

INVESTIGACIÓN

Diseño y Construcción de un Controlador de Temperatura para Tratamiento Térmico por Rampas.

Hurtado V, R¹, Gaona J, S¹ y Coronel G, J²

¹Grupo de Investigación CYTEMAC, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

²Grupo de Bajas Temperaturas, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Recibido: 3 de Septiembre de 2007; Revisado: 15 de Noviembre de 2007; Aceptado: 02 de Febrero de 2008

Resumen— Este documento reporta el diseño y la construcción de un controlador digital de temperatura, para un horno utilizado en el tratamiento térmico de muestras de materiales sintetizados en el laboratorio del grupo CYTEMAC de la Universidad del Cauca.

Palabras Clave: Control de temperatura, variación de temperatura, tratamiento térmico

Abstract—This paper treats about the design and construction of a temperature digital controller, for a furnace wich is used in the thermal treatment of the samples in the CYTEMAC’s Lab of University of Cauca.

Keywords: Temperature control, Temperature Variation, Thermal treatment.

I. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de materiales, uno de los procedimientos mas importantes es el tratamiento térmico. En el tratamiento, el tratamiento por rampas es el más usado. El tratamiento térmico se inicia sometiendo la muestra a una rampa de temperatura hasta un valor por debajo de la temperatura final deseada y luego se incrementa hasta el valor de interés.

Las rampas y los escalones para el tratamiento térmico no tienen una teoría establecida, la pendiente de la rampa y el tiempo de duración de los escalones se escogen bajo el criterio del experimentador. Lo que se pretende con un tratamiento térmico es manipular la energía interna y poder inducir reacciones, fenómenos de transporte, crecimiento, secado, etc.

Este proceso de tratamiento térmico se llevo a cabo en horno eléctrico discontinuo tipo mufla para el cual se diseño y construyo un controlador digital tipo PID.

Este controlador fue denominado **CTC – f1**, y le permite al usuario escoger entre tres rampas y tres escalones, así como la pendiente de las rampas y el tiempo de duración de los escalones.

II. MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Un proceso importante en la implementación de un dispositivo de control es la variable que se va ha controlar, en

este caso se trata de la temperatura. Esta variable física nos indica el grado de calentamiento de un sistema y solo puede ser medida con el sensor adecuado. La señal del sensor — Energía Térmica— se debe “traducir” a una mas conveniente —voltaje— para su manipulación.

A. El Sensor

El sensor que se uso para medir la temperatura fue la combinación termocupla tipo K y compensador de junta fría AD595 de **ANALOG DEVICE**, por ahora solo se describirá la termocupla. Una termocupla es la combinación de dos conductores distintos, conectados en uno de sus extremos, junta de medición. La termocupla tipo K, tiene la siguiente composición, 90% Ni – 10% Cr / 95% Ni – Al, Si, Mn, y opera en un el rango de -200°C a 1100°C [1].

III. DESCRIPCIÓN DEL HORNO

Las propiedades dinámicas y estáticas de un horno, pueden ser descritas de una maderá aproximada por la siguiente función de transferencia [1]:

$$G_{HT}(s) \approx \frac{K_H e^{-sL_{HT}}}{1 + \tau_{HT}s} \tag{1}$$

En esta ecuación se incluyen las propiedades dinámicas del sensor, así, K_H es la constante del sistema, L_{HT} es el retardo del horno y el sensor, y τ_{HT} es la constante de tiempo del horno y el sensor

IV. CONTROLADOR

A. Controlador PID

La ley de control de un controlador tipo PID, se deriva de una ley de control basada en la suma de tres términos, **Proporcional (P)**, **Integral (I)** y **Derivativo (D)**. Un esquema general para un sistema de control PID se muestra en la figura 1 [2].

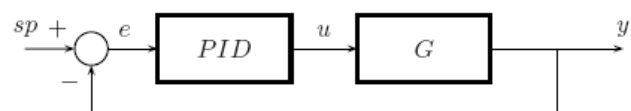


Fig. 1 Esquema general de un sistema de control.

En la Fig 1, sp es la señal de referencia o SetPoint, e es la señal de error, u es la señal de control y y es la variable controlada o señal de salida y G es el modelo de la planta o sistema a controlar, sobre la cual recae la acción de control. En el más simple de los controladores PID, la función de transferencia es como se muestra en (2).

