizar el análisis residual y la respuesta al escalón porque dichos análisis nos muestran si existe o no auto correlación, correlación cruzada y ver si la respuesta en el tiempo es lo más cercano al proceso en estudio.
5. Al momento de diseñar el controlador, las especificaciones de sobrenivel porcentual, tiempo de estabilización y error de estado estacionario deben ser elegidas tomando en cuenta las limitaciones físicas del proceso en estudio.

14. Referencias

- [1] Francis W. Sears, Mark W. Zemansky, "*Física Universitaria*", Vol. 1., Décimo primera edición, PEARSON EDUCATION, México, 2004.
- [2] F. P. Incropera y P. DeWitt. "*Fundamentos de transferencia de calor*". Prentice-Hall, Pearson Educación 1999.
- [3] L. Ljung, "Matlab User's Guide: System Identification Toolbox". Prentice Hall, 1988.
- [4] Katsuhiko Ogata, *Sistemas de control en tiempo discreto*, Pearson Educación, 1996.
- [5] Carlos A. Smith, Armando B. Corripio, "*Control Automático de Procesos, Teoría y Práctica*", Primera edición, Noriega Limusa, Mexico, 1991.
- [6] Ing. E.A. Ana Isabel Gutierrez Colmenares, "*Sistemas de Identificación*", Primera edición, Coruniversitaria, 1999.
- [7] Lennart Ljung & Torkled Glad, "*Modeling of dynamic system*", Prentice-Hall, 1994.