

DIDACTIC SYSTEM FOR THE IMPLEMENTATION OF DIGITAL CONTROLLERS

SISTEMA DIDÁCTICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES DIGITALES

Ing. Yamir Hernando Bolaños, Ing. Luisa Fernanda Pineda,
MSc. Víctor Hugo Mosquera

Universidad del Cauca, Grupo de Automática Industrial – GAI.

Calle 5 # 4-70. Popayán, Cauca, Colombia.

Tel.: +57-2-820 9800, Fax: +57-2-820 9800, Ext. 2120.

E-mail: {hybolanos, lpineda, mosquera}@unicauca.edu.co

Abstract: This paper presents the design and construction of a system for digital controllers implementation, which allows you to apply a practical knowledge of different areas, such as continuous systems, discrete systems, characterization for reaction curves, modeling techniques and implementation of controllers, among others. The system consists of a hardware consists of a motherboard with USB communication and two pilot plants (one of temperature and other RC circuits) and software that allows easy implementation of digital controllers addition with to Matlab connectivity.

Keywords: Digital control, PID control, on-off control, modeling systems.

Resumen: En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema para la implementación de controladores digitales, el cual permite aplicar de forma práctica diferentes conocimientos teóricos de áreas, tales como: sistemas continuos, sistemas discretos, caracterización por curvas de reacción, técnicas de modelado e implementación de controladores, entre otras. El sistema consta de un hardware compuesta por una tarjeta principal con comunicación USB y dos plantas experimentales (una de temperatura y otra de circuitos RC) y un software que permite la fácil implementación de controladores digitales además de contar con conectividad a Matlab.

Palabras Claves: Control digital, Control PID, control *on-off*, modelado de sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas didácticos son una herramienta potente que facilita los procesos de aprendizaje en los estudiantes, del mismo modo que despiertan su interés en las temáticas relacionadas al control, ya que mediante las experiencias prácticas, se aplica y refuerzan los conocimientos teóricos adquiridos.

Entre algunas plataformas didácticas orientadas a la enseñanza del control realimentado se pueden encontrar; *NI ELVIS (Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite)*, plataforma educativa para diseño y generación de prototipos basada en NI LabVIEW, cuenta con un software llamado NI ELVISmx, el cual ofrece los paneles necesarios para la programación de ELVIS a través de LabVIEW. A esta plataforma se pueden conectar algunas plantas fabricadas por la empresa Quanser. En la siguiente figura se muestra una imagen de ELVIS y algunas plantas de Quanser [1].

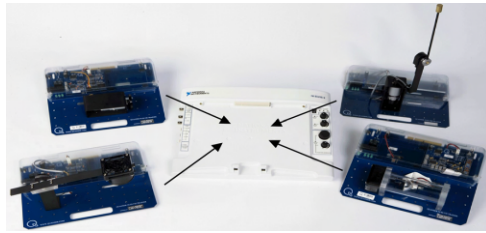


Fig. 1. ELVIS y plantas a controlar

Quanser Engineering Trainer (QET): DC Motor

Control: entrenador que permite aplicar los principios básicos del control y técnicas de sintonización a través del control de un motor. El control se puede hacer mediante un PC o embebido en el PIC 16F877 que hace parte del entrenador. Cuenta con una interfaz de usuario (QIC Interactive Interface, QICii, la cual provee una comunicación en tiempo real para llevar a cabo el ajuste de los parámetros de diferentes controladores. Este entrenador también es compatible con un software llamado *QuaRC*, desarrollado por Quanser, el cual permite correr en tiempo real modelos desarrollados con Simulink de Mathworks. En la siguiente figura se encuentra una imagen de la tarjeta entrenadora [2].



Fig. 2. QET Control de un Motor DC.

Sistema de levitación neumática: trabajo desarrollado en la Universidad del Cauca, en él se emplea aire sobre una esfera con el fin de contrarrestar la fuerza gravitatoria, de modo que el objeto se mantiene estable sin necesidad de contacto físico con ninguna parte del contenedor que lo aloja. Cuenta con un PID tipo serie el cual se sintoniza mediante ajuste manual. En la siguiente figura se muestra el sistema de levitación neumática [3].



