

CONTROL DEL ENFRIAMIENTO Y APAGADO SEGURO DE UN HORNO PARA EL PROCESO DE TUESTE DE CAFÉ

Adrian Bastera González, Julio Ávila Hernández
Julio Cesar Ortiz Domínguez, 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
abasterrag_itv@hotmail.com, inshe82@hotmail.com
ark_unix@hotmail.com, mauricio_octavio@hotmail.com

RESUMEN.

Se presenta un control automático para el enfriamiento de un horno tostador de café durante el proceso de tueste y apagado del mismo, para mejorar la regulación de temperatura reduciendo sus tiempos muertos, cuando se requiere que la temperatura baje para estabilizarla o evitar deformaciones en el horno durante el apagado de la tostadora.

Este control es realizado mediante un PID para variar la velocidad de un ventilador extractor que presentó un resultado satisfactorio, fue programado en un microcontrolador PIC al cual se conectan circuitos electrónicos de procesamiento de información, transductores, procesadores de señal y circuitos de control de potencia de salida [9].

1. INTRODUCCION

El control de temperatura en una máquina tostadora de café requiere de un proceso especializado basado en condiciones prácticas por experiencia de expertos tostadores de café y teóricas presentadas por científicos especializados.

La investigación científica y la práctica en el área de nutrialimentación aplicada al tostado de café nos han conducido a la necesidad de sistemas de control computarizado como son los microcontroladores para facilitar esta tarea.

Los sistemas automáticos evitan el error humano así como la necesidad de implementar un operador que tenga que estar presente durante un proceso para operarlo de manera manual. Al sustituir a esta persona por un sistema inteligente capaz de poder tomar decisiones, a partir de normas y protocolos previamente establecidos en su programación, se puede reducir la cantidad de

personal que se utilizaba en el proceso según la cantidad de acciones que sea capaz de realizar de forma automática el sistema.

Para lograr el control de temperatura automático se utilizaron sistemas de control programable denominados microcontroladores. Estos circuitos son capaces de recibir señales de entrada de bajo voltaje y tienen una salida de bajo voltaje.

Pero los sistemas que gobiernan las variables mecánicas de la máquina, como motores, válvulas de gas y solenoides son sistemas que utilizan voltajes de corriente alterna CA, por lo cual se implementó un sistema de control de potencia a base de relevadores de estado sólido y relevadores electromagnéticos como salidas de control, además se implementaron sensores de tipo óptico, magnético y bimetálicos como señales de entrada al sistema de control.

Uno de los retos de este proceso es que al trabajar con sistemas de CA, como son motores y solenoides de válvulas, y algo muy importante, un transformador de ignición que entrega dos salidas de 7 KV, se genera un alto nivel de ruido en las líneas de comunicación de datos y transmisión de los sensores.

Las alternativas que había antes de los microcontroladores fueron los PLD, los CPLD y los FPGA, además del control por relevadores y los PLC, sin embargo, ninguno de los tres elementos mencionados anteriormente ofrece la modularidad de funciones integradas en un mismo chip. El implementar la circuitería con el uso de microcontroladores nos representa ventajas muy significativas al tratarse de tamaño y precio, además de su versatilidad en cuanto a diseño por su programación en lenguaje C.

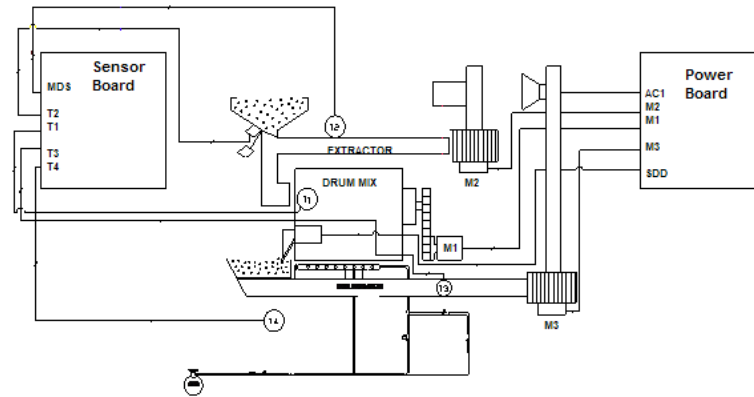


Figura 1. Diagrama general de tostadora.

