Comparison of different control techniques applied to real time temperature control

MSc. Emil Hernández Arroyo, PhD. Omar Pinzón Ardila

Universidad Pontificia Bolivariana - Sede Bucaramanga, Autopista Piedecuesta, Km. 7, Bucaramanga, Colombia.
E-mail: emil.hernandez@upb.edu.co

MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona - Norte de Santander, Colombia,
Email: jdiazcu@gmail.com

ABSTRACT

This paper presents a comparative study of the temperature control of a pilot plant built for this purpose, with different control strategies implemented, including a model based predictive controller (MPC) and classical PID controllers with and without antiwindup action and the basic on-off control. The results of the control and monitor the temperature variable in real time were shown, with the use of the various controllers through a data acquisition system using a computer with Matlab's *Real-Time Windows Target Toolbox*. Finally, after evaluating different control techniques the best results were with the use of predictive control (MPC).

Keywords: Temperature control, nonlinear control, MBPC control, PID control, on-off control.

RESUMEN

En este artículo se realiza un estudio comparativo del control de temperatura de una planta piloto construida para este fin, con diferentes estrategias de control implementadas que incluyen un controlador predictivo basado en el modelo (MPC) y los controladores PID clásico con y sin acción *antiwindup* al igual que el básico control *on-off*. Se presentan los resultados de controlar y monitorear en tiempo real la variable temperatura, con el uso de los diferentes controladores a través de un sistema de adquisición de datos empleando una computadora y la herramienta *Real -Time Windows Target* del Matlab. Finalmente, despues de evaluar diferentes técnicas de control se encontraron los mejores resultados con el uso del control predictivo (MPC).

Palabras clave: Control de temperatura, control no lineal, control MPC, control PID, control *on-off*.

1. INTRODUCCIÓN

El control automático ha desempeñado un papel importante en el avance de la ingeniería y la ciencia. Dado el desarrollo en los sistemas de control, para vehículos espaciales, guiado de misiles y robots, este se ha convertido en una parte integral de los procesos modernos industriales y de fabricación. Por ejemplo, el control automático es fundamental para el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, nivel y caudal en las industrias de control de procesos, para mejorar la productividad y simplificar el trabajo de muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias, por lo que se hace atractivo conseguir el comportamiento óptimo de los sistemas (Ogata, 2003; Burns, 2001).

2. SISTEMAS CON RETARDO

En algunos sistemas físicos existe un retardo importante entre la acción y la respuesta del sistema. Esto es típico de los sistemas de control de temperatura debido principalmente a dos razones; la primera es que estos sistemas

pueden poseer una dinámica lenta propia de los sistemas térmicos. La otra razón, es debido al retardo de transporte o tiempo muerto, producido principalmente por el sistema de tuberías que poseen la mayoría de ellos. Durante mucho tiempo, ha sido una práctica común el análisis y diseño de sistemas de control lineales para el control de sistemas de temperatura utilizando un controlador de tipo Proporcional, Integral y Derivativo (PID) donde se han obtenido resultados aceptables (Åström y Wittenmark, 1996).

El desempeño de un controlador PID para sistemas de control de temperatura con retardo puede mejorarse añadiendo una acción predictiva para compensar el retardo de la respuesta de este tipo de sistema. Aunque la acción derivativa es una alternativa de predicción, existen actualmente otras alternativas basadas principalmente en técnicas de control no lineal. El predictor Smith (SP) y el control predictivo basado en el modelo (MBPC) son útiles para sistemas que incluyen tiempos de retardo y cuando se cuenta con buenas aproximaciones del modelo de la planta. Con lo cual se puede conseguir drásticas mejoras en la respuesta transitoria ante eventuales cambios en la señal de referencia. El controlador PID predictivo es una versión simple del predictor de Smith. El MBPC es una generalización del predictor Smith, que se puede aplicar satisfactoriamente a sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas.

Dado que los controladores predictivos se fundamentan en los modelos matemáticos del sistema a controlar es importante que el modelo sea lo más preciso posible. Por lo tanto, es de particular importancia tener una adecuada estimación del retardo que introduce el sistema (Åström y Hägglund, 2006; Umez-Eronini, 2001).

Un controlador PI solamente considera datos pasados y presentes, y un controlador PID también predice el comportamiento futuro del proceso por extrapolación lineal. Sin embargo una buena predicción pueden mejorar el desempeño de los controladores, particularmente cuando el proceso presenta retardos, lo cual es común en el control de procesos. Los tiempos de retardo van desde un mecanismo de retardo puro causado por el transporte o el tiempo requerido para los cálculos y la comunicación. (Ollero, 1991; Roca, 2002).

Los retardos también se deben a mediciones obtenidas en un análisis *off-line*. Y también aparecen cuando un sistema de alto orden o una ecuación diferencial parcial se aproximan a un modelo de bajo orden como es el ejemplo de la conducción de calor. Por otro lado, existen controladores que pueden lidear este tipo de procesos, el MBPC es una clase amplia de controladores que hoy en día se está siendo muy popular (Maciejowski, 2002).

3. INSTALACION EXPERIMENTAL

En este trabajo se presenta una forma alternativa para controlar y monitorear en tiempo real la variable temperatura del horno fabricado por la empresa Grupo Siatec Ltda. Para lo que se dispuso de un computador de escritorio que utiliza el software Matlab y la herramienta *Real-Time Windows Target*. Este software es ampliamente extendido debido a que permite simular, monitorear y controlar las variables del proceso en una misma plataforma computacional. Además, se está controlando el módulo mediante algoritmos con arquitectura abierta (sistemas no propietarios) los cuales permiten una mejor adaptabilidad y diseño del algoritmo de control. En la figura 1 se muestra la instalacion experimental del proyecto realizado.

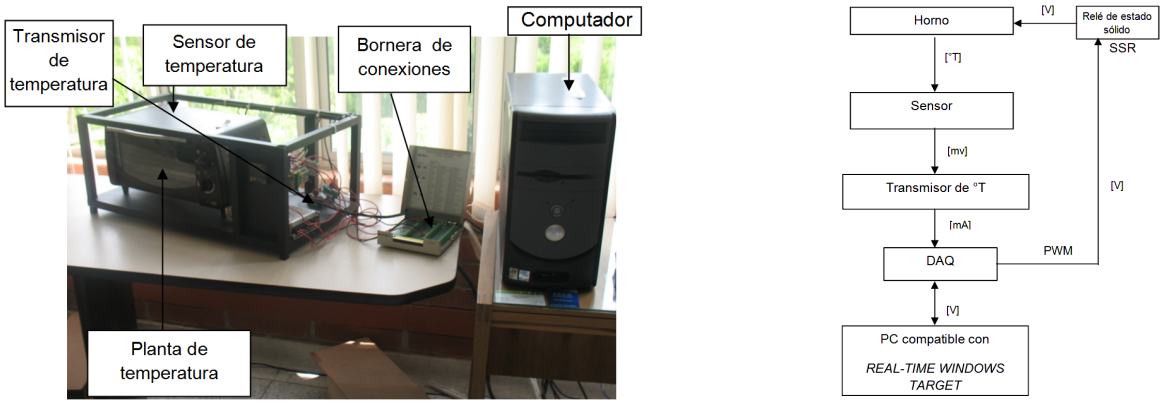


Figura 1: Sistema de Control de Temperatura (a) Instalación (b) Diagrama en Bloques

Lo anterior permite explorar diferentes formas de control sin necesidad de depender de arquitecturas cerradas. Este módulo se conecta a un computador de escritorio utilizando la tarjeta de adquisición de datos PCI-6032E de la empresa *National Instruments* (National Instruments, 2005). Como primer paso, se diseña e implementa la señal de control por modulación de ancho de pulso o PWM (Maloney, 2006; Texas Instruments, 1999) que regula los tiempos de encendido de la planta de temperatura, por medio del relé de estado sólido. Con esta señal PWM, implementada en *simulink*, se puede controlar la variable temperatura, además, se diseñan e implementan los circuitos acondicionadores de señal (CAS) para adquirir la señal del sensor de temperatura mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

Luego se diseñan los reguladores: *on-off*, PID y MBPC, mediante los diagramas de bloques de Simulink para controlar la variable temperatura. El programa de control en tiempo real se genera utilizando la herramienta *Real-Time Windows Target* de *Matlab* (MathWorks, 2006; Vanegas, 2008), interactuando físicamente sobre el módulo, permitiendo la posibilidad de hacer un ajuste del control y de los parámetros del regulador para optimizar la respuesta del sistema.

4. SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA

4.1 PLANTA PILOTO DE TEMPERATURA

La planta de temperatura de la figura 1 consiste en un horno con resistencias eléctricas, un transmisor de temperatura PT100 SITRANS TKL SIEMENS, una fuente de 24 V y alimentación de 120 V, donde se estudian los fundamentos del control de procesos, teniendo como variable a controlar la temperatura. Se utilizó una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) que se encarga de efectuar la comunicación entre el computador y el módulo didáctico según se observa en la figura 2.

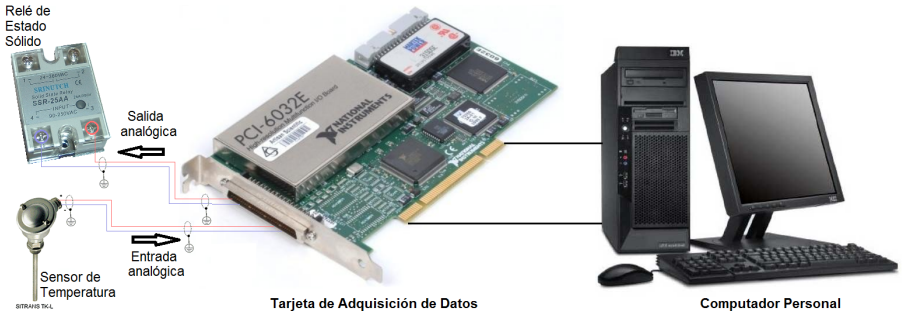


Figura 2. Sistema de adquisición de datos

4.2 OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA

En este trabajo se determinó el modelo matemático de la planta, realizando un proceso de identificación utilizando la información de la entrada (paso de voltaje a 120 V) y el adquiriendo la variable temperatura [°C] con la planta en lazo abierto (Lennart and Torkel, 1994). En la figura 3 se observa el diagrama de bloques en *Simulink* que permite obtener el modelo de la planta en lazo abierto utilizando al tarjeta de adquisición de datos. En la figura 4 se observa el resultado de la identificación con la cual se puede determinar un modelo aproximado de la planta.

