

Identificación de sistemas de primer orden con multímetro digital¹

Systems identification of first order with digital multimeter

Rubén Darío Cárdenas²

Recibido: 29/04/2014 - Aceptado: 08/19/2014

Cómo citar este artículo: R. Cárdenas. "Identificación de sistemas de primer orden con multímetro digital", IngEam, vol. 2, n.º 2, pp. 21-37, 2015

Resumen

Este artículo presenta el análisis y diseño de un sistema de control automático de temperatura, realizando la identificación del sistema térmico a través de un multímetro digital UT-60A con su respectivo aplicativo (método experimental basado en la respuesta de la planta ante una señal tipo escalón, muestreando 10.000 datos que se tabularon y se graficaron en Excel, lo cual permitió graficar la curva de respuesta del sistema en tiempo real), como resultado de los proyectos de Investigación aplicada del Centro de Automatización Industrial del Sena Regional Caldas, para que de manera didáctica puedan analizar, validar y confrontar la Teoría de Control en una aplicación real. Para realizar la identificación y modelado del sistema térmico se evaluó la respuesta en lazo abierto aplicando una entrada escalón que permitió analizar la dinámica del sistema, el cual fue validado mediante la utilización de dos métodos gráficos a partir de la curva de respuesta, con el fin de realizar las pruebas necesarias en tiempo real apoyados por el programa MATLAB.

Palabras clave: identificación, control automático, multímetro Digital, MATLAB.

Abstract

This article presents the analysis and design of automatic temperature control, making the identification of the thermal system through a digital multimeter UT- 60A with its respective application (experimental method based on plant response to a step signal type , sampling ten thousand (10,000) data that were tabulated and graphed in Excel, which allowed plotting the response curve of the system in real time) as a result of applied research projects being carried out at the Centre for Automation SENA Regional Industrial Caldas, so that in an educational way they can analyze, validate and confront the Control Theory in a Real application software using a Digital Multimeter. To perform the identification and modeling of the thermal system the response was evaluated in open loop by applying a step input which allowed analyzing the dynamics of the system, which was validated by the use of two (2) graphic methods from the response curve, in order to make the necessary real-time testing program supported by the MATLAB.

1 Artículo proveniente del proyecto Uso de las TIC en los procesos de formación del Sena regional Caldas centro de automatización industrial, ejecutado en el periodo 01/2013-01/2015. Grupo de Investigación Electrónica, Automatización y Energías Alternativas, Semillero de Investigación BIOMETRONICA.

2 Ph. D. Information Technology, DsC. CUM LAUDE Electronic Engineering, MSc. Electrical Engineering, Esp. Gerencia en Finanzas, Ingeniero Electrónico, Tecnólogo Profesional en Electrónica y Automatización Industrial. Centro de Automatización Industrial SENA Regional Caldas. Correo electrónico: rdcardenas75@misena.edu.co

Keywords: Identification, Automatic Control, Digital Multimeter, MATLAB.

Introducción

Este artículo se realiza con el fin de presentar un módulo práctico, a través del cual se pueda apoyar la fundamentación de la automatización en el campo del control automático de procesos, pudiendo ver el comportamiento de las variables involucradas, facilitando la labor del instructor y disminuyendo el tiempo de asimilación de estos conceptos por parte de los aprendices, ya que combina las técnicas de identificación, diagnóstico, diseño, control y optimización que permiten implementar e innovar diversos procesos industriales (en empresas de manufactura y de servicios), logrando una mejora continua en los sistemas de costos y de producción bajo estándares de calidad redundando en beneficio de los clientes internos y externos de la empresa.

Este proyecto de investigación aplicada se basará en la identificación y modelado del sistema térmico, se evalúa la respuesta en lazo abierto aplicando una entrada escalón que permitió analizar la dinámica del sistema, el cual fue validado mediante la utilización de 2 métodos gráficos a partir de la curva de respuesta, con el fin de realizar las pruebas necesarias en tiempo real apoyados por el programa MATLAB. El objetivo general fue identificar un sistema de primer orden con multímetro digital, para desarrollar e implementar un sistema de control automáticos de temperatura. Por otro lado, los objetivos específicos son:

- a. Capturar señales de temperatura a través de un multímetro digital UT 60A.
- b. Identificar un sistema de primer orden utilizando métodos gráficos, a partir de los datos registrados por el multímetro Digital UT 60A.
- c. Realizar el modelado matemático del sistema identificado con el multímetro digital UT 60A.
- d. Analizar la estabilidad del sistema tanto en lazo abierto como cerrado con el fin de establecer los parámetros de diseño del controlador.
- e. Diseñar el controlador del sistema de temperatura.
- f. Simular y seleccionar el control más óptimo para el sistema de temperatura.
- g. Implementar el controlador seleccionado.

22

Métodos

El tipo de Investigación realizada es experimental y se trabajó en cuatro etapas: análisis, identificación, diseño e implementación (ver Figura 1).

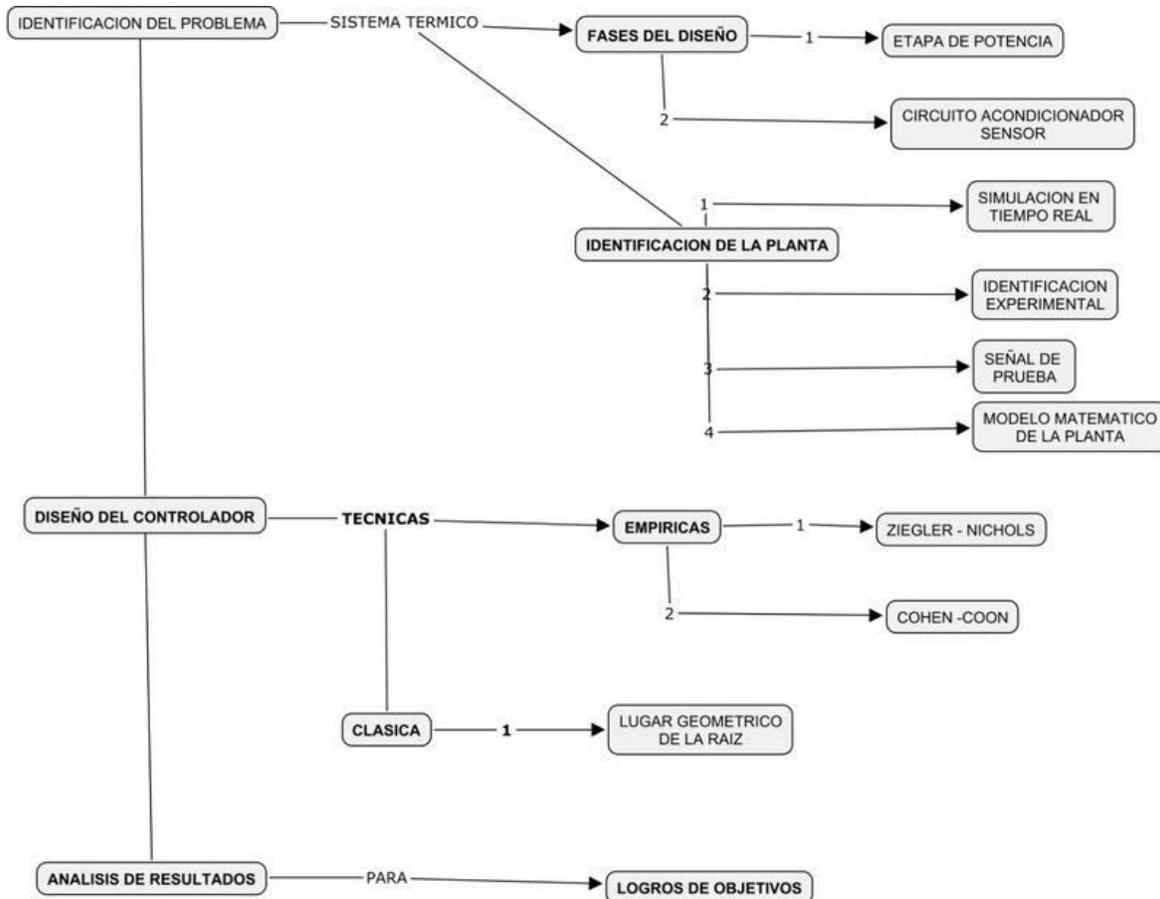


Figura 1.1 Mapa conceptual resumen metodología

Etapa de Análisis: La figura 2 presenta el mapa conceptual de la estructura de la etapa de análisis.

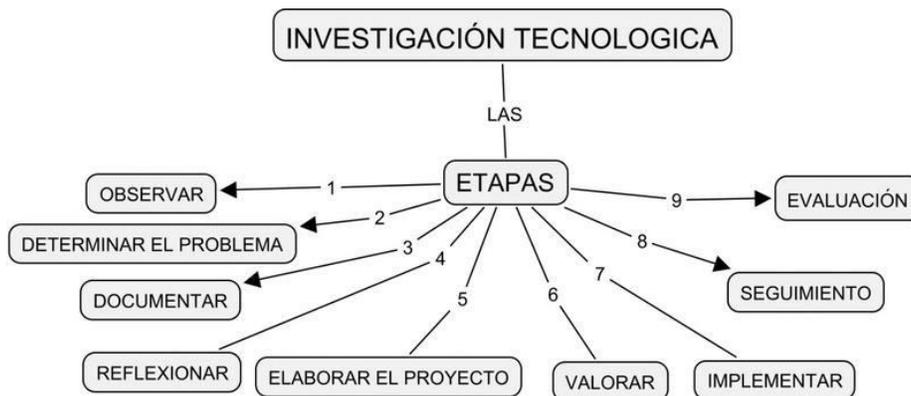


Figura 2. Mapa conceptual etapa de análisis

Etapa de identificación. Se realizaron los siguientes pasos:

1. Selección y montaje del sistema físico.
2. Obtención de datos de entradas y salidas.
3. Examinar los datos: eligiendo el mejor modelo dentro de una estructura, conforme a un criterio de estabilidad, basado en las propiedades de los datos estadísticos.
4. Estimar y validar el modelo analizando las propiedades de este en una simulación para evidenciar la correspondencia con el sistema real.

Etapa de diseño: En esta etapa se realizó lo siguiente:

1. Análisis de la respuesta en función del tiempo para conocer los parámetros de estabilidad del sistema.
2. Obtención de la respuesta bajo el método experimental observando el comportamiento de la planta en tiempo real.
3. Encontrar la constante de tiempo para saber en qué momento la respuesta alcanza un valor determinado.
4. Análisis de estabilidad en lazo abierto.
5. Análisis de estabilidad en lazo cerrado.
6. Diseño del controlador.

Etapa de implementación. Se ejecutó realizando los siguientes pasos:

1. Integración de los elementos que componen el sistema físico y el controlador de temperatura.
2. Pruebas preliminares y ajuste del control diseñado.
3. Simulación en tiempo real del sistema de control de temperatura.
4. Entrega de documentos que sustentan el proyecto.
5. Entrega del controlador de temperatura y documento básico de su funcionamiento al laboratorio de electrónica.

24

Discusiones

1. **Identificación de sistemas:** obtención de forma experimental de un modelo que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso objeto de estudio. Para realizar la identificación se utiliza el software para el multímetro UNI-T ref.UT60A versión 2.0 y se adquieren las muestras, las cuales se verifican con las muestras tomadas con el multímetro UNI-T ref. UT52. Ambos equipos presentan una resolución de 1.0, una diferencia de 0.1 en régimen permanente. Se capturan 226 muestras en 491 segundos, la comunicación se hace por el puerto serial (RS-232). Por último, se tabulan y grafican en Excel para obtener la curva característica del termopar.

El elemento calefactor que produce la excitación en el termopar son dos resistencias de 150 vatios cada una a 55 voltios AC. Como la escala de voltaje está en mV se multiplicó por 100 para visualizar el comportamiento de la curva de respuesta. La gráfica que se muestra a continuación permite ver el comportamiento del mV generado con respecto a la escala de

tiempo respectivo. Se observa que para 20 mV la curva trata de estabilizarse debido a la imposibilidad de las resistencias para entregar más temperatura.

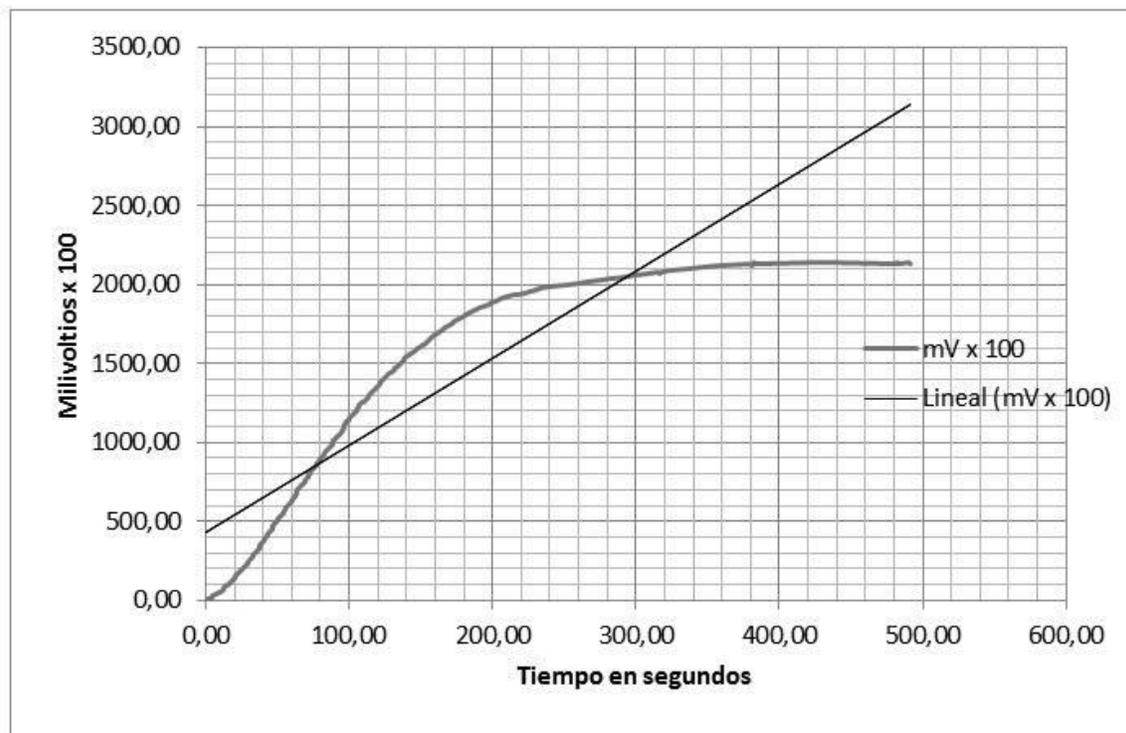


Figura 3. Curva identificación termopar tipo K

La línea recta describe el comportamiento del sistema de calentamiento, pero la tendencia de los mV generados (curva que describe el termopar) muestra una curva lineal con tendencia a infinito ajustándose a las gráficas características de estos instrumentos de medición.

2. Métodos básicos de identificación: identificación analítica enfocada al modelado. Este método requiere conocimiento especializado sobre la tecnología del proceso. Identificación experimental basada en pruebas en lazo abierto y en condiciones estables donde se observa el comportamiento del sistema en tiempo real. En este artículo se presenta el método experimental por considerarse práctico, para fines pedagógicos. El proceso debe mostrar una curva con forma de “s”, estas curvas se generarán a partir de una simulación dinámica de la planta. En procesos tecnológicos la respuesta puede ajustarse mediante un modelo de primer orden con o sin retardo, se elige este modelo porque se puede utilizar en procesos simples o complejos, si no se requiere exactitud, puesto que los sistemas térmicos presentan respuesta monótona creciente sin oscilaciones, siendo la precisión un factor clave en el sistema, la expresión matemática para este modelo es:

$$G(S) = \frac{K \cdot e^{-tds}}{\tau \cdot s + 1} \text{ Ecuación 1}$$

En la ecuación 1, K es la ganancia del proceso, t_d el tiempo de retardo, τ la constante de tiempo. Estos parámetros se obtienen de la respuesta obtenida en el proceso de identificación ante la entrada escalón.

3. Diseño del controlador.

a. Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID

Ziegler y Nichols [1] propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i ; y del tiempo derivativo T_d , con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o de la sintonización de los controles PID la realizan los ingenieros en el sitio mediante experimentos sobre la planta, se han propuesto numerosas reglas de sintonización para los controladores PID desde la propuesta de Ziegler-Nichols, sin embargo, aquí solo se presentan las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, en ambos se pretende obtener un 25 % de sobrepaso máximo en la respuesta escalón. Para este artículo solo se tomará el método uno, el cual plantea la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario que se obtiene de manera experimental.

Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la figura 4 (si la respuesta no exhibe una curva con forma de S este método no es pertinente.) Tales curvas de respuesta escalón se generan experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta. La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea $c(t) = K$, como se aprecia en la figura 4.

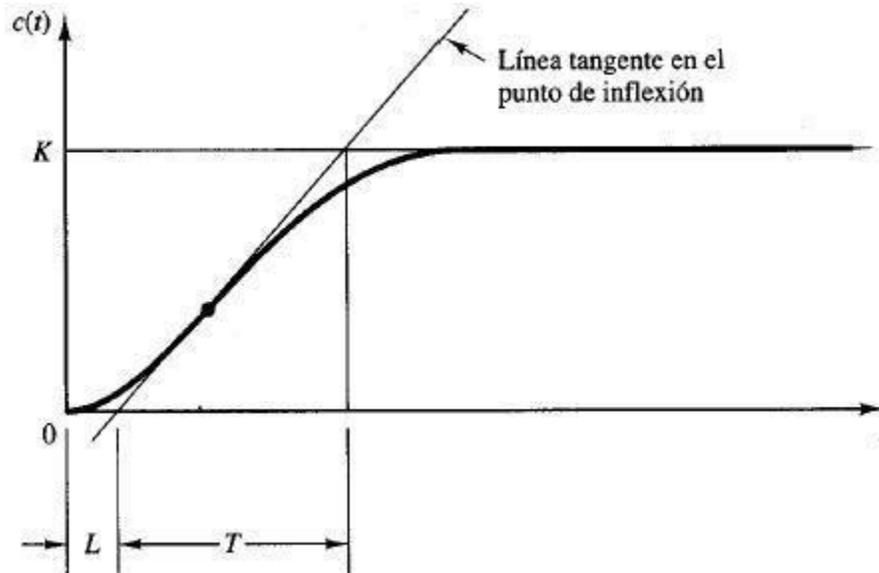


Figura 4. Curva de respuesta con forma de S

Ziegler y Nichols [1] sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que aparece en la Tabla 1. Se observa que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce una curva de respuesta en forma de S.

Tabla 1. Reglas de Ziegler-Nichols basadas en la respuesta escalón de la planta

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

b. Método de la curva de reacción

Desarrollado por Cohen y Coon [2], donde se considera un sistema cuyo bucle de control ha sido "abierto" mediante la desconexión del elemento final de control desde el controlador (es decir, la señal de control es manejada por el diseñador, y no por el controlador). De manera que si el diseñador introdujese una señal consistente en un escalón de amplitud (Y) el actuador final de control recibiría un brusco cambio de posición. Y Si se registra la medición de la salida en el tiempo se obtendrá la curva de reacción del proceso (o del sistema).

El gran aporte de Cohen y Coon [2] fue destacar que para muchos procesos observados la respuesta puede ser bien modelada por un primer orden con retardo, con tres parámetros fáciles

de estimar, la ganancia estática (K), el tiempo de respuesta (τ) y el tiempo de retardo (θ). El desarrollo arroja un conjunto de valores recomendable para los parámetros de cualquiera de los tres tipos de controlador (proporcional, integral y derivativo) (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Reglas de Cohen - Coon

I	K_C	τ_I	τ_D
P	$K_C = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left(1 + \frac{\theta}{3\tau} \right)$	No Aplicable	No Aplicable
PI	$K_C = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left(0,9 + \frac{\theta}{12\tau} \right)$	$\tau_I = \theta \frac{30 + 3\theta/\tau}{9 + 20\theta/\tau}$	No Aplicable
PID	$K_C = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau} \right)$	$\tau_I = \theta \frac{32 + 6\theta/\tau}{13 + 8\theta/\tau}$	$\tau_D = \theta \frac{4}{11 + 2\theta/\tau}$

Una vez efectuada la identificación de la planta se aplican las técnicas empíricas de sintonización de parámetros del controlador [3], como lo son las reglas de Ziegler-Nichols o el método de Cohen-Coon. Después de realizar el análisis de estabilidad del sistema por el método Lugar Geométrico de las Raíces [4], se observó que el error es cero en régimen permanente, por lo tanto se aplicara un PI o un PID para que el tipo de sistema sea uno [5].

Resultados

Pruebas experimentales de identificación.

La planta seleccionada consta de un cilindro macizo de bronce, una resistencia tipo cartucho y un instrumento de medida (termopar tipo k). El volumen del cilindro es:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot a \quad \text{Dónde: } \pi = 3.1416 \quad r = \text{radio (12.75mm)} \quad a = \text{altura (63mm)}$$

$$V = 3.1416 \times (12.75)^2 \times 63. \quad V = 32174.5 \text{ mm}^3$$

Coefficiente de conductividad térmica para el bronce, 116-186 $\frac{W}{(m.K)}$

Una resistencia calefactora de 150 vatios a 55 voltios, de 6.3mm de diámetro y una longitud de 90 mm. Un termopar tipo k con bulbo de 3.5 mm y contratuerca de fijación roscada ¼ NPT. El cilindro de bronce lleva 2 perforaciones a centro, una para la resistencia de 6.5mm de diámetro y una profundidad de 30mm, otra para el termopar de 6mm de diámetro y una profundidad de 15mm, quedando 18mm de separación entre el elemento calefactor y el instrumento de medición.

Para la identificación del sistema se conecta el multímetro UT60A y UT52 en paralelo con la señal del termopar tipo k, el UT60A a su vez se conecta con el computador por el puerto serie con conector DB-9 y bajo protocolo (RS-232). La fuente ATX-550 W se utiliza como generadora que con la ayuda de un pulsador y un relé se genera un escalón que excita la resistencia. Se conecta en lazo abierto toda la planta, y se inicia la captura de 10000 muestras para ser tabuladas y graficadas en Excel (Ver figura 5).



Figura 5. Planta en lazo abierto

En este proceso, los datos son almacenados y organizados, las muestras obtenidas se depuran, dado que en promedio se capturan tres datos por segundo, con los resultados se procederá a graficar. A continuación se muestra el resumen de la tabla 3 utilizada (diez mil muestras).

Tabla 3. Resumen de tabla de datos para graficar

No Muestra	Tiempo	DC/AC	Milivoltios	Unit	AUTO	Tiempo (sg)	mV x 10
1	08:02:52 p.m.	DC	000.0	mV	AUTO	0	0,00
43	08:03:07 p.m.	DC	000.0	mV	AUTO	15	0,00
44	08:03:07 p.m.	DC	000.1	mV	AUTO	111	1,00
317	08:04:43 p.m.	DC	000.1	mV	AUTO	162	2,00
318	08:04:43 p.m.	DC	000.2	mV	AUTO	236	3,00
462	08:05:34 p.m.	DC	000.2	mV	AUTO	298	4,00
463	08:05:34	DC	000.3	mV	AUTO	378	5,00

	p.m.						
675	08:06:48 p.m.	DC	000.3	mV	AUTO	482	6,00
676	08:06:48 p.m.	DC	000.4	mV	AUTO	730	7,00
852	08:07:50 p.m.	DC	000.4	mV	AUTO	1863	8,00
853	08:07:50 p.m.	DC	000.5	mV	AUTO	3453	8,00
1105	08:09:19 p.m.	DC	000.5	mV	AUTO		
1106	08:09:19 p.m.	DC	000.6	mV	AUTO		
1379	08:10:54 p.m.	DC	000.6	mV	AUTO		
1380	08:10:55 p.m.	DC	000.7	mV	AUTO		
2089	08:15:03 p.m.	DC	000.7	mV	AUTO		
2090	08:15:03 p.m.	DC	000.8	mV	AUTO		
5327	08:33:56 p.m.	DC	000.8	mV	AUTO		
5328	08:33:56 p.m.	DC	000.8	mV	AUTO		
10001	09:01:11 p.m.	DC	000.8	mV	AUTO		

En la tabla 3 se muestra la recapitulación donde se aprecia el número total de muestras que va de la numero 1 en el tiempo 8:02:52 hasta la 10001 en el tiempo 9:01:11, lo que da un tiempo total de muestreo de 3453 segundos, en este caso se toman como referencia para graficar hasta la muestra 10001 dado que la tendencia de muestreo evidencia que el sistema se ha estabilizado en 0.8 mV.

Los datos antes mencionados se organizaron y el milivoltaje se multiplica por diez para ser graficados con facilidad, y el tiempo se da en segundos a partir de cero, en este se encuentra el tiempo de retardo y la constante de tiempo, con las que se integra la función de transferencia del sistema. La figura 6 representa el comportamiento de la planta térmica bajo el principio de transferencia de calor por conducción. Este tipo de plantas son de dinámicas lentas y el tiempo empleado en la captura de muestras es elevado.

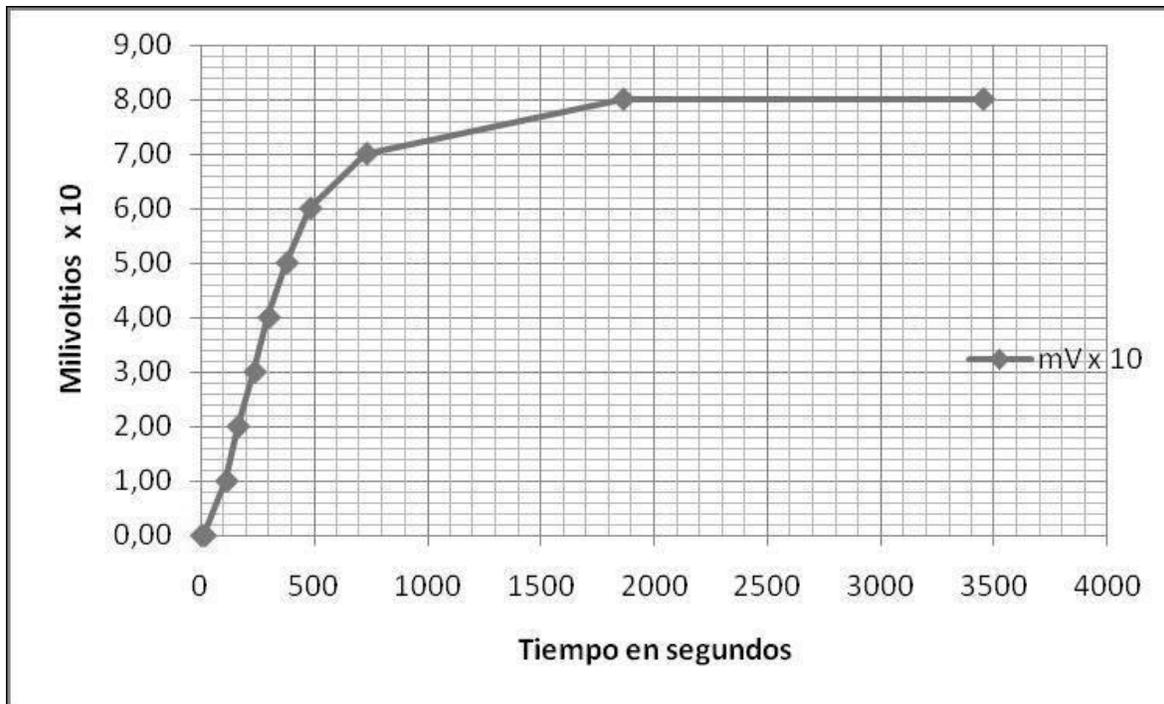


Figura 6. Curva de reacción del Sistema térmico

Los puntos señalados en la figura 6 son los tomados de la tabulación. Basado en los datos de la tabla 3 y en la curva de reacción se encuentran los tiempos T_d , τ , y la ganancia del sistema, para completar la función de transferencia que se ajusta a la planta. Para hallar la dinámica del sistema se utiliza el método de los dos puntos, la idea es obtener dos tiempos, primero el tiempo al cual tiene lugar el 63.2% del cambio total ($t_{63.2} : 0.632 \Delta T$) y después el tiempo al cual tiene lugar el 28.3 % del cambio total ($t_{28.3} : 0.283 \Delta T$).

31

Se aplica aproximación de PADE y se reemplaza en la función de transferencia, después de reemplazar valores y graficar en MATLAB se obtuvo la curva de la figura 6, lo que muestra que T_{ao} se encuentra en las coordenadas 377.3, 0.51, este tiempo equivale a 377.3 segundos.

$T_{s\ 5\%}$ = Tiempo de estabilización del 5 %.

$T_{s\ 5\%}$, es el tiempo que tarda el sistema en ingresar a la franja del 5 %, esta franja resulta de sacar el 5 %, a la salida del sistema, el valor resultante se le suma y resta a la salida generándose una franja alrededor de la salida. Se encuentra en las coordenadas 977.3, 0.76, este equivale a 977.3 segundos.

$T_{s\ 2\%}$ = Tiempo de estabilización del 2%.

$T_{s\ 2\%}$, es el tiempo que tarda el sistema en ingresar a la franja del 2 %, esta franja resulta de sacar el 2 %, a la salida del sistema, el valor resultante se le suma y resta a la salida generándose una franja alrededor de la salida. Se encuentra en las coordenadas 1295, 0.784, este equivale a 1295 segundos.

El tiempo que tarda el sistema en estabilizarse es de 1741 segundos. Después de aplicar el Método de los tres puntos, remplazar valores y graficar en MATLAB se obtuvo la curva de la figura 7 y se observa que $T_u =$ Tiempo de respuesta. T_u se encuentra en las coordenadas 22.73,-0.000000002732, este es el tiempo que tarda el sistema en producir un cambio en la variable manipulada (22.73 segundos).

$T_g =$ Tiempo de compensación.

T_g , es la diferencia entre T_u y el τ

$$T_g = \tau - T_u$$

$$T_g = 386.4 - 22.73$$

$$T_g = 363.67$$

$\tau =$ Tiempo en alcanzar el 63.2 % del cambio total.

τ , se encuentra en las coordenadas 386,4 0.5056, este tiempo equivale a 386.4 segundos

T_s del 5 % = Tiempo de estabilización del 5 %.

T_s del 5 %, es el tiempo que tarda el sistema en ingresar a la franja del 5 %, esta franja resulta de sacar el 5 % a la salida del sistema, el valor resultante se le suma y resta a la salida generándose una franja alrededor de la salida. Se encuentra en las coordenadas 840.9, 0.76, el cual equivale a 840.9 segundos.

T_s del 2 % = Tiempo de estabilización del 2 %.

T_s del 2 % es el tiempo que tarda el sistema en ingresar a la franja del 2 %, esta franja resulta de sacar el 2 %, a la salida del sistema, el valor resultante se le suma y resta a la salida generándose una franja alrededor de la salida. Se encuentra en las coordenadas 1014, 0.784, la cual equivale a 1014.5 segundos.

El tiempo que tarda el sistema en estabilizarse es de 1595 segundos. Se realiza un algoritmo en MATLAB [6] para Confrontación de las curvas (Ver Figura 7).

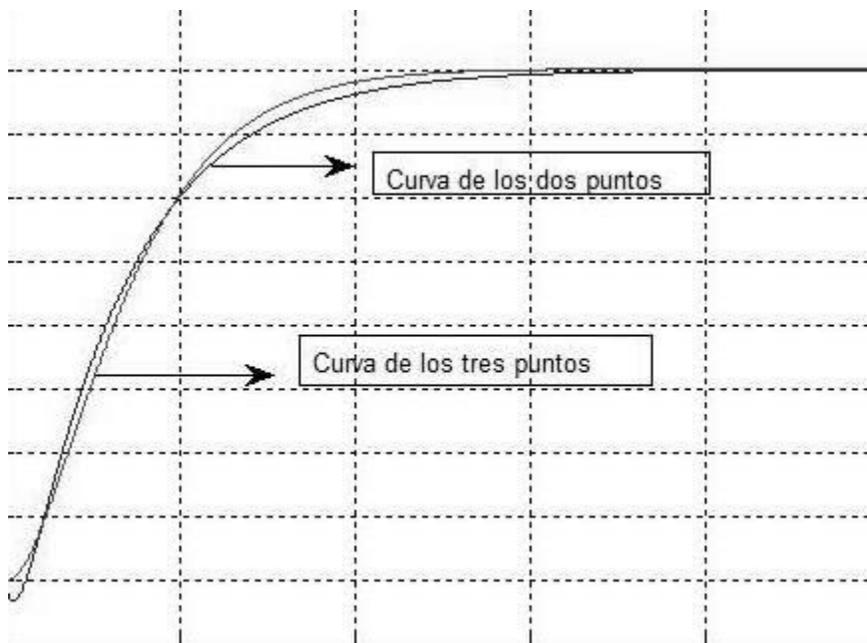


Figura 7. Curvas de reacción lazo abierto.

La curva que presenta mejor comportamiento y se ajusta al sistema inicial es la modelada por el método de los dos puntos, este modelo será el utilizado para el diseño del controlador, basados en las curvas de respuesta en lazo cerrado con los controladores PI, PID.

Se realiza la simulación del Sistema en el Toolbox Simulink de MATLAB [7] como muestra la figura 8 y las curvas de respuesta del sistema sintonizado aplicando las reglas de Ziegler-Nichols que se puede ver en la figura 9.

33

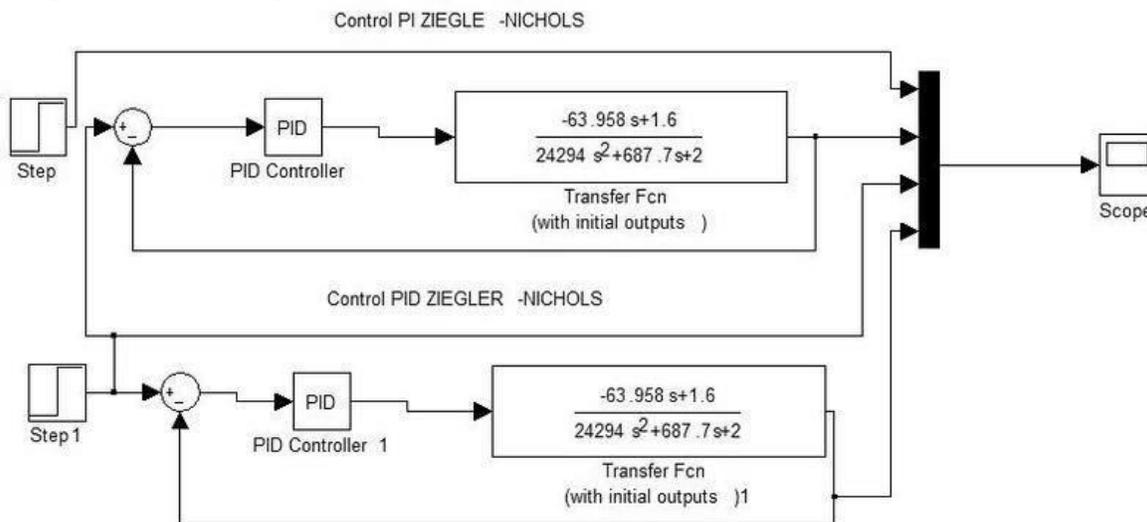


Figura 8. Respuesta a un escalón en lazo cerrado sintonizado aplicando las Reglas de Ziegler-Nichols