2. DESARROLLO

Un sistema automático de tostado de café requiere de un control que implica el procesamiento de diversas variables involucradas en el proceso de tueste de café, como son las siguientes:

1. Medición de la temperatura del tambor.
2. Medición de la temperatura del extractor.
3. Accionamiento del tambor de secado (DRUM MIX).
4. Detección del funcionamiento del tambor operando.
5. Encendido del ventilador de extracción del tambor.
6. Detección del ventilador operando.
7. Encendido del ventilador enfriador de café.
8. Apertura del solenoide de la compuerta de descarga del café.
9. Comunicación con el quemador para activar piloto, fuego alto y fuego bajo.

2.1 Muestreo de las temperaturas

Las dos variables de entrada más importantes son las temperaturas del tambor y la del extractor de aire caliente. Uno de los problemas al medir esto es la exactitud en la medición, la cual se ve afectada por distintos factores, como lo son el ruido electromagnético, el ruido estático y el tipo de termopar. En este caso usando un tipo K, el problema se reduce, ya que es uno de los más estables. El otro problema es adecuar el micro voltaje del termopar para su medición por el convertidor analógico digital del microcontrolador, para lo cual se tienen que usar amplificadores de instrumentación.

Existe un amplificador especial que permite simplificar la medición de la temperatura

utilizando un termopar tipo K, el AD597, este circuito determina la temperatura de contacto en la placa de circuito impreso y ajusta la compensación en frío, entregando una medición proporcional de 10mV/°C.

Se muestra en la Figura 2 dos termopares tipo K acoplados a dos circuitos integrados AD597, cuyas salidas son tomadas por el microcontrolador PIC18F4550 en sus canales analógicos AN0 y AN1. El rango de temperaturas posibles de medir en este sistema es de 0 a 500°C.

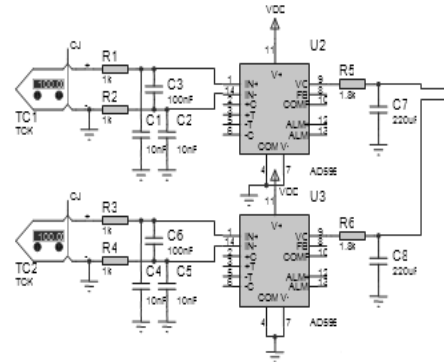


Figura 2. Diagrama de conexión de termopar tipo K con AD597.

2.2 Relevadores de estado sólido

Algunos dispositivos de la tostadora automática de café requieren de voltajes de 120 VCA para su funcionamiento, tal es el caso del ventilador del extractor, el motor del tambor, la chispa, etc., por lo que se implementaron los relevadores de estado sólido que son circuitos en los que el componente principal y el que hace las fases de interruptor es un TRIAC, dispositivo que tiene la particularidad de disparar una corriente de hasta 12 A si recibe una señal de entrada mínima.

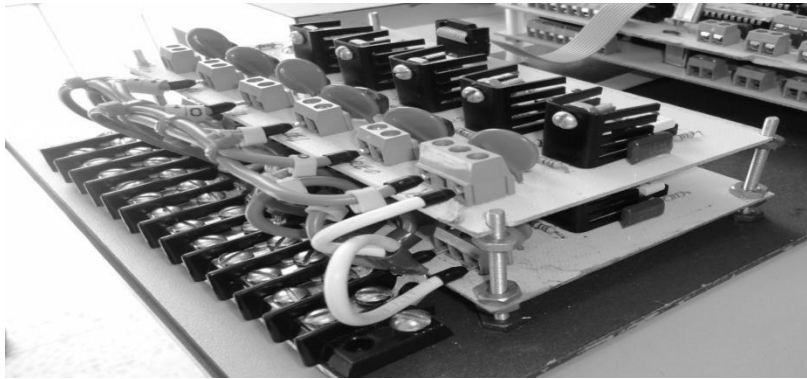


Figura 3. Tarjeta de potencia con relevadores de estado sólido.

