

CONTROL PARA UN QUEMADOR DE GAS LP CON PROTOCOLO DE SEGURIDAD EN UNA TOSTADORA DE CAFÉ

Julio Ávila Hernández, Javier Gómez Rodríguez, Adrian Basterra González, Mauricio Octavio Ortega Ayala
Instituto Tecnológico de Veracruz
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Av. Miguel Ángel de Quevedo # 2779, Col. Formando Hogar
C.P. 91897, Veracruz, Veracruz, México
Teléfono/Fax: +52 (229) 938 3765
inshc82@hotmail.com, jgomezr@itver.edu.mx, abasterrag@hotmail.com, mauricio_octavio@hotmail.com

RESUMEN.

Se presenta un sistema de control automático para la operación de un quemador de Gas LP que es utilizado como fuente de energía en las máquinas utilizadas para el tueste de café de especialidad, conocidas como tostadoras, en el sector comercial de la industria alimenticia. En esta aplicación en específico las presiones de gas ascienden hasta los 3 kPa y las temperaturas ascienden hasta los 300 °C. El control se encuentra basado en las condiciones de seguridad necesarias para su correcta operación en los negocios de compra y venta de alimentos. Con la finalidad de monitorear todas las variables involucradas se utilizaron tanto sensores de uso comercial como sensores desarrollados con dispositivos discretos e integrados. El algoritmo de control fue desarrollado para ser implementado y probado satisfactoriamente con un PLC de uso comercial y posteriormente con un microcontrolador.

1. INTRODUCCIÓN

Los granos de café verde deben recibir un procesamiento térmico, llamado tueste, que genere en ellos una serie de alteraciones, tanto físicas como químicas, para alcanzar las características de aroma, sabor, textura y color deseadas. Inicialmente el tueste del grano se realizaba de forma artesanal, pero debido a la creciente demanda del producto en el mercado surgen las máquinas tostadoras de operación manual con diferentes fuentes de energía. Dichos equipos existen de tipo industrial y de tipo casero, ambos tipos utilizan Gas LP o corriente eléctrica como fuente de energía para el control de la temperatura del proceso, las diferencias entre unos y otros son el costo del proceso y el control de los mismos.

El costo del proceso es menor cuando es utilizado el Gas LP que la corriente eléctrica, pero el control se vuelve más complicado por las condiciones de seguridad que se requieren.

La investigación científica en el área de nutrialimentación aplicada al tueste de café ha conducido a la necesidad de desarrollar sistemas de control automáticos basados en PLCs y microcontroladores para facilitar esta tarea. Los sistemas de control automáticos evitan tanto el error humano, debido a que pueden ejecutar acciones a partir de normas y protocolos de seguridad previamente establecidos en su programación, así como la necesidad de emplear un operador experto que tenga que estar presente durante todo el proceso para controlarlo de manera manual.

Para el desarrollo de dichos sistemas de control es necesario emplear conocimientos de control, programación y normas de seguridad con la finalidad de mejorar la eficiencia del proceso.

2. DESARROLLO

Para lograr el tostado deseado en cada proceso individual de tueste de café es necesario que se presente un determinado perfil de temperaturas y tiempos, normalmente este perfil se logra a través de un operador experto al modificar la flama del quemador de Gas LP entre piloto, fuego alto y bajo, a partir de su conocimiento y entrenamiento en materia de café y su procesamiento. Durante el proceso se presentan el precalentado y el tueste que son las dos etapas que se deben controlar, volviéndose necesario el monitoreo constante de la flama del quemador para mantener las condiciones deseadas.

Para poder desarrollar el algoritmo de control fue necesario contar con una tostadora manual que presentara todos los parámetros inherentes al proceso a controlar, dicha tostadora permitió realizar un análisis detallado de todas las condiciones de operación y seguridad.