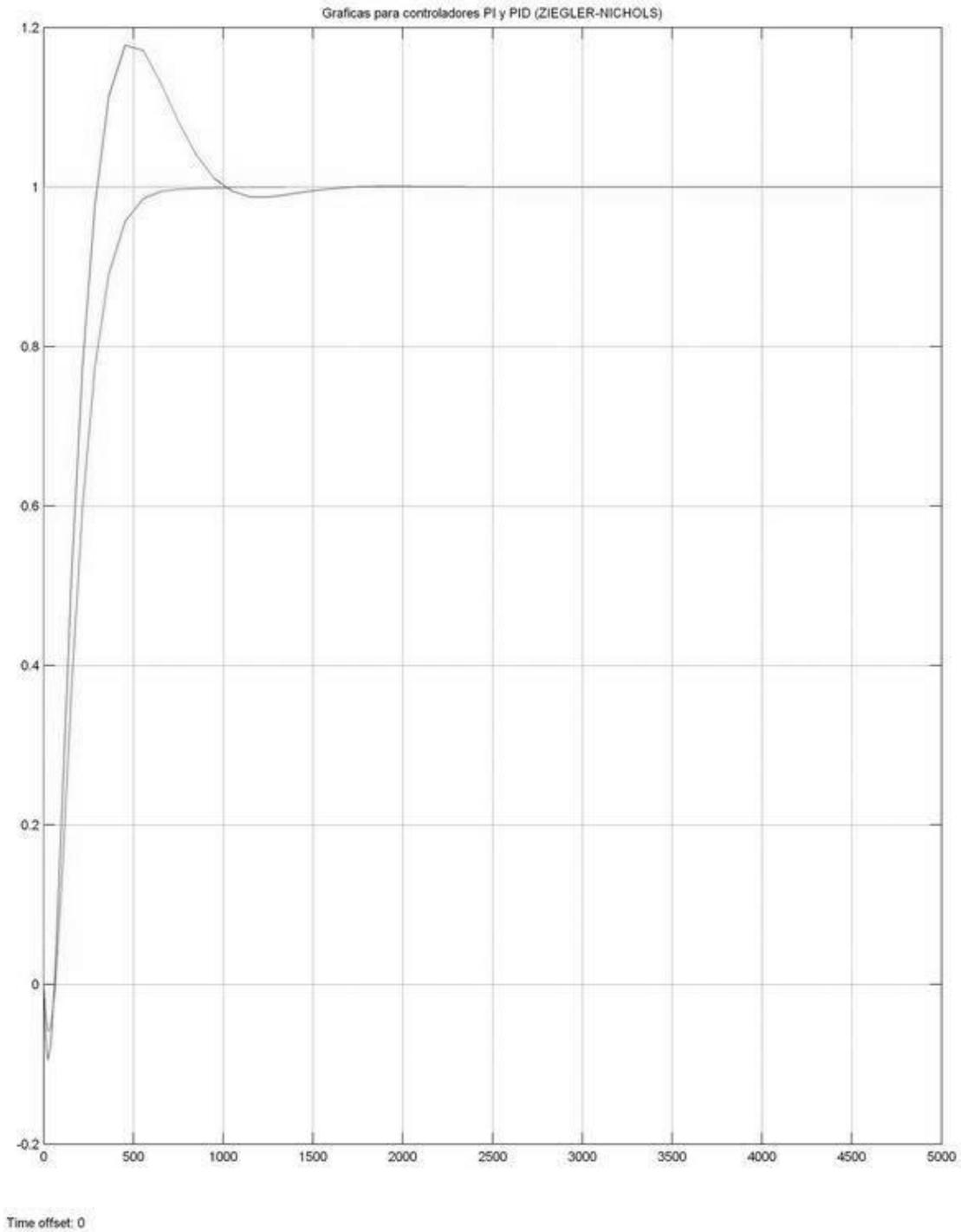


Figura 9. Curvas de respuesta a un escalón para un PI y PID sintonizado aplicando las Reglas de Ziegler-Nichols

Se realiza la simulación del Sistema en el Toolbox Simulink de MATLAB como muestra la figura 10 y las curvas de respuesta del sistema sintonizado aplicando las reglas de Cohen -Coon (ver en la figura 11).

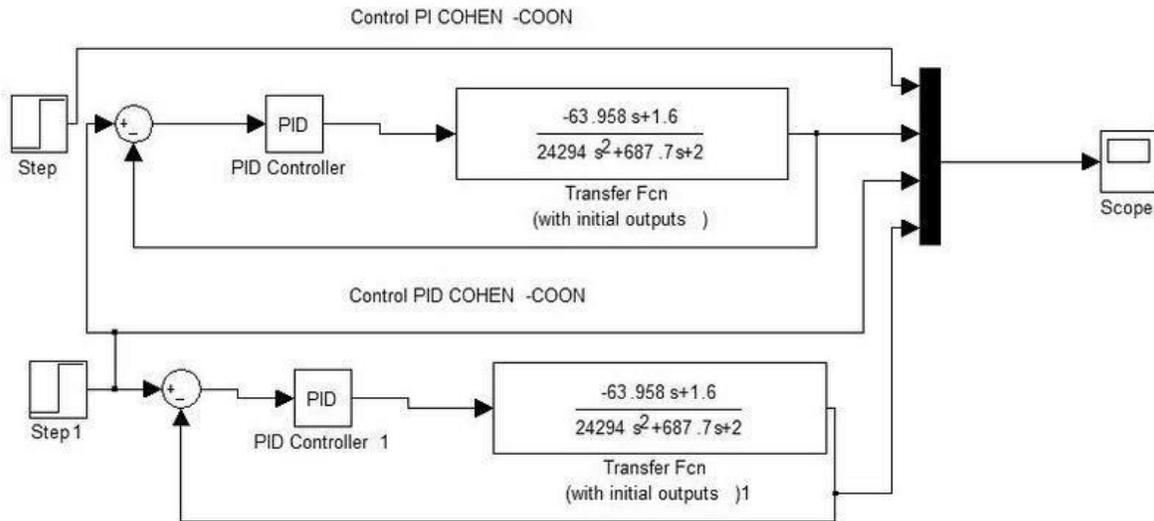


Figura 2. Respuesta a un escalón en lazo cerrado sistema sintonizado aplicando las Reglas de Cohen -Coon

35

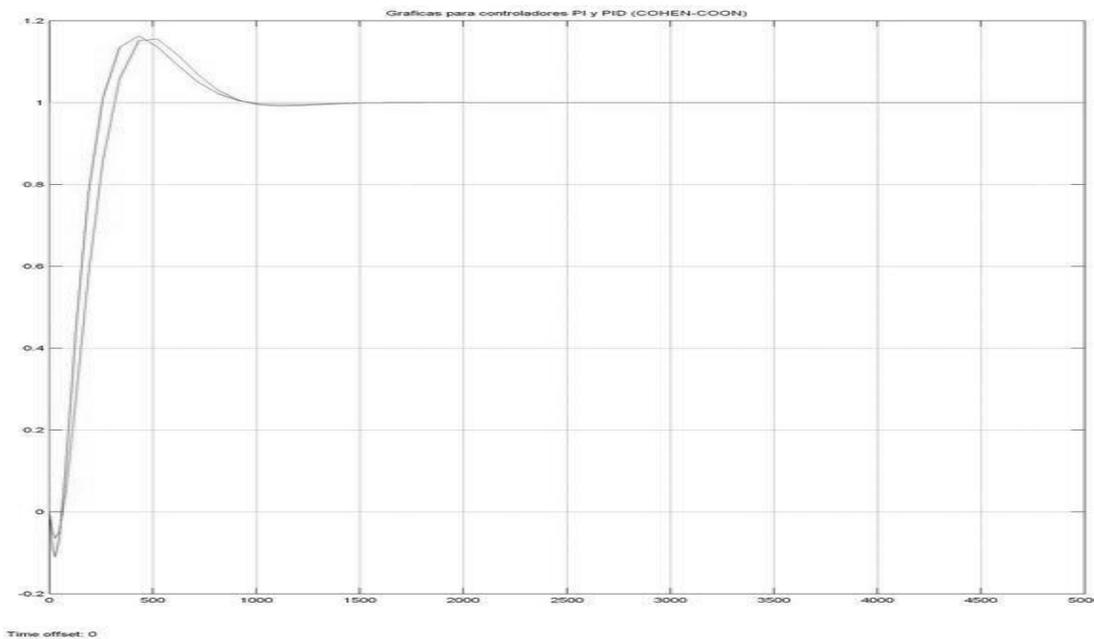


Figura 11 Curva de respuesta a un escalón con un PI y PID sistema sintonizado aplicando las Reglas de Cohen - Coon

La curva describe el comportamiento de la planta ante un escalón unitario con una acción de control (PI,) y (PID). La acción de control (PID) es más rápida que el (PI) pero presenta un tiempo de retardo y estabilización mayores, su sobrepaso no supera el 20 % para ninguno de los dos casos.

Implementación

El modelo matemático a implementar es el obtenido por el método de Cohen - Coon, para controladores (PID).Las ecuaciones características se definen a continuación.

Ecuación característica de la planta:

$$G(s) = \frac{1.6 - 63.9584(s)}{24294.27845(s^2) + 687.7(s) + 2}$$

Ecuación control (PID) método de Cohen - Coon:

$$G_{PID}(s) = \frac{88.092(s)^2 + 2.782(s) + 0.0138}{s}$$

Ecuación que define la planta en lazo cerrado:

$$G(s)_{lc} = \frac{-0.150_3 + 0.00099_{s^2} + 0.0000955_s + 0.000000585}{s^3 + 0.0348_{s^2} + 0.000298_s + 0.00000117}$$

Conclusiones

1. Para realizar la identificación y modelado del sistema térmico se evalúa la respuesta en lazo abierto aplicando una entrada escalón que permitió analizar la dinámica del sistema, el cual fue validado mediante la utilización de dos métodos gráficos a partir de la curva de respuesta, con el fin de realizar las pruebas necesarias en tiempo real apoyados por el programa MATLAB
2. Como innovación se realiza la identificación del sistema térmico a través de un multímetro digital UT-60A con su respectivo aplicativo (método experimental basado en la respuesta de la planta ante una señal tipo escalón, muestreando 10.000 datos que se tabularon y se graficaron en Excel, el cual permitió graficar la curva de respuesta del sistema en tiempo real)
3. La utilización del método de los dos puntos y el método de los tres puntos arroja dos ecuaciones que presentan un componente llamado tiempo muerto, el cual es modelado mediante la aproximación de PADE, generando un incremento en los polos de las ecuaciones (para esto existe poca bibliografía).
4. El diseño de un sistema de control de temperatura basado en las reglas de sintonía de ZIEGLER-NICHOLS y Cohen Coon, permiten encontrar los parámetros (KP,KD,KI) adecuados para el sistema térmico, utilizando el modelo gráfico de SIMULINK de MATLAB se pueden ver las curvas de respuesta en lazo cerrado ante una estrada escalón, pudiendo

evaluar de modo visual su comportamiento en cuanto a velocidad de respuesta y tiempo de estabilización, para la obtención de los criterios se utilizó el modelo matemático de lazo cerrado, el cual se evalúa en MATLAB bajo los conceptos de curva de respuesta y lugar geométrico de las raíces, donde se concluye que los parámetros más adecuados para el sistema térmico son los obtenidos por el método de Cohen - Coon para el controlador (PID), por presentar menor tiempo de estabilización, menor sobrepaso, y sobreoscilaciones inferiores al cuatro por ciento.

Referencias bibliográficas

- [1] J. Mejía, J. Mejía & C. Gutierrez, C. “Sintonización de controladores PID: Una comparación entre dos algoritmos evolutivos” en MA Cruz-Chávez. Atlacomulco: CICos, 2011, pp. 5-15, 2011.
- [2] F. Arteaga, W. García, & J. Moreno. “Multimedia PID: software multimedia para el aprendizaje de controladores y sus criterios de entonamiento”. Revista Ingeniería UC, vol. 20 n.º 2, pp. 52-59, 2013
- [3] C. Betancor, J., Cerezo, & A. Vega. Diseño de un sistema de control de temperatura [En línea]. 2013, 14 de febrero. Disponible en <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/taee:congreso-2006-1116/S3F04.pdf>
- [4] R. Dorf. *Sistemas modernos de control*. Ciudad de México, México: Addison-Wesley, 1989
- [5] R. Cárdenas, O. Orozco, C. Pérez & P. Pineda. *Diseño, análisis y simulación de un prototipo de péndulo invertido y su respectivo sistema de control para el laboratorio de control de la UAN sede Manizales*, Múnich, Alemania: Editorial GRIN GmbH, 2009
- [6] K. Ogata. *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Ciudad de México, México: Prentice-Hall Hispanoamérica, 1996
- [7] K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Ciudad de México, México: Prentice-Hall Hispanoamérica, 1998.