Fig. 3. Sistema de levitación neumática.

Este artículo presenta en la sesión 2 el diseño hardware del sistema desarrollado para la implementación de controladores digitales, en la sesión 3 se el software desarrollado para la interacción del hardware con el usuario, el modelado de las plantas experimentales se puede observar en la sesión 4, la implementación de los controladores digitales y los resultados experimentales del sistemas se encuentran en la sesión 5.

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

El sistema para implementación de controladores digitales se compone de:

- Una tarjeta principal para adquisición y control.
- Una tarjeta correspondiente a la planta de temperatura.
- Una tarjeta correspondiente a la planta de circuitos RC.

2.1 Diseño y elaboración de prototipo hardware de Tarjeta principal.

Se establecen las siguientes características como base para iniciar el diseño y desarrollo de la tarjeta principal:

- Comunicación directa a un PC: Se requiere que la tarjeta se pueda comunicar con un PC para realizar diferentes acciones como: monitoreo de variables (*setpoint*, variable controlada, variable manipulada, esfuerzo de control), y configuración del sistema (selección de tipo planta, configuración de entradas-salidas).
- El software que se escogió para el manejo desde el PC es Matlab, se elige Matlab ya que es altamente versátil e integra muchas herramientas útiles para el diseño de controladores, análisis y modelado de los sistemas entre otras, además este es un software con el que tanto docentes como estudiantes están ampliamente familiarizados.
- Múltiples recursos para manejo de periféricos: Se requieren recursos tales como entradas-salidas digitales, entradas- salidas analógicas, salidas PWM.
- Programación rápida: Una de las funciones de la tarjeta principal es la adquisición de las variables de las plantas, y otra muy importante es contener y ejecutar código correspondiente al control diseñado por el usuario (función en caso de control embebido), así que se requiere de un mecanismo que permita una programación y

reprogramación versátil, que en lo posible no involucre el uso de herramientas adicionales como un programador externo o acciones como retirar y reemplazar componentes de la tarjeta.

- Capacidad de procesamiento acorde con las tareas a desarrollar: La tarjeta principal del sistema deberá ejecutar múltiples tareas de procesamiento, tales como: operaciones de adquisición (comunicación con PC), procesamiento en el manejo de periféricos y procesamiento de acciones de control de las plantas en el caso de control embebido, por lo tanto se requiere que la velocidad y capacidad de procesamiento sean eficientes ante los diferentes requerimientos del sistema.

Para cumplir con las necesidades y características descritas anteriormente, se realiza un proceso de diseño y se seleccionan los materiales más adecuados para llevar a cabo la fabricación de la tarjeta principal. El diseño y fabricación tienen como resultado la tarjeta mostrada en la Fig. 4 y cuenta con las características presentadas en la Tabla 1.



Fig. 4. Tarjeta principal diseñada.

Tabla 1. Características tarjeta principal.

Parámetro	Detalle
Frecuencia máxima de operación	48Mhz, con multiplicador de frecuencia, (cristal de 20Mhz externo).
Conexión con PC	USB 2.0.
Alimentación	5 VDC obtenidos del bus USB directamente. Consumo máximo 500mA.
Entorno de trabajo	Sistema operativo: Windows XP, comunicación con Matlab, programación en lenguaje C, IDE de desarrollo Mplab integrado con compilador CCS
Métodos de programación	Programación in-circuit ICSP, bootloader USB de Microchip.
Entradas analógicas	4, con resolución de 8 o 10 bits por hardware. Voltaje de entrada máximo 5v sin acondicionamiento
Salidas PWM (Generar esfuerzo de control)	2 por hardware (módulos internos del microcontrolador). Resolución 8 o 10 bits configurable por software. Frecuencia configurable por software, configurada a 3Khz por defecto para el proyecto.

Entradas digitales fijas	3 para detección de planta conectada. 1 pulsador para entrar a modo de programación por bootloader 1 para pulsador de reset
Salidas digitales fijas	4 para indicadores LED's
Canales bidireccionales digitales	2 configurables como entrada o salida por software, uno es utilizado para manejo del sensor de temperatura, el otro está libre.
Sistema de visualización local	Pantalla LCD de 2x16, utiliza 4 pines del microcontrolador para transmitir datos y 2 para control.

Posteriormente se lleva a cabo el diseño y fabricación de las tarjetas correspondientes a las plantas del sistema. Las plantas a elaborar son una planta de temperatura y una planta de circuitos RC. Para el desarrollo de las mismas se establecen los siguientes criterios:

- Definición clara de los tipos de variables en cada planta: variable controlada, variable manipulada, esfuerzo de control.
- Tiempo de respuesta: se debe considerar que la capacidad de procesamiento de la tarjeta principal permita realizar una buena adquisición de las variables en cada planta, teniendo en cuenta que la tarjeta principal puede muestrear señales de hasta 100Khz para señales analógicas. Este requerimiento no es crítico en el caso de la planta de temperatura, ya que los procesos térmicos se caracterizan por ser procesos lentos, por el contrario en el caso de la planta de circuitos RC es un aspecto a tener en cuenta en el diseño.
- Disturbios: la generación de disturbios es un aspecto importante en la experimentación práctica en la implementación de controladores, por lo que se deben implementar mecanismos que permitan generar disturbios en las plantas.
- Sensado de variable(s): tener en cuenta el tipo de sensor a utilizar, precisión del sensor, rango de variables.

2.2 Planta de temperatura

Se diseña una planta de temperatura en la cual la temperatura generada es producto de la disipación de potencia de una resistencia comercial a base de carbón de 30Ω a 5w. El actuador de esta planta es una etapa de potencia a base de transistores, cuya entrada es una señal PWM la cual permite variar la potencia disipada por la resistencia. Como instrumento de realimentación del sistema se cuenta con un sensor DS18S20, el cual puede dar el valor de la temperatura alrededor de la resistencia de manera precisa.

La planta de temperatura que se obtiene como resultado del proceso de diseño y fabricación se puede apreciar en la Fig. 5 y en la Tabla 2 se encuentran sus características.

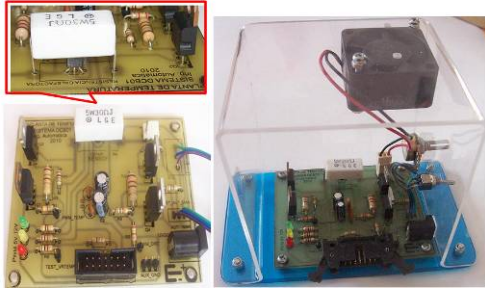


Fig. 5. Imágenes reales de la planta de temperatura.

Tabla 2. Características planta de temperatura.

Parámetro	Detalle
Rango de temperatura de operación (Variable controlada).	25 – 95 °C, se dejara como rango de operación 25 – 85 °C.
Spam	60 °C
Tiempo que toma alcanzar la temperatura máxima.	6 min, temperatura medida con sensor DS18S20.
Consumo máximo de corriente.	420 mA
Sistema Sensor - Transmisor.	Circuito integrado DS18S20
Voltaje de operación	12VDC
Señal de control	PWM 3KHZ
Disturbio experimental	Ventilador controlado por PWM
Puntos de tierra auxiliar	Tres para realizar mediciones.

2.3 Planta eléctrica de circuitos (mallas) RC.

Se diseña una planta de circuitos RC en la cual se controla el voltaje a la salida del circuito; la planta cuenta con un mecanismo para la configuración del orden del sistema, a través de *jumpers*, de modo que se pueden obtener sistemas de primer, segundo y tercer orden.

El actuador de esta planta está conformado por un filtro pasa-bajo para generar la variable manipulada y una etapa de potencia a base de amplificadores operacionales, para no atenuar la señal que se le entrega a la planta. Como instrumento de realimentación del sistema se cuenta con un sensor-transmisor implementado con un amplificador operacional en modo seguidor, para adaptar las impedancias, el propósito de su uso, es no alterar la dinámica de la planta; a la salida del seguidor, se coloca un divisor de tensión con el cual se adaptan los niveles de tensión, que soportan las entradas analógicas del microcontrolador.

La planta de circuitos RC que se obtuvo como resultado del proceso de diseño y fabricación se puede apreciar en la Fig. 6 y en la Tabla 2 se encuentran sus características.



Fig. 6. Imagen real de la planta de circuitos RC.

Tabla 3. Características planta de circuitos RC.

PARÁMETRO	DETALLE
Alimentación	12 VDC
Orden del sistema	1er, 2do y 3er Orden Configurable por Hardware mediante jumpers
Rango Voltaje de operación (Variable controlada)	0 a 10 VDC
Spam	10 Voltios
Sistema Sensor-Transmisor	Amplificador Operacional, como seguidor de tensión o adaptador de impedancias más divisor de tensión.
Señal para generar esfuerzo de control	PWM 3KHZ
Variables Medibles	Voltaje de entrada (variable manipulada). Voltaje malla 1, malla2 y malla3, (variable controlada) Señal PWM que genera el esfuerzo de control, se puede medir la frecuencia mediante osciloscopio.
Disturbio experimental	Disturbio por cambios en la carga a la salida de la planta de forma manual mediante jumper. Posibilidad de implementación de disturbio por software limitando el esfuerzo de control.

3. INTERFAZ DE USUARIO BÁSICA PARA INTERACCIÓN CON EL SISTEMA

Para complementar la funcionalidad del sistema se desarrolla una interfaz de usuario, esta aplicación sirve como de apoyo para realizar prácticas con el sistema, mediante la cual se pueden ver los valores de las variables tanto de forma grafica como numérica, también permite modificar el valor del *setpoint* y guardar los datos de la práctica desarrollada, entre otros.

Se plantean los siguientes requerimientos básicos:

- Ingresar y enviar información desde el PC a la tarjeta principal: tal como el *setpoint* o ley de control según el tipo de planta conectada.

- Capacidad de Monitorear variables: visualizar tanto de forma numérica como grafica las variables que intervienen en el proceso.
- Controlar de forma manual las plantas: permitir que el usuario realice cambios en el esfuerzo de control, de modo que obtenga datos que sirvan para la caracterización del sistema.

Para cumplir con estos requerimientos se opta por realizar dos interfaces, un para realizar monitoreo de variables y otra para realizar control manual, cabe aclarar que las interfaces están orientadas al control embebido monitoreado por PC, aunque también se podría realizar control por PC donde la tarjeta principal trabajaría como una tarjeta de adquisición de datos

La implementación de las interfaces se realiza con la herramienta GUIDE de Matlab, cabe resaltar que a través de la interfaz se establece una comunicación tipo bulk con el microcontrolador de la tarjeta principal. En la Fig. 7 se muestra una imagen de la interfaz para el monitoreo de variables del proceso.

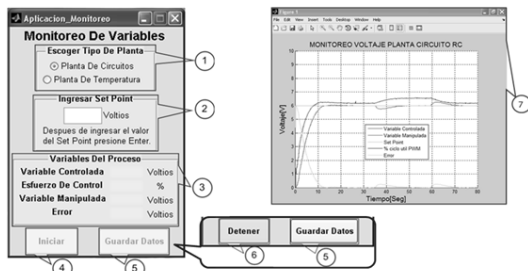


Fig. 7. Interfaz para el monitoreo de variables.

Las secciones que conforman la interfaz de usuario, como se muestra en la Fig. 7 son:

1. Escoger tipo de planta.
2. Escoger *setpoint*.
3. Variables del proceso.
4. Iniciar el proceso.
5. Guardar datos.
6. Detener el proceso.
7. Gráfica de variables.

Por otro lado la aplicación para el control manual es útil en prácticas de identificación. En este trabajo la aplicación se emplea para analizar el comportamiento de los actuadores de las plantas, así como para obtener una curva de reacción que permitió modelar la planta de temperatura.

En la figura 7 se muestra una imagen de la aplicación para realizar control manual, como se puede observar cuenta con las mismas opciones

para escoger tipo de planta, la visualización de variables del proceso tanto de forma numérica como grafica y los botones iniciar/detener y guardar, la característica principal de la interfaz es que permite modificar la señal PWM, la cual está directamente relacionada con la ley de control. Los valores que se pueden ingresar están entre 0 y 100 en unidades de porcentaje.

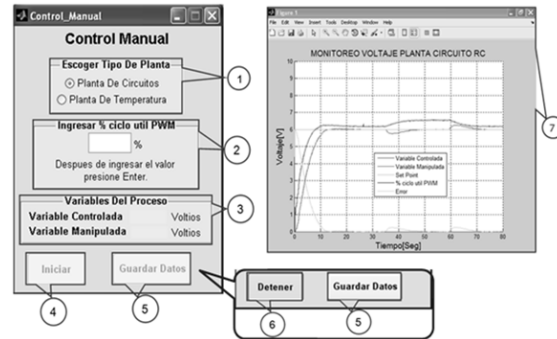


Fig. 8. Interfaz de usuario para el control manual.

4. MODELADO DE PLANTAS EXPERIMENTALES

A continuación se describen los procedimientos realizados para obtener los modelos tanto de la planta de temperatura como de la planta de circuitos RC.

4.1 Modelado planta de temperatura

Para realizar el modelado de la planta de temperatura, se lleva a cabo un experimento práctico con el fin de tener datos reales para obtener un modelo de la planta alrededor de un punto de operación.

En resumen el procedimiento que se desarrolla en la práctica es el siguiente:

- Manualmente introducir un cambio en el valor de la señal PWM.
- Esperar a que la variable controlada llegue a un valor de estado estable.
- Manualmente introducir un cambio de entre 5% y 10% del valor de la señal PWM.
- Esperar a que la variable controlada llegue a un valor de estado estable.
- Guardar los datos obtenidos del procedimiento anterior.
- Después de aplicar el procedimiento descrito anteriormente se obtuvieron los datos que describe la anterior figura, en donde se puede apreciar el cambio en la variable controlada (temperatura), al variar el esfuerzo de control en un 5%.

La Fig. 9 corresponde a los resultados del experimento realizado. Con estos datos se desea obtener un modelo de primer orden más tiempo muerto. Para la obtención de los modelos se emplearon dos métodos, el primero fue el de los dos puntos propuesto por Smith y el segundo es el del criterio de la integral del cuadrado del error.

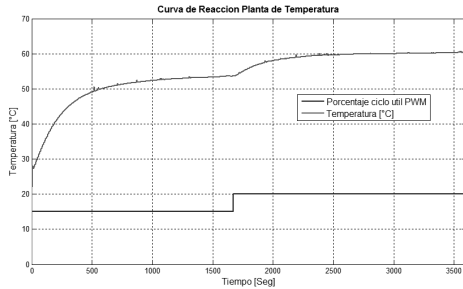


Fig. 9. Curva de reacción planta de temperatura.

Después de aplicar el método de Smith se obtiene el siguiente modelo de primer orden más tiempo muerto:

$$G_{(s)} = \frac{1.35}{273.72s + 1} e^{-15.88s} \quad (1)$$

El segundo método empleado fue el de la estimación de parámetros, por medio del criterio de la integral del cuadrado del error [4], con el cual se obtuvo el siguiente modelo de primer orden más tiempo muerto

$$G_{(s)} = \frac{1.3853}{284.3269s + 1} e^{-13.5189s} \quad (2)$$

Se realiza una simulación con cada modelo y las respuestas obtenidas se pueden ver en la Fig. 10, en ella se puede apreciar las respuestas de los modelos ante una entrada de tipo escalón, como se ve las respuestas son muy similares, sin embargo la respuesta del modelo obtenido mediante la integral del cuadrado del error logra estabilizarse alrededor de los 60° de forma similar al sistema real de modo que se escoge el modelo obtenido por este método para realizar el controlador que validará el sistema con la planta de temperatura.

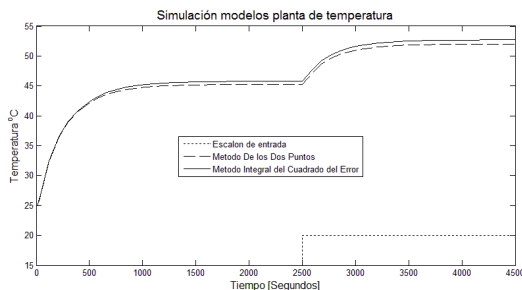


Fig. 10. Respuestas de simulación de modelos planta de temperatura.

4.2 Modelado planta de circuitos RC

El modelado de la planta de circuitos RC se realiza teóricamente a través de modelado matemático. Para ello se aplicó la ley de voltajes de Kirchhoff y el concepto de reactancia capacitiva en función de la transformada de Laplace, descrita por las ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

$$\sum_{k=1}^n V_k = V_1 + V_2 + V_3 \dots + V_n = 0 \quad (3)$$

$$X_{C_s} = \frac{1}{C_s s} \quad (4)$$

Como se mencionó anteriormente la planta de circuitos RC puede configurarse para obtener sistemas de primer, segundo y tercer orden, de modo que se realiza un modelo para cada sistema posible. A continuación se muestra el circuito equivalente a un sistema de primer orden con su correspondiente modelo, en el cual se dejan indicados los valores de C y R, ya que estos pueden variar según la configuración mediante los jumpers.

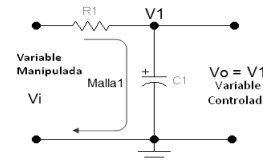


Fig. 11. Diseño de la planta de circuitos RC configurada como sistema de primer orden.

$$G_{(s)} = \frac{1}{C_1 \times R_1 \times s + 1} \quad (5)$$

Para la planta de circuitos RC configurada como sistema de segundo orden, se tiene el circuito equivalente:

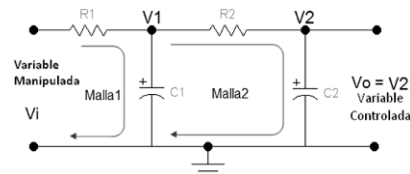


Fig. 12. Diseño de la planta de circuitos RC configurada como sistema de segundo orden.

La ecuación equivalente a la planta configurada como sistema de segundo orden:

$$G_{(s)} = \frac{1}{c_1 c_2 R_1 R_2 s^2 + (R_1 c_2 + R_2 c_2 + c_1 R_1) s + 1} \quad (6)$$

Finalmente el circuito correspondiente al sistema configurado como sistema de tercer orden se muestra a continuación:

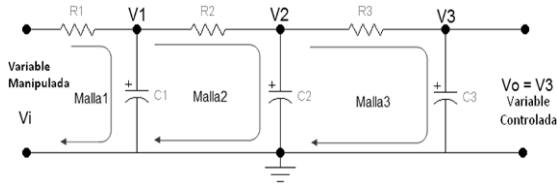


Fig. 13. Diseño de la planta de circuitos RC configurada como sistema de tercer orden.

La ecuación equivalente a la planta configurada como sistema de tercer orden:

$$G(s) = \frac{1}{As^3 + Bs^2 + Ds + 1} \quad (7)$$

Donde:

$$A = c_1 c_2 c_3 R_1 R_2 R_3$$

$$B = c_1 c_2 R_1 R_2 + c_1 c_3 R_1 R_2 + c_2 c_3 R_2 R_3 + c_2 c_3 R_1 R_3$$

$$D = c_1 R_1 + c_2 R_2 + c_3 R_3 + c_2 R_1 + c_3 R_1 - R_1 R_3 c_3 R_2 - \frac{R_1 R_3 c_3}{R_2}$$

5. DISEÑO DE CONTROLADORES

A continuación se encuentran descritos los diferentes controladores implementados para llevar a cabo la validación del sistema, los cuales son: un on/off y un proporcional para la planta de temperatura y un PID para la planta de circuitos RC.

5.1 Implementación de controlador on/off para la planta de temperatura

El controlador on/off se implementa dada la baja complejidad del mismo, esto con el fin de evaluar el comportamiento de un controlador básico sobre la planta de temperatura. La salida del controlador solo tiene dos estados, entregar el valor máximo o el mínimo de la energía disponible en el sistema.

En la Fig. 14 se muestra la respuesta que se obtiene al implementar el controlador on/off para la planta de temperatura. En la imagen se puede apreciar como la variable controlada oscila constantemente alrededor del *setpoint*, lo cual es una característica de este controlador.

También se puede observar que la señal PWM conmuta entre el 0% y el 100% cada vez que la temperatura hace el cruce por el valor del *setpoint*. Aproximadamente a los 8 minutos de iniciar el experimento se introduce un cambio en el *setpoint* como se puede apreciar en la imagen

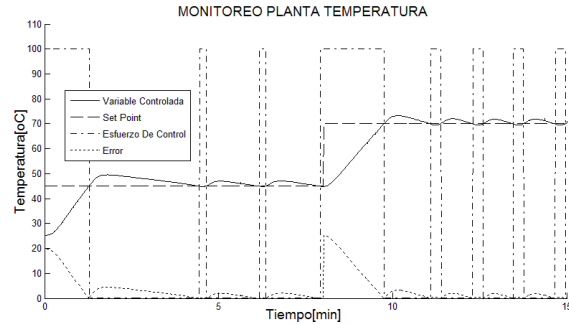


Fig. 14. Respuesta de la planta de temperatura ante un controlador on/off.

5.2 Implementación de un controlador P para la planta de temperatura

El segundo controlador implementado en la planta de temperatura fue un controlador proporcional. La corrección generada por este tipo de controladores es proporcional a la señal de error.

Una característica de este controlador es que no presenta cambios bruscos ante variaciones del error, sino que son proporcionales a él [5], con lo cual se espera obtener un mejor seguimiento de la señal.

Para hallar el valor de la ganancia proporcional se empleo el método de Ziegler y Nichols, el cual usa los parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto obtenido mediante el proceso de modelado.

Con la ganancia proporcional calculada se implemento la ley de control en el microcontrolador de la tarjeta principal, con lo cual se obtiene la respuesta mostrada en la Fig. 15, en ella se puede apreciar que el error de estado estable es bastante pequeño y se eliminan las oscilaciones en la variable controlada, por lo que se concluye que el voltaje presenta un mejor seguimiento de la consigna, en comparación con la respuesta del controlador on/off.

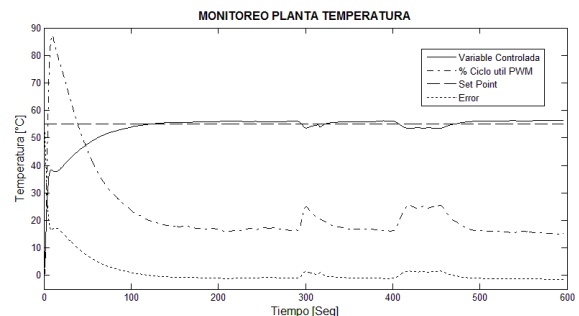


Fig. 15. Respuesta control proporcional y disturbios en la planta de temperatura.

En la Fig. 15 se puede apreciar como se comporta el controlador proporcional ante un disturbio; se puede observar que cuando ocurre el disturbio inmediatamente el controlador reacciona aumentando el porcentaje de la señal de PWM.

5.3 Implementación de un controlador PID para la planta de circuitos RC

El controlador implementado para la planta de circuitos RC es la estructura básica del PID tipo paralelo, que está dado por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

La sintonización del controlador se realiza a través del método de la ganancia última de Ziegler y Nichols. Para hallar la ganancia hasta la cual el sistema es estable, se empleo el método del lugar geométrico de las raíces a través de la herramienta *rltool* de Matlab, teniendo la ganancia última y la frecuencia de corte, se aplicaron las ecuaciones:

$$K_p = 0.6K_u \text{ a } 1.0K_u \quad (9)$$

$$T_i = 0.5T_u \quad (10)$$

$$T_d = 0.125T_u \quad (11)$$

Teniendo el PID en función de la transformada de Laplace, se realiza la transformada Z para discretizarlo y posteriormente obtener una ecuación en diferencias que se implementa en el microcontrolador [6,7]. Finalmente se muestra la ley de control que se implementa:

$$U_{T(h)} = K_1 E_{k(h)} + K_2 E_{k(h-1)} + K_3 E_{k(h-2)} + U_{T(h-1)} \quad (12)$$

Donde:

$U_{T(h)}$: es la salida actual del controlador.

$E_{k(h)}$: es el error actual del sistema.

$E_{k(h-1)}$: es el error anterior del sistema.

$E_{k(h-2)}$: es el error anterior al error $E_{k(h-1)}$.

$U_{T(h-1)}$: es la salida anterior del controlador.

En la Fig. 16 se puede observar como el sistema se estabiliza cerca de los 15 segundos y no presenta sobreimpulso, alrededor de los 38 segundos se introduce el disturbio deshabilitando la resistencia de carga, se puede ver como rápidamente el controlador rechaza el disturbio y estabiliza el sistema, luego cerca de los 60 segundos se habilita nuevamente la resistencia de carga lo cual se ve reflejado en otro disturbio en la planta, del mismo modo la rápida estabilización de la planta debido a la acción del controlador

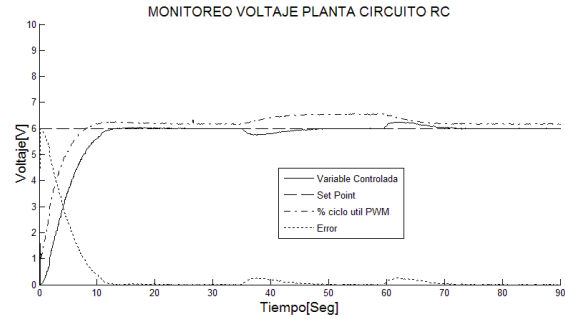


Fig. 16. Respuesta control PID y disturbios en la planta de circuitos RC.

6. CONCLUSIONES

Se crea un sistema que permite aplicar de forma práctica diferentes conocimientos teóricos de áreas tales como: sistemas continuos y discretos, técnicas de modelado, diseño e implementación de controladores, entre otros.

Las tarjetas desarrolladas cuentan con ventajas tales como tamaño reducido, bajo consumo y bajo costo de fabricación en comparación a sistemas comerciales similares, lo cual facilita tanto el uso como la reproducción del sistema.

Se demuestra que la técnica para adquirir y graficar variables en Matlab mediante el uso de *timers* es eficaz, disminuyendo los retardos de tiempo por efectos de la comunicación.

Se verifica de forma práctica los fundamentos teóricos en cuanto a modelado, caracterización y control de sistemas dinámicos.

RECONOCIMIENTO

Agradecimiento a la Universidad del Cauca, que brindo todo el apoyo para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] National Instruments. (2011). NI ELVIS: Educational Design and Prototyping Platform. Recuperado el 3 de Mayo de 2011, de NI: <http://www.ni.com/nielvis/>
- [2] Quanser. (2008). Quanser engineering trainer (QET) series: QET DC Motor Control Trainer. Recuperado el 3 de Mayo de 2011, de Quanser: http://www.quanser.com/english/html/products/fs_product_challenge.asp?lang_code=english&pcat_code=exp-mec&prod_code=S24-QET&tmpl=3

- [3] Galíndez, J. R; Jaramillo, O. (2011). Sistema de prototipado rápido de control para el módulo de prácticas mic955 de la empresa Feedback. Tesis de pregrado en Ingeniería en Automática Industrial, Universidad del Cauca (Colombia), 2011.
- [4] Rengifo, C. F. (2011). Electiva Implementación de Controladores PID. Apuntes de clase. Universidad del Cauca. (Colombia), 2011.
- [5] Lipták, B. (2006). Process Control and Optimization (Vol. II). CRC Press - ISA Press.
- [6] Cuadrado, A. A. (18 de Mayo de 2009). Control Digital. Recuperado el 3 de Mayo de 2011, de Universidad de Oviedo, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática: <http://isa.uniovi.es/~cuadrado/archivos/cdigitalbase.pdf>.
- [7] Ibrahim, D. (2006). Microcontroller Base Applied Digital Control. Cyprus: Department of Computer Engineering Nercar East University.