

Equipo Didáctico para Control y Monitoreo de Temperatura

Miguel Magos Rivera

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, San Pablo 180 Col. Reynosa. México D.F. México.
mrm@correo.azc.uam.mx

Ricardo Godínez Bravo

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, San Pablo 180 Col. Reynosa. México D.F. México.
rgb@correo.azc.uam.mx

Daniel A. Mendieta Hernández

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, San Pablo 180 Col. Reynosa. México D.F. México.

RESUMEN

Se presenta el diseño y la construcción de un prototipo didáctico que servirá de apoyo para realizar prácticas de laboratorio para estudiantes de carreras de ingeniería en el área de control e instrumentación. El equipo basa su funcionamiento en un proceso térmico sobre el cual se puede ejercer control, además cuenta con una serie de sensores que permiten monitorear su comportamiento. Las características generales del equipo, así como los bloques que lo conforman son descritos en el artículo. Finalmente, se presentan gráficas del comportamiento térmico del sistema, así como los modelos matemáticos de la respuesta temporal en distintos puntos de la planta.

Palabras clave: Enseñanza en control, Control de procesos, Equipo de laboratorio

ABSTRACT

This paper describes the design and construction of a didactic prototype used for undergraduate experimental activities in control and instrumentation courses. The educational platform bases its operation on a thermal process on which control can be exerted. In addition it counts on a series of sensors that allows to monitor its behavior. General specifications, as well as the hardware blocks of the prototype are described in the article. Finally, it presents graphs of the system's thermal behavior as well as the mathematical models in different parts of the plant.

Keywords: Control education, Process control, Experimental laboratory

1. INTRODUCCIÓN

El control de procesos se ha desarrollado fuertemente en las últimas décadas impulsado por los avances tecnológicos y la necesidad de sistemas productivos que, entre otras características, buscan mejores productos a menores precios. Lo anterior ha provocado que los contenidos de los programas de estudios de las instituciones que imparten carreras relacionadas con ingeniería se estén ajustando a los cambios que la sociedad y la industria requieren. Distintos foros de discusión han sido organizados por la comunidad educativa con el fin de debatir la dirección hacia la cual se debe orientar la docencia asociada con el área de control en las carreras de ingeniería. Tenemos, por ejemplo que, la International Federation of Automatic Control (IFAC), organiza cada tres años el *Symposium on Advances in Control Education*, asimismo, la Control Systems Society del IEEE organizó en 1998 el *Workshop on New Directions in Control Engineering Education*. De igual forma, periódicamente diversas revistas enfocadas en esta área proponen números dedicados a la enseñanza del control en ingeniería: "A World View of Control Education", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 16, No. 2, 1996, "Advances in Control Education", *Control Engineering Practice*, Vol. 14, No. 2, 2006, "Innovations in undergraduate education. I",

IEEE Control Systems Magazine, Vol. 24, No. 5, 2004, "Innovations in undergraduate education. II", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 25, No. 1, 2005.

Algunas de las conclusiones que se han obtenido en estos foros de discusión indican que la enseñanza de las asignaturas relacionadas con el control de procesos, se fue desviando desde sus inicios hacia conceptos matemáticos abstractos, no obstante haber tenido sus raíces en necesidades concretas de la industria. Partiendo de este hecho, varias universidades en el mundo están considerando actualmente en regresar a las bases. La idea no es eliminar el fundamento matemático que sustenta el estudio de los sistemas de control, lo que se desea es que la docencia en el área pueda orientarse a un nivel menos abstracto que el que normalmente se maneja en los cursos en las universidades (Bissell, 1999), (Bernstein, 1999), (Dormido, 2004). Con esto se busca proporcionar a la industria, ingenieros que, aplicando principios teóricos y de ingeniería, sean capaces de resolver problemas reales.

Algunas de las metodologías que se están implementando en la enseñanza de algunas áreas de la ingeniería, y en particular en la de control de procesos, se basan en enfrentar al estudiante a situaciones lo más cercanas a la realidad. Este concepto conlleva a que el trabajo en el laboratorio se convierta en una práctica fundamental que sirva de respaldo en la comprensión de conceptos teóricos. Una problemática a la que constantemente se enfrentan las universidades públicas de algunos países es el costo elevado de los equipos de experimentación necesarios en los laboratorios de ingeniería. Una estrategia que se ha puesto en práctica en el Departamento de Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana campus Azcapotzalco desde hace más de 10 años para resolver esta situación, es el autoequipamiento. Esta opción, además de permitir tener equipos más adecuados a las necesidades particulares de la institución y de reducir drásticamente los costos de los mismos, ha permitido acumular experiencia en el desarrollo de equipos dedicados a la experimentación (Valadez et al., 1999), (Magos et al., 2001), (Alcantara et al., 2000), (Siller et al., 2006) y (Alcantara y Barrales, 2006).