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (2)$$

B. Controlador por Modelo Interno (IMC)

El controlador fue “sintonizado” usando un *Controlador por Modelo Interno* (IMC), este método exige que la función de transferencia de la planta $G(s)$ se exprese como el producto de dos funciones de transferencia [3].

$$G(s) = p_a(s)p_m(s) \quad (3)$$

Donde $p_m(s)$ contiene los componentes de $G(s)$ (polos y ceros) que serán cancelados con el controlador, y $p_a(s)$ contiene los elementos de $G(s)$ que no serán cancelados por el controlador.

Así como con $G(s)$, también se supondrá una función de transferencia de lazo cerrado deseada de la forma:

$$G_{cl}(s) = \frac{p_a(s)}{(\lambda s + 1)^r} \quad (4)$$

La función de transferencia para el controlador será la combinación de (3) y (4)

$$G_C(s) = \frac{G_{cl}(s)}{G(s) - G_{cl}(s)G(s)} = \frac{p_m^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)} \quad (5)$$

El controlador en (5) es el controlador por modelo interno $G_{IMC}(s)$.

Con el adecuado procedimiento matemático [3] se puede aproximar $G_{IMC}(s)$ a un controlador PID, y así obtener los parámetros de este; K (Constante del controlador) T_i (Tiempo integral) y T_d (tiempo derivativo). Para un sistema de primer orden, el controlador por modelo interno es

$$G(s) = \frac{K_H^{-1}(\tau s + 1)}{(\lambda s + 1) - e^{-Ls}} \quad (6)$$

Lo que dará finalmente la descripción de los parámetros del PID:

$$\begin{aligned} K &= \frac{T_i}{K_H(\lambda + L)} \\ T_i &= \tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \\ T_d &= \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \left[1 + \frac{L}{3T_i} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

V. DISCRETIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID

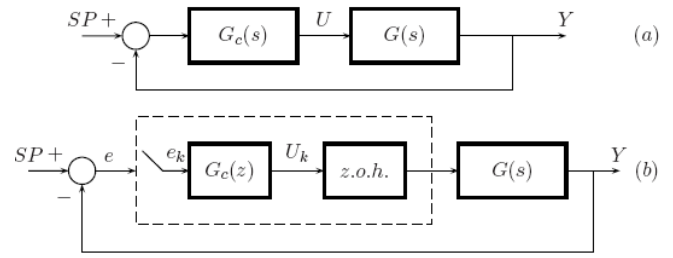


Fig. 2 Lazo de control de tiempo continuo (a) y su equivalente de tiempo discreto (b).

Lo que se pretende con la discretización es obtener un nuevo lazo de control (Fig 2b) con un comportamiento similar al lazo de tiempo continuo (Fig 2a) [4], [5].

A. Discretización de la Acción Proporcional

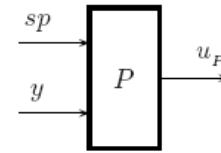


Fig. 3 Ley de control proporcional.

Esta es la más simple de todas y se puede representar por la Fig 3, cuya ecuación se expresa como

$$u_P(kh) = sp(kh) - y(kh) \quad (8)$$

B. Discretización de la Acción Integral

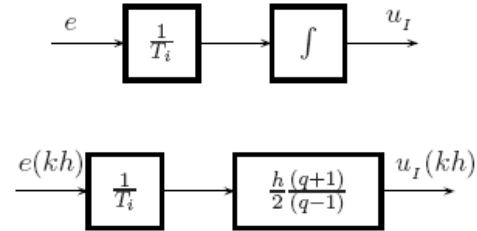


Fig. 4 Ley de control integral.

En la Fig 4, se reemplaza el integrador de tiempo continuo por uno tipo Tustin [5]. Con lo que se obtiene el modelo en espacio de estados

$$\begin{cases} x(kh+h) = x(kh) + e(kh) \\ u_I(kh) = \frac{h}{2T_i} [e(kh) + x(kh)] \end{cases} \quad (9)$$

C. Discretización de la Acción Derivativa

El esquema de la Fig 5, también presenta un bloque de integración que se reemplaza por uno tipo Tustin. El modelo en espacio de estados es:

$$\begin{cases} x(kh+h) = -px(kh) - (1+p)y(kh) \\ u_D(kh) = K_d [x(kh) + y(kh)] \end{cases} \quad (10)$$

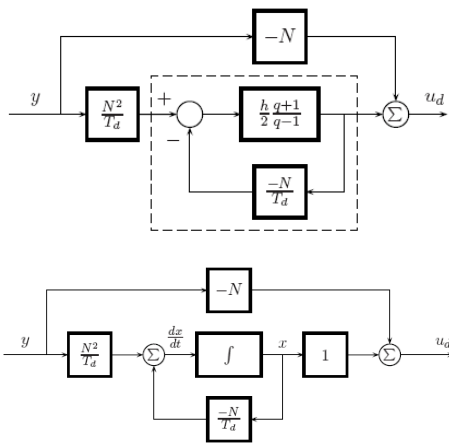


Fig. 5 Derivador de tiempo discreto.

VI. CONTROLADOR DE TEMPERATURA CTC -f1

El dispositivo construido para controlar temperatura, fue denominado **CTC-f1**. A continuación se describen las partes que lo componen y se muestra su empotrado en el horno.

A. Compensador de Juntura Fría

Este compensador es el **AD595** de ANALOG DEVICES, cuyo esquema y apariencia pueden ser vistos en la Fig 6 [6].

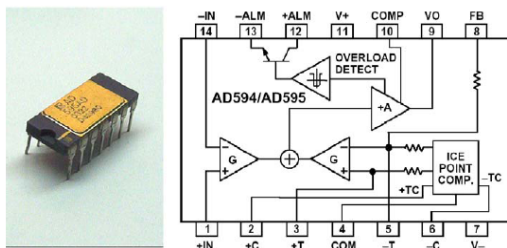


Fig. 6 Esquema y apariencia del AD595.

El **AD595** es un amplificador de instrumentación y un compensador de juntura fría para termocuplas tipo K. El amplificador está precalibrado para dar una salida de $10mV/^{\circ}C$ directamente desde la señal de la termocupla.

B. Microcontrolador

Este es obviamente el dispositivo más complejo e importante del controlador **CTC-f1**. De él dependen, la adquisición de la señal, el sistema de control, y la interfase entre el usuario y el dispositivo. El microcontrolador usado fue un PIC18f452 de Microchip [7].

C. Reloj de Tiempo Real

El reloj de tiempo real que se usó para este proyecto fue un **DS1302** de MAXIM [8]. Este dispositivo se usó principalmente por las ventajas que tiene frente al microcontrolador para contar tiempos largos, además que trabaja independientemente una vez es inicializado.

D. Actuador

El actuador utilizado en el controlador **CTC-f1** fue un

relay de estado sólido, el **TSS16G48S** marca TOSHIBA. Este relay cuenta con un aislamiento óptico, opera a un máximo de $16A$ y $120V AC$ y es compatible con dispositivos [9].

E. Interfase de Usuario

La interfase está compuesta principalmente por un teclado matricial de 4×4 , desde el cual se pueden acceder los datos para modificar los parámetros del controlador, valores de temperatura y tiempos de operación, y una pantalla LCD, de 2×16 .

La unión de todos los componentes hacen el controlador **CTC-f1**, la Fig 7 muestra el controlador totalmente ensamblado, listo para ser empotrado en el horno. Y la Fig 8 muestra el controlador empotrado en el horno.



Fig. 7 Controlador CTC-f1.



Fig. 8 Empotrado del CTC-f1 al horno.

VII. RESULTADOS.

A. Caracterización del Horno

Para la caracterización del horno se procedió utilizando una señal de entrada tipo escalón. La señal de entrada fue en voltios AC y la salida se registró en grados centígrados. La respuesta se ve en la Fig 9.

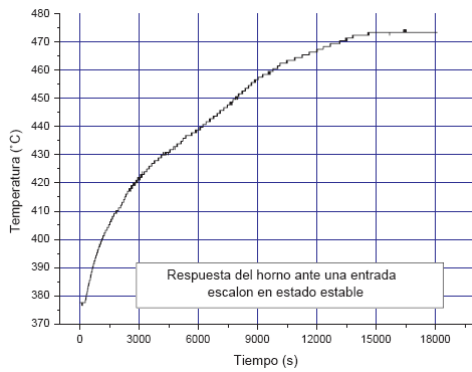


Fig. 9 Respuesta del horno en un rango de operación.

De esta grafica se tiene la tabla I

TABLA I
CARACTERIZACIÓN DEL HORNO

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tiempo de respuesta	τ	5721	s
Tiempo muerto	L	65.9	s
Constante del horno	K_H	13.93	°C/V

Con estos resultados el modelo utilizado para la planta fue:

$$G(s) = \frac{13.93e^{-65.9s}}{5721s + 1} \quad (11)$$

B. Parámetros del controlador

Ahora, con el modelo de la planta se obtienen los parámetros del controlador. La forma de estos parámetros esta expuesta en (7), reemplazando los valores de τ , L y K_H y considerando un $\lambda = 0,5^1$, los valores para T_i , K y T_d se muestran en la tabla II.

TABLA II
PARÁMETROS DEL CONTROLADOR

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tiempo integral	T_i	5753.8	s
Tiempo derivativo	T_d	32.56	s
Constante del controlador	K	6.22	V/°C

Así, la ley de control se puede expresar como

$$U(s) = K \left[(SP(s) - Y(s)) + \frac{1}{5753.8} E(s) - \frac{32.56s}{1 + \frac{32.56}{3}s} Y(s) \right] \quad (11)$$

C. Respuesta del sistema

En la Fig 10 se puede observar el comportamiento del

sistema para un proceso de tratamiento térmico (tres rampas de 5° C/min y valores de temperatura de 200, 300 y 700° C para los escalones). Esta figura demuestra la configuración de los parámetros del sistema, como son cantidad y valor de las pendientes y el tiempo de duración de los escalones.

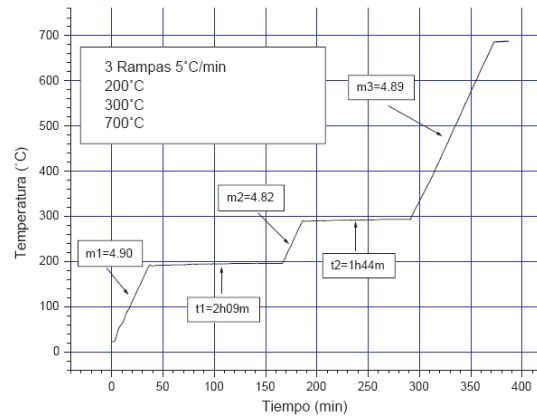


Fig. 10 Respuesta del horno para un proceso de tratamiento térmico.

VIII. CONCLUSIONES

El **CTC-f1** realiza de manera exitosa un proceso de tratamiento térmico, para el cual se pueden fijar una variedad en el número de rampas y de escalones al igual que su duración, los valores alcanzados durante un tratamiento térmico están dentro del 90% del valor esperado.

Con este controlador se les da la oportunidad a los investigadores de ampliar su rango de experimentación para sus muestras y poder lograr mejores resultados.

Este controlador fue hecho considerando las características del horno para el cual iba ha ser usado lo que le da una ventaja sobre los controladores comerciales.

REFERENCIAS

- [1] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J., McGhee J. Temperature Measurement, 2ed., Wiley, 2001.
- [2] Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna, 3ed., México, Prentice Hall, 1998.
- [3] Rengifo Rodas, Carlos Felipe. Ajuste de Controladores PID por Aproximación de un Controlador por Modelo Interno, Universidad del Cauca, Popayán – Colombia.
- [4] Åström K.J., Wittenmark B. Computer-Controlled Systems, Theory and design, 3ed., Prentice Hall, 1997.
- [5] Hurtado Velasco, Ronald. Diseño y construcción de un controlador de temperatura para un horno utilizado en el proceso de caracterización y calcinado de la cascarilla de arroz, Universidad del Cauca, Popayán
- [6] Analog Devices Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation AD594/AD595, USA, Analog Devices Inc., 1999.
- [7] Microchip PIC18f452 Data Sheet, Microchip Technology Inc, 2002.
- [8] Maxim DS1302 Trickle-Charge Timekeeping Chip, USA, Maxim Integrated Products, 2005.
- [9] Toshiba TSS16G48S, TSS16J48S, Toshiba Corporation, 2001.

¹ Se opto por este valor tomando como base los resultados de las simulaciones