

CONTROLADOR PID DE TEMPERATURA DE TIPO DIDACTICO

M. Bañuelos S., J. Castillo H., G. Rayo L. S. Quintana T., R. Damián Z., J. Pérez S.
Lab. de Electrónica. Centro de Instrumentos, UNAM. Apdo. Postal 70-186.
México, D.F. C.P. 04510. Tel. (5) 622-86-08 ext. 111. FAX: (5) 622-86-53
E-mail: mike@aleph.cinstrum.unam.mx

RESUMEN

La enseñanza de la teoría de sistemas de control representa un reto en los planes de estudio de licenciatura. Una alternativa para atraer el interés de los estudiantes consiste en darles la oportunidad de construir su propio sistema de control. De esta manera, ellos se sentirán con más confianza hacia esta materia que de otra manera parece árida y teórica. En este artículo, presentamos un sistema de control de temperatura de agua, simple y de bajo costo, basado en una parrilla eléctrica. El sistema consiste en un sensor de temperatura de circuito integrado, un controlador PID analógico y una etapa de potencia cuyo costo es menor a los \$100 pesos.

ABSTRACT

Teaching of control systems theory represents a challenge in undergraduate engineering curricula. One alternative to attract students interest is to give them the chance to build their own control system. In this way, they will feel confident towards this otherwise arid and theoretic subject. In this paper, we present a simple and low cost water temperature control system based on an electric grill. The system consists of an IC temperature sensor, an analog PID controller and a power stage whose cost is below \$100 pesos.

1 INTRODUCCIÓN

El impartir cursos a nivel licenciatura sobre teoría de sistemas de control se enfrenta a varios problemas. Por un lado, se tiene que enfrentar con el prejuicio de los estudiantes de que el control es una materia árida y con un contenido matemático fuerte; y por el otro, el contar con laboratorios donde los alumnos puedan comprobar de una forma más clara los fundamentos de la teoría requiere de equipo costoso. Además, por sí sólo el equipo más completo no garantiza un adecuado aprendizaje de los conceptos básicos de la teoría de control. Se da el caso, por ejemplo, de que una vez teniendo equipo de laboratorio, no se tiene el cuidado de desarrollar un manual de prácticas adecuado y simplemente se copian las prácticas sugeridas por el fabricante del equipo, las cuales pueden resultar de muy poca utilidad.

Todo esto tiene como consecuencia que sea muy difícil motivar a los estudiantes para que se interesen y aprendan los principios básicos de la teoría de sistemas de control; lo cual propicia, que cuando en la actividad profesional se ven obligados a interactuar con sistemas de control, actúen como operadores de equipo, en lugar de desarrolladores de tecnología.

Una alternativa para resolver este problema la proporcionan los programas de simulación, los cuales definitivamente acercan al alumno a la comprensión de los principios de la teoría de control. Sin embargo, lo ideal es que los estudiantes ataquen un problema de control real y puedan ver el comportamiento de las variables físicas involucradas.

En este sentido, nosotros proponemos que los estudiantes construyan un sencillo y económico controlador electrónico de temperatura. Esto les permitirá poner en práctica los conceptos relativos a un controlador PID (proporcional, integral y derivativo), y lo más importante, es que comprobarán que son capaces de implantar un sistema de control electrónico con el cual efectivamente pueden manipular una variable física. El enfoque que nosotros proponemos, contrasta con el comúnmente seguido en las prácticas de laboratorio, donde a los estudiantes se les da una serie de

instrucciones sobre como conectar algunos módulos y después se les pide que tomen algunas lecturas. Nosotros consideramos que, dado que los estudiantes se involucran en la construcción de todos los elementos que forman el sistema de control, se puede obtener un entendimiento integral del problema de control y mejorar el nivel de motivación.

El sistema que proponemos consiste en un controlador PID analógico, basado en amplificadores operacionales de propósito general. El controlador está implementado de tal manera que fácilmente se distinguen cada una de las partes del controlador: sumador, acción proporcional, acción integral y acción derivativa. El sistema también cuenta con una etapa de potencia, que utiliza el método de “paquetes de onda” para regular la potencia entregada a una parrilla eléctrica. En la parrilla se coloca una tasa con agua, y la temperatura se mide mediante un sensor de temperatura integrado (LM35) o un termistor. Considerando que se cuenta con una fuente de alimentación y un multímetro, el resto de los componentes tiene un precio inferior a los \$100 pesos. Esto representa una excelente inversión si se considera los beneficios obtenidos desde el punto de vista didáctico.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la figura 1, se muestra un diagrama simplificado del sistema de control de temperatura. El sistema está constituido por un controlador PID analógico, una etapa de potencia, una parrilla eléctrica y un sensor de temperatura.