Bajo este concepto, se decidió realizar el diseño y la construcción de un módulo didáctico que, empleando un proceso de transferencia de calor, sirva de apoyo en la realización de prácticas de laboratorio con PLC's, controladores industriales y paquetes de control e instrumentación por computadora como: Matlab, Labview e Intouch. En este artículo se describen los distintos bloques que conforman el equipo, en la segunda sección del documento se presentan las características principales del sistema. La tercera sección presenta los bloques principales del sistema así como el diseño e implementación de los mismos. En la cuarta sección del documento, se presentan algunos resultados obtenidos respecto al comportamiento del sistema. El artículo finaliza con algunos comentarios y conclusiones del equipo desarrollado.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO

El módulo, cuya construcción se describe en este documento, tiene como elemento central un calefactor eléctrico alimentado a través de un transformador de voltaje. Por su parte, el calefactor eléctrico es una resistencia con potencia de 50 W colocada sobre un disipador de aluminio. Con el fin de generar perturbaciones en el sistema térmico, se incluyó un pequeño ventilador.

El sistema permite la conexión de una **entrada analógica** en el rango de 0 a 1 vdc. Internamente, esta señal controla en forma proporcional el paso de energía al elemento calefactor del sistema: con una entrada de 0 vdc, se envía el 0% de energía eléctrica al calefactor, mientras que con 1 vdc a la entrada se envía el 100%. De esta forma puede controlarse externamente la temperatura por algún sistema de control. Esta característica permite implementar diversos tipos de algoritmos de control sobre el proceso.

Son tres las **salidas analógicas** que proporciona el equipo, se trata de señales en el rango de 1 a 5 volts que corresponden a un rango de temperatura de 0 a 150 °C que generan igual número de sensores colocados en puntos distintos del disipador de aluminio. Estos elementos permiten el envío de señales a dispositivos de adquisición de datos, así como a controladores para, de esta forma, implementar algoritmos de control de lazo cerrado.

La activación del ventilador, así como la de cinco indicadores luminosos, es posible mediante la conexión de señales de **entradas digitales**, estos dispositivos se encenderán al momento que se presente un nivel lógico alto (5 ó 24 vdc según la posición de un selector) en las terminales asociadas. Los indicadores se incluyeron con el fin de permitir señalar estados o etapas de una secuencia de control.

El equipo cuenta con cinco interruptores y cinco pulsadores, los cuales permiten generar **salidas digitales** que pueden emplearse para inicializar o interrumpir algún proceso, estos elementos al ser accionados, envían un nivel lógico alto (5 ó 24 vdc según la configuración de un selector).

Con las facilidades descritas, el equipo puede ser empleado como apoyo docente en temas como: control clásico, modelado de procesos físicos, control de procesos industriales, instrumentación electrónica, instrumentación virtual, control por computadora y adquisición de datos, por mencionar sólo algunos, la figura 1, muestra una vista del equipo.



Figura 1: Vista del prototipo construido.

Cabe aclarar que el módulo puede ser usado con distintos dispositivos de control industrial o sistemas electrónicos diseñados para aplicaciones específicas ya que cuenta, como ya se mencionó, con un selector que permite conmutar los niveles de las señales de entrada y salida digital entre 5 vdc y 24 vdc.

Los elementos que conforman el sistema se encuentran dentro de un gabinete portátil que facilita su transportación y almacenamiento. Todas las señales del prototipo se encuentran accesibles mediante una serie de bornes colocados en la cara frontal del aparato. El equipo requiere de alimentación eléctrica de 120 vac. En la figura 2 se muestran las terminales de conexión de las distintas señales del sistema.

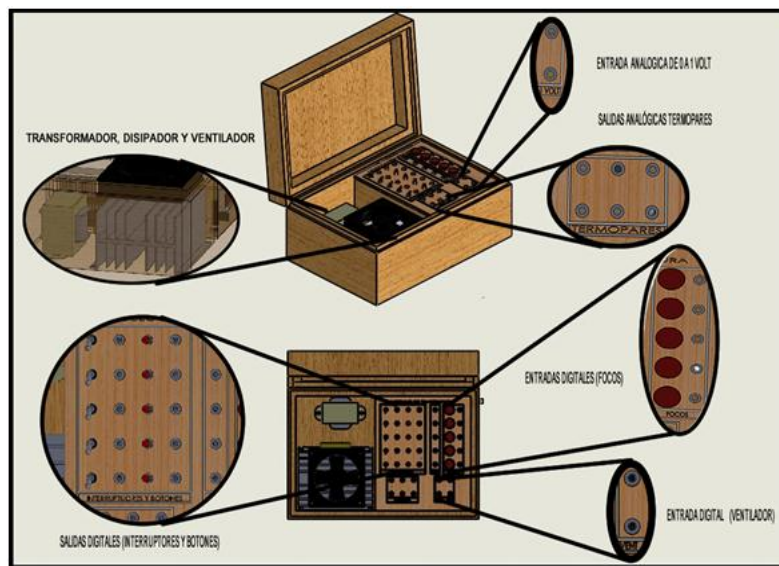


Figura 2: Bornes de conexiones del módulo de temperatura.

3. BLOQUES DEL SISTEMA

3.1 PROCESO TÉRMICO

El proceso físico que se maneja en el módulo didáctico construido es de tipo térmico. El elemento central del mismo es un calefactor eléctrico colocado sobre un disipador de aluminio. El calefactor al ser alimentado eléctricamente, vía un transformador, disipa energía en forma de calor, la cual es transferida por conducción al perfil de aluminio. Con el fin de generar perturbaciones en el sistema térmico, se incluyó un ventilador el cual se encuentra colocado sobre la barra de aluminio. La imagen de la figura 3, muestra una vista del proceso térmico construido.

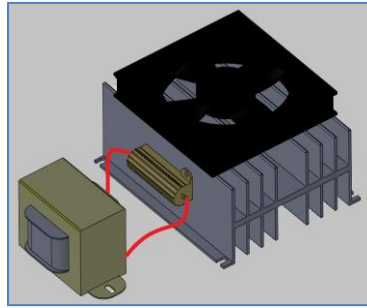


Figura 3: Proceso térmico construido

El funcionamiento del proceso consiste en controlar el voltaje que alimenta al transformador el cual a su vez proporciona energía eléctrica al calefactor elevando de esta forma la temperatura en el disipador. Puede observarse que el calefactor fue colocado en un costado del perfil de aluminio, lo anterior con la finalidad de crear una distribución de temperaturas que permitiese, dependiendo de la posición del sensor, modelar, y/o controlar sistemas con retardos. El elemento calefactor es una resistencia eléctrica de la serie RH-50 de 8Ω con una potencia de 50 W., del fabricante Dale. Su encapsulado es de aluminio con terminales de tipo axial. El disipador sobre cuyo costado se colocó el calefactor, es un segmento de perfil de aluminio anodizado de 8 aletas en H modelo 423K de Wakefield, sus dimensiones son: 120 x 140 x 67 mm. Con la finalidad de introducir perturbaciones al proceso que permitan evaluar el comportamiento de distintos algoritmos de control, se agregó un ventilador el cual facilita la pérdida de calor en el sistema. El dispositivo empleado tiene una potencia de 4.5 W, velocidad angular máxima de 3000 RPM y un flujo de aire de 88 pies cúbicos por minuto. Sus dimensiones son 105 x 105 x 20 mm. Por último tenemos el transformador de voltaje de 120 vac de entrada y una salida de 24 vac, la corriente máxima que maneja es de 3 A. La finalidad de este elemento es reducir los niveles de voltaje que la etapa de potencia entrega, a niveles adecuados para el calefactor.

3.2 ENTRADA ANALÓGICA

El módulo de temperatura cuenta con una entrada analógica cuyo valor de voltaje puede variar de 0 a 1 vdc. Esta señal está conectada internamente a un circuito electrónico que realiza el control por fase de la energía eléctrica que se enviará al elemento calefactor. Este circuito se encarga de regular el paso de voltaje a la resistencia calefactora, su operación es lineal por lo que la energía que se entregará será proporcional al nivel del voltaje aplicado en el borne correspondiente. De esta forma, con la señal de voltaje de 0 a 1 vdc, es posible regular de 0 a 100% de la energía que se entrega al calefactor.

