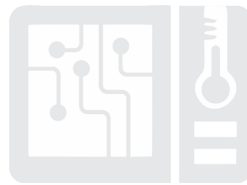


# Sistema de control de temperatura por software para horno eléctrico



## Colaboración

Luis Javier Mona Peña; Huitzilihuitl Saldaña Mora; Iván de Jesús Epifanio López, Instituto Tecnológico de Saltillo

**Resumen:** el uso de software como una herramienta para el control, monitoreo y automatización de procesos ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años. Actualmente el uso de los sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) es generalizado tanto en el sector Industrial como en el Académico. El presente artículo se enfoca al uso del software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) para realizar el control de temperatura de un horno eléctrico por medio del Algoritmo de control Proporcional Integral Derivativo (PID) además de moduladores de ancho de pulso (PWM) utilizando como plataforma de hardware un Controlador Automático Programable (PAC) tipo FieldPoint de la compañía National Instruments. Dicho sistema de control tiene como propósito el seguimiento de rampas de calentamiento generadas por el usuario por medio una Interfaz Hombre Máquina (HMI) para el manejo del equipo.

**Palabras clave:** HMI, LabVIEW, PAC, PID, PWM, SCADA

**Abstract:** The use of software as a tool for control, monitoring and process automation has grown exponentially in recent years. Currently the use of SCADA systems (Supervisory Control and Data Acquisition) is widespread both in Industry and the Academia. This article focuses on the use of the software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) for temperature control of an electric oven through the Proportional Integral Derivative algorithm (PID) as well as Pulse Width Modulators (PWM), using as hardware platform a Programmable Automation Controller (PAC) FieldPoint from National Instruments Company. The monitoring system is intended to monitor heating ramps generated by the user via a Human Machine interface (HMI) for the equipment's operation.

**Keywords:** HMI, LabVIEW, PAC, PID, PWM, SCADA

## INTRODUCCIÓN

Las herramientas informáticas ofrecen múltiples ventajas al momento de implementar soluciones a problemas o retos, entre estas ventajas se encuentran la flexibilidad, escalamiento y encapsulamiento de las aplicaciones además de la cuestión económica. Estas ventajas se aprovechan en la solución aquí descrita al reemplazar un sistema de control de temperatura para un horno eléctrico que era obsoleto y rudimentario por otro adaptable y flexible modificando al mínimo sus componentes de hardware.

El control de temperatura requiere de un especial cuidado debido a la naturaleza del comportamiento exponencial de la misma. Un horno de convección eléctrico supone la irradiación de temperatura por medio de elementos resistivos los cuales al circular corriente entre sus terminales disipa una buena parte de dicha corriente en forma de calor.

El algoritmo de control es de suma importancia en la operación de cualquier sistema, en este caso sino se tiene un buen sistema de control no se pueden tener temperaturas estables en el rango deseado de temperatura máxima y mínima durante el tiempo requerido. Los controladores "Todo/Nada" son los sistemas de control más básicos [1]. Estos envían una señal de activación ("On", "Encendido") cuando la entrada de señal es menor que un nivel de referencia definido previamente y desactiva la señal de salida ("No", "Apagado" o "0") cuando la señal de entrada es mayor que la señal de referencia.

Son utilizados en termostatos de aire acondicionado. Estos activan el aire frío "On" cuando la temperatura es mayor que la de referencia y lo desactivan "Off" cuando la temperatura ya es menor (o igual) que la de referencia. La figura 1 ilustra la estrategia de control en diferentes modalidades: A (Ideal), B (zona muerta) y C (Histéresis).

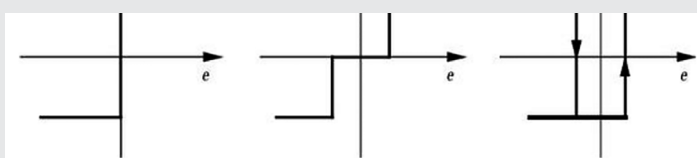


Figura 1. Características de controlador Encendido/Apagado.

Debido a las características propias del controlador Encendido/Apagado resultaría no viable para la generación de rampas de calentamiento debido a las oscilaciones que produce al cambiar la salida del actuador final entre cero y cien por ciento no permitiendo el ajuste fino necesario, generando inestabilidad, inexactitud y creando un desgaste del actuador disminuyendo significativamente su vida útil.

La estrategia de control Proporcional Integral Derivativa ofrece la solución idónea para resolver el reto [1]. Las ventajas de la estrategia PID sobre otras estrategias tales como el control Encendido/Apagado son notables cuando se pretende tener exactitud en las mediciones además de ofrecer mayor estabilidad. La descripción del algoritmo de control PID [3] se describe a continuación Ec(1):

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = P + I + D$$

Donde:

- Salida de control  $u(t)$ : Es la magnitud de la acción de control que alimentará al actuador para la corrección del error.
- Acción proporcional (P): es la acción que produce una señal proporcional a la desviación de la salida del proceso respecto al punto de consigna.
- Acción integral (I): es la acción que produce una señal de control proporcional al tiempo que la sa-

lida del proceso ha sido diferente del punto de consigna.

- Acción derivativa (D): es la acción que produce una señal de control proporcional a la velocidad con que la salida del proceso está cambiando respecto del punto de consigna.
- Constante de tiempo integral (Ti): es el tiempo, generalmente expresado en minutos, que debe transcurrir para que la acción integral alcance (iguale o repita) a la acción proporcional.
- Constante de tiempo derivativa (Td): es el intervalo de tiempo, generalmente expresado en minutos, en el que la acción derivativa adelanta a la acción proporcional.

**Cada acción de control tiene una respuesta característica:**

1. La acción proporcional varía instantáneamente con el error y alcanza un valor estacionario cuando éste lo alcanza.
2. La acción integral tiene en cuenta la historia pasada del error y se anula cuando se hace cero.
3. La acción derivativa predice los cambios en el error y se anula cuando alcanza un valor estacionario.

El control original estaba dado por un control Encendido/Apagado o de dos posiciones, por lo que el control de temperatura a un Set Point específico no era posible debido a la naturaleza misma del control de dos posiciones, donde la no linealidad, falta de estabilidad y de exactitud eran los problemas recurrentes.

Eso sin mencionar el exagerado desgaste de las lámparas y su continuo daño, ya que la inyección abrupta del 100% de la corriente genera un transitorio que sobrepasa las especificaciones del fabricante dañando las continuamente.

La modulación por ancho de pulsos de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga [2].

$$D = \frac{\tau}{T}$$

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente Ec(2):

Donde:

- D es el ciclo de trabajo (0 a 100%)
- $\tau$  es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)
- T es el período de la función

La figura 2 muestra el concepto de un Modulador de Ancho de Pulso.

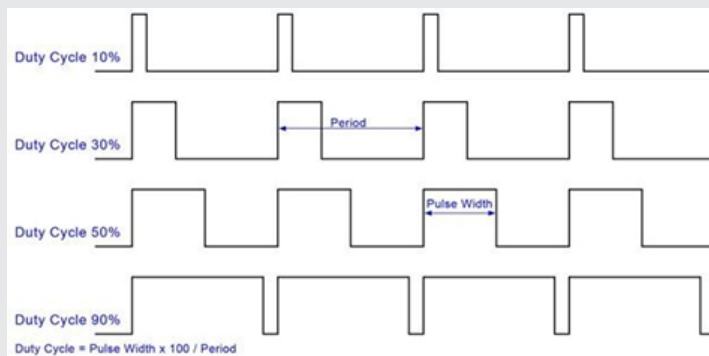


Figura 2. Concepto de Modulación de Ancho de Pulso.

Debido a que dicho horno no estaba originalmente diseñado para satisfacer curvas de calentamiento para el tratamiento térmico de materiales, donde la generación de patrones de calentamiento específicos para lograr el objetivo de la modificación de las propiedades de los mismos es primordial, se decidió implementar una estrategia que realmente controlara el horno de acuerdo a los parámetros deseados por los usuarios finales. Dichos objetivos particulares son los siguientes:

- Estrategia de control que permitiera curvas o rampas de calentamiento definidas por el usuario.
- Operable por medio de una HMI (Interfaz Hombre Maquina) residente en una computadora comercial.
- Actuadores Electrónicos para el manejo de la corriente de las lámparas.
- Sistema flexible a cambios de operación posteriores.
- Registro de la temperatura de las pruebas en una base de datos para su posterior consulta

## MATERIAL Y MÉTODOS

El horno objeto de control es propiedad del CINVESTAV Campus Saltillo y se encuentra dentro de sus instalaciones en la Ciudad de Ramos Arizpe. Una descripción general del sistema eléctrico del horno donde se implementó el sistema de control expuesto en el siguiente artículo se detalla a continuación:

1. Cuatro lámparas de filamento resistivo de alta potencia (1200 watts) marca Phillips de tipo bulbo alimentadas con corriente alterna (127 VAC cada una).
2. Interruptor de control On/Off para la operación del mismo.
3. Cada lámpara está recubierta por una pared de Aluminio por lo que las cuatro paredes se cierran formando un prisma donde se concentra el calor irradiado por las cuatro lámparas.

Dentro de las estrategias de control disponibles se escogió el control Proporcional Integral Derivativo (PID) [1] debido a su probada eficacia para el control de temperatura.

Esto suponía implementar una estrategia de hardware para el control de la corriente que se inyectaría a cada una de las lámparas (control de fase trifásico por medio de PWM) [2], para de esta manera controlar la corriente circulante por las mismas dando como resultado un control de la temperatura concentrada en la cámara de calentamiento de aluminio del horno. La electrónica de Potencia seleccionada en el diseño del control de fase fue la Modulación de Ancho de Pulso (PWM) utilizando transistores bipolares de compuerta aislada IGBT'S. Dicha selección se realizó debido a las características que ambos dispositivos nos dan, y que son entre otras características: Control del 100% de corriente circulante por medio del PWM al IGBT y por lo tanto a la carga (lámparas), alto manejo de corriente del IGBT y velocidad de conmutación muy alta 20 KHz.

La idea era controlar la duración del ciclo del PWM de forma programática, es decir, por medio de software indicarle al módulo PWM en qué porcentaje modular el ancho del pulso, esto por medio de la salida de un control PID implementado en software para de esta manera tener el control de fase según lo indicara el algoritmo de control. El hardware especificado según requerimientos del horno fue el siguiente:

- Chasis Industrial tipo FieldPoint marca National Instruments de 4 ranuras.
- Módulo Ni-cFP-PWM-520 para tener funcionalidad PWM.
- Módulo de Adquisición de Temperatura Ni- FP-120-TC para la lectura y acondicionamiento de Termopares.

El software para realizar la aplicación y el control del hardware del chasis industrial fue LabVIEW 2014 de la compañía National Instruments, el cual es el software líder en el mercado para el desarrollo de sistemas de supervisión y control de datos (SCADA).

Dicho software cuenta con las herramientas para realizar adquisición de datos de todo tipo de variables físicas y la escritura/lectura de señales analógicas y digitales, además de que cuenta con algoritmos de control como el PID y control difuso, entre otros y la flexibilidad de ser orientado a objetos, eventos y comunicación ActiveX para el manejo de bases de datos en cualquier software o lenguaje que soporte los objetos ADO (ActiveX Data Objects) tales como Microsoft Access, SQL Server, Oracle, etc.

La implementación del proyecto se dividió en dos etapas: Desarrollo del tablero de control para el hardware y el Desarrollo del Software. Este artículo trata

específicamente sobre el desarrollo del Software ya que el hardware queda simplemente en un control de fase trifásico del cual se puede encontrar amplia información en diversas fuentes sobre Electrónica de Potencia.

Al ser el Compact FieldPoint un dispositivo de los llamados "Controladores Automáticos Programables" (PAC's), es necesario configurarlo [3] y esto incluye las propiedades de conexión por medio de una red remota, en este caso solo se configura para que tanto la computadora donde se alojará la aplicación de software y el Compact FieldPoint compartan la misma máscara de subred y cada uno su respectiva dirección IP. Tal como se muestra en la figura 3.

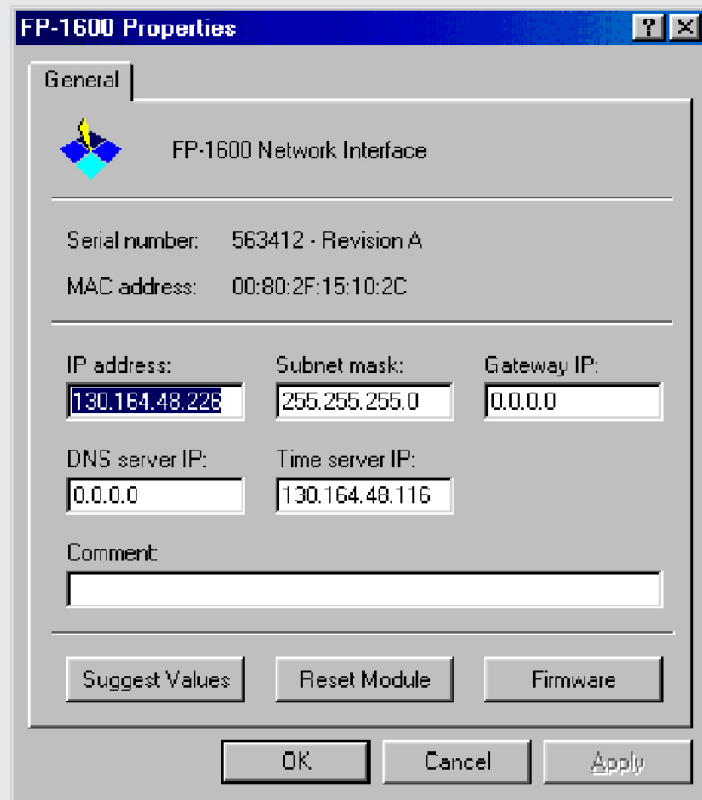


Figura 3. Configuración de propiedades de red del PAC

De la misma manera se configura los módulos de lectura analógica para el termopar y el de las salidas PWM.

Para la implementación del software se tomaron como base los requerimientos para asegurar la funcionalidad de la prueba del horno, por lo que esto suponía tener un apartado donde el usuario introdujera los datos de las curvas de calentamiento requeridas según el material a utilizar en el horno.

La siguiente interfaz Figura 4, tiene como propósito para el usuario que este defina los puntos de control y la duración de los tiempos de subida para la generación de la rampa y los tiempos de establecimiento que involucra el régimen estacionario del sistema.

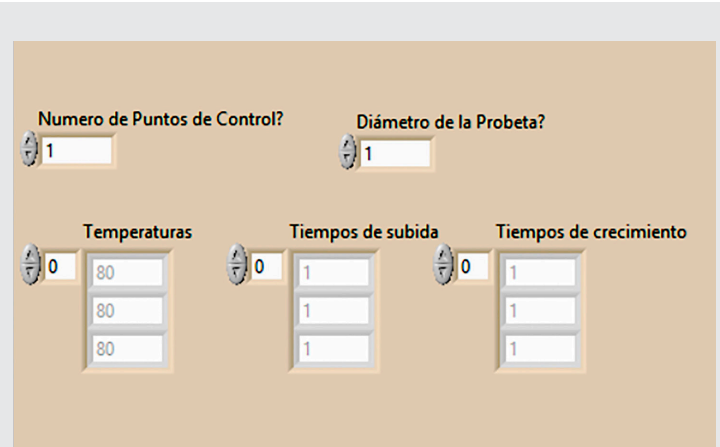


Figura 4. Datos en la interfaz de Set Up del sistema para la definición de curva de calentamiento.

Cada una de las columnas debe ser debidamente inicializada ya que son los valores que el software utiliza como datos de alimentación tanto al algoritmo de control PID como para la generación de la rampa de subida y del régimen estacionario, de tal forma que cada uno de los puntos de control debe de tener la forma que se muestra en la figura 5.

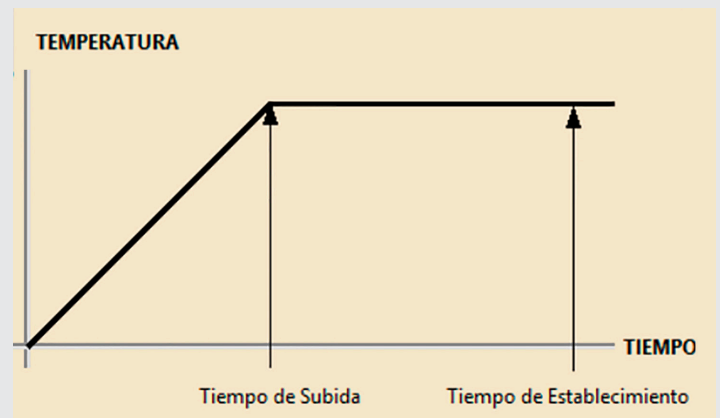


Figura 5. Esquema Típico de curva de calentamiento

Una vez que se han introducido los datos para la generación de los patrones de calentamiento, el sistema pasa automáticamente a la interfaz de ejecución de la prueba.

Dentro de dicha interfaz Figura 6, el usuario es capaz de observar el comportamiento progresivo de la prueba, que incluye la gráfica de monitoreo de temperatura así como el porcentaje de la modulación del ancho del pulso generada por el control PID, además de especificar el periodo en que se realizará el registro de temperaturas ya sea en un archivo ASCII o en la base de datos en Microsoft Access o SQL Server [4]. La temperatura máxima que el horno genera y que el sistema es capaz de controlar es de aproximadamente 1200°C.