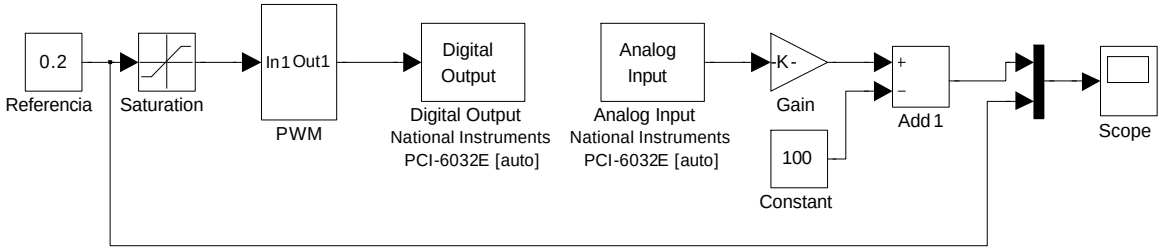


Figura 3: Diagrama de bloques en lazo abierto para realizar la identificación de la planta

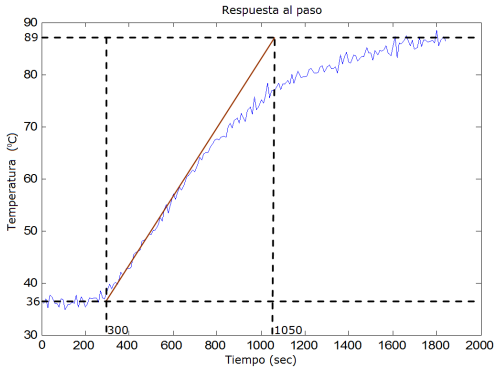


Figura 4: Respuesta de la planta en lazo abierto

Para conseguir la función de transferencia de la planta se realiza por la curva de reacción (respuesta de la planta de la figura 4) haciendo una aproximación a un sistema de primer orden con retardo por el método de la pendiente máxima (Dorf and Bishop, 2005). La constante de tiempo se obtiene cuando la pendiente (desde la temperatura ambiente de 36 ^{o}C y 300 seg.) intercepta el valor máximo de la respuesta (89 ^{o}C en 1050 seg.), por lo que la constante de tiempo se determina como la diferencia de ambos tiempos: 1050 - 300 = 750 seg. y la ganancia por la relación de la diferencia de temperaturas inicial y final (89^{o}C-36^{o}C) entre la variable de entrada (120V). Por lo que la función de transferencia de la planta queda descrita según la ecuación (1) (Smith y Corripio, 2007):

$$Gp(s) = \frac{K}{Ts+1}e^{-Ls} = \frac{0.44}{750s+1}e^{-300s}. \quad (1)$$

Donde:

L = 300 seg. (Tiempo de retardo), T = 750 seg. (Constante de tiempo), K = (89^{o}C-36^{o}C)/120V = 0.44 (Ganancia).

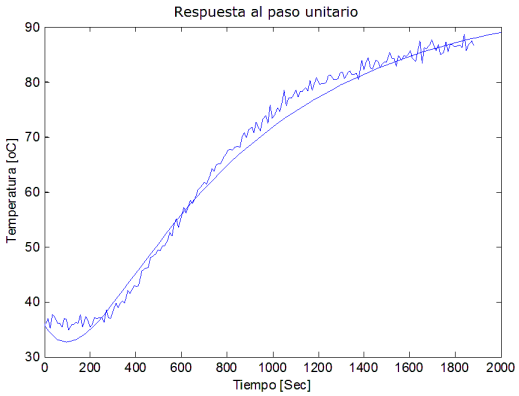
Linealizando la función de transferencia utilizando la aproximación de Pade de primer orden (Chavu, 2001):

$$e^{-Ls} \approx \frac{1-\frac{Ls}{2}}{1+\frac{Ls}{2}} = \frac{-s+\frac{2}{L}}{s+\frac{2}{L}} = \frac{-s+\frac{2}{300}}{s+\frac{2}{300}} = \frac{-s+0.006667}{s+0.006667}. \quad (2)$$

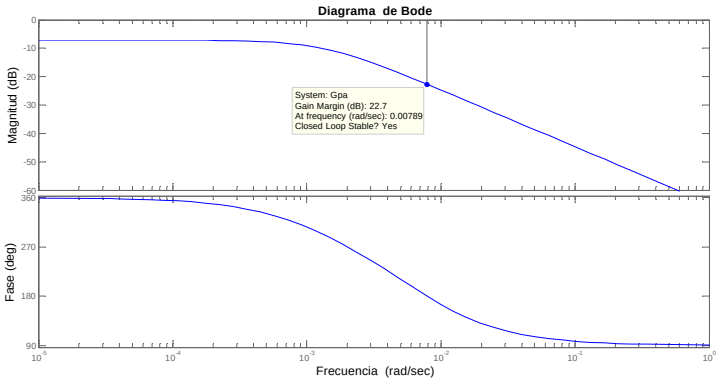
Sustituyendo (2) en (1) se obtiene:

$$Gp(s) = \frac{0.44}{750s+1}\left[e^{-300s}\right] = \frac{0.44}{750s+1}\left[\frac{-s+0.006667}{s+0.006667}\right] = \frac{-0.44s+0.002933}{750s^2+6s+0.006667}. \quad (3)$$

La función de transferencia resultante es un sistema lineal de segundo orden tipo cero (al no poseer integrador), con dos polos reales (s_1=-1/750 y s_2=-2/300) siendo el primero el dominante, por lo que se obtiene una respuesta similar a un sistema de primer orden (el polo dominante es 5 veces mayor). Además posee un cero en el semiplano derecho, lo que da un comportamiento de fase no mínima que garantiza la aproximación del retardo.



(a)



(b)

Figura 5: Respuesta del modelo matemático de la planta. a) Temporal. b) Frecuencial.

4.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL REGULADOR PID PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA

Para calcular el regulador se utiliza el método de Ziegler Nichols de la ganancia máxima, los datos para la sintonía se consiguen del diagrama de bode (figura 5b), margen de ganancia Mg = 22.7 dB o Mg = 13.6364 en valor absoluto y la frecuencia de cruce de ganancia Wcg = 0.00789 rad/seg. Con estos datos se calcula la ganancia máxima y el período de oscilaciones de la siguiente manera (Pardo y Díaz, 2005):

$$K_{u\max} = M_g \cdot K = 13.6364 \cdot 0.44 = 6. \quad (4)$$

$$P_u = 2p/wcg = 2 \cdot 3.1416/0.00789 = 796.5390 \text{ seg}. \quad (5)$$

Evaluando estos parámetros en la tabla de Ziegler-Nichols para un controlador tipo PID, se consigue:

$K_c = 0.6 \cdot K_{u\max} = 0.6 \cdot 6 = 3.6$, $T_i = P_u/2 = 796.5390/2 = 398.2695 \text{ seg}$, $T_d = P_u/8 = 796.5390/8 = 99.5674 \text{ seg}$

La función de transferencia del regulador sería:

$$PID(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) = 0.36\left(1 + \frac{1}{398.2695 s} + 99.5674 s\right) = \frac{142756.756 s^2 + 1433.77 s + 0.36}{398.2695 s}. \quad (6)$$

Utilizando la *toolbox* de sistemas de control del *Matlab*, obtenemos la respuesta del sistema en lazo cerrado con el controlador anterior, con lo que se consigue un sobreimpulso de M_p = 27% y un tiempo de establecimiento de T_s = 3120 seg. como se muestra la figura 6a. Para mejorar el tiempo de respuesta del sistema se procede a utilizar la herramienta *sisotool* del *Matlab* con la cual, haciendo un ajuste más fino, se mejora el tiempo de establecimiento a 2000 seg. con un aumento del sobreimpulso a M_p = 67%, como se puede observar en la figura 6b, utilizando el siguiente controlador PID.

$$PID(s) = 0.274\left(1 + \frac{1}{0.0298 s} + 28135.0365 s\right) = 770.9495 \frac{(s + 0.005962)^2}{s} = \frac{770.9 s^2 + 9.192 s + 0.0274}{s}. \quad (7)$$

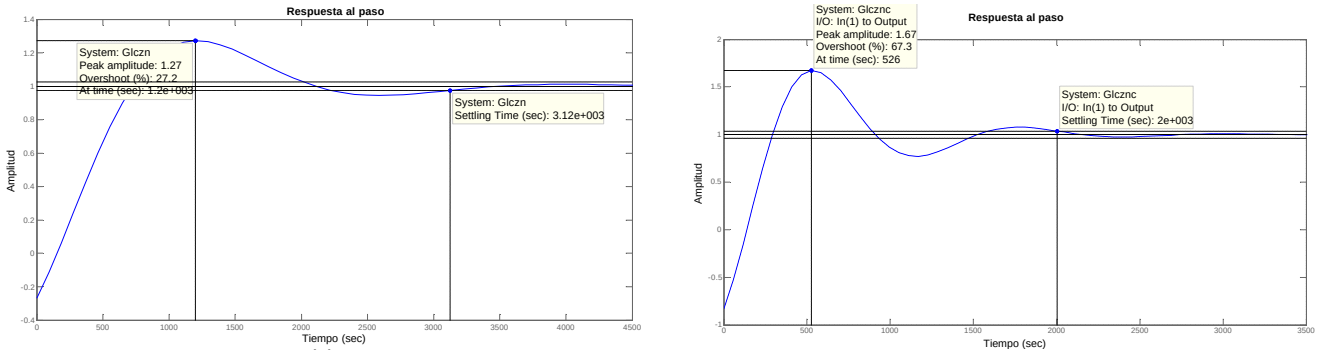


Figura 6: Respuesta de la simulación. a) Ajuste Ziegler Nichols. b) Ziegler Nichols mejorado.

Esta respuesta podría ser mejorada aún si hacemos coincidir un cero del controlador PID con el polo dominante de la planta, o sea en s=- 0.006667 , con la disminución apreciable del tiempo de establecimiento, pero esta cancelación puede verse afectada por la dinámica del retardo y por la variación de parámetros con el funcionamiento.

4.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez obtenido el controlador se implementa el sistema en lazo cerrado, para lo cual fue discretizado el controlador PID descrito en (7) utilizando la aproximación en retardo (Landau and Zito, 2006; Moudgalya, 2007). En la figura 8 se observa el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, implementado en *Simulink* para el control de temperatura con un regulador PID. Se utilizan los bloques *Digital Output* y *Analog input* de la librería *RTWINTG* (*Real Time WINdow TarGet*) para interactuar físicamente con el modulo didáctico en tiempo real.

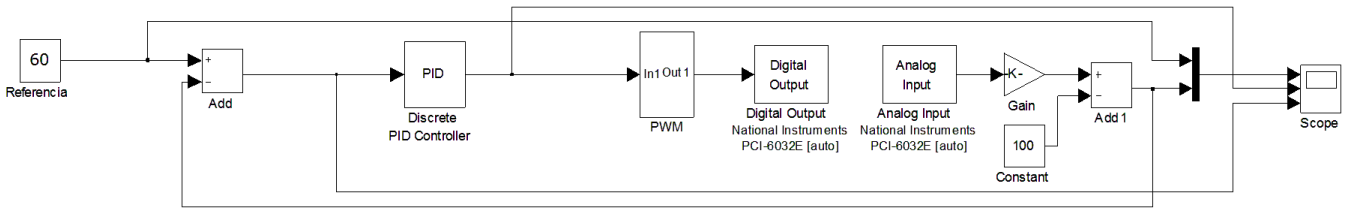


Figura 7: Diagrama de bloques para el control experimental de temperatura PID

En la figura 8 se muestra la respuesta del sistema de la figura 7 para una referencia de 60 °C, un sobreimpulso de 40 °C, con el cual alcanza una temperatura máxima de 100 °C, y un tiempo de establecimiento de 2000 segundos.

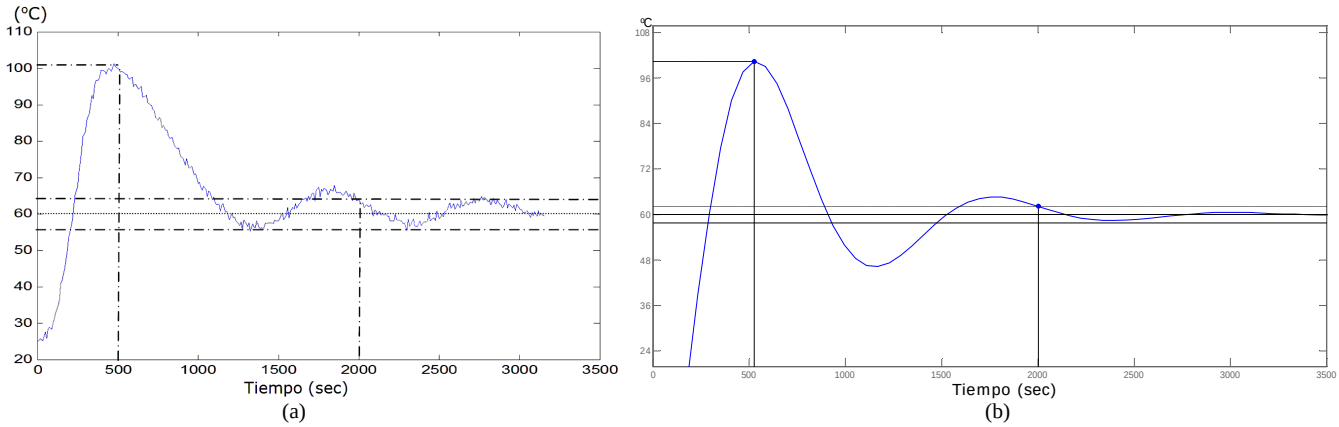


Figura 8: Respuesta del sistema en lazo cerrado. a) Experimental. b) Simulada.

4.5 PID CON ACCIÓN *ANTIWINDUP*

La mayoría de los controladores industriales están ajustados para operar en un rango lineal, asumiendo que no hay limitaciones en el proceso ni en el regulador. Tal consideración es válida si las perturbaciones son pequeñas o sólo hay cambios ligeros en la referencia (Hanus, 1980). Sin embargo, los sistemas reales poseen limitaciones; en caso de un cambio grande en la referencia la señal del regulador quedará limitada, lo que rompe la unión directa entre el controlador y el proceso en lazo cerrado. Esto puede producir comportamiento indeseable en el regulador, conocido como *windup*, sobre todo si el controlador posee término integral, como el caso del PID. La acción correctiva a este efecto se conoce como *antiwindup* y se realiza directamente sobre el término integral del controlador, deteniendo la integración mientras el sistema está en saturación. En la figura 9 se muestra el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, con un regulador PID con acción *antiwindup* (Åström and Rundqwist, 1989).

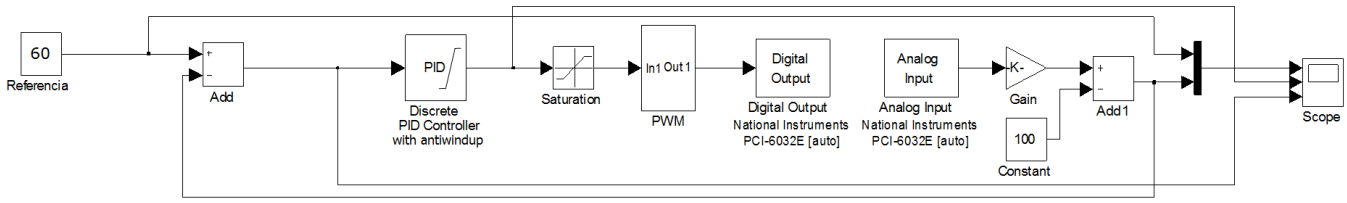


Figura 9: Diagrama de bloques para el control experimental de temperatura PID *antiwindup*.

La fig. 10 muestra la respuesta con un tiempo de establecimiento de 1200 segundos y sobreimpuso de 8 °C.

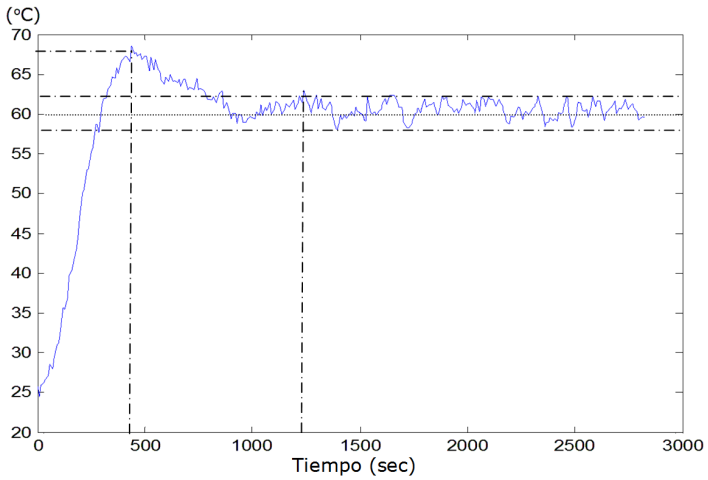


Figura 10: Respuesta del sistema de control experimental PID *antiwindup* de temperatura en lazo cerrado

4.6 CONTROL *ON-OFF*

El control *on-off* es uno de los métodos de control más antiguos que se sigue empleando hoy en día por su relativa sencillez y eficacia. A pesar de que posee sus limitaciones, ya que para su utilización práctica en la mayoría de los casos se agrega de una brecha diferencial (*histéresis*) la cual evita que se produzcan ciclos limites y agrega un grado de libertad adicional al sistema de control (Ogata, 2003). Se pueden conseguir resultados aceptables disminuyendo la brecha diferencia al mínimo, pero con la desventaja del aumento de las conmutaciones del elemento final de control (relé de estado sólido).

En la figura 11 se muestra el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, para el control de temperatura con un regulador *on-off*, el cual es implementado con el bloque *Relay* al cual se le ajusta una brecha diferencial de 58 a 70 °C. El bloque *Saturation* se coloca para asegurar que el sistema no sobrepase un valor máximo (100 °C).

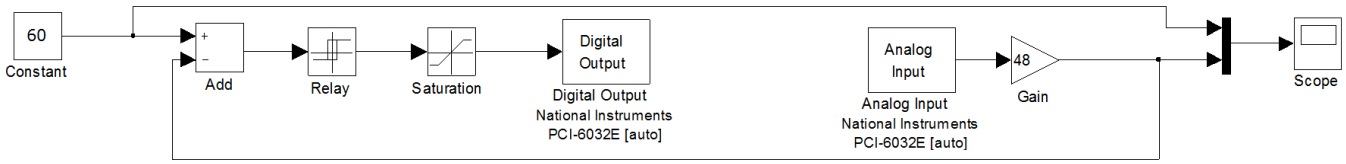


Figura 11: Diagrama de bloques para el control experimental de temperatura *on-off*

En la figura 12 se muestra la respuesta del sistema anterior. El tiempo de establecimiento es de 2800 segundos.

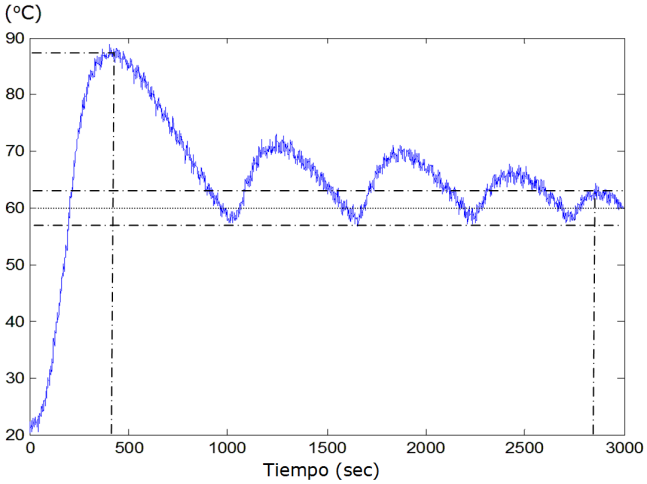


Figura 12: Respuesta del sistema de control experimental *on-off* de temperatura en lazo cerrado

4.7 CONTROL PREDICTIVO BASADO EN EL MODELO (MPC)

El control predictivo basado en el modelo (MPC) es una clase de algoritmos de control por computador que utilizan un modelo explícito del proceso para predecir la respuesta a futuro de la planta (Mosca, 1994). En cada intervalo de control el algoritmo MPC intenta optimizar el comportamiento mediante el cálculo de una secuencia de ajustes a futuro de la variable manipulada. La primera entrada en la secuencia óptima se envía a la planta, y todo el cálculo se repite en intervalos de control posterior. Originalmente fue desarrollado para satisfacer las necesidades de control especializado de las centrales eléctricas y refinerías de petróleo, sin embargo la tecnología MPC se puede emplear en una amplia variedad de áreas de aplicación, que incluye el control de temperatura (Camacho and Bordons, 2004).

Para la implementación de este controlador se utilizó la *Model Predictive Control Toolbox* del *Matlab* utilizando el comando *mpctool*. Los parámetros del control para la implementación del MPC fueron los siguientes:

Tiempo de muestreo (t_s) = 10 seg.
Horizonte de predicción (H_p) = 10 t_s = 100 seg.
Horizonte de control = 2 t_s = 20 seg.

En la figura 13 se muestra el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado implementado en el *Simulink* para el control de temperatura con regulador MPC.

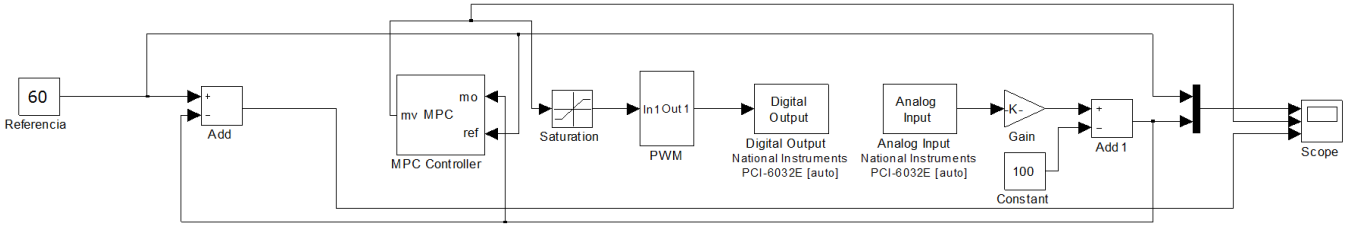


Figura 13: Diagrama de bloques para el control experimental de temperatura MPC

En la figura 14 se muestra la respuesta del sistema de la figura 13 donde se observa un tiempo de establecimiento de 1000 segundos, evidenciando un mejor comportamiento del control predictivo basado en el modelo (MPC) comparado con los otros controladores.

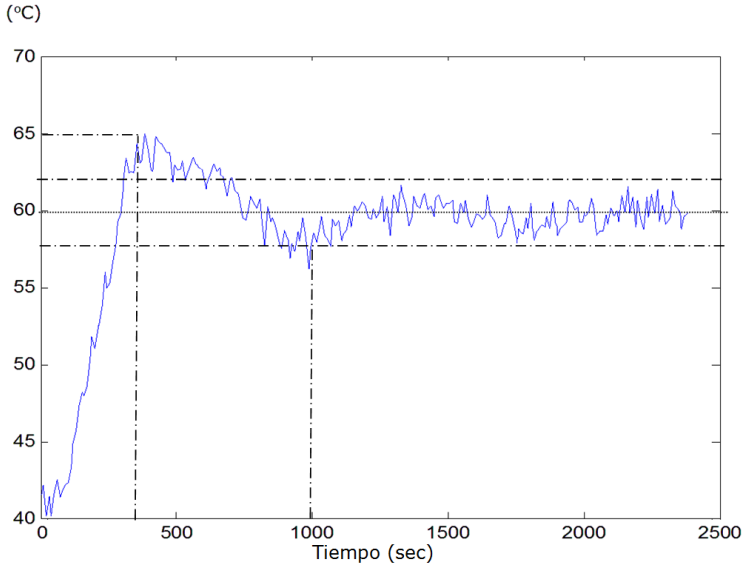


Figura 14: Respuesta del sistema de control experimental MPC de temperatura en lazo cerrado

En la figura 15 se comparan los controladores MPC y PID, donde se observa el comportamiento transitorio de ambos. De esta figura se puede concluir superioridad dinámica del controlador MPC sobre el controlador PID en términos del tiempo de establecimiento y el sobreimpulso máximo.

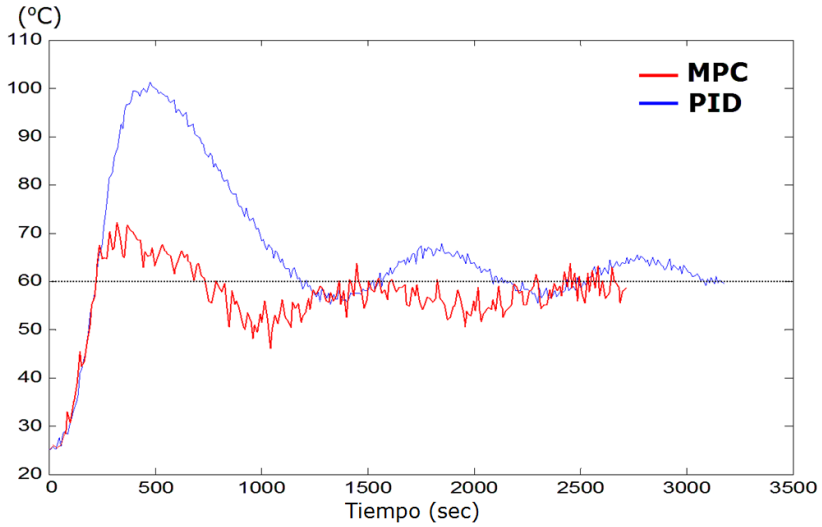


Figura 15: Respuestas de los sistemas de control PID y MPC

En la tabla 1 se muestra la respuesta transitoria de los cuatro controladores con objeto de facilitar la comparación.

Tabla 1: Comparación de la respuesta transitoria de sistema con diferentes controladores

Indicadores de la Respuesta Transitoria	**Tipo de Control**			
	on - off	**PID**	**PID *antiwindup***	**MPC**
Tiempo de retardo (T_d) [seg.]	180	125	200	187
Tiempo de subida (T_r) [seg.]	230	245	350	310
Tiempo pico (T_p) [seg.]	480	500	450	430
Sobreimpulso (M_p) [°C]	88	40	8	5
Tiempo de establecimiento (T_s) [2%] [seg.]	2800	2000	1200	1000

5. CONCLUSIONES

El sistema de control por modulación de ancho de pulso (PWM) es efectivo para realizar el control, el cual determina los tiempos de encendido y apagado del relé de estado sólido, controlando de esta forma la variable de la temperatura en el módulo didáctico. Con la utilización de la herramienta RTWINTG del *Matlab*® se puede generar de forma sencilla y precisa el programa de control en tiempo real para interactuar físicamente con la variable temperatura del módulo didáctico.

Se requiere de un proceso de identificación de la planta piloto de temperatura para establecer el modelo de la planta. Para lo cual se utilizó el registro de las mediciones en tiempo real de las señales de entrada y salida para un paso escalón. El modelo a utilizar fue el descrito por un sistema de primer orden con retardo. Los parámetros del modelo fueron determinados por el método de la pendiente máxima.

Se implementaron diferentes estrategias de control que incluyen el controlador *on-off*, el PID, el PID con acción *antiwindup* y el controlador predictivo (MPC). En el caso del controlador PID se ajustó por el segundo método de Ziegler-Nichols, el cual fue mejorado, modificando levemente la posición de los ceros que introduce en controlador, reduciendo el tiempo de establecimiento del sistema en lazo cerrado. Adicionalmente se agregó una acción *antiwindup* para mejorar la respuesta del sistema y lo cual se obtuvo en los resultados experimentales que el control PID *antiwindup* el cual tiene un mejor comportamiento respecto al PID clásico y al control *on-off* esto se evidencia en un menor sobreimpulso y menor tiempo de establecimiento.

Finalmente se implementó en *Matlab*® un controlador predictivo basado en el modelo (MPC) el cual mejora aun más la respuesta del sistema en lazo cerrado. Para establecer los resultados se elaboró una tabla comparativa que pone en evidencia superioridad del control predictivo en sistemas con retardo. Los resultados verifican que en sistemas que presentan tiempo muerto, fase no-mínima o cuando el sistema está sujeto a limitaciones o perturbaciones constantes, las estructuras denominadas convencionales de control (control PID) no siempre dan los mejores resultados.

Por último, se recomienda para trabajos futuros implementar un etapa de filtrado, que puede realizarse en el mismo software de *Matlab*®, esta serviría para filtrar el ruido y establecer con mayor claridad los indicadores de la respuesta transitoria. Igualmente se considera que haciendo variaciones en el diseño del controlador predictivo (MPC), como establecer restricciones y optimización se puede conseguir mejores indicadores en la respuesta de este método de control.

REFERENCIAS

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. 4ta Ed. Pearson Educación, España.

Burns, R. S. (2001). *Advanced Control Engineering*. 1st Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.

Åström, K.J.nd Wittenmark, B. (1996). *Computer-Controlled systems: theory and design*. 3rd Ed.

Åström, K.J. Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA, United States.

Umez-Eronini. (2001). *Dinámica de sistemas y control*. Ed. Thomson, México.

Ollero B., A. (1991). *Control por computadora: Descripción interna y diseño óptimo*. Ed. Marcombo, España.

Roca C., A. (2002). *Control de procesos*. 2da Ed, Alfaomega, México.

Maciejowski, J.M. (2002). *Predictive Control with Constraints*. Prentice-Hall, Englewood Clifts.

National Instruments (2005). *NI 6013/6014 Family Specifications*. 2003–2005 National Instruments Co.

Maloney, T.J. (2006). *Electrónica industrial moderna*. 5ta Ed., México: Pearson Educación.

Texas Instruments. (1999). PWM Solenoid/Valve Driver, Burr-Brown products from Texas Instruments Co.

MathWorks. (2006). *Real-Time Windows Target for use with Real-Time Workshop*®*, User's Guide Version 2*. MathWorks, Inc.

Vanegas, J.D. (2008). *Control del módulo didáctico, de nivel y caudal, Procon 38-001 de la empresa FeedBack utilizando la herramienta Real-Time Window Target de Matlab*. Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.

Lennart, L. and Torkel, G. (1994). *Modeling of dynamic systems*. 1st Ed., Prentice Hall, United States.

Dorf, R. and Bishop, R. (2005). *Sistemas de control moderno*. 1ra Ed., Pearson, España.

Smith, C. y Corripio, A. (2007). *Control automático de procesos*. Editorial Limusa, México.

Chavu, P. C. (2001). *Process Control a first course with Matlab*. University of California, San Diego 2001.

Pardo, A. y Díaz, J.L. (2005). *Fundamentos en sistemas de control automático*. Universidad de Pamplona, Colombia.

Landau, I. D. and Zito, G. (2006). *Digital Control Systems Design, Identification and Implementation*. Springer. France.

Moudgalya, K.M. (2007). *Digital Control*. John Wiley and Sons, England.

Hanus, R (1980). "A new technique for preventing control windup". *Journal A*., Vol. 21, No. 1, pp. 15-20.

Åström, K.J. and Rundqwist, L. (1989). "Integrator windup and how to avoid it", *Proceedings of the 1989 American Control Conference*, Vol. 2, pp. 1693-1698.

Mosca, E. (1994). *Optimal, predictive and adaptive control*. 1st Ed., Prentice Hall, London.

Camacho, E. and Bordons, C. (2004). *Model predictive control*. 2nd Ed., Springer, London.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.