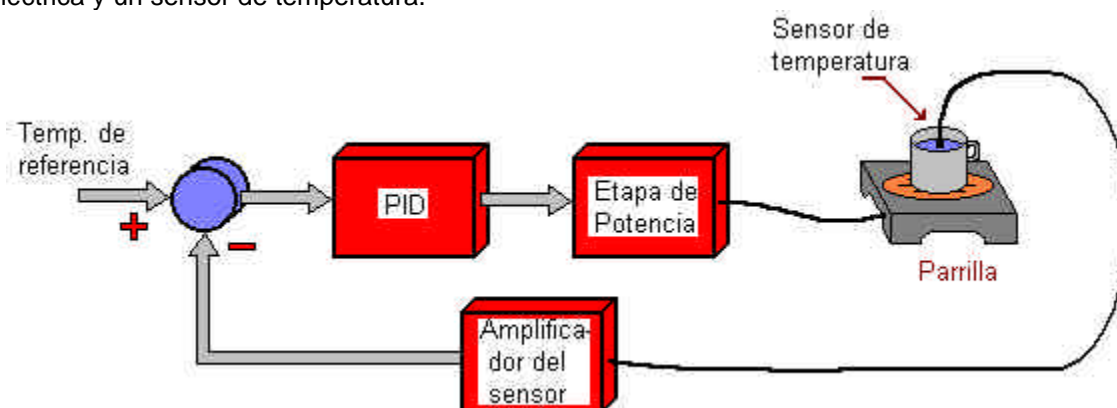


Figura 1. Sistema de control de temperatura.

2.1 Controlador PID

El controlador utilizado es un controlador PID paralelo, el cual está constituido por una etapa de acción de control proporcional, una etapa derivativa y una etapa integral, de acuerdo con el diagrama de la figura 2.

El controlador tiene entonces una función de transferencia dada por

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (1),$$

donde K_p es la constante de acción proporcional, T_i es la constante de tiempo de la acción integral, T_d es la constante de tiempo de la acción derivativa, $E(s)$ es la señal de error y $U(s)$ es la señal de control.

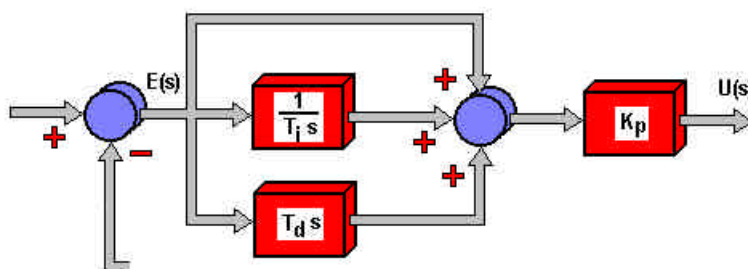


Figura 2. Controlador PID paralelo.

En la figura 3, se muestra un diagrama simplificado de la implementación electrónica utilizada, la cual consta de cuatro etapas. Por facilidad de implementación, se utilizaron circuitos integradores y derivadores inversores, así como un sumador inversor y un circuito de control de ganancia (acción proporcional, K_p) inversor. Esto genera tres etapas inversoras, y para compensar el signo, se añadió un amplificador diferencial que calcula el error, pero con signo negativo. De esta manera, el circuito da la apariencia de tener retroalimentación negativa, pero en realidad no es así.

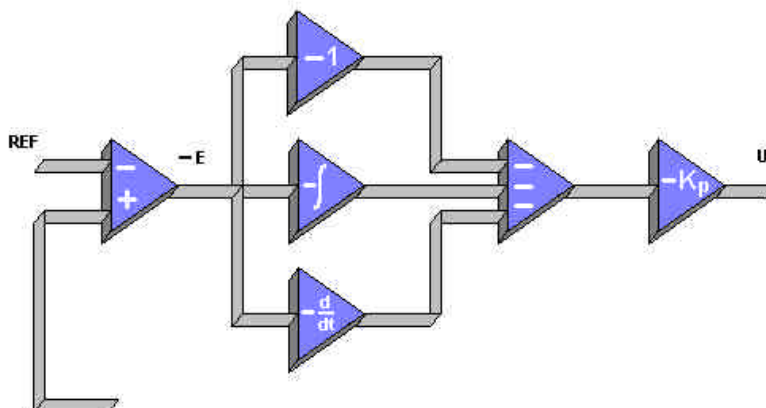


Figura 3. Esquema simplificado del controlador PID electrónico.

En la figura 4, se muestra el diagrama esquemático del controlador PID propuesto. Si aproximamos el funcionamiento del integrador y del derivador considerando que $R_{16}C_5s \ll 1$ y $R_{18}C_6s \gg 1$ tenemos que la función de transferencia del controlador está dada por

$$U(s) = \frac{R_{27}R_{29}}{R_{28}R_{31}} \left(1 + \frac{1}{\frac{R_{17}R_{26}R_{29}C_6}{R_{28}R_{29}}s} + \frac{R_{15}R_{28}R_{29}C_5}{R_{25}R_{29}}s \right) E(s) \quad (2)$$

donde

$$K_p = \frac{R_{27}R_{29}}{R_{28}R_{31}} \quad (3)$$

$$T_i = \frac{R_{17}R_{26}C_6}{R_{28}} \quad (4)$$

$$T_d = \frac{R_{15}R_{28}C_5}{R_{25}} \quad (5).$$

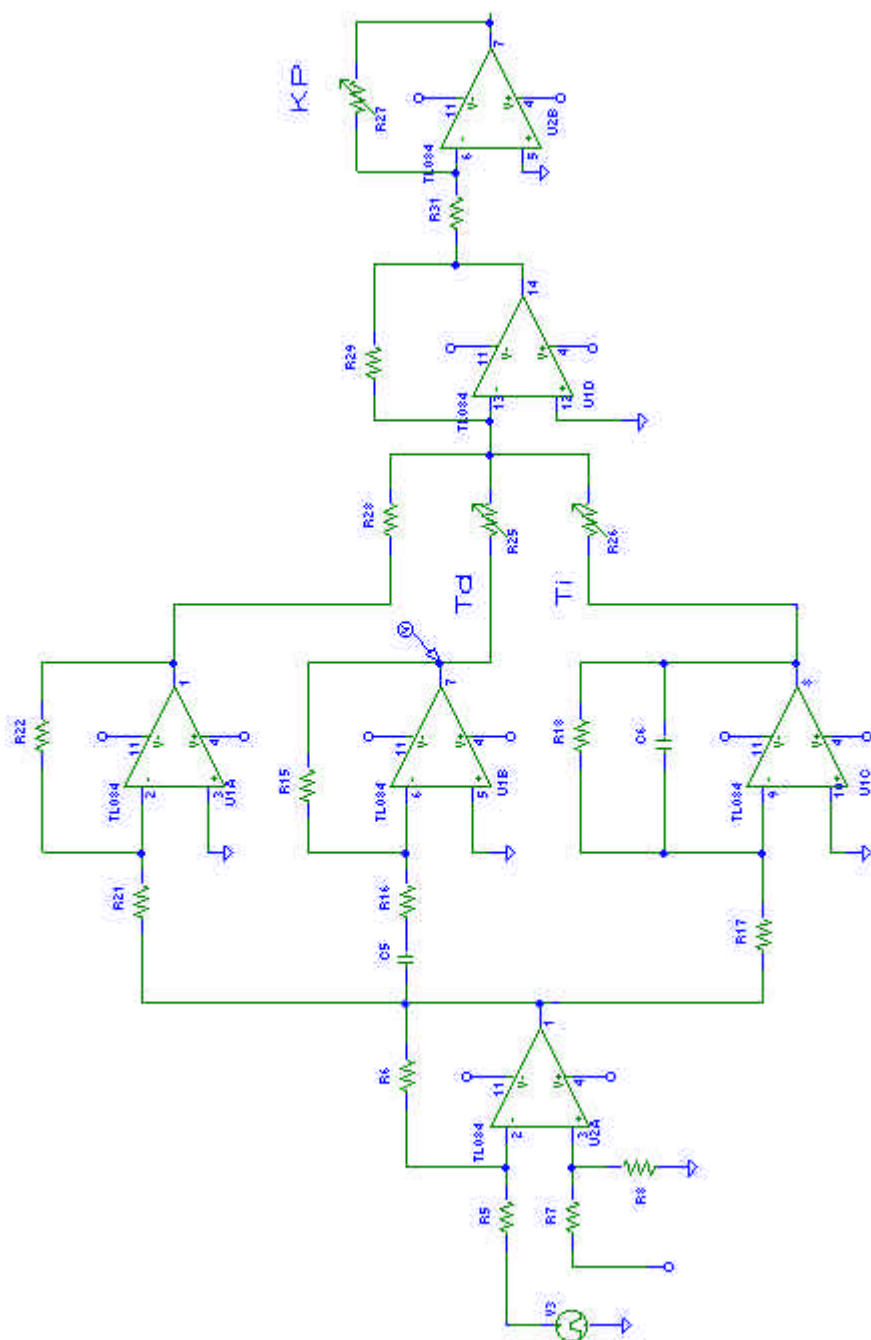


Figura 4. Diagrama esquemático del controlador PID.

En este caso, las constantes K_p , T_i y T_d se ajustan mediante la resistencias R_{27} , R_{26} y R_{25} respectivamente. La implementación presentada no resulta óptima en cuanto al número de amplificadores operacionales utilizados; sin embargo, tiene la ventaja de separa claramente cada una de las funciones del controlador, por lo cual es más fácil de entender su funcionamiento y más fácil de corregir cualquier desperfecto. Por ejemplo, si se desconecta la retroalimentación y se aplica como señal de referencia una señal cuadrada de un generador de funciones, se puede

observar en un osciloscopio la señal de salida de cada una de las etapas, y en especial del integrador y el derivador. En este último caso, el estudiante tiene la oportunidad de visualizar cómo la salida del integrador corresponde a una señal triangular, y cómo la salida del derivador es un tren de espigas (positivas y negativas). Esta experiencia puede servir para reforzar los conocimientos de análisis de señales.

2.2 Etapa de potencia

En la figura 5 se puede observar el diagrama de bloques de la etapa de potencia. Ésta consiste de un generador de tiempo proporcional, una etapa de aislamiento y un interruptor de estado sólido (triac). El circuito generador de tiempo proporcional recibe la señal de salida del controlador PID (señal de control) y