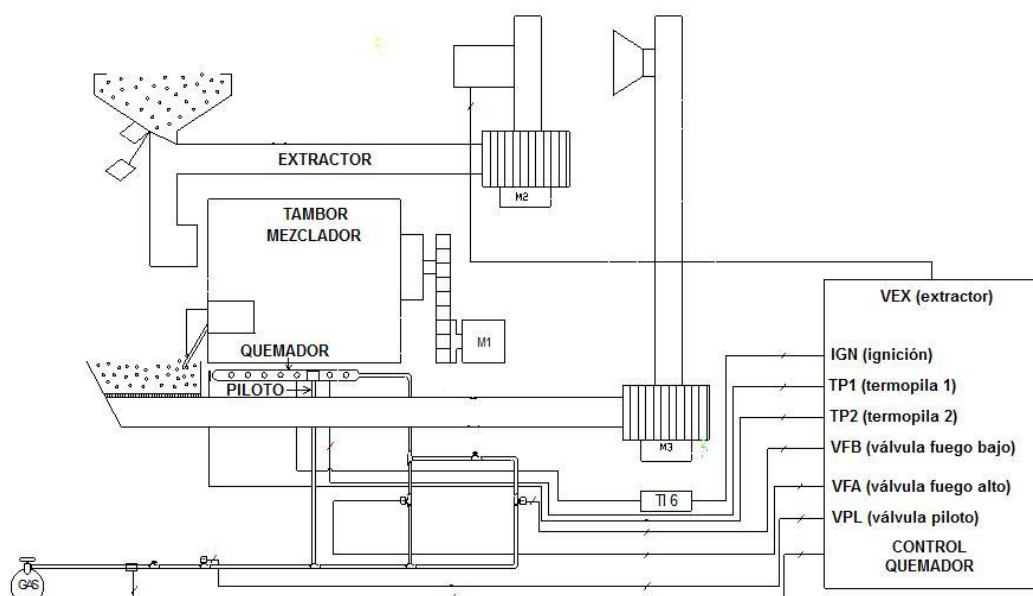


Figura 1. Diagrama general de la máquina tostadora.

2.1. Módulo de control del quemador

En la Figura 1 se muestra el diagrama general de la máquina tostadora de café que fue utilizada para el desarrollo del presente trabajo. El sistema mostrado es referente a la sección de control del quemador, diseñado específicamente para su operación en forma manual y automática obedeciendo solo a comandos de encendido, apagado, fuego bajo y fuego alto.

El modulo de control del quemador del horno tiene como función desarrollar todas las acciones de control para la operación del quemador a gas LP las principales partes con las que cuenta el quemador son:

- Quemador.
- Piloto.
- Electrodo de ignición.
- Termopila piloto.
- Termopila quemador.
- Electroválvula para piloto.
- Electroválvula para fuego alto.
- Electroválvula para fuego bajo.
- Transformador de ignición.

El cuerpo del quemador es el dispositivo que se utiliza para la combustión del gas, donde se produce la flama, mismo que se ubica en la Figura 1 como quemador y se muestra físicamente en la Figura 2. El piloto es un dispositivo que tiene un

orificio muy pequeño, que no supera el milímetro de diámetro, por el cual se obtiene un bajo flujo de gas permitiendo solamente una pequeña flama, suficiente para poder encender el fuego alto o bajo del quemador, como se puede apreciar en la Figura 3a).



Figura 2. Módulo quemador.

El electrodo de ignición Figura 3b) permite la generación de un arco eléctrico para iniciar la combustión del gas y producir la flama en el piloto, la termopila para el piloto Figura 3c) y otra igual que se encuentra en el extremo del quemador son los sensores que indican el estado de encendido o apagado en que se encuentran el piloto y el quemador.

Las electroválvulas, normalmente cerradas, como se muestran en la Figura 4a), controlan el paso del gas para el piloto y el quemador en fuego alto y fuego bajo. El transformador de ignición como se muestra en la Figura 4b) genera un voltaje de 4000

Volts para producir un arco eléctrico de encendido del piloto.



Figura 3. a) Piloto b) electrodo c) termopila.

En el quemador de Gas LP existen fenómenos físicos que se pueden monitorear para ser empleados como parámetros de control, es sumamente útil contar con transductores eléctricos, del tipo activo, como son el termopar y la termopila, que permiten la medición del cambio de energía en el quemador que se manifiesta a través de los cambios en la temperatura gracias al uso del principio físico conocido como termoelectrónico, con dichos transductores se puede observar que al inicio de la combustión del Gas LP existe una pendiente negativa, por milisegundos, que se convierte en positiva y sigue su conocido comportamiento logarítmico hasta alcanzar la temperatura máxima, al mitigarse la flama la pendiente es negativa con un comportamiento exponencial hasta alcanzar la temperatura ambiente como se muestra en la *Figura 7*.

2.2. Algoritmo de control

La operación del quemador a gas requiere de un procedimiento que tome en cuenta las condiciones de seguridad y a la vez la operación del proceso de encendido y apagado tanto del piloto como del quemador. Para el diseño de este algoritmo se utilizaron diagramas ASM (Algorithm State Machine) conocidos como algoritmos para maquinas de estados.

En la *Figura 5* se muestra el algoritmo desarrollado en un diagrama ASM donde podemos observar el flujo de control considerando los sensores de entrada, que son las termopilas para piloto y quemador, así como los actuadores de salida que son las electroválvulas de control, podemos observar también que en algunas condiciones por seguridad se generan alarmas y se ejecutan acciones de apagado de emergencia.



Figura 4. a) Electroválvula b) Transformador de ignición.

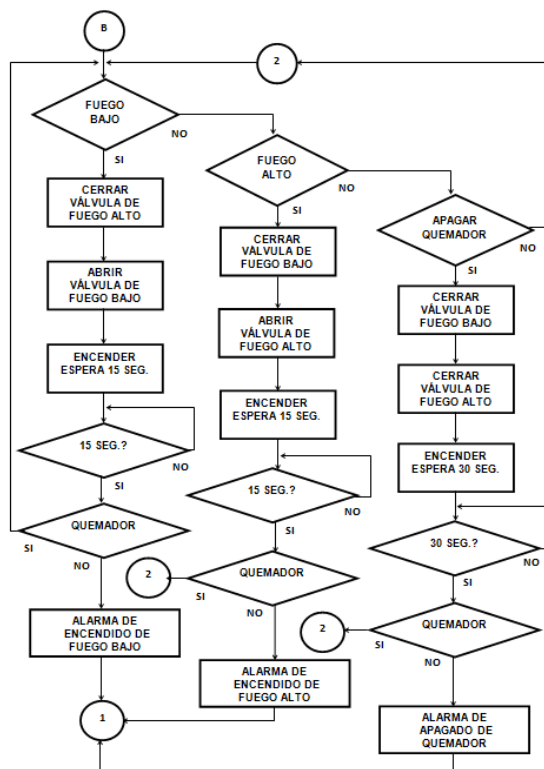


Figura 5. Diagrama ASM de la fase de quemador.

En el flujo de la operación del quemador se pueden apreciar 3 trayectorias principales, que son fuego alto, fuego bajo y apagado, que son las condiciones de control, cada una de las cuales considera los tiempos requeridos para la seguridad del proceso, si dentro de estos tiempos no se ejecuta la acción ordenada se recurre a un sistema de alarma y se toman las acciones correspondientes que nos permitan una terminación segura del

proceso. El algoritmo de control apaga el sistema, utilizando su protocolo de seguridad, y activa las alarmas sonora y visual en caso de presentarse alguna falla en el encendido del piloto, giro de tambor, ventilador o encendido de fuego alto y fuego bajo.

La secuencia del protocolo de seguridad al apagado es la siguiente:

1. Cerrar todas las válvulas de gas.
2. Mantener extractor encendido 1 minuto.
3. Indicar la falla del proceso al usuario.
4. Esperar a que el usuario repare el problema.
5. Reiniciar el sistema.
6. Esperar a que se ejecute el autodiagnóstico automático inicial y observar los mensajes del sistema.

2.3. Implementación con PLC.

Una vez que se diseñó el algoritmo de control se procedió a su implementación con un controlador lógico programable PLC de uso industrial modelo SR3B261FU de la marca TELEMECANIQUE que cuenta con:

- 16 entradas digitales de 100-240 VAC.
- 10 salidas a relevador.
- Alimentación 100-240 VAC.

El programa de control se realizó obedeciendo los algoritmos diseñados y se implementó en diagrama de escalera o contactos, este método es muy seguro y ha sido ampliamente probado en la industria [2].

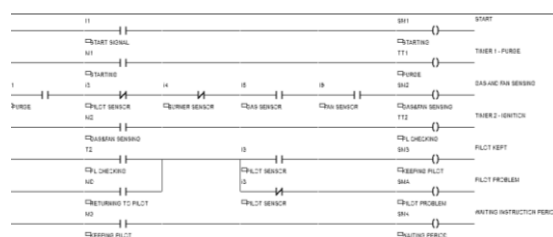


Figura 6. Sección de autodiagnóstico en diagrama de escalera para PLC.

En la Figura 6 se presenta la sección del autodiagnóstico del programa de control en diagrama de escalera, podemos observar que el flujo de información se muestra por líneas de corriente que fluyen de izquierda a derecha, los contactos forman las entradas al sistema y en la

parte derecha las bobinas forman las salidas o actuadores del sistema.

Los tiempos de espera para verificar si el piloto ha quedado encendido están basados en la curva de reacción de la termopila al calor inducido por la flama del piloto, como se muestra en la Figura 7.

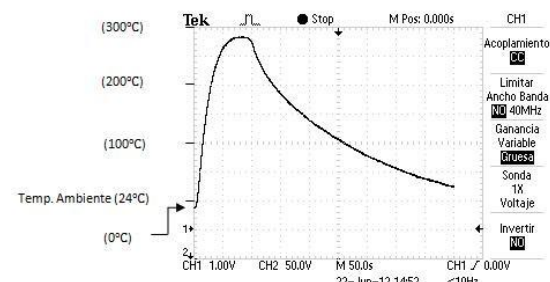


Figura 7. Respuesta de la termopila a la flama.

Se considera que en lapso de 15 segundos es posible detectar la tendencia de la curva y obtener la pendiente correspondiente para determinar el estado del piloto.

2.4. Implementación con el microcontrolador PIC18F4550.

Una vez que se probó el algoritmo de control con el PLC y se obtuvieron resultados satisfactorios en el sistema, se procedió a su implementación haciendo uso de un microcontrolador PIC18F4550, y circuitos auxiliares, con el objeto de mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción y mantenimiento de las máquinas tostadoras de café.

Dentro de los circuitos auxiliares que fueron desarrollados e implementados, para adaptar las señales de entrada y salida a las condiciones requeridas por el PIC18F4550, podemos mencionar los relevadores de estado sólido para el control de las válvulas de gas, del transformador de ignición y del extractor del tambor como se muestra en el diagrama en la Figura 8 y su implementación física en PCB en la Figura 9a).

Otro circuito auxiliar implementado es el acondicionador de señal necesario para que el PIC pueda realizar la lectura de la temperatura del piloto y del quemador utilizando una termopila, mismo que se puede observar en el diagrama de la Figura 10.

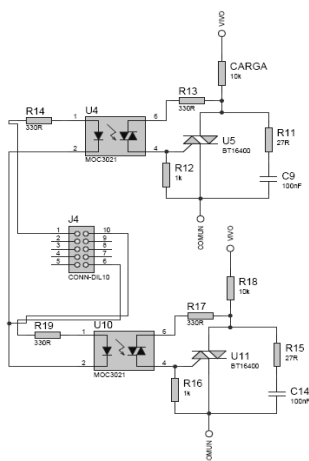


Figura 8. Diagrama de relevadores de estado sólido.

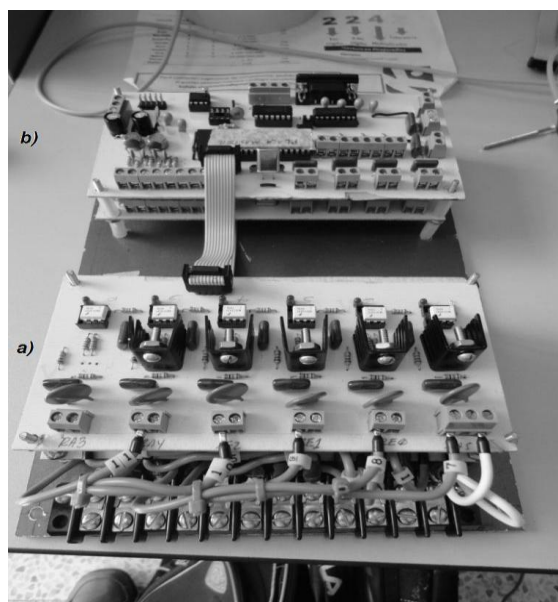


Figura 9. a) Relevadores de estado sólido b) PIC18F4550.

El extractor tiene un sensor electro magnético de efecto hall que está montado en la parte interior del escape de aire caliente, donde se implementó un mecanismo que nos permite detectar el flujo de aire.

El resultado de la interacción del mecanismo y el sensor producen una señal que es enviada al PIC para su interpretación. Se diseñaron los circuitos de acondicionamiento de señal para que el PIC pueda controlar el medio y los dispositivos de potencia, tratando de optimizar los espacios requeridos por el diseño del sistema.

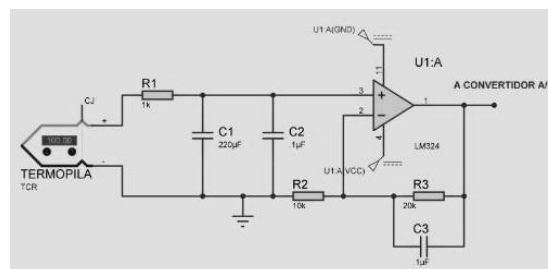


Figura 10. Acondicionador de señal para termopila.

El microcontrolador que usamos en este módulo es el PIC18F4550 y se muestra en la Figura 9b), este dispositivo nos ofrece las siguientes características.

- ADC de 13 canales con salida a 10 bits.
- 5 puertos con I/O digital.
- Comunicación USART.
- Comunicación I²C.
- Memoria RAM de datos de 2 KB.
- Memoria EEPROM de 256 KB.
- Memoria FLASH de 32 KB.

Los microcontroladores PIC se pueden programar mediante el uso de lenguaje ensamblador o de un lenguaje de alto nivel. Lo que facilita mucho el desarrollo de los sistemas de automatización es el uso de este tipo de lenguajes, los cuales son estándares globales y han subsistido durante décadas, como es el caso de C, que es el lenguaje que se decidió usar en el proyecto por su eficiencia y versatilidad.

Para el control del quemador se asignaron 3 señales lógicas dirigidas hacia las 3 entradas del módulo del quemador, denominadas PILOTO, FUEGO BAJO y FUEGO ALTO. Cada una de estas manda una orden al módulo del quemador para cambiar el estado de las electroválvulas a como corresponda en la nueva instrucción, pudiéndose activar hasta dos de manera simultánea, siempre que una de ellas sea la del piloto. En caso de que la instrucción recibida tuviera más de una señal de activación para las electroválvulas el sistema responderá de acuerdo al algoritmo de control.

El sistema censa la actividad del piloto por medio de termopilas, teniendo un rango de 0 a 300 °C que corresponden a un voltaje de 0 a 5 Volts. Con este voltaje aplicado al ADC del PIC se obtiene el valor de la temperatura a la que se encuentra el piloto,