El control por fase es un circuito electrónico que permite regular la energía promedio que se envía a una carga. El procedimiento básicamente consiste en colocar un dispositivo semiconductor entre la carga y la línea de alimentación el cual hace las funciones de interruptor. Este elemento, denominado tiristor, es controlado de tal forma que deje pasar energía eléctrica durante un determinado intervalo de tiempo de cada uno de los semiciclos de la línea, variando de esta forma la energía promedio suministrada. Una de las técnicas más empleadas para controlar el instante de activación de un tiristor se basa en la modulación por ancho de pulso, PWM por sus siglas en inglés. Este método consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que se encuentra en

nivel alto, pero manteniendo el mismo período o frecuencia. En este caso, la duración del nivel alto está asociada al voltaje de entrada al módulo. Este pulso, sincronizado con los semiciclos de la señal de la línea, es empleado para activar el encendido del tiristor, logrando de esta forma asociar su duración con la cantidad de energía que se suministra a la carga, de esta forma tendremos una relación directa entre el voltaje externo de entrada y la cantidad de energía proporcionada al calefactor del módulo.

El circuito de control por fase diseñado y construido para el sistema, basa su operación en un sistema digital cuyo elemento principal es un microcontrolador. Este bloque se encarga de generar la señal PWM para el tiristor a partir de información proporcionada por elementos externos y el programa residente en su memoria. La figura 4.3, muestra el diagrama de bloques con las partes principales del circuito.

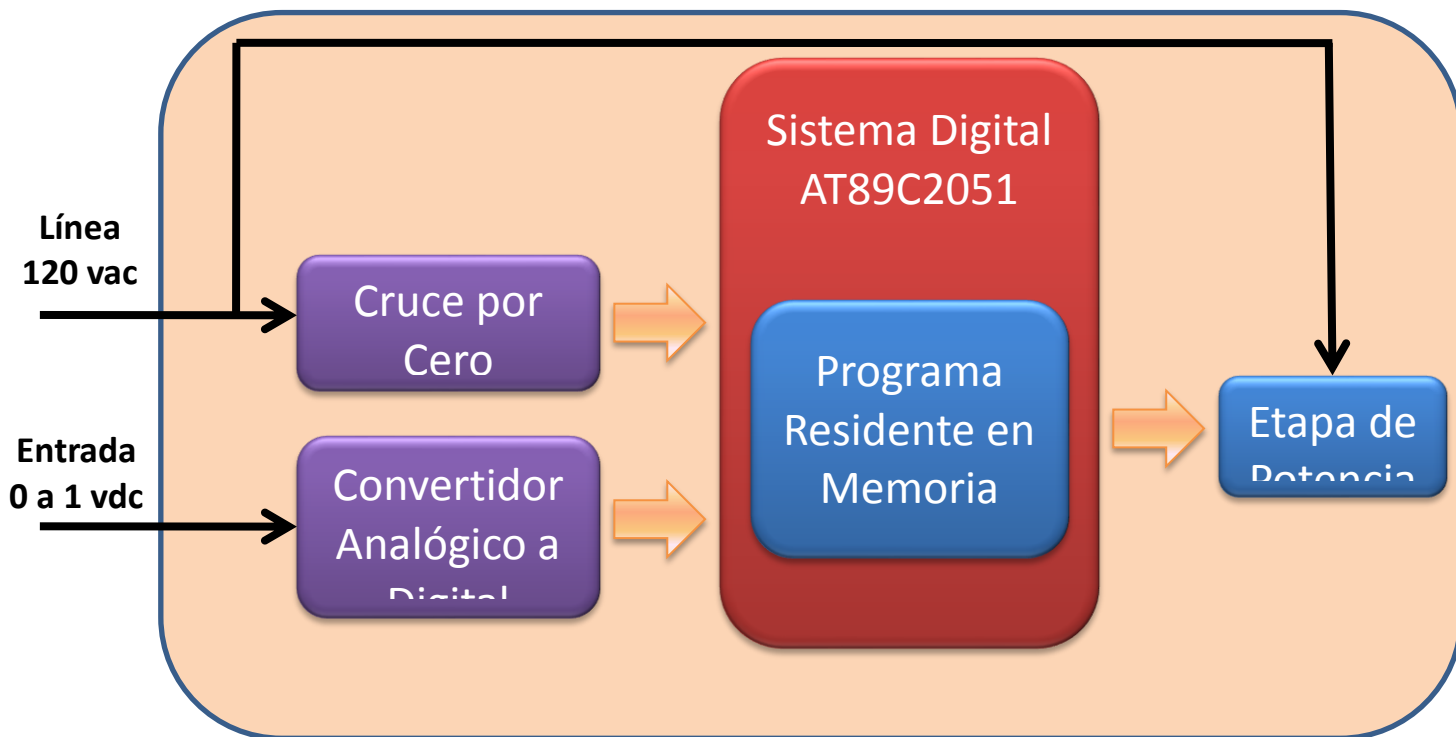


Figura 4: Diagrama de bloques del control por fase.

Cruce por Cero. Este bloque es el encargado de detectar el cruce por cero de la señal de la línea de 120 vac para la sincronización de ésta con la señal PWM. Como elemento principal de esta etapa se encuentra un optoacoplador, el cual recibe la señal de la línea de alimentación atenuada, este elemento genera un pulso que pone en corte y saturación a un transistor, el cual finalmente será el encargado de enviar la señal de interrupción hacia el microcontrolador que le indica que un cruce por cero de la señal de la línea se ha producido.

Convertidor Analógico a Digital. Este bloque es el encargado de digitalizar el valor de la señal de entrada de 0 a 1 vdc con el fin de que el microcontrolador determine el ciclo de trabajo de la señal PWM a enviar a la etapa de potencia. El convertidor seleccionado es el ADC0804, se trata de un convertidor de 8 bits con señales de control compatibles con el microcontrolador.

Sistema Digital. El elemento principal de este bloque es un microcontrolador de 8 bits, AT89C2051 de la familia mc51 de ATMEL. Este dispositivo, a partir de la señal de cruce por cero y del valor digital de la señal de entrada, genera el pulso PWM a enviar a la etapa de potencia. Para su operación, el microcontrolador requiere de un programa en lenguaje ensamblador, mismo que se encuentra residente en la memoria del circuito. El diagrama de flujo general del programa y de las rutinas de recepción y procesamiento de información enviada por el

convertidor analógico-digital, el detector de cruce por cero y la generación de la señal PWM se muestra en la figura 5.

Puede observarse que son tres los grandes bloques del programa: el programa principal, la rutina de atención a la interrupción del circuito de cruce por cero y por último la rutina asociada a la generación del pulso de encendido para el tiristor.

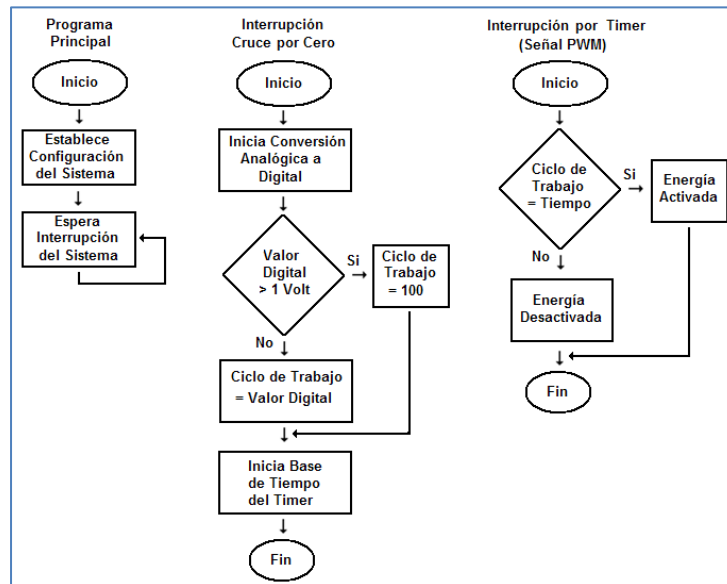


Figura 5: Diagrama de flujo del programa del microcontrolador.

- El **Programa principal** se encarga de configurar las variables del sistema e inicializar valores. Una vez que estas tareas han sido realizadas, el sistema queda en espera de que una interrupción se presente, ya sea proveniente de la etapa de detección de cruce por cero o del temporizador que determina el momento en el cual hay que enviar el pulso de encendido al tiristor.
- La rutina de **Interrupción de cruce por cero**, se encarga de solicitar un dato al convertidor analógico-digital, al momento que la señal de la etapa de cruce por cero se activa. Dependiendo del valor digitalizado del voltaje externo, el programa arranca el temporizador que determina el periodo que se debe mantener en nivel alto el pulso de disparo que se enviará al tiristor.
- La **Interrupción señal PMW**, convierte el valor del ciclo de trabajo calculado, en un intervalo de tiempo, mismo que corresponde la duración en nivel alto del pulso de disparo.

Etapas de Potencia. Este bloque contiene los elementos encargados de controlar la cantidad de energía eléctrica que se proporcionará al elemento calefactor, esto a partir de la señal PWM proveniente del sistema digital. La etapa de potencia del control por fase, consta de un tiristor TRIAC el cual se encarga de abrir y cerrar el circuito de alimentación de voltaje a la carga. Con el fin de proteger las etapas de baja potencia de algún problema en el calefactor, se incluye un circuito de acoplamiento óptico basado en un optoacoplador. La figura 6 muestra una vista del circuito impreso final. Se observa en la parte inferior derecha un conector por medio del cual se realizan las conexiones de señales de entrada y salida a la tarjeta de circuito impreso.

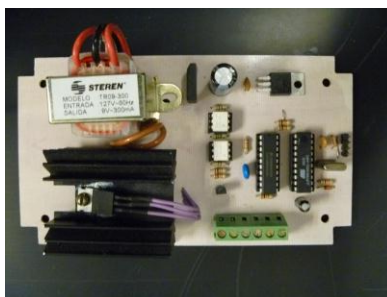


Figura 6: Vista del ensamblaje final del circuito impreso.

3.3 SALIDAS ANALÓGICAS

Las salidas analógicas que proporciona el módulo didáctico son tres señales de voltaje proporcionales a la temperatura en igual número de puntos del disipador de aluminio, figura 7. Los sensores empleados son termopares tipo K que operan en el rango de 0 a 150 °C., están contruidos con alambre calibre 24, forro de teflón, punta recubierta de teflón, 1.00 mt de extensión, terminales tipo zapatas de espada y cuentan con un adhesivo que facilita su instalación sobre el proceso térmico. Los sensores fueron colocados en distintos puntos del disipador de calor, para poder tener señales con retardo. Cada uno de los termopares cuenta con un transmisor analógico que proporciona, con ayuda de una resistencia eléctrica, el voltaje de salida: 1 a 5 vdc para el rango 0 a 150 °C. Estas salidas permiten el envío de señales a dispositivos de adquisición de datos, así como a controladores para, de esta forma, implementar algoritmos de control de lazo cerrado.



Figura 7: Ubicación de los termopares sobre el disipador de calor.

3.4 ENTRADAS DIGITALES

El módulo construido cuenta con 6 elementos que permiten la conexión de igual número de señales de entrada de tipo digital: 5 focos y un ventilador. El nivel lógico alto que se requiere para activar estos dispositivos puede ser de 5 ó 24 vdc. Es mediante un selector manual que el usuario determina el nivel de voltaje correspondiente para en valor alto de entrada. El circuito diseñado para realizar esta operación se basa en un par de relevadores electromecánicos, figura 8.

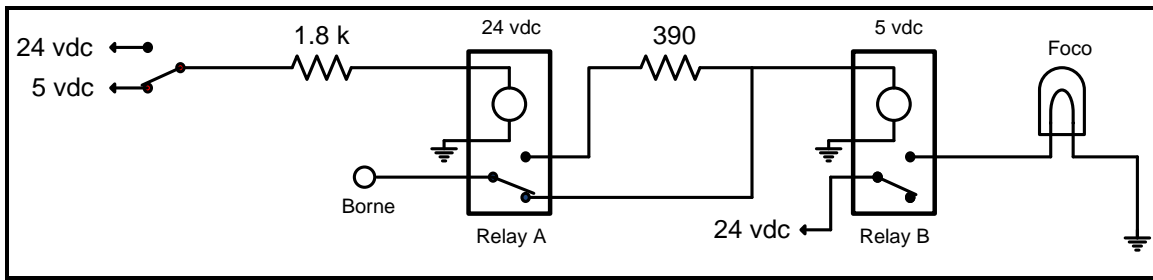


Figura 8: Circuito de selección de voltaje para nivel alto.

Los elementos que se manejan mediante estas señales, permiten visualizar señales generadas por interruptores de nivel, temperatura, flujo o sensores de proximidad dentro del proceso, así como activar el ventilador que permite introducir perturbaciones al sistema térmico.

3.5 SALIDAS DIGITALES

El sistema cuenta con cinco interruptores y cinco botones momentáneos los cuales permiten generar señales de salida de tipo digital. El nivel lógico alto para estas señales puede ser de 5 ó 24 vdc. Estos elementos permiten simular señales generadas por interruptores de nivel, temperatura, flujo o sensores de proximidad dentro del proceso. Asimismo, se pueden emplear como elementos de interface entre el operador de un sistema y el equipo de control que lo maneja, esto es, utilizarse para indicar al controlador que inicie o finalice alguna operación o para que pase a la siguiente etapa dentro de una secuencia de control.

3.6 ALIMENTACION DEL EQUIPO

El prototipo diseñado requiere conectarse a una alimentación de 120 vac que proporcione energía eléctrica para la operación de los circuitos y elementos integrados. La alimentación de energía eléctrica para los circuitos electrónicos del módulo la proporciona una fuente de voltaje de la marca PHOENIX CONTACT, modelo STEP-PS/1AC/24DC/2.5. Este dispositivo se alimenta con 127 vac a 60Hz y proporciona una salida de 24 vdc con una corriente máxima de 2.5 A. El equipo cuenta con un interruptor de encendido general, mismo que permite la alimentación de todos los dispositivos del sistema. La conexión a la línea de alimentación se realiza mediante un cable polarizado tipo computadora.

3.7 GABINETE

Los elementos del sistema descritos en las secciones de este trabajo, se colocaron en un gabinete de madera de 240mm x 360mm x 155mm, que permite la fácil transportación y almacenaje del mismo. En la figura 9, se muestra una vista explosionada del sistema en el cual se observa la ubicación de los elementos al interior del gabinete. Cabe mencionar que la tapa del equipo es completamente desmontable de forma tal que deja libre el espacio de trabajo facilitando de esta forma el uso del equipo.

La imagen de la figura 10 muestra una vista superior del equipo terminado.

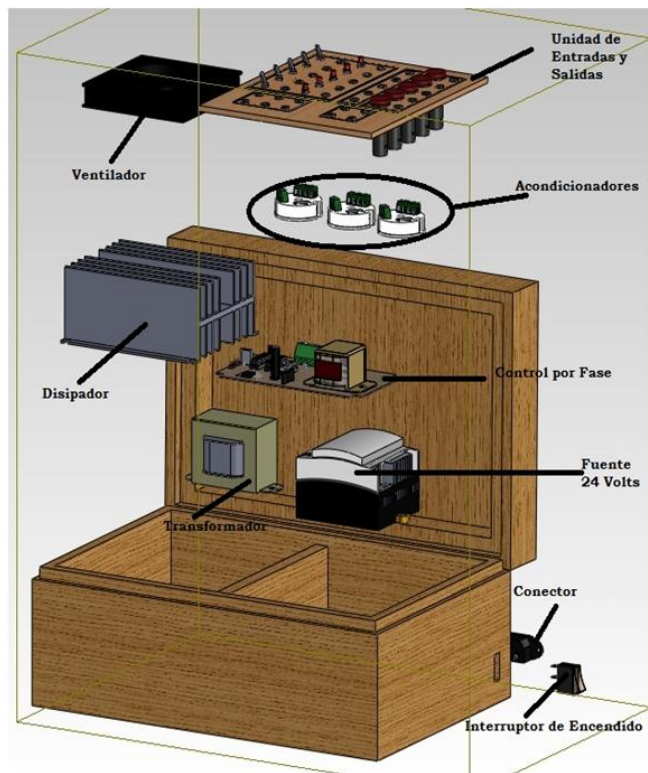


Figura 9: Ubicación de los elementos dentro del gabinete.

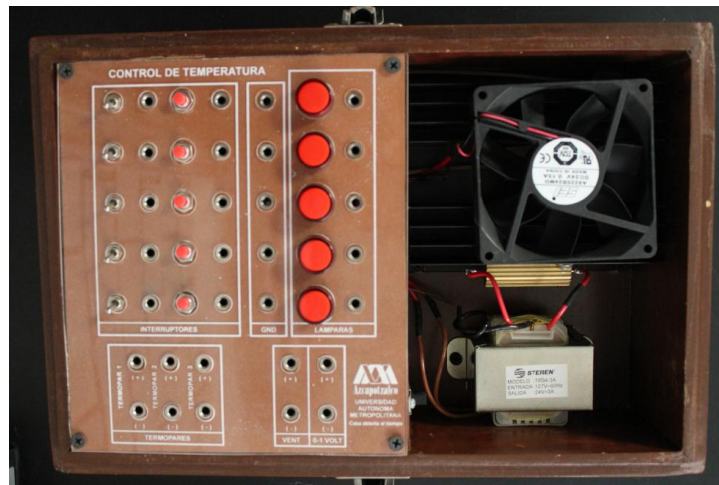


Figura 10: Vista superior del módulo construido.

4. COMPORTAMIENTO DEL EQUIPO

Una vez terminado el prototipo, y con ayuda del módulo de adquisición de datos NI USB 6215 de National Instruments y de una aplicación desarrollada en Labview, se realizaron algunas pruebas de funcionamiento. Aplicando una señal de entrada analógica de 1 vdc, lo cual implica que la cantidad de energía eléctrica proporcionada fue del 100% del máximo permitido, y manteniendo el ventilador apagado, se determinó el comportamiento en el tiempo de la temperatura en los tres puntos de medición. A partir de estos valores se obtuvieron con Matlab las funciones de transferencia correspondientes. Las gráficas experimentales y teóricas se muestran en la figura 11.

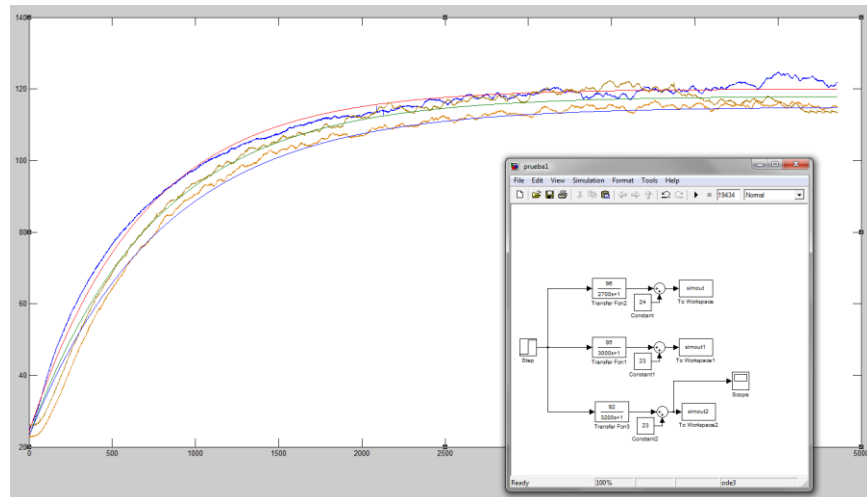


Figura 11: Comportamiento temporal del sistema y función de transferencia del mismo.

5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la construcción de un prototipo didáctico de apoyo para prácticas de control e instrumentación empleando un proceso térmico. El equipo corresponde a una versión modificada de otro sistema que se ha empleado durante varios años en los laboratorios de docencia de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco (Magos et al., 2001). Los comentarios respecto a la capacidad y facilidad de manejo de la versión anterior, fueron considerados en el diseño del nuevo aparato. Al momento de redactar este artículo, se están concluyendo con las pruebas de funcionamiento y se elaboran prácticas de control de temperatura con algoritmos tanto de lazo abierto como de lazo cerrado. Los equipos de laboratorio que se están considerando para estas prácticas son: controladores lógicos programables, sistemas de adquisición de datos por computadora, controladores de temperatura y sistemas electrónicos basados en microcontroladores.

Hasta el momento, salvo mínimos ajustes, la operación del prototipo ha sido satisfactoria y en los próximos meses se iniciará la construcción de varios sistemas similares para su entrega a los laboratorios y de esta forma el profesorado cuenta con equipos que puedan ser empleados por grupos de 2 ó 3 alumnos.

RECONOCIMIENTOS

Este proyecto se realizó con recursos del acuerdo 11/2009 del Rector General de la Universidad Autónoma Metropolitana.

REFERENCIAS

- Bissell, C.C. (1999). "Control Education: Time for Radical Change?". *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 19, No. 5, pp 44-49.
- Bernstein, D. S. (1999). "Enhancing Undergraduate Control Education", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 19, No. 5, pp 40-43.
- Dormido, S. (2004). "Control Learning: Present and Future", *Annual Reviews in Control*, Vol. 28, pp 115-136.
- Valadez, G., Alcántara, R., Jaimes, J., Magos, M., (1999). "Tablero Simulador para Prácticas con Controladores Lógicos Programables", Ed. Universidad Autónoma Metropolitana, México.

- Magos, M., Tavares, F., González, F. (2001). “Diseño y Construcción de un Modulo de Transferencia de Calor para Experimentación”, *Reunión de Verano IEEE*, Acapulco, México.
- Alcántara, R., Jaimes, J., Magos, M., y Moreno, G. (2000). “Implementación de un Tablero Simulador para Prácticas Didácticas con Controladores Lógicos Programables”. *Reunión de Verano IEEE*, Acapulco, México.
- Siller, I., Alcántara, R., Jaimes, J., Ramírez, I., y Nájera, N. (2006). “An Educational Level Control System”. *WSEAS/IASME International Conference on Educational Technologies*, Bucharest, Romania.
- Alcántara, R., Barrales, R. (2006). “Integración de Labview a un prototipo didáctico para la enseñanza de la medición de parámetros propios de la industria de procesos”. *Reunión de Verano IEEE*, Acapulco, México.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito