

## CONTROL DE TEMPERATURA PARA UNA TOSTADORA DE CAFÉ

Leonardo Miguel Rivera García, Marcel Adrián Tapia García,  
José Antonio Hernández Reyes, Carlos Roberto González Escarpeta.  
Instituto Tecnológico de Veracruz  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Av. Miguel Ángel de Quevedo No. 2779. Colonia Formando Hogar.  
C.P. 91897. Veracruz, Veracruz.  
Teléfono/Fax: +52 (229) 938 3765

leonardo\_mrg@hotmail.com, adriantapia89@hotmail.com, jantoniohr@hotmail.com, carlosge@hotmail.com,

### RESUMEN.

El artículo presenta una propuesta de control alternativo, mediante lógica difusa, para la regulación de la temperatura en una tostadora de café con tres niveles de flama como salida. La ventaja más significativa de este tipo de controlador es la sencillez que su implementación conlleva a través de un microcontrolador. Aun cuando requiere ajustar los parámetros de los conjuntos de manera empírica, proporciona un comportamiento aceptable.

### 1. INTRODUCCIÓN

El tostado de café ha sido, desde sus inicios, un proceso puramente artesanal, esta cualidad es la que le otorga el sabor y la calidad al producto final. El control de la temperatura de tostado por un operador experto requiere de una preparación profesional en dicha actividad, sin embargo, aún esta preparación no asegura la ausencia de errores [1].

El aumento en el mercado de consumo de café y la necesidad inherente de incrementar su producción, han superado la capacidad humana para el control de este proceso.

Surgen entonces los primeros intentos para automatizar la regulación del procedimiento. La primera opción fue el control ON-OFF por su sencillez. Posteriormente, y con el avance de la electrónica, los controladores lógicos programables (PLC) abrieron la puerta para implementar un control más óptimo por su capacidad de procesamiento. Empero, su costo y volumen representan una característica adversa para su producción en masa. El microcontrolador ofrece las ventajas de un PLC, pero en una versión más barata y flexible, que permite la incorporación de periféricos y lenguajes de programación de alto nivel. Por lo anterior, facilita incorporar

controladores más sofisticados que un PID clásico. Resulta interesante que son aún emergentes las aplicaciones con lógica difusa en microcontroladores, pues resultan más comunes las simulaciones o los controles por ordenador. De aquí, que se proponga el uso de un controlador lógico difuso programados en un microcontrolador.

La metodología descrita a continuación expone cómo se implementó un controlador mediante lógica difusa (*FLC, Fuzzy Logic Controller*) al control de la temperatura en el proceso de tostado de café.

El presente artículo se organiza en cinco secciones: en la Descripción del sistema se muestra de forma general el proceso a controlar, en la Descripción del controlador se explica cómo se incorpora la lógica difusa al proceso de regulación, en la Implementación de lógica difusa se desarrollan los pasos necesarios para asociar las características del sistema al formato difuso, por último en la sección de Resultados se muestra un perfil de tostado realizado con el controlador.

### 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

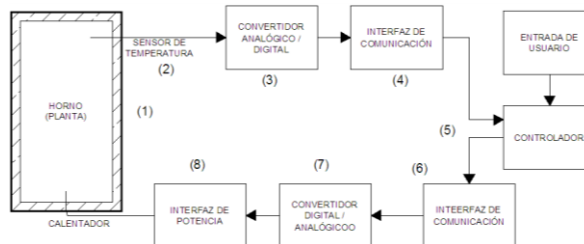


Figura 1. Vista general del sistema de tostado

El sistema a controlar es el de una tostadora de café. Dicho sistema consta de 1) la planta, que en este caso es la cámara de tostado o el horno, 2) sensores de temperatura (termopares), 3)

Acondicionador de señal (CAD), 4) Interfaz de comunicación con el controlador, 5) Controlador (microcontrolador), 6) Interfaz de comunicación con la salida, 7) Acondicionador de señal de salida (optoacoplamiento) y 8) Etapa de potencia a la planta (válvulas de gas) como se aprecia en la Figura 1.

El artículo comprende únicamente lo concerniente a la etapa del controlador, el cual fue implementado, mediante lenguaje C, en un Microcontrolador PIC18F4550, un microcontrolador de gama media que resulta ideal para aplicaciones de sistemas embebidos por su capacidad de memoria y procesamiento [2]. Para la medición de temperatura se emplearon termopares Tipo K, con amplificadores AD597, que es un circuito integrado especial para acondicionar la señal de dicho termopar para obtener 10mV/°C.

En la Figura 2 se aprecia la tostadora que se utilizó para realizar las pruebas.

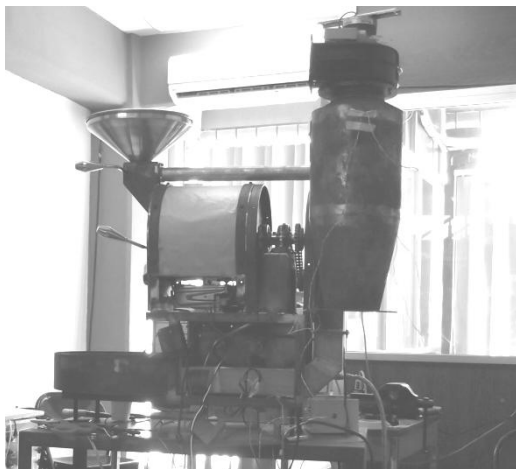


Figura 2. Tostadora de café.

## 2.1. Proceso de tostado

Para el proceso de tostado se presentan tres etapas principales: a) Precalentado de la cámara de tostado (horno), en ésta, se debe alcanzar una temperatura de entre 230 y 250°C, con la cual el café recibe un golpe de calor para alterar su sabor, ocasionalmente se depositan granos durante esta etapa para calentar de manera uniforme la superficie de la cámara, b) Tostado, el cual no debe tener una duración de menos de 4 minutos ni más de 12 minutos y comprende temperaturas de entre 200 y 240°C según el tipo de tostado (claro, medio,

oscuro), es en esta etapa donde los granos pierden entre 10 y 25% de su peso y se les otorga su aroma y sabor característicos y c) Enfriamiento, en el que los granos tostados son vertidos en un contenedor con orificios por donde se hace pasar aire forzado para lograr que su temperatura disminuya de manera uniforme.

## 2.2. Diagrama del programa de control

En el diagrama de flujo de la figura 10 se muestra una visión general del programa de control que fue implementado en el microcontrolador mediante lenguaje de C.



Figura 9. Diagrama de flujo del programa principal.

De manera general el programa funciona de la siguiente manera:

Al iniciar, se establece la temperatura de precalentado y se llama a la función de control difuso; si se ha alcanzado la temperatura si activa una alarma sonora para el operador se verifica si se ha abierto la compuerta para depositar el café, mientras esto no suceda seguirá el control para mantener la temperatura y la alarma activada.

Si se depositó el café, se inicia el conteo del tiempo y se asigna la temperatura para el control de acuerdo a una proporción, este proceso continua hasta que se alcanza el tiempo de tostado. Luego de este tiempo, se abre la compuerta de salida del café para terminar el proceso.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO DIFUSO

La lógica difusa o borrosa nos otorga un medio para traducir conceptos y razonamientos que resultan cotidianos para el hombre, pero difíciles de definir mediante la lógica clásica [3].

Un controlador basado en lógica difusa consta de 4 etapas principales, que se ilustran en la Figura 2 y son:

- Fuzzificación: convierte los valores de las variables de entrada al universo de los conjuntos difusos.
- Base de reglas: agrupa el conocimiento obtenido de la experiencia y comportamiento deseado del sistema en un conjunto de reglas lingüísticas.
- Motor de inferencia: calcula las relaciones establecidas con la base de reglas.
- Defuzzificación: Convierte los valores difusos obtenidos con el motor de inferencia a valores de la variable de control.

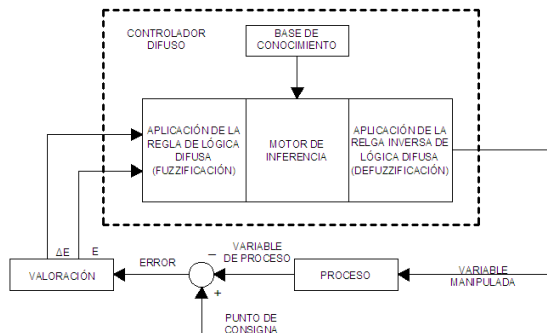


Figura 2. Control difuso dentro del sistema de control.

### 4. IMPLEMENTACIÓN DE LÓGICA DIFUSA

Para implementar el controlador con lógica difusa, como se mencionó en la sección anterior, se siguieron las etapas más comunes obtenidas de la investigación documental, mediante un modelo Mandami para una salida difusa, estas son: Fuzzificación de entradas y salida, Aplicación de la base de reglas y la Defuzzificación.

#### 4.1. Fuzzificación de las entradas y salida

Se propone un esquema de control de dos variables de entrada con una de salida, como se ve en la Figura 3.



Figura 3. Esquema del controlador propuesto.

Siguiendo a los controles tradicionales que emplean como variable de entrada al Error de la variable de proceso (PV), se decidió iniciar con este parámetro. En nuestro caso es PV es la temperatura. El error se obtiene como se muestra en la siguiente fórmula:

$$e_T = T_{Actual} - T_{Anterior} \quad (1)$$

Donde:

$e_T$  = Error de temperatura

$e_{Actual}$  = Temperatura actual

$e_{Anterior}$  = Temperatura de la muestra anterior

De lo anterior se entiende que el controlador pretende que:

$$e_T \rightarrow 0 \text{ en } t \rightarrow \infty \quad (2)$$

Este parámetro proporciona información de que tan alejada se encuentra la temperatura actual de la deseada.

Asimismo, resulta importante conocer cómo cambia el Error en el sistema, por esto se empleó como segunda entrada al control la variable de Diferencial de Error, que calculamos de la siguiente forma:

$$de = e_{Actual} - e_{Anterior} \quad (3)$$

Donde:

de: Diferencial de Error

$e_{Actual}$ : Error actual

$e_{Anterior}$ : Error anterior

Debido a la sencillez que presentan los cálculos de los valores de pertenencia, para la establecer los conjuntos se emplearon funciones del tipo triangular y trapezoidal [4][5][6].

Para el universo de la variable *Error de temperatura* los conjuntos se consideraron en la Figura 4.

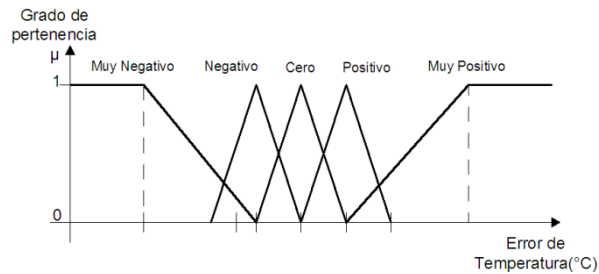


Figura 4. Conjuntos difusos del universo Error de temperatura.

Para el universo de la variable *Diferencial de Error* se tienen los mostrados en la Figura 5.

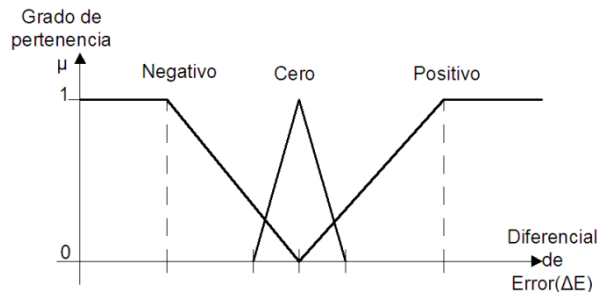


Figura 5. Conjuntos difusos del universo Diferencial de Error de temperatura.

En el sistema propuesto se consideran 3 niveles de salida: Piloto, Flama baja, Flama alta. Para simplicidad del sistema real se tiene que, dichas salidas, se controlan mediante válvulas del tipo ON-OFF.

Los conjuntos del universo de la variable de salida, *Tipo de Flama*, comprenden valores de 0 a 100% considerando al cero como Piloto y al 100% como Flama alta: Figura 6.

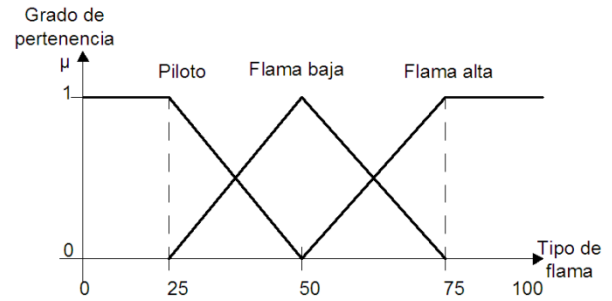


Figura 6. Conjuntos difusos del universo Tipo de flama.

## 4.2. Base de reglas

En base a las pruebas realizadas se llegó a la base de reglas de la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de reglas

TF		E				
		MN	N	C	P	MP
DE	N	P	P	FB	FB	FA
	C	P	P	P	FA	FA
	P	P	P	FB	FB	FA

Donde:

TF= Tipo de Flama

E= Error de Temperatura

DE= Diferencial de Error de Temperatura

MN= Muy negativo

N= Negativo

C= Cero

P= Positivo

MP= Muy Positivo

P= Piloto

FB= Flama baja

FA= Flama alta

Para la definición lingüística de las reglas se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{Regla } i: \text{Si } (x_1 \text{ es } A_i) \text{ y } (x_2 \text{ es } B_i) \\ \text{Entonces } (y \text{ es } C_i) \quad (4)$$

Para  $A_i$  que es un conjunto del universo Error,  $B_i$  es un conjunto del universo Diferencial de Error y  $C_i$  es un conjunto del universo Tipo de Flama.

## 4.3. Defuzzificación

Para la defuzzificación se empleó el Método de centro máximo [5].

$$Salida = \frac{\sum(\mu(x) \cdot x)}{\sum \mu(x)}$$

(5)

Donde:

$\sum(\mu(x) \cdot x)$ : Sumatoria de los productos de los valores de pertenencia de cada regla activada por el valor máximo del conjunto de salida de cada regla.

$\sum \mu(x)$ : Sumatoria de los valores de pertenencia de cada regla activada.

Con esta técnica se emplea como valor del conjunto, el que se presenta al grado de pertenencia máximo. En el caso de los conjuntos triangulares simétricos el valor corresponde al del centro de dicho conjunto. Para los conjuntos rampa trapezoidales de bajada y de subida, se emplean los valores de derecha máxima e izquierda máxima, respectivamente. Figura 7.

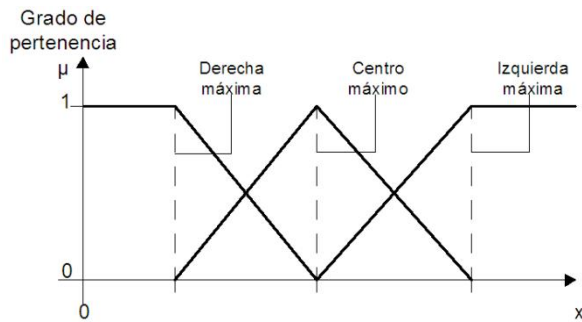


Figura 7. Obtención del valor más representativo de cada conjunto.

Como ya se mencionó, los actuadores de salida, es decir las válvulas de gas, son del tipo ON-OFF, es por esto que se realizó un último paso para la conversión de los valores de salida.

Luego de obtener el valor de salida mediante la técnica de centros máximos, se establecieron conjuntos binarios para el universo de salida, siendo:

Si  $Salida < 33 \rightarrow Salida = Piloto$

(6)

Si  $33 \leq Salida \leq 66 \rightarrow Salida = F\_baja$

(7)

Si  $Salida > 66 \rightarrow Salida = F\_alta$

(8)

Basados en lo anterior, se generan los conjuntos binarios de la Figura 8.

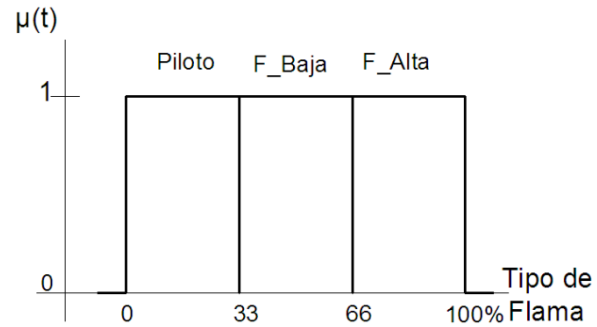


Figura 8. Conjuntos binarios para la salida Tipo de Flama.

## 5. RESULTADOS

En la Figura 10 se puede apreciar la gráfica de un tostado obtenido con la implementación del control.

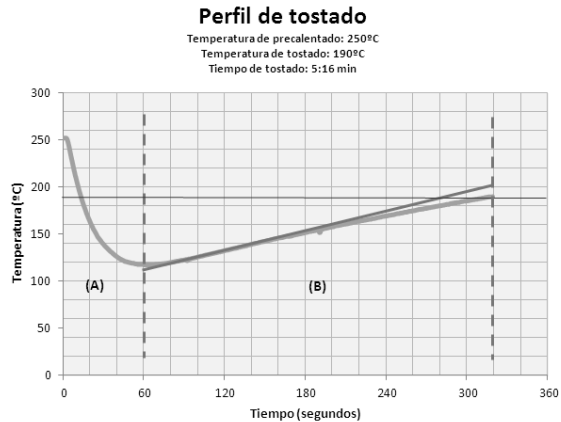


Figura 10. Gráfica del tostado a 190°C.

La zona marcada como (A) representa la caída de la temperatura por la entrada de los granos de café en el tambor de la tostadora. La zona (B) muestra el proceso de tostado.

Por otra parte, la capacidad de memoria del microcontrolador resultó suficiente para implantar el programa de control.

## 6. CONCLUSIONES

Los controladores con lógica difusa brindan buena regulación para el control de procesos térmicos que, por lo general, son de respuesta lenta, para los cuales usualmente se recomiendan controladores PI o PID [7] o que son, paradójicamente, controlados por humanos [8].

El controlador mediante lógica difusa proporcionó un control satisfactorio para mantener la temperatura de precalentado y la temperatura del proceso de tostado. Resulta indeseable mantener los granos de café dentro del tambor, durante mucho tiempo llegados a su temperatura de perfil, es por esto que el control en el tostado nos sirve para suavizar la que, de otra forma, sería la curva de un controlador ON-OFF.

Asimismo, se deja abierta la posibilidad de emplear actuadores con regulación para obtener un mejor desempeño del sistema.

## 7. REFERENCIAS

- [1] W. Harrison Ukers. *"All about coffee"*. Library of Alexandria. 818 pp. 1935.
- [2] \_*"Datasheet: Microcontrolador PIC18F4550"*. .
- [3] L. Álvarez Munárriz. *"Fundamentos de inteligencia artificial"*. EDITUM, 363 pp. 1994.
- [4] B. Martín del Río, A. Sanz Molina. *"Redes neuronales y Sistemas borrosos"*. México. Alfaomega, 440 pp. 2006.
- [5] P. Ponce Cruz. *"Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería"*. México. Alfaomega, 376 pp. 2010.
- [6] F.J. Ceballos Sierra, J. R. Hilera González *"Redes neuronales artificiales: Fundamentos, modelos y aplicaciones"*. Alfaomega, 498 pp. 2000.
- [7] E. Mandado Pérez, J. Marcos Acevedo, C. Fernández Silva. *"Autómatas programables y sistemas de automatización"*. Marcombo, 1120 pp. 2009.
- [8] A. García Higuera, F. Castillo García. *"CIM, el computador en la automatización de la producción"*. España. Universidad de Castilla, La Mancha, 272 pp. 2007.