la transforma en un pulso cuya duración es proporcional a la señal de control. La etapa de aislamiento está formada por un optoacoplador MOC3030, el cual cuenta con un circuito detector de cruce por cero. Finalmente, la etapa de potencia cuenta con un triac, con el cual se controla el voltaje de línea que se aplica a la parrilla.

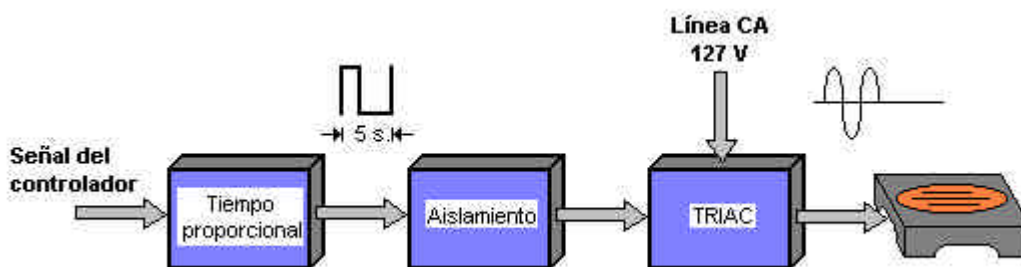


Figura 5. Diagrama de bloque de la etapa de potencia.

En conjunto, la etapa de potencia se encarga de regular el número de semiciclos de voltaje de línea que le son aplicados a la parrilla. Teniéndose como base un período de 5 segundos, la señal del controlador determina cuanto tiempo deberá encender la parrilla. Un ejemplo de lo anterior se muestra en la siguiente tabla.

Señal del controlador	Tiempo encendido. En segundos	Tiempo apagado. En segundos
0%	0	5
20%	1	4
40%	2	3
60%	3	2
80%	4	1
100%	5	0

Tabla 1. Funcionamiento de la etapa de potencia.

El circuito generador de tiempo proporcional se implementó mediante un circuito generador de pulsos, según se muestra en la figura 6. Un temporizador LM555 (U1) se encarga de generar una base de tiempo de 5 segundos, la cual consiste en un pequeño pulso negativo que se aplica a un segundo temporizador LM555 (U2). El pulso que recibe U2 activa la carga del capacitor C1, el cual se carga mediante una fuente de corriente constante basada en el amplificador operacional U3. Esto produce una rampa en el voltaje del capacitor C1, el cual se carga hasta llegar a un voltaje $V_{control}$, ya que cuando $V_{C1} > V_{control}$, el comparador U4 genera una señal que reinicia al temporizador U2, el cual a su vez entonces descarga al capacitor C1. La señal resultante a la salida del circuito, es un tren de pulsos con un período fijado por el temporizador U1 y con un pulso

alto cuya duración la determina la rampa de carga del capacitor C1 y el voltaje de control $V_{control}$. De hecho, con el circuito debidamente ajustado, la duración del pulso alto de salida es directamente proporcional al voltaje $V_{control}$.

