

Diseño e Implementación de un sistema de control cascada en la planta de intercambio térmico - PIT000

Design and implementation of a cascade control system in the heat exchange plant

Recibido: 20- 10 - 2016 Aceptado: 08-05-2017

Juan Gonzalo Álvarez Díaz^{1*}
Jorge Enrique Moreno Serrano²
Edwin Fernando Ramírez Murillo³

¹ Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. CEAI, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA.
* jgalvarez@sena.edu.co

² Colombiano. M.Sc. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. CEAI, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA.
jemorenos@sena.edu.co

³ Colombiano. Ingeniero Electrónico. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. ASTIN, Cali – Colombia, Unidad de Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, UIADTI – SENA.
eramirez@sena.edu.co

Resumen

En el artículo se describe el diseño e implementación del sistema de control de la Planta Didáctica de Intercambio Térmico - PIT000, ubicada en el Centro de Electricidad y Automatización Industrial, CEAI - SENA, como un aporte investigativo a las necesidades de las instituciones de educación y de las empresas, ingenios azucareros, petroquímicas y papeleras, entre otras. El sistema de control se basa en una estrategia cascada temperatura-flujo, implementada mediante el uso de tecnología de instrumentación y control industrial, que incluyó transmisores inteligentes de flujo y temperatura, controladores lógicos programables y válvulas de control con posicionador inteligente. La metodología de diseño del sistema de control incluyó la elaboración de diagramas (P&ID) y bloques de la estrategia, la definición de condiciones de operación del proceso, el modelado de los lazos de control por medio de funciones de transferencia, el diseño de los controladores de flujo y temperatura, la determinación de los parámetros de sintonía haciendo uso del Matlab y la implementación final del sistema de control. Los resultados de la investigación, que están asociados a la implementación del sistema de control, son considerados satisfactorios, debido a que se validan con la simulación y prueba de la estrategia de control ante condiciones de operación, así como la estrategia de control cumplió con el propósito de mejorar el comportamiento de la temperatura de salida del producto en el proceso.

Palabras clave: Intercambio térmico; control cascada; PID; PIDTuner; Simulación; implementