

Adecuación y automatización para un horno industrial a gas natural

JOHN FERNANDO COLMENARES MONTERO

CARLOS ARTURO OSPINO YEPES

ÓSCAR ALIRIO VARGAS AYALA

TUTOR:

JORGE RAMÍREZ

RESUMEN

Este documento muestra como se llevó a cabo la adecuación de un horno cuya fuente de energía era el gas propano, para poder trabajarlo con gas natural, además el diseño e implementación de un sistema electrónico para realizar la mezcla adecuada de aire y gas garantizando una buena combustión y ahorro de energía utilizando técnicas *Fuzzy Logic*. Igualmente, la realización de un sistema de adquisición de datos y un encendido automático.

Uno de los resultados más esperados y por lo cual se realizó este proyecto es que por medio de la adecuación del horno a gas natural, se economizó un 70 % del combustible utilizado. Las horneadas tienen un mejor desempeño mediante el manejo controlado de las variables propias de la planta.

Por su simplicidad y buenos resultados se implementó un control *Fuzzy*, Proporcional-Derivativo el cual procesa y envía a los actuadores la palabra de control. Las técnicas *Fuzzy Logic* dan la posibilidad de controlar sistemas en los cuales es difícil modelar matemáticamente el comportamiento de un sistema.

La implementación de los dispositivos utilizados, con recursos como microcontroladores, hacen que este tipo de tecnologías sean asequibles por microempresas dedicadas a la producción de cerámica y porcelana.

Palabras clave: *Fuzzy Logic*, combustión, quemadores, ventilador centrífugo.

1. INTRODUCCIÓN

Un horno es "un aparato que permite acumular la mayor parte del calor que genera", o un sistema que hace posible, gracias a su diseño y funcionamiento, la acumulación en lugar de la disipación de calor.

La adecuación y automatización del horno se realizó para mejorar la producción, la calidad y bajar los costos de producción en la empresa ARTE MILCOL Ltda., evitar pérdidas de materia prima e incumplimiento en los pedidos.

Por los costos que le significaba a la empresa el consumo de gas propano se optó por adecuarlo a gas natural que es más económico. Esto trajo como consecuencia cambiar la instalación de gas y de los quemadores, además de la implementación de un dispositivo para generar aire (ventilador centrífugo) con el fin de compensar la combustión que difiere entre estos dos tipos de combustibles.

La adecuación del horno se gestó casi simultáneamente con la modelación matemática del horno y se realizó de la siguiente manera: se determinó mediante el modo teórico y práctico que los quemadores de gas propano no sirven para el gas natural porque su apertura en las puntas es demasiado grande, en comparación con los quemadores de gas natural, además, la cantidad de aire para la combustión con propano es diferente con respecto al gas natural.

El rendimiento de quemadores que se encuentran en el mercado es muy bajo, por tanto, no son óptimos para la aplicación; al generar la combustión, el quemador atmosférico adquiere aire, pero cuando se encuentra a poca potencia no puede tomar del ambiente la cantidad necesaria para una buena combustión, por consiguiente, fue indispensable cambiarlos por nuevos quemadores, donde lo normal es que para que exista una buena combustión y en condiciones normales necesite 15 m³ de aire por cada 1 m³ de gas. A partir de muchos ensayos se logró mezclar el aire con el gas de forma uniforme y sobrealimentar los quemadores con un 20% más de aire, sin perjudicar la combustión.

En los quemadores se implementaron una serie de electrodos contruidos en la misma empresa para generar la chispa de encendido, en una aleación entre alúmina, porcelana y cuarzo, además del núcleo en acero, para que soporte altas temperaturas en el interior del horno. Estos electrodos, a su vez, están conectados a transformadores de alta tensión con los cuales se genera un arco en voltaje, utilizado para realizar el encendido de los quemadores.

2. CONTENIDO

En el control principal se encuentran dos microcontroladores; uno realiza las funciones de maestro, el cual envía órdenes a los actuadores, captura la temperatura, supervisa el encendido del ventilador centrífugo y del encendido de los quemadores, llamado microcontrolador-Maestro; el otro realiza el control *Fuzzy*, por lo que es llamado microcontrolador-*Fuzzy*, en el cual, por medio de la temperatura que es transmitida serialmente por el microcontrolador-Maestro, se obtienen dos variables lingüísticas que son el error de temperatura (Temp_Error) y la derivada del error (Derivada_Er) (véase figura 1). La salida de este control se llama potencia, que es el porcentaje de apertura de las válvulas.

El conjunto Temp_Error esta dado por la diferencia entre la temperatura de referencia (Tsp), que es suministrada a través de una tabla de valores preestablecida de acuerdo con las curvas de temperatura obtenidas en la práctica, y la temperatura actual (Tac).

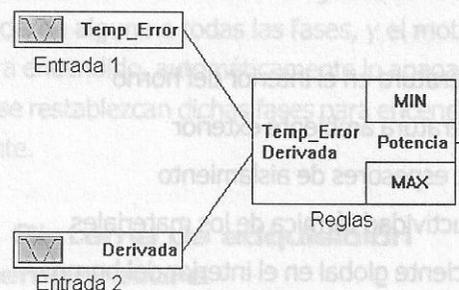


FIGURA 1. VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA

$$\text{Temp_Error} = T_{sp} - T_{ac} \quad (1)$$

El conjunto Derivada_Er, está dado por la razón de cambio del error de temperatura en el tiempo:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{[\text{Temp_Error}(n) - \text{Temp_Error}(n-1)]}{[T(n) - T(n-1)]} \quad (2)$$

La salida del control Fuzzy es el conjunto potencia y es el valor obtenido de la fuzzificación, la inferencia de las reglas y la defuzzificación. Este valor retorna serialmente al microcontrolador maestro.

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Como primera medida establece las pérdidas de calor. En relación directa con el recinto del horno y los materiales refractarios y aislantes utilizados, estas pérdidas se pueden clasificar en pérdidas en las paredes y pérdidas por el calor almacenado en el revestimiento.

Las pérdidas de calor por las paredes (figura 2) en una región plana se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$p_p = \frac{t_h - t_a}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (3)$$

Donde:

t_h : temperatura en el interior del horno

t_a : temperatura ambiente exterior

e_1, e_2, e_3 : espesores de aislamiento

λ_1 : conductividad térmica de los materiales

α_1 : coeficiente global en el interior del horno

α_e : coeficiente global en el exterior

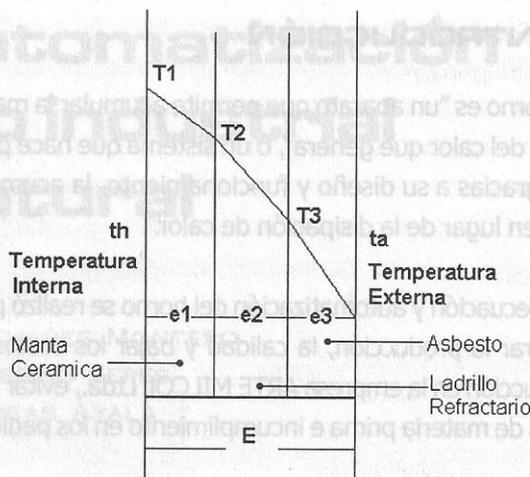


FIGURA 2. PÉRDIDAS DE CALOR POR LAS PAREDES

Otras pérdidas relacionadas con las paredes es la transmisión de calor al exterior y está dada por la siguiente ecuación de Fishendon y Saunders:

$$p_p = K(tp - 20)^{1.25} + 5.67 * e * \left[\left(\frac{tp + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (4)$$

K = Constante $K=2,09$ para paredes verticales

Ambiente en calma $20^\circ C$

Emisividad 0.9

T_p = Temperatura en la pared

3.1. Pérdidas por calor almacenado en el revestimiento

El cálculo del calor almacenado es sencillo una vez determinadas las temperaturas en las diferentes capas. Tomando como origen la temperatura ambiente para una pared compuesta por tres capas.

$$q_{re} = e_1 * C_1 * d_1 * \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t_a \right) + e_2 * C_2 * d_2 * \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t_a \right) + e_3 * C_3 * d_3 * \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t_a \right) = \text{Kcal} / \text{m}^2 \quad (5)$$

Donde:

e_1, e_2, e_3 : Son los espesores en m

C_1, C_2, C_3 : Son los calores específicos en (Kcal/kg °C)

d_1, d_2, d_3 : Son las densidades en kg/m³

Después de realizar estos cálculos se determina la conductividad térmica (Cd). Luego se calculan los tiempos de calentamiento y el flujo de calor en kilocalorías; se determina la cantidad de kilocalorías almacenadas (temperatura); se halla la potencia de los quemadores calculada por intermedio de la potencia en kilocalorías del gas natural por la cantidad de metros de gas consumidos. Por último, se calcula el intercambio térmico de los quemadores con la carga. Se realiza el cálculo del tiempo de calentamiento y se lleva al plano digital o software para su análisis de comportamiento.

Las características de temperatura del horno son:

- Rango de temperatura: 17 a 1.250 °C
- Duración del proceso: 8 Horas (Aprox.)

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Está basado en técnicas de Fuzzy Logic implementadas en un microcontrolador y otro encargado de manejar los diferentes periféricos.

El sistema lo conforma un control principal con cuatro dispositivos esclavos; está basado en la interfase industrial RS-485 como se muestra en la figura 3.

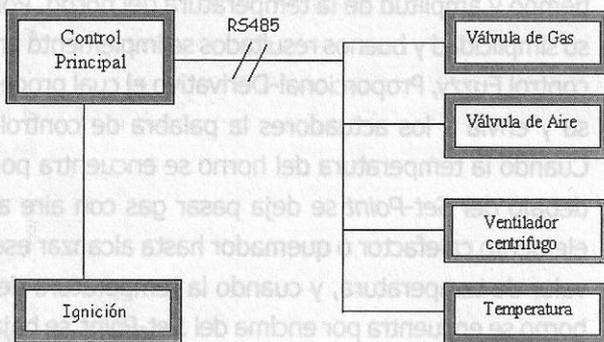


FIGURA 3. SISTEMA DE CONTROL PRINCIPAL

4.1. Control principal

Este es el corazón de todo el sistema; desde aquí se controlan los periféricos por medio del Bus RS-485, se realiza el cómputo de los valores de Fuzzy Logic y se realiza el encendido de los quemadores.

4.2. Temperatura

Este bloque adquiere los datos de temperatura por medio de un pirómetro que fue modificado al crearle un puerto de comunicación serial y por medio de la interfase RS-485, envía estos datos al control principal cuando éste es direccionado.

4.3. Válvula de gas

Consta de un registro de bola para gas de 1/2 pulgada con un acople mecánico (piñón) y un motor paso a paso con su respectiva tarjeta, la cual recibe datos del control principal y actual según la orden dada.

4.4. Válvula de aire

El diseño de esta consta de un registro cortina para aire de 2 pulgadas, las demás características son compartidas con la válvula de gas.

4.5. Ventilador centrífugo

Con este bloque se controla el encendido y apagado de un motor trifásico de 3 HP y además monitorea el estado de las fases como sistema de seguridad. Cuando hay ausencia de alguna o todas las fases, y el motor se encuentra encendido, automáticamente lo apaga y espera a que se restablezcan dichas fases para encenderlo nuevamente.

4.6. Sistema de adquisición de temperatura

Para la realización del sistema de adquisición de datos se utilizó la herramienta de Microsoft, Visual Basic, con

la cual se elaboraron las curvas de quemado para cada línea de producción. Se hizo el direccionamiento del puerto serie (interfase RS-232) de un PC para así poder acceder al Bus RS-485 y hacer la respectiva captura de la temperatura.

4.7. Ignición

Su función es la de encender los quemadores y está conformado por transformadores de alto voltaje que generan un arco eléctrico.

4.8. Interfases

Desde un punto de vista técnico, se denomina interfaz al dispositivo que permite la conexión entre dos equipos para que exista comunicación entre ellos. En general, una interfaz puede ser un elemento software o hardware, ya que también puede recibir el nombre de interfaz aquel software que permite comunicar, por ejemplo, dos aplicaciones distintas.

4.8.1. Interfase RS-232

Esta interfase fue desarrollada con el propósito de establecer comunicación entre computadoras a través de módem, una característica principal es que sólo se puede tener comunicación punto a punto.

4.8.2. Interfase RS-485

La comunicación del sistema de control está basado en la interfase tipo industrial RS-485 que por sus características lo hace menos inmune al ruido electrostático y electromagnético.

La interfase serial RS-485 se diseñó para la conexión física de computadoras y terminales directamente. La longitud de la interfase se puede extender hasta 1.200 metros y alcanzar una velocidad de 10 Mbits por segundo. Su principio de funcionamiento se basa en la utilización de líneas balanceadas, las cuales requieren que cada señal tenga dos conductores sobre los que se estable-

cen básicamente dos niveles de voltaje; la señal sobre el segundo conductor es el nivel complementario del primero. El receptor responde a la diferencia de voltaje entre los dos conductores; este método es también llamado medida diferencial.

Lo anterior conlleva a que este tipo de líneas balanceadas sean inmunes (dentro de algunos límites) al ruido electrostático, electromagnético, picos de voltaje e interferencias en general, por lo que es muy utilizado en el ámbito industrial, lugares donde se presenta con más frecuencia este tipo de ruido.

La interfase RS-485 utiliza cable par trenzado (*Twisted-Pair*); consiste en dos conductores aislados que están retorcidos entre sí, con el cual se consigue una buena inmunidad al ruido electromagnético.

5. RESULTADOS

- Uno de los resultados más esperados y por lo cual se realizó este proyecto es que por medio de la adecuación del horno a gas natural, se economizó un 70 % del combustible utilizado.
- Las horneadas tienen un mejor desempeño mediante el manejo controlado de las variables propias de la planta.
- Luego de haber probado diferentes estrategias de control Fuzzy sobre la planta, se establecieron algunas características con base en el comportamiento en tiempo y amplitud de la temperatura del horno. Por su simplicidad y buenos resultados se implementó un control Fuzzy, Proporcional-Derivativo el cual procesa y envía a los actuadores la palabra de control. Cuando la temperatura del horno se encuentra por debajo del *Set-Point* se deja pasar gas con aire al elemento calefactor o quemador hasta alcanzar ese valor de temperatura, y cuando la temperatura del horno se encuentra por encima del *Set-Point* se baja la cantidad de gas y aire hasta descender la temperatura al mismo valor, es decir, se tiene una franja

muerta de 7 °C en donde los actuadores no se accionan para cambiar la temperatura. La seguridad en cuanto a funcionamiento del horno, se garantiza en la medida en que se monitorean constantemente las fuentes de energía.

6. CONCLUSIONES

Las técnicas Fuzzy Logic dan la posibilidad de controlar sistemas en los cuales es difícil modelar matemáticamente el comportamiento de un sistema.

La implementación de los dispositivos utilizados, con recursos como microcontroladores, hacen que este tipo de tecnologías sean asequibles por microempresas dedicadas a la producción de cerámica y porcelana.

Por el alto costo de una válvula proporcional, se logró diseñar una propia obteniendo buenos resultados hasta el momento.

Existen herramientas como el FuzzyTECH, HiTECH y Pic-Basic que facilitan la realización de cálculos matemáticos en un microcontrolador como divisiones, multiplicaciones, logaritmos, funciones trigonométricas y otras operaciones complejas.

La utilización de técnicas *Fuzzy Logic* ofrece la facilidad de alterar los conjuntos, cambiar las reglas para reestructurar el control de acuerdo con las características de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio, *Hornos industriales de resistencias*, McGraw Hill.

FERNÁNDEZ CHITTI, José, *Hornos Cerámicos*, Ediciones Condorhuasi, Argentina, 1992.

KUO, Benjamin, *Sistemas de control automático*, Ediciones Prentice-Hall, 1996.

Microchip, "FuzzyTECH-MP, User'guide". Microchip Technology Inc. 1994.

Microchip, "Embedded, Solution Controls". Microchip Technology Inc. 1994.

<http://www.kaowooll.com>.

<http://www.motorola.com>.

<http://www.fuzzytech.com>.

<http://www.microchip.com>.

<http://www.imse.cnm.es/xfuzzy/flebwi.com>

Autores

JOHN FERNANDO COLMENARES MONTERO. Ingeniero en Control e Instrumentación Electrónica, con título de Tecnólogo en Electrónica.

Área de interés: microcontroladores.
jfercho@msn.com

CARLOS ARTURO OSPINO YEPES. Ingeniero en Control e Instrumentación Electrónica, con título de Tecnólogo en Electrónica egresado de las Unidades Tecnológicas de Santander en Bucaramanga. Estudiante actual en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica.

Área de interés: microcontroladores y robótica.
txarlie@starmedia.com

ÓSCAR ALIRIO VARGAS AYALA. Ingeniero en Control e Instrumentación Electrónica, con título de Tecnólogo en Electrónica
Área de interés: microcontroladores.
oscar_vargas99@hotmail.com