

Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero

Concepts and implementation of PID
controllers in a smelting furnace steel

Pablo Javier Jiménez-Ceciliano¹

*Fecha de recepción: 12 de marzo del 2014
Fecha de aprobación: 14 de julio del 2014*

Jiménez-Ceciliano, P. Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 31-40.

¹ Estudiante de Ingeniería en Mantenimiento industrial, Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago Costa Rica. Estudiante de Meteorología Escuela de Física Universidad de Costa Rica Rodrigo Facio, San Pedro, Costa Rica Teléfono: (506) 89555140. Correo electrónico: pablojcl75@hotmail.com.

Palabras clave

Controladores; Automatización; Fundición; Control; Estabilidad; Sintonización; Error; Ganancia; Identificación; función de transferencia.

Resumen

La importancia en la industria de tener los procesos debidamente controlados para evitar que estos salgan de su respectivo punto de operación ha llevado a desarrollar distintos sistemas de control, en el presente artículo se describe uno de tantos sistemas, los controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo).

Estos controladores se encargan de mantener un proceso en un estado de trabajo estable, cuando se presenten variaciones controladas o aleatorias el sistema por medio de una función de transferencia y los parámetros de sintonización del controlador se encargan de regresar el sistema a su respectivo punto de operación.

Además se analizarán distintas gráficas generadas por medio de la herramienta de SIMULINK de MATLAB para facilitar la comprensión de los conceptos y del caso en estudio, la identificación, sintonización también son parte de dicho estudio.

Keywords

Controllers; Automation; Foundry; Control; Stability Tuning; Error; Gain; ID; transfer function.

Abstract

The importance in the industry of having accurately controlled process to avoid that they run out of their specific operating point, has led to develop different control systems, the following article describes one of many systems, the PID drivers (Proportional, Integral, Derivative).

The importance in the industry of having accurately controlled process to avoid that they run out of their specific operating point, has led to develop different control systems, the following article describes one of many systems, the PID drivers (Proportional, Integral, Derivative).

These drivers are in charge to maintain a process in on stable state of work, when there are controlled or random variations of the system by a transfer function, the tuning parameters of the driver are in charge to bring back the system at its respective operating point.

Moreover, different graphics generated by the SIMULINK tool of MATLAB will be analyzed to facilitate the concepts comprehension and in this study, the identification and tuning are also on important part of it.

Introducción

Durante la historia la utilización del acero como material de construcción ha sido indispensable, debido a esto el desarrollo de procesos para la producción del mismo y los equipos para la obtención de fundiciones son muy variados, estos se clasifican según la temperatura que se necesita para fundir un determinado material, dentro de los hornos utilizados se pueden destacar: el Horno de Cubilote, Aire, Crisol, Cuba, Reverbero, Arco Eléctrico, Inducción. (D. Morre, R. Kibbey, 2002). Estos hornos se encargan de refinar el arrabio el cual se obtiene del alto horno (mineral de hierro, coque y piedra caliza), y así producir un acero de alta calidad. Los aceros se van a clasificar según la cantidad de carbono pre-

sente en su composición, estos son aleaciones que contiene menos de 2.11% de carbono dentro de los cuales se pueden encontrar acero de bajo carbono (menos de 0.25%), acero de medio carbono (entre de 0.25 y 0.55%), y los aceros de alto carbono (más de 0.55%); por otra parte las aleaciones que contienen entre 2.11 y 6.67% son considerados hierros fundidos. Las distintas formas tanto de aceros como de hierros fundidos se pueden observar en la figura 1. (Vergara, 2010)

Como se mencionó anteriormente la principal característica para la selección de un horno es el rango de temperatura en la que puede trabajar; esta propiedad es de gran importancia ya que gracias a ésta se va a llevar el proceso de fundición y la

obtención de las propiedades deseadas al finalizar el proceso. Según la temperatura y el porcentaje de carbono se dan diferentes formaciones y distintas propiedades al acero esto se muestra en el diagrama Fe-C; sin embargo también se pueden realizar tratamientos térmicos a las piezas para darles características adicionales a estas, de aquí surge la gran importancia de tener un adecuado y preciso control de la temperatura.