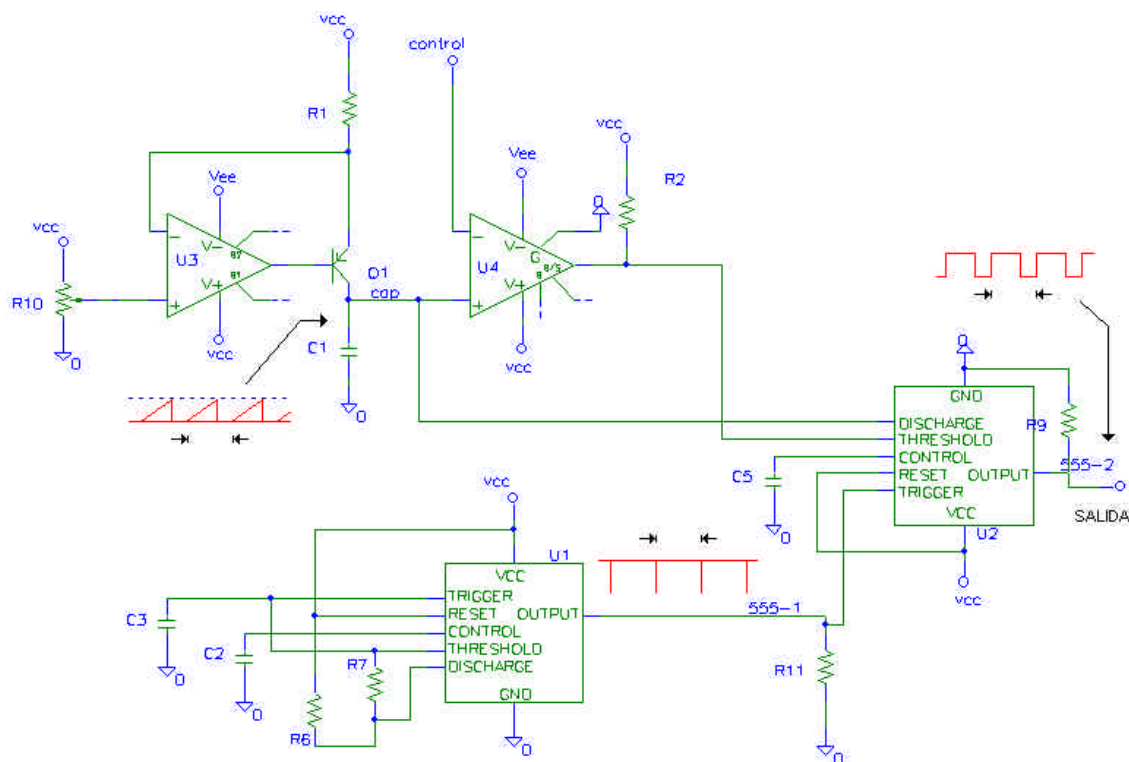


Figura 6. Diagrama esquemático del circuito generador de pulsos.

La etapa de aislamiento y el triac de salida se muestran en el diagrama esquemático de la figura 7. Como aislamiento se utiliza un optotriac MOC3030, el cual al contar con un detector de cruce por cero se reduce la emisión de radiación electromagnética.

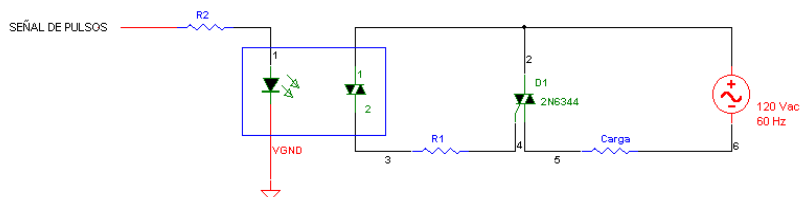


Figura 7. Etapa de aislamiento y triac.

En la figura 8, se muestran dos oscilogramas del voltaje aplicado a la parrilla para dos diferentes valores del voltaje de control. Se puede apreciar como cambia el número de ciclos aplicados por período.

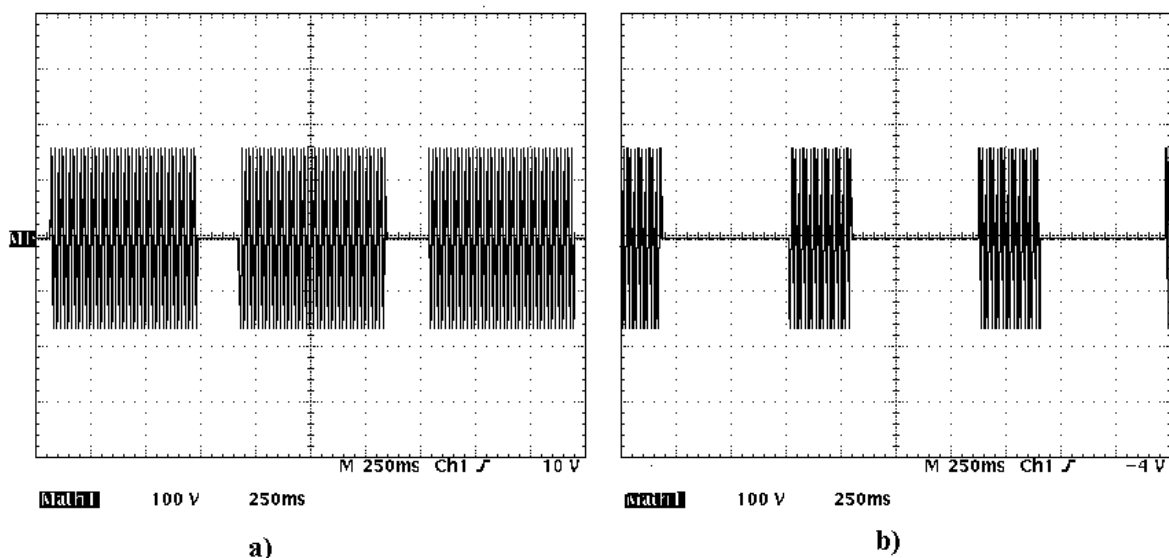


Figura 8. Oscilogramas del voltaje aplicado a la parrilla.

2.3 Sensor de temperatura

Como elemento sensor de temperatura se utilizó un circuito integrado LM35D, el cual es un sensor que genera un voltaje proporcional a la temperatura en grados Celsius, opera en un intervalo de 0° a 100 °C con una no linealidad típica de ± 0.2 °C y una exactitud típica de ± 0.9 °C. Además, este dispositivo cuesta alrededor de \$15 pesos.

3. SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR

Una vez que se tiene implementado todo el sistema de control de temperatura, se procede a caracterizar la planta para poder sintonizar el controlador, utilizando el método de Ziegler-Nichols.

3.1 Caracterización del sistema

Para caracterizar el sistema se escogió el método de la curva de reacción, debido a que el sistema térmico presenta características dinámicas que nos permiten aproximarlos a un sistema de primer orden con tiempo muerto como el dado por la siguiente expresión

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (6),$$

donde K es la constante de ganancia del proceso, τ es la constante de tiempo y θ es el tiempo muerto.

El método de la curva de reacción consiste de los siguientes pasos:

- Permitir que el proceso alcance estado estacionario.
- Introducir un cambio tipo escalón en la variable de entrada.
- Recolectar datos de la entrada y respuesta de salida hasta que el proceso nuevamente alcance estado estacionario.
- Realizar el cálculo gráfico de los parámetros a partir de la curva de reacción.

Para el cálculo de los parámetros a partir de la curva de reacción, Ziegler y Nichols propusieron dos métodos conocidos de manera general como el método de la tangente y método del punto-y-tangente. Sin embargo, ambos presentan el inconveniente de que la determinación de la tangente a la curva de reacción no es fácilmente reproducible, lo cual crea diferencias en los parámetros obtenidos.

Como alternativa se recomienda utilizar el método de los dos puntos (propuesto por C.L. Smith), el cual elimina la dependencia en la recta tangente. El método consiste en determinar los instantes de tiempo t_1 y t_2 en los cuales la respuesta alcanza el 0.283 y el 0.632 del cambio producido en la salida debido a un escalón en la variable de entrada. A partir de ellos se determina la constante de tiempo y el tiempo muerto mediante las siguientes expresiones

$$t = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (7)$$

y

$$q = t_2 - t \quad (8).$$

En la figura 9, se muestra la curva de temperatura de la parrilla. Una vez que se ha estabilizado la temperatura de la parrilla, lo cual ocurre alrededor de los 44 °C, se incrementa la acción de control un 33% y a partir de ahí se genera una curva de reacción mediante la cual se definen los parámetros de aproximación del proceso. De acuerdo con la figura se pueden estimar $t_1 = 10$ minutos y $t_2 = 18$ minutos; por lo tanto, aplicando las expresiones (7) y (8) se tienen $\tau = 12$ minutos y $\theta = 6$ minutos.

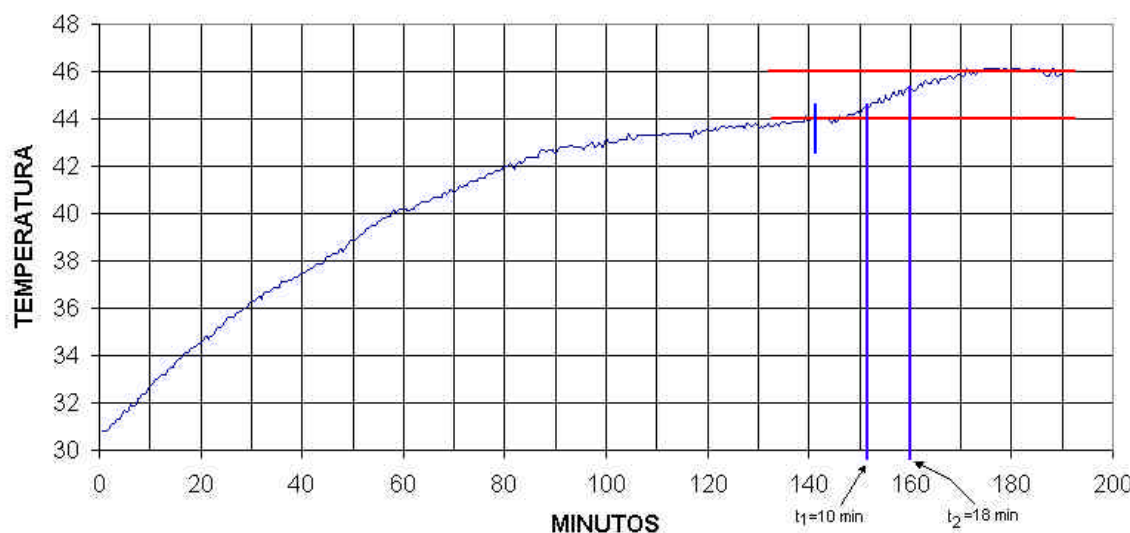


Figura 9. Curva de reacción.

En la figura 10 se muestra una comparación de los datos experimentales con el modelo matemático encontrado para la respuesta de la planta.

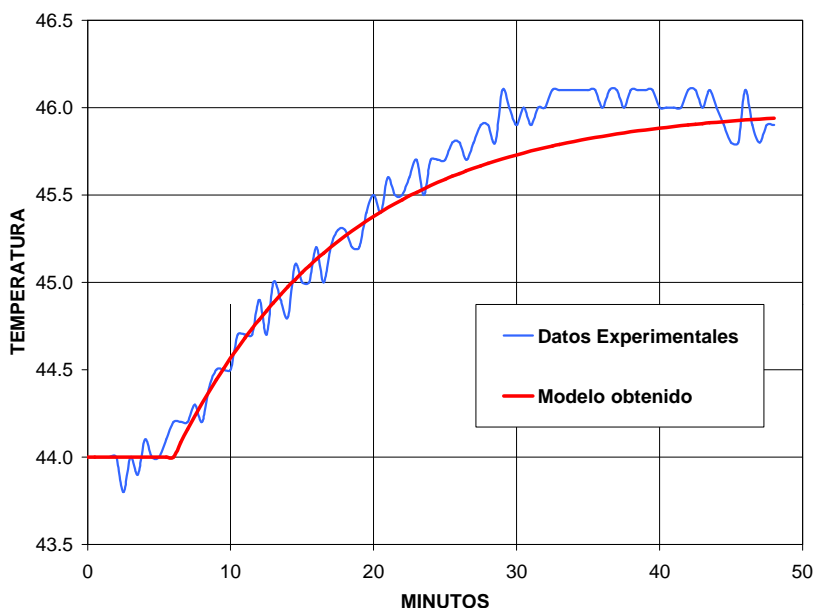


Figura 10. Comparación del modelo obtenido.

3.2 Ajuste de parámetros

Si se utilizan las fórmulas propuestas por Ziegler y Nichols para obtener los parámetros de ajuste del controlador se tiene que

$$K_p=7.5, \quad T_i=15\text{min} \quad \text{y} \quad T_d=2.4 \text{ min.}$$

Estos datos se utilizan para calcular los componentes del controlador PID analógico, y se obtienen los valores mostrados en la tabla 2.

Componente	Valor
R15	100K
R17	100K
R25	2K
R26	75K
R27	3.75K
R28	5K
R29	100K
R31	10K
C5	10 μ F
C6	10 μ F

Tabla 2. Componentes del controlador PID.

4. RESULTADOS

Se implementó el controlador PID analógico, y junto con el sensor y la etapa de potencia se realizó una prueba experimental, la cual se muestra en la figura 11. Como puede observarse, el

controlador permite reducir el tiempo de asentamiento de la temperatura. Existe un pequeño sobrepaso, el cual puede reducirse mediante un proceso adicional de sintonización manual.

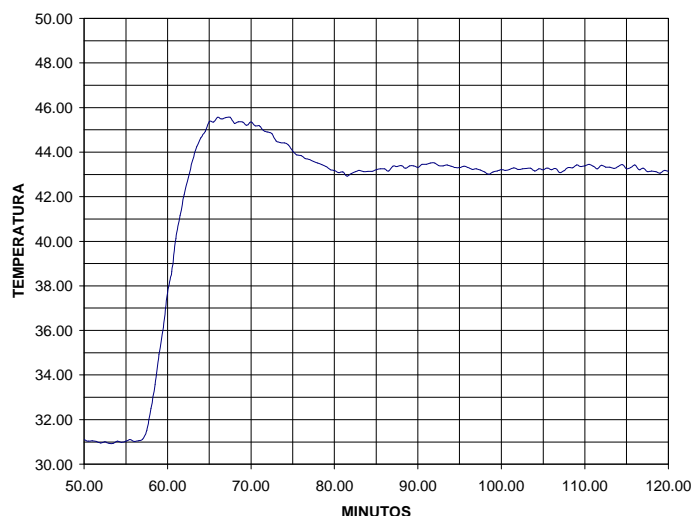


Figura 11. Respuesta del sistema con el controlador PID.

5. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la implantación de un económico sistema de control de temperatura de tipo didáctico. El controlador PID analógico propuesto permite a los estudiantes observar de manera independiente la señal producida por cada una de las etapas del controlador, lo que complementa las explicaciones teóricas. La etapa de potencia se asemeja a las implementadas en controladores comerciales, lo cual es una aportación adicional del sistema. El proceso de caracterización del sistema permite comparar el modelo del sistema con los resultados experimentales. El sistema cumple el objetivo de acercar al estudiante a todas las etapas del desarrollo de un sistema de control: definición del problema, modelado, sintonización, implementación y comprobación experimental.

6. REFERENCIAS

- [1] Corripio, Armando B. *Tuning of industrial control systems*. Instrument Society of America. 1990.
- [2] Smith, Carlos A.; Corripio, Armando B. *Principles and practice of automatic process control*. Second edition. John Wiley & Sons. 1997.
- [3] Marlin, Thomas E. *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*. Mc Graw-Hill. 1975.
- [4] Astrom, Karl J.; Hagglund, Tore. *PID controllers: theory, design, and tuning*. Second edition. Instrument Society of America. 1995.
- [5] McMillan, Gregory K. *Tuning and control loop performance: a practitioners's guide*. Third edition. Instrument Society of America. 1994.
- [6] Roots, William K. *Fundamentals of temperature control*. Academic Press. 1969.
- [7] Bañuelos, M.A.; Martínez, W.; Pérez, J.L. "Análisis y diseño de un controlador PID analógico". Reporte técnico RTESTE9905. Centro de Instrumentos, UNAM.
- [8] Rayo, G.D.; Bañuelos, M.A.; Castillo, J.; Pérez, J.L.; Pérez, J.S. "Control de temperatura de un horno industrial de secado utilizando un PID analógico". En memorias de SOMI XIV Congreso de instrumentación. Tonanzintla, Pue. Octubre de 1999.