una sección del programa en lenguaje C se puede apreciar en la *Figura 11*.

```
//=====ENCENDIDO DE PILOTO=====//  
SPARK_ON      // ENCENDER CHISPA  
VALV_PILOT_ON // ABRIR VÁLVULA PILOTO  
  
//=====CHEQUEO DE PILOTO=====//  
//-----REVICION DEL ADC -----//  
  
for (i=0; i<3; i++)  
{  
    set_adc_channel(0); // INICIA FOR  
    delay_us(10);       // SELECCIONA TERMOPILA PILOTO  
    delay_us(10);       // TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN  
    temp_1=read_adc();  // TOMAR LECTURA DEL CANAL  
    delay_us(10);       // TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN  
  
    delay_ms(3000);     // TIEMPO DE ENCENDIDO DEL PILOTO  
  
    set_adc_channel(0); // SELECCIONA TERMOPILA PILOTO  
    delay_us(10);       // TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN  
    temp_2=read_adc();  // TOMAR LECTURA DEL CANAL  
    delay_us(10);       // TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN  
  
    if (temp_1<temp_2) // DETERMINA LA PENDIENTE  
    {  
        alarm_reg = 0; // PENDIENTE POSITIVA  
                        // PILOTO ENCENDIDO  
    }  
  
    else  
    {  
        alarm_reg = 2; // PENDIENTE NEGATIVA  
                        // ALARMA DE PILOTO  
    }  
}  
//TERMINA FOR
```

Figura 11. Encendido del piloto en lenguaje C.

El sistema de seguridad incluye el hacer sonar una alarma y encender una señal luminosa, a partir de un código de sonidos el usuario puede reconocer que tipo de alarma que se ha activado y tomar las acciones convenientes.

3. RESULTADOS

Se ha desarrollado el modelo de algoritmo para el sistema de control de ignición del sistema piloto y quemador así como también el sistema de alarmas y sus respectivos protocolos.

El sistema de control automático desarrollado ha sido implementado en una tostadora que utiliza Gas LP y cuya operación se llevaba a cabo solo de manera manual, para su desarrollo se han tomado en cuenta las condiciones de seguridad para una operación confiable de tipo industrial. Se controla el encendido y el apagado tanto de la flama piloto como del quemador, así como el nivel de flama del quemador como respuesta a los diferentes parámetros considerados.

4. CONCLUSIONES

La experiencia obtenida en el desarrollo del proyecto nos permite el aprendizaje sobre los efectos físicos que suceden en un sistema operado con Gas LP como son el tiempo de distribución del gas por las líneas, los tiempos de ignición y sofocación de flamas, un aprendizaje muy amplio en ruidos eléctricos y térmicos que se generan en

todas las etapas del proyecto, por ejemplo en el momento de ignición del fuego bajo o alto se produce un efecto térmico detectado por la termopila. Otro problema difícil de resolver pero que deja gran aprendizaje sobre ruidos eléctricos fue el generado por el funcionamiento del transformador de ignición al producir ruidos de línea y aéreos que afectaban gravemente el funcionamiento del microcontrolador PIC y sus circuitos auxiliares. La solución de estos problemas fue muy significativa para el éxito de este proyecto.

La experiencia obtenida al implementar un sistema de seguridad con normas y directivas a seguir permitió tener un control eficiente de la flama y de los problemas que podrían llegar a presentarse al usuario final a fin de salva guardar su integridad y la del sistema.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pallás Areny, Ramón. *Sensores y acondicionadores de señal*. Tercera Edición. Ed. Alfaomega. 2006. ISBN 84-267-1171-5.
- [2] Mandado, Enrique; Marcos, Jorge; Fernández, Celso; Armesto, José. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. Segunda Edición. Ed. Alfaomega. 2009. ISBN 978-607-7686-73-6.
- [3] Angulo Usategui, José M.; Angulo Martínez, Ignacio. *Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones*. Segunda Edición. Ed. McGraw Hill/Interamericana. 1999. ISBN 84-481-2496-0.
- [4] Deitel, Harvey M.; Deitel, Paul J. *Cómo programar en C/C++ y Java*. Cuarta Edición. Ed. Pearson Educación. 2004. ISBN 970-26-0531-8.
- [5] Galeano, Gustavo. *Programación de sistemas embebidos en C*. Primera Edición. Ed. Alfaomega. 2009. ISBN 978-958-682-770-6.
- [6] García Breijo, Eduardo. *Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC*. Primera Edición. Ed. Alfaomega. 2008. ISBN 978-970-15-1397-2.