En el presente artículo se muestran las etapas para desarrollar un adecuado sistema de control por medio de controladores PID. En su primera parte se expondrá el concepto y funcionamiento de dichos controladores, se encontrará la función que va a controlar la temperatura y finalmente se mostrará una simulación con los resultados obtenidos.

Controladores

En un sistema de control el controlador es el "cerebro" del circuito, éste es el que toma la decisión de llevar una determinada acción a cabo. Para esto el controlador realiza las siguientes acciones:

- Compara la señal del proceso (variable controlada) contra el punto de control.

- Envía la señal de control apropiada al elemento final de control, para mantener la variable controlada en el punto de control. (A. Smith, B. Corripio, 1991)

Tomando en cuenta las acciones anteriores es como el controlador lleva a cabo su función durante el proceso; a continuación se exponen los tipos de controladores más utilizados, se mencionan las principales características para la adecuada selección.

Criterio de estabilidad

Existen 3 requerimientos de estudio para el adecuado diseño de un sistema de control (Respuesta transitoria, Estabilidad y Error de estado estable); la estabilidad, considerado el criterio más importante ya que para un sistema inestable la respuesta transitoria y el error de estado estable pueden ser puntos debatibles. La respuesta total de un sistema es la suma de la respuesta libre y la respuesta forzada; una respuesta libre describe la forma en que un sistema disipa o adquiere energía y la forma natural de esta depende únicamente del sistema, mientras la respuesta forzada depende únicamente de la entrada. Para que un sistema de control sea útil la respuesta libre debe aproximarse a cero dejando únicamente la respuesta forzada. Por lo tanto un sis-

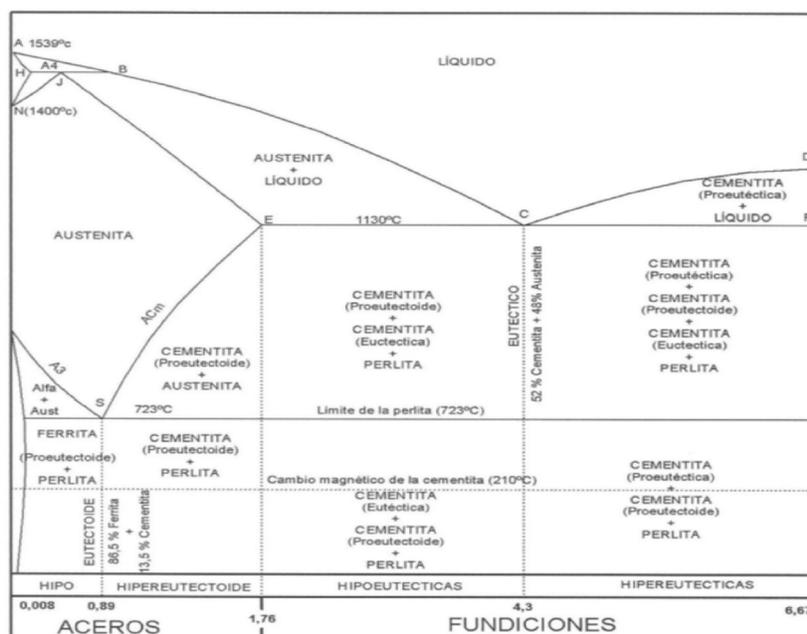


Figura 1. Diagrama Fe- Cementita tomado de tecnología de Materiales II (Castillo, 2007)

tema es estable siempre y cuando la respuesta libre tienda a cero conforme el tiempo tienda al infinito, y a su vez la respuesta forzada permanezca constante (Nise, 2012).

Es de gran importancia determinar si el sistema es estable o inestable para esto basta con saber la ubicación de los polos sobre el plano s ; y para que se dé la estabilidad del mismo, estos deberán estar ubicados en el semiplano izquierdo; a continuación se menciona un método para conocer dicha información.

Criterio de Routh-Hurwitz

Con el uso de este método se podrá determinar cuántos polos tiene el sistema en el semiplano izquierdo, en el derecho y sobre el eje, sin embargo solamente se conocerá la cantidad no las coordenadas de cada polo. Este método consta de los siguientes pasos:

- Generar tabla de datos llamada arreglo de Routh.
- Interpretar el arreglo de Routh para determinar cuántos polos existen.

Para la función de transferencia equivalente mostrada en la figura 2, se tomará el denominador y con este se determinará la ubicación de los polos mediante el arreglo de Routh que se muestra en el cuadro 1.

Luego de la generación del arreglo de Routh se utiliza el criterio de Routh-Hurwitz que expresa que el número de raíces del polinomio que están en el semiplano derecho es igual al número de cambios de signo de la primera columna. (Nise, 2012)

Ya conociendo el criterio de estabilidad mencionado anteriormente, se continuará a definir los conceptos y funcionamiento básico de cada uno de los controladores más usados en la industria.

Controlador Proporcional (P)

Es el controlador más simple en su funcionamiento, éste reacciona proporcionalmente al error y se describe por la siguiente ecuación:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) \quad (1)$$

$m(t)$ = Salida del controlador
 \bar{m} = Valor base
 $e(t)$ = señal de error
 K_c = Ganancia del controlador

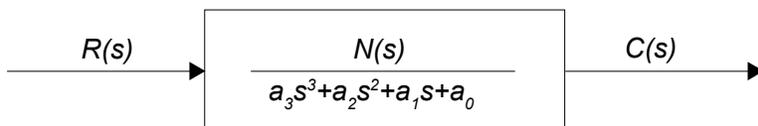


Figura 2. Función de transferencia equivalente.

Cuadro 1. Arreglo de Routh completo.

s^3	a_3	a_1
s^2	a_2	a_0
s^1	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix}}{a_2} = b_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & 0 \\ a_2 & 0 \end{vmatrix}}{a_2} = 0$
s^0	$-\frac{\begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = c_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_2 & a_1 \\ b_2 & a_0 \end{vmatrix}}{b_1} = 0$

Este tipo de controladores poseen la ventaja de tener solamente un parámetro de ajuste K_c , sin embargo tienen una desventaja ya que estos operan con una desviación o error de estado estable. En cuanto al parámetro de ajuste se debe mencionar que entre más grande sea el valor de éste menor será la desviación pero la respuesta del proceso se puede volver oscilatoria. (Smith et al, 1991)

Este comportamiento se observa en la figura 2, como aumenta la oscilación a mayores valores de K_c y como disminuye el error de estado estable, esto para una determinada respuesta a escalón de una función de transferencia dada.

La función de transferencia del controlador proporcional es la siguiente:

$$G(s) = K_c \quad (2)$$

Controlador Proporcional-Integral (PI)

El aspecto integral le da inteligencia al controlador ya que la mayoría de los procesos no pueden trabajar con desviación, éste logra que el sistema trabaje en el punto de control; la ecuación descriptiva es la siguiente:

$$M(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt \quad (3)$$

$T_I =$ tiempo de integración o reajuste

Este controlador logra eliminar la desviación integrando el error constantemente y de esta manera en determinado momento el error será cero y la integral una constante. Para este controlador la función de transferencia está dada por:

$$G(s) = K_c \left(1 + \frac{I}{\tau_I s} \right) \quad (4)$$

Smith (1991) menciona que probablemente el 75% de los controladores sean de este tipo.

En la figura 3 se observa cómo se elimina el error de estado estable con la operación del criterio integral y como la integración del error es más rápida conforme se aumenta el tiempo de reajuste.

Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Cuando se añade la acción derivativa el controlador logra anticipar hacia dónde va el proceso, esto mediante la observación del cambio en la rapidez del error, su derivada. (Smith et al, 1991)

La ecuación descriptiva para este controlador es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

$T_D =$ Rapidez de derivación

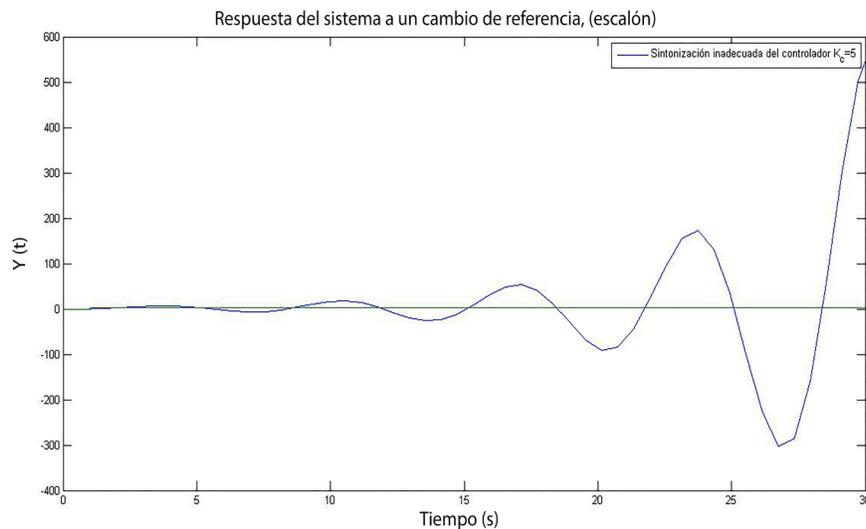


Figura 3. Sintonización inadecuada.

En este controlador la variación del parámetro τ_D determina la anticipación del sistema a cambios; sin embargo se debe tener cuidado con la manipulación del mismo debido a que si no se sintoniza adecuadamente se introducirá ruido a la salida y el régimen puede volverse no controlable.

La función de transferencia para el PID es:

$$G(s) = K_c \left(1 + \frac{I}{T_I s} + \tau_D s \right) (b)$$

En la figura 4 se muestra una adecuada sintonización del controlador PID, también se observa una inadecuada selección del valor de τ_D la cual causa que el sistema oscile y la salida salga de control.

cuada selección del valor de τ_D la cual causa que el sistema oscile y la salida salga de control.

Identificación y resultados

Luego de conocer los conceptos básicos de los controladores se puede iniciar a realizar la identificación del proceso y sintonización del controlador para el adecuado funcionamiento del sistema. A continuación se muestra los datos tomados en un horno de fundición se trazará la gráfica y así se podrá realizar la identificación del proceso.

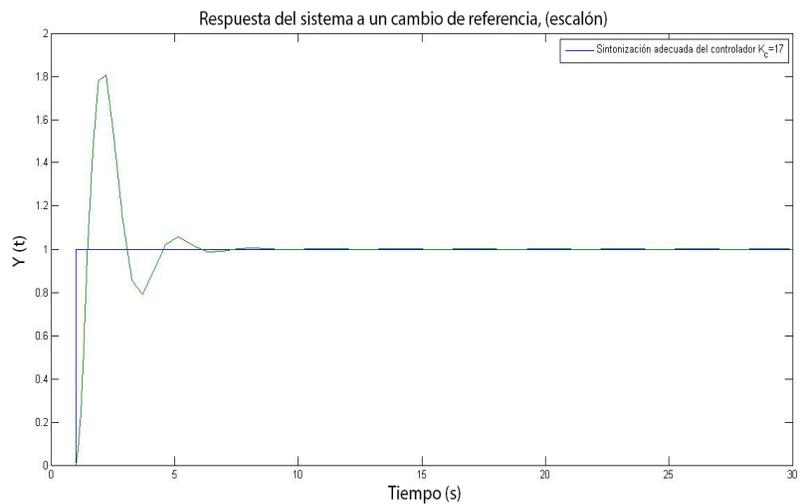


Figura 4. Sintonización adecuada.