El circuito está acoplado al microcontrolador de forma optoelectrónica, esto con el propósito de aislar el voltaje de línea de los sensibles circuitos de control. En la *Figura 3* se muestra la placa terminada de relevadores de estado sólido que se utiliza tanto en la tarjeta maestra como en la de control del quemador.

2.3 Sensores

Como se muestra en la *Figura 1*, se tienen colocados dos termopares T1 y T2 para la medición de la temperatura del tambor y el extractor; se tienen 3 motores M1 y M2 y M3 para accionamiento del tambor de secado y los ventiladores. Se cuenta con sensores magnéticos y ópticos para determinar la operación correcta, tanto del extractor como del tambor. Para la apertura de la compuerta de descarga se ha colocado un solenoide.

2.3.1 Sensor del tambor.

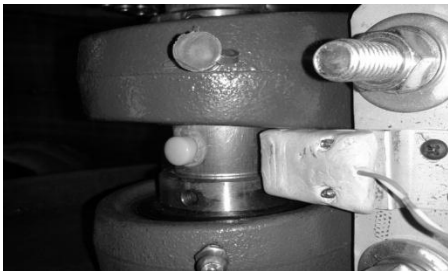


Figura 4. Sensor del tambor

El sistema de control cuenta con sensores que determinan si los componentes están funcionando correctamente durante todo el proceso. El primero de ellos es el sensor magnético del tambor secador, el cual se encuentra a un costado del eje trasero. Este sensor consiste en un detector de efecto Hall, para lo cual se montó un imán en la flecha del tambor, de esta forma la temperatura de 150 °C de

la flecha no afecta al sensor. En la *Figura 4* se puede observar la localización de este sensor.

2.3.2 Sensor ventilador extractor

El ventilador tiene un sensor optoelectrónico por interrupción de haz que está implementado en la parte interior del escape de aire caliente a través de un mecanismo que reacciona con la velocidad del flujo de aire.

2.4. Operación de motores

El tambor de tueste, el ventilador extractor y el ventilador enfriador trabajan con motores eléctricos de CA. Estos componentes requieren de relevadores de estado sólido para ser accionados por el microcontrolador. El ventilador enfriador de café y el motor del tambor sólo necesitan ser encendidos o apagados, por lo mismo, no requieren de control extra más que mandar una señal de encendido o apagado en cualquier caso, sin embargo, el ventilador de extracción de aire caliente requiere que su potencia sea regulada para mantener temperaturas fijas dentro del sistema, sin embargo, el relevador de estado sólido funciona igual, lo que difiere es la señal de entrada. Para que el relevador de estado sólido pueda regular la potencia de su salida se debe de trabajar como un control de fase variable, de este modo, necesitamos sincronizar el microcontrolador con la línea de alimentación de CA. Para este fin implementamos un circuito detector de cruces por cero, el cual se muestra en la *Figura 5*.

La señal de salida de este dispositivo llega al microcontrolador hacia un pin destinado especialmente para interrumpirlo cuando haya un cambio de estado, lo que lo hace extremadamente preciso. Lo que el microcontrolador tiene que hacer ahora es disparar el relevador de estado sólido un

corto tiempo después de que haya un cruce por cero y con eso, se regula la potencia del ventilador de extracción de aire caliente del tambor.

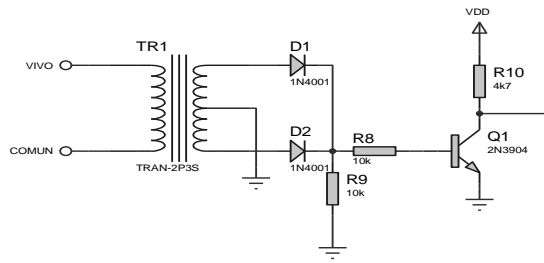


Figura 5. Circuito detector de cruces por cero de la línea de CA.

2.5. Operación de solenoide

La compuerta de salida de café debe permanecer cerrada casi todo el tiempo, debiendo abrirse solamente cuando termine el ciclo de tueste. Se implementó un sistema de apertura, basado en un solenoide que irá dentro de la carcasa de la tostadora, este solenoide estará gobernado, al igual que los demás dispositivos, por un relevador de estado sólido al cual se le mandará una señal de encendido cuando el ciclo de tueste finalice.

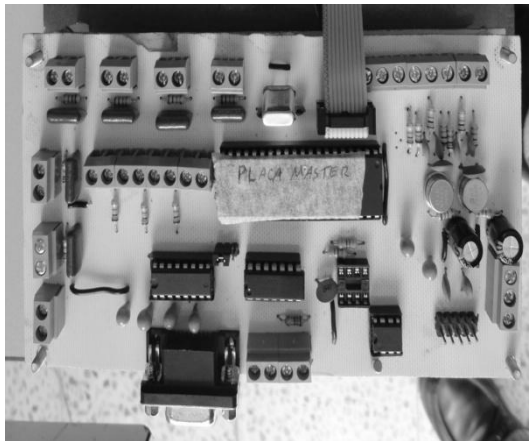


Figura 6. Tarjeta terminada del modulo maestro.

2.6 Comunicación

Debido a que el sistema requería ser modular, se separaron las funciones del quemador de las del módulo maestro, por lo tanto, con el afán de asegurar la comunicación de estos dos módulos, se asignaron 3 salidas lógicas dirigidas hacia las 3 entradas del módulo del quemador, denominadas HIGH FIRE, LOW FIRE Y PILOTO. Cada una de estas manda un orden al módulo del quemador a cambiar el estado de sus válvulas a como corresponda.

2.7 PCB

El circuito de la placa maestra ofrece la posibilidad de efectuar la regulación de la temperatura mediante un algoritmo de control. En la Figura 6 se muestra la placa maestra terminada con toda su circuitería.

2.8 Funcionamiento general

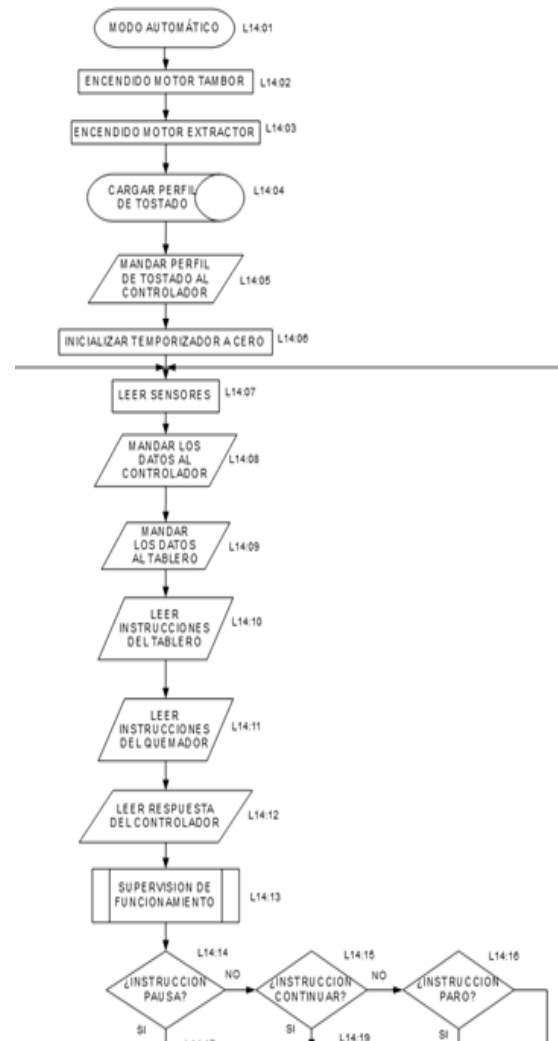


Figura 7. Funcionamiento general.

El módulo de circuito impreso PCB, en su programación, implementa un algoritmo de estados múltiples, como se muestra en la Figura 7, comenzando por el encendido del motor del tambor y la comprobación de que todos los sistemas están funcionando correctamente. Posteriormente, se procede a mandar a encender el piloto y la flama alta, para comenzar a calentar el tambor secador, cuando la temperatura asciende a 200 °C comienza

un ciclo de tostado automático, en este caso se procede como sigue, dependiendo si se trata de un tostado automático o manual. En el flujo de la operación del quemador se pueden apreciar 3 trayectorias principales, que son pausa, continuar y paro, que son las condiciones de control, cada una de las cuales considera los tiempos requeridos para la seguridad del proceso, las anteriores son las tres acciones a seguir por el operador según lo requiera durante la supervisión de proceso.

2.9 Control de enfriamiento

La operación del algoritmo principal de control de temperatura produce tiempos muertos muy largos en la etapa de enfriamiento cuando se excede la temperatura deseada, ya que éste se produce solo por condiciones ambientales. Para reducir estos tiempos muertos se diseñó un control de enfriamiento utilizando el extractor de flujo variable operado por un controlador PID, el desarrollo del mismo considera como punto de consigna o SET POINT “SP” la temperatura a la cual el tambor de tueste tendrá que operar, generalmente es de 200 °C como se muestra en la *Figura 8*.

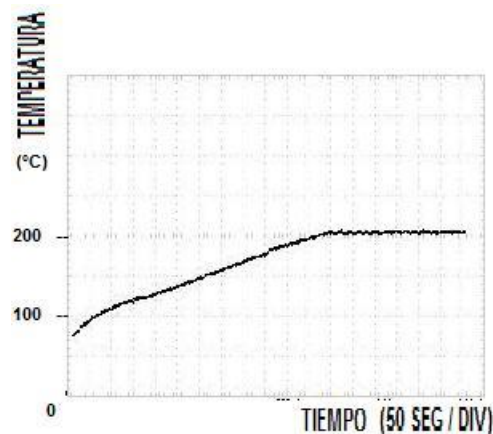


Figura 8. Gráfica del controlador PID una vez implementado en el horno.

Se medirá la temperatura del proceso, o sea la del tambor de tueste, denominada variable de proceso PROCESS VARIABLE “PV”, considerando estas dos condiciones PV y SP calculamos el error que se presenta cuando no son iguales, lo que nos obliga a hacer correcciones en el flujo del extractor. El proceso para determinar estas correcciones denominadas como ERROR DEL PROCESO “EP” considera la diferencia entre SP y

PV, $EP = SP - PV$, el tratamiento de EP es lo que se denomina CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO “PID”, se utiliza un sistema discreto para el diseño de este controlador, llevando la teoría analógica a un algoritmo en lenguaje C. Como podemos observar en la *Figura 9* la curva de error generada por un sistema en la cual podemos considerar dos condiciones para la acción de control, una sería el área del error y otra la pendiente del error, estos parámetros nos permiten poder corregir el error de una forma más precisa, el área nos indica la cantidad de error existente y la pendiente nos indica la razón de cambio del error. Con estos parámetros podríamos establecer en tiempo continuo el procesamiento de la ecuación (1).

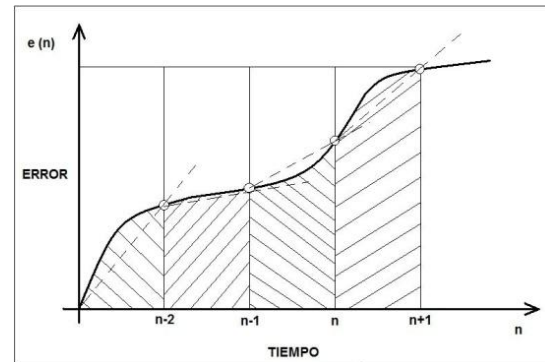


Figura 9. Gráfica del error entre el SET POINT y la variable de proceso.

$$u(t) = e(t)K_p + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Considerando que el sistema de control se realiza con un microcontrolador utilizaremos la representación discreta para el procesamiento del error, considerando la integral y la derivada discreta en la siguiente forma utilizando el método trapezoidal para la integral:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{i=1}^n e(n)T + \frac{K_d [e(n) - e(n-1)]}{T} \quad (2)$$

Considerando la posibilidad de mejorar la respuesta al sistema consideramos tener más muestras estadísticas para mejorar la predicción del control por lo tanto utilizaremos la ecuación (1) recorrida en el tiempo $u(n-2)$ quedando como se muestra en la ecuación (3).

$$u(n-2) = Kp e(n-2) + Ki \sum_{i=1}^{n-2} e(i)T + \frac{Kd[e(n-1) - e(n-2)]}{T} \quad (3)$$

$$u(n) - u(n-2) = Kp[e(n) - e(n-2)] + Ki \left[\sum_{i=1}^n e(i) - \sum_{i=1}^{n-2} e(i) \right] T + \frac{Kd[e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)]}{T} \quad (4)$$

$$u(n) = u(n-2) + e(n) \left[Kp + KiT + \frac{Kd}{T} \right] + e(n-1) \left[+KiT - \frac{2Kd}{T} \right] + e(n-2) \left[\frac{Kd}{T} - Kp \right] \quad (5)$$

$$u(n) = u(n-2) + K1 e(n) + K2 e(n-1) + K3 e(n-2) \quad (6)$$

Considerando las ecuaciones (2) y (3) realizamos la ecuación de diferencia entre ambas obteniendo la ecuación (4), reduciendo y separando términos comunes se tiene la ecuación (5), simplificando y sustituyendo los coeficientes de $e(n)$, $e(n-1)$ y $e(n-2)$ por $K1$, $K2$ y $K3$, resulta la ecuación (6). Las constantes $K1$, $K2$ y $K3$ se definen en las ecuaciones (7), (8) y (9) que se muestran a continuación:

$$K1 = Kp + KiT + \frac{Kd}{T} \quad (7)$$

$$K2 = KiT - 2 \frac{Kd}{T} \quad (8)$$

$$K3 = \frac{Kd}{T} - Kp \quad (9)$$

Como podemos observar las constantes $K1, 2, 3$ dependen de las constantes Kp , Ki y Kd , que son las constantes de control PID, las cuales podemos obtener teniendo un modelo matemático de la planta a controlar o mediante algunas técnicas de entonación. El sistema utilizado es por aproximaciones sucesivas iniciando con Kd y Ki con valor de cero y se inicia dando valores a Kp hasta obtener la mayor aproximación al set point ya que en este modo solo se aproxima, hecho esto, se procede a incrementar la Ki hasta obtener el punto deseado, por último la Kd se ajusta llevando el set point a cambios bruscos e ir aumentando el valor hasta llegar al punto deseable. Este algoritmo discreto de control PID resulta muy eficiente para ser programado con microcontrolador ya que se define por sumas y multiplicaciones.

3. CONCLUSIONES

Durante el tiempo de desarrollo de este proyecto se logró la implementación de un algoritmo de control PID para la regulación de la temperatura basada en enfriamiento durante el tostado y el apagado de la tostadora, así como el algoritmo para la automatización del proceso de tostado, incluyendo todas las etapas desde que se carga la máquina con café hasta que la máquina expulsa el café tostado. Además de diseñar un método de medición de temperatura por medio de termopares. La experiencia y las pruebas realizadas con el

prototipo real permitieron conocer el proceso y aprender las diversas problemáticas derivadas de este tipo de procesos, como lo fue la captura de temperaturas y la implementación de un algoritmo eficiente de regulación de temperatura. Todo esto abre un campo de oportunidades en la industria, tanto del café como de la industria de alimentos, así como algunos procesos de hornos para mejorar su rendimiento y ayudar a reducir los consumos de energía.

4. 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.
- [7] Creus Sole, Antonio. *Instrumentación industrial*. Séptima Edición. Ed. Marcombo. 2005. ISBN 84-267-1361-0.
- [8] Ogata, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. Cuarta Edición. Ed. Pearson Educación. 2003. ISBN 84-205-3678-4.
- [9] Enríquez Harper, Gilberto. *Instalaciones electromecánicas en casas y edificios*. Primera Edición. Ed. Limusa. 2003. ISBN 968-18-5874-3.