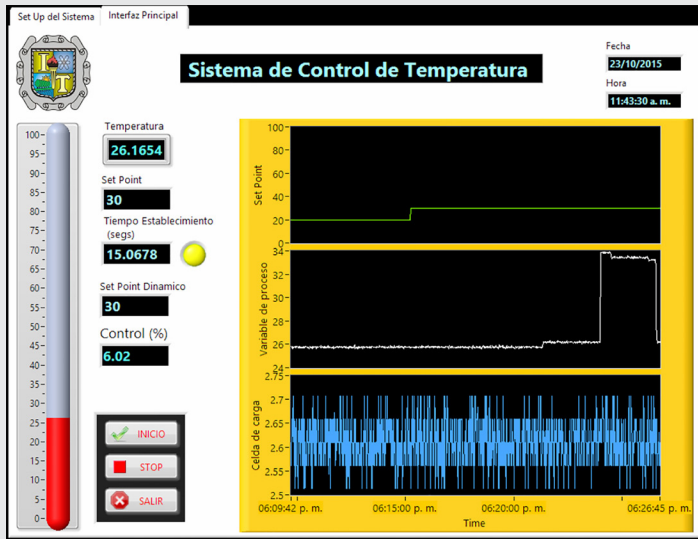


Figura 6. Interfaz de Ejecución de prueba.

No hay un límite en la cantidad de curvas de calentamiento que el sistema es capaz de realizar. La velocidad de actualización de lecturas de temperatura está limitada por el tiempo de adquisición de la señal del termopar, el cual es de periodos de un segundo.

Para la generación de la rampa [3][4] el sistema divide el Setpoint de dicha rampa en Setpoints intermedios más pequeños llamados Setpoints Dinámicos siendo la cantidad de divisiones el factor principal para la linealidad de la rampa, esto minimiza el sobreimpulso entre las diversas curvas de calentamiento. Una vez alcanzado el Setpoint de la curva llamado Setpoint Objetivo, el sistema utiliza un Timer para crear la región estacionaria siendo el valor que el usuario proporcionó en la interfaz de inicialización como Tiempo de Establecimiento el preset del mismo, una vez alcanzado el intervalo requerido por la curva, el sistema busca los datos de la siguiente curva de calentamiento. Este proceso es cíclico hasta que se alcanza la última curva de calentamiento o cuando el usuario interrumpe la prueba.

**RESULTADOS**

El Sistema es capaz de realizar el control del horno y por lo tanto de la temperatura en un sistema de lazo cerrado aplicando exitosamente un algoritmo PID en LabVIEW 2014, teniendo un error dentro de una tolerancia de 3 °C en toda la escala completa de 30°C a 1200°C debido al algoritmo de auto sintonización desarrollado. Esto ha dado como resultado que los usuarios del equipo puedan darle el uso deseado para las pruebas de materiales que tanto Maestros como alumnos del CINVESTAV Campus Saltillo realizan para el desarrollo de sus investigaciones, utilizando al horno como un sistema eficiente y confiable para el tratamiento térmico de los materiales.

Para el control PID que utiliza el sistema, se desarrolló un algoritmo de Auto-Sintonización, por lo que los valores de Ganancia Proporcional (Kp), Tiempo Integral (Ti) y Tiempo Derivativo (Td) no son constantes en la ejecución de la prueba sino que son dinámicos ya que dependiendo del valor de la referencia o setpoint estos se adecuarán de acuerdo a lo que la variable setpoint dinámico indique, esta variación es dentro del rango de 30°C a 1200°C lo que ofrecerá la correspondiente sintonización. Esto es necesario debido a que al poder existir múltiples curvas de calentamiento no se puede fijar una Sintonización universal para toda la prueba ya que debido a la naturaleza del control PID y en específico de la acción proporcional, esta tratará de eliminar el error lo más pronto posible y esto para la aplicación no resulta favorable ya que no permitiría el calentamiento y enfriamiento tipo rampa requerido. En la Figura 7 se muestra parte del algoritmo de auto-sintonización.

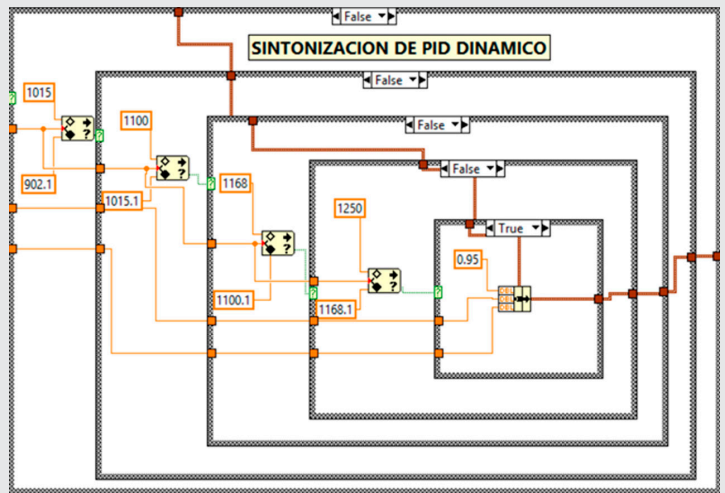


Figura 7. Algoritmo de Auto-sintonización.

La figura 8 muestra el algoritmo de control PID de LabVIEW para la aplicación del control en porcentaje a de 0 a 100 % del ciclo de modulación del PWM y por lo tanto el control de fase hacia las lámparas llegando a un máximo de potencia absorbida de 1200 watts por lámpara y 1200 °C de temperatura irradiada total.

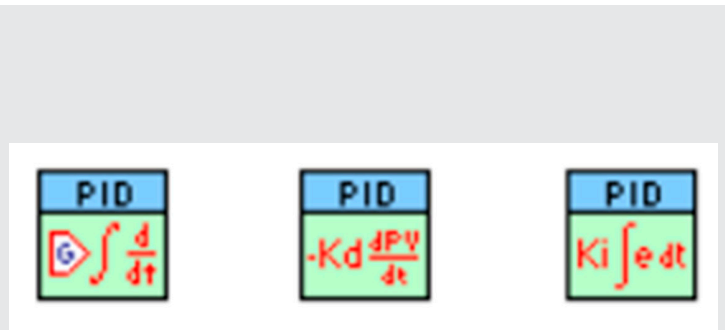


Figura 8. Algoritmo de control PID

## CONCLUSIONES

La implementación de sistemas de control por software ofrece grandes ventajas contra los tradicionales controladores comerciales por hardware, siendo las principales la flexibilidad del uso del software, el escalamiento a futuras adecuaciones o modificaciones, el encapsulamiento, reusabilidad de código, además de fácil implementación de registradores de datos y de control vía remota del equipo.

No hay limitaciones en cuanto a la cantidad de algoritmos de control (PID, Difuso, etc) [5][6] que se pueden utilizar por software, siendo esta otra gran ventaja porque no se tienen que comprar múltiples controladores por hardware, simplemente se manda llamar nuevamente al código que realiza el algoritmo de control, pudiendo existir dentro de la misma aplicación: Adquisición de datos, registradores de datos, algoritmos de control, control de movimiento, sistemas de visión, protocolos de comunicación industrial, etc. Las ventajas que los sistemas SCADA han ido obteniendo con el paso del desarrollo de las tecnologías de información y de velocidad y eficiencia en la adquisición de señales análogas y digitales ha potenciado el uso de dichos sistemas, siendo una de las razones de su crecimiento tanto en centros educativos, investigación y todo tipo de industria como servicios, alimentos y de procesos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ogata Katsushiko, "Ingeniería de Control Moderna". Cuarta Edición, Editorial Pearson Education.

[2] H. Rashid Muhammad, "Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones". Tercera Edición, Editorial Pearson Education

[3] National Instruments, "LabVIEW 2014 User Manual", February 2014 Edition

[4] Mona Peña, Luis Javier, "Introducción a la Instrumentación Virtual", manual de Curso, Instituto Tecnológico de Saltillo, 2009.

[5] Daniel J. López Amado, Diego García, Leonardo Davico, "Controlador Difuso Multivariable del Perfil de Temperatura de un Horno", XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, 21 al 23 de septiembre de 2005. Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires Argentina.

[6] Camargo Castro Andrés Felipe, Villamizar Rivera Edgardo Jesús. "Control de Temperatura de un Horno por medio de Lógica Difusa". Universidad Pontificia Bolivariana, 2008. Tesis de Ingeniería.



# Ciencias de la Computación

# Ingeniantes

Instituto Tecnológico Superior de Misantla