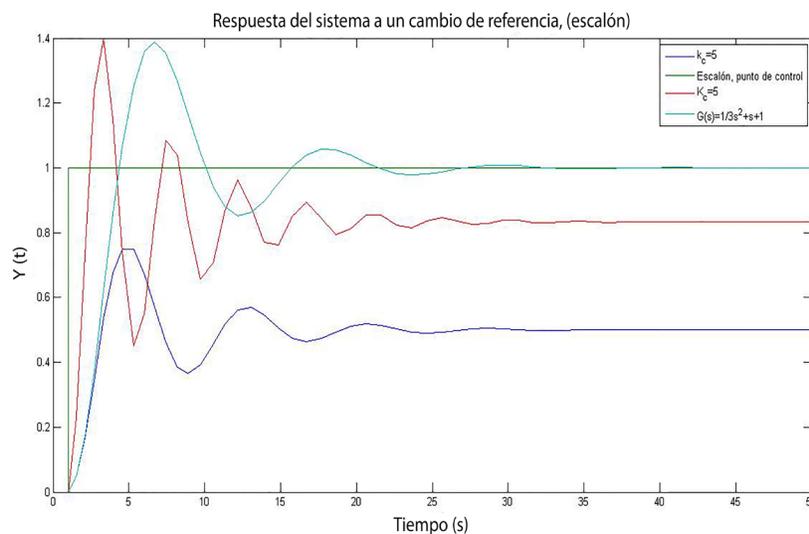


Figura 5. Comportamiento para distintas ganancias del controlador $[K]_c$.

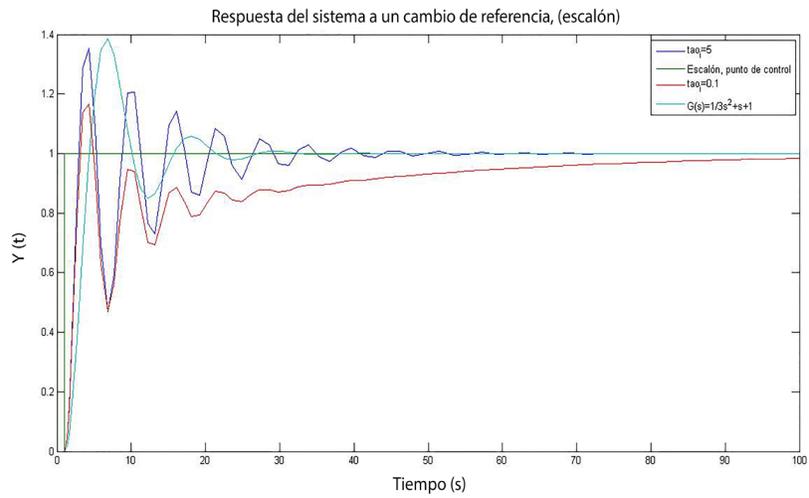


Figura 6. Comportamiento para distintos tiempos de integración τ_I .

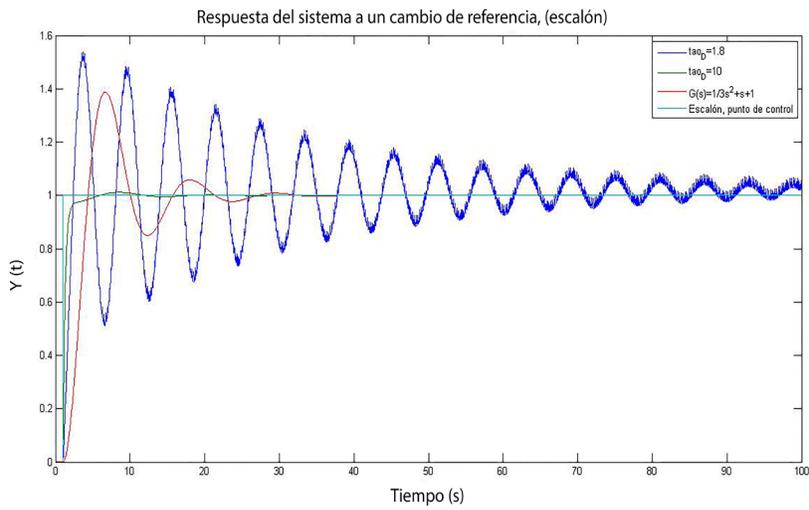


Figura 7. Comportamiento para distintos valores de tiempo de derivación τ_D

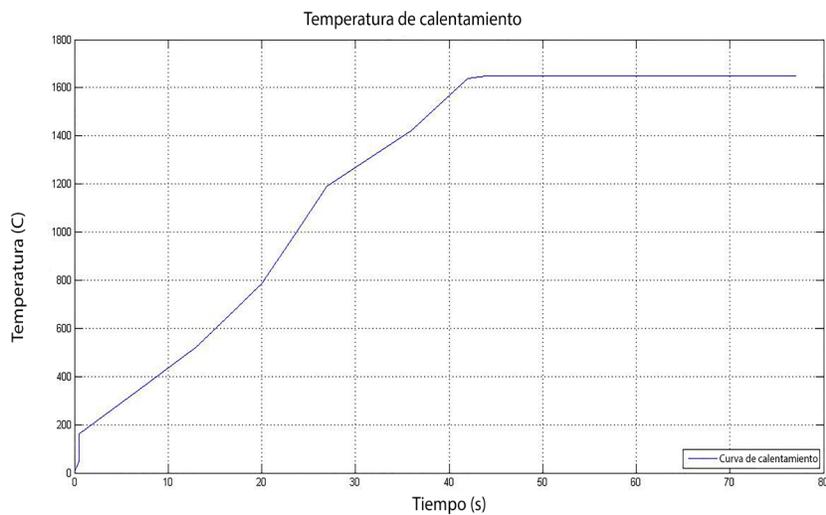


Figura 8. Grafica del proceso.

Cuadro 2. Resultados de temperatura y tiempo para horno de fundición.

Tiempo (hr)	Temperatura (°C)
0.00	0
0.50	50
0.50	160
6.75	340
13.00	520
16.50	653
19.99	785
23.49	988
26.99	1190
35.97	1420
41.98	1640
43.98	1650
51.98	1650
69.04	1650
77.05	1650

Observando que se trata de un sistema de primer orden la función de transferencia va a estar dada por:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{Ts + 1}$$

Donde la ganancia se calcula a continuación:

$$\frac{\Delta Y}{\Delta X} = K = \frac{1650}{10} = 165$$

Donde el ΔY es la variable de salida del sistema y ΔX será la variable de entrada con un valor definido por una función escalón seleccionada. Para encontrar el valor de θ se utilizará el criterio del 62,3% del cambio total del sistema para determinar este parámetro el procedimiento se muestra en la figura 9.

Por lo tanto la función de transferencia va a estar dada de la siguiente manera:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{165e^{-0*s}}{24.44s + 1} = \frac{165}{24.44s + 1}$$

Ahora utilizando la herramienta Simulink de MATLAB se puede simular dicho proceso y proceder a dimensionar el adecuado controlador para cambios en referencia y en perturbaciones. En la figura 10 se muestra el diagrama realizado para simular el proceso, se selecciona un controlador

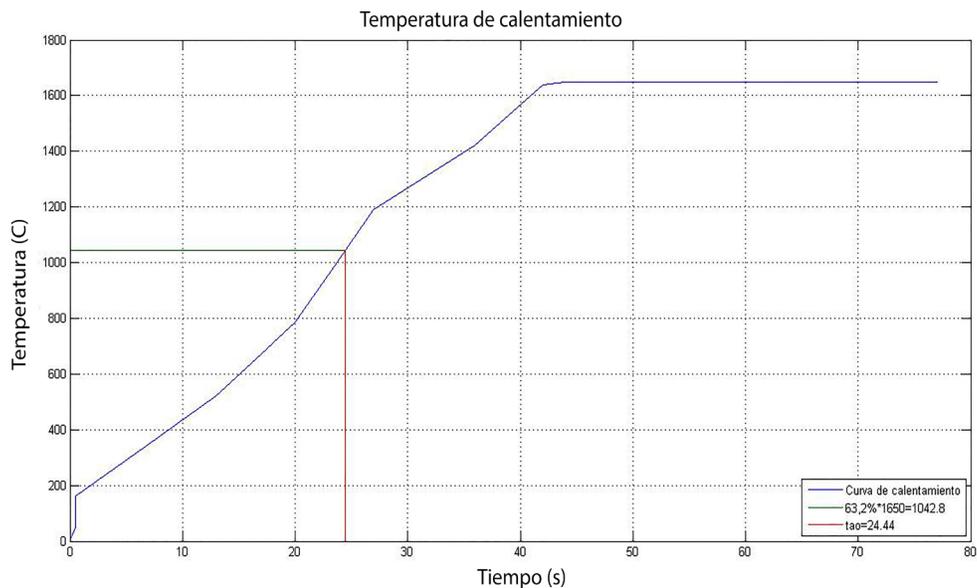


Figura 9. Identificación del proceso.

PI, se analizó utilizando distintos criterios existentes (ITAE, IAE, ISE) y se determinó que la mejor sintonización se obtenía con el criterio ITAE con los valores que se muestran en el cuadro 3.

Observando el sistema cuando se realizan los cambios tanto en referencia como en perturbación podemos ver cómo reacciona el controlador PI sobre el sistema respecto a las alteraciones que está sufriendo y logra controlarlo adecuadamente, este comportamiento lo observamos en la figura 11. Dado que es un sistema de fundición no es tan importante evitar que se den los picos que se muestran en la figura 11 sin embargo esto si se debe

evitar estrictamente en casos de que sea un sistema de tratamiento térmico ya que por una pequeña variación e la temperatura se afectara la microestructura del material.

Conclusiones

Se demuestra que para un controlador P a mayores valores de k_c el sistema disminuye el error de estado pero se vuelve oscilatorio.

Se concluye que para un controlador PI a mayores valores de k_c es más rápida la disminución del error de estado estable pero el sistema se vuelve oscilatorio.

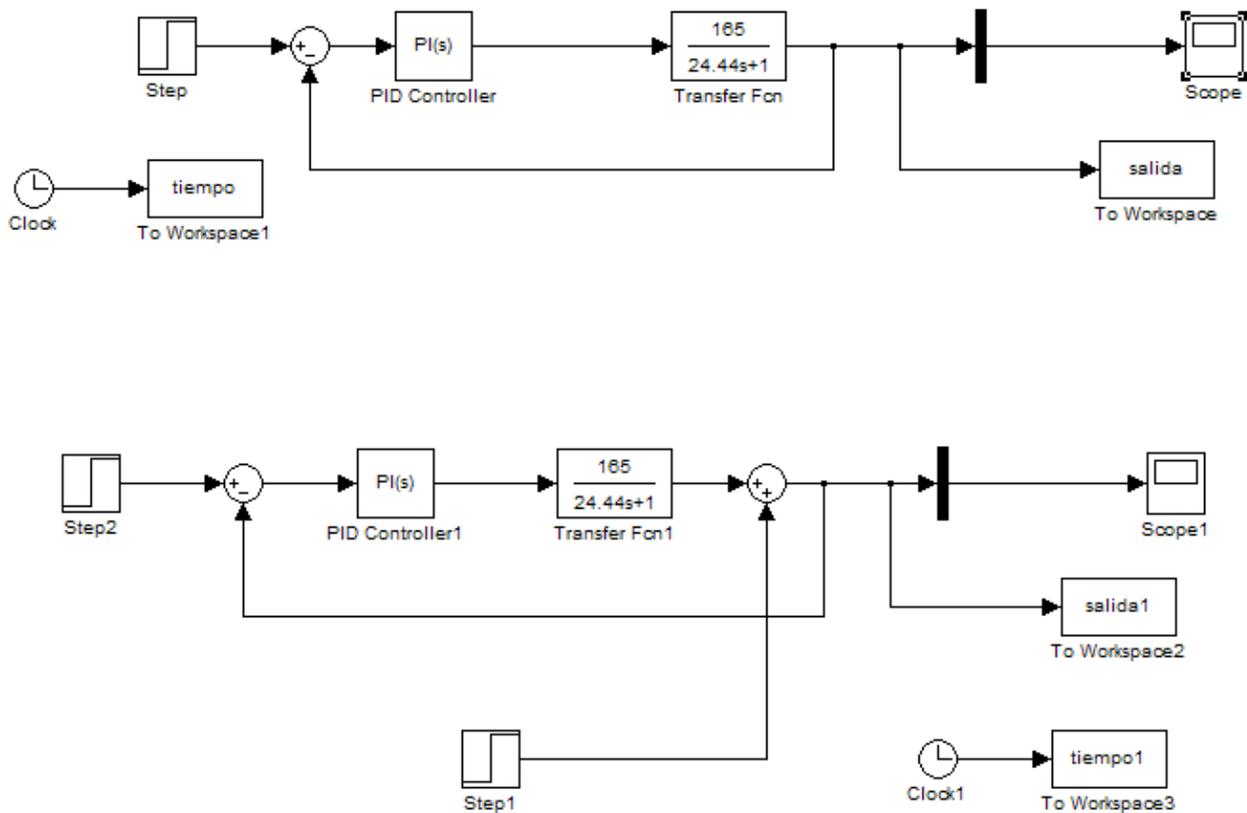


Figura 10. Simulación para cambio en referencia y perturbación del sistema.

Cuadro 3. Valores para la sintonización del controlador:

	Perturbación	Referencia
K	0.0023	0.0007
tI	0.3735	0.5718

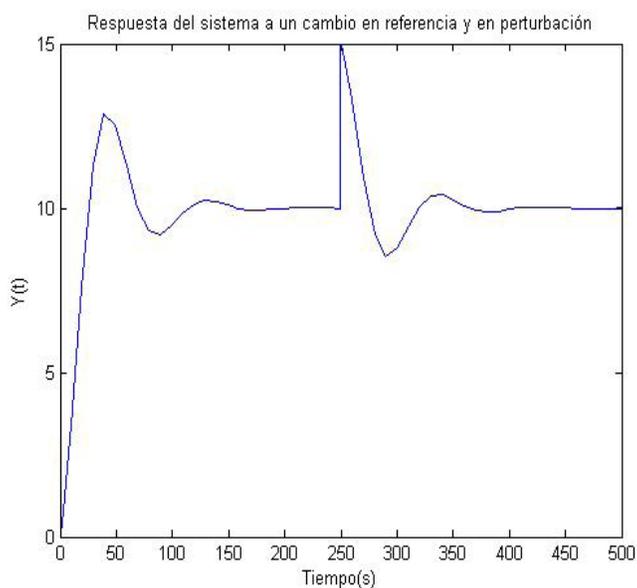


Figura 1. Simulación para cambios en referencia y perturbación.

Se expone que para sistemas no tan estrictos como hornos de fundición pueden haber variaciones en el sistema de control sin embargo para procesos de tratamientos térmicos se debe evitar completamente.

Bibliografía

Amadori, A. (s.f.). *El ABC de la automatización*. Obtenido de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sistemas-de-control-automatico.pdf>

Castillo, F. D. (2007). *Tecnología de Materiales II*.

Madrigal, A., Valverde, J., & Villalobos, E. (2002). *Controladores PID, aplicación al control de velocidad de un motor de cc*. San José.

Mazzone, V. (Marzo de 2002). *Controladores PID*. Obtenido de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

Moore, H. D. (2002). *Materiales y procesos de fabricación*. México, D.F.: LIMUSA.

Nise, N. S. (2012). *Sistemas de control para ingeniería*. México: Grupo Editorial Patria.

R.Mazaeda, C. D. (s.f.). Ajuste Automático de controladores PID. 5.

Smith et al, C. A. (1991). *Control Automático de procesos*. Mexico D.F.: LIMUSA, S.A.

Vergara, M. E. (2010). *Tecnología de Materiales*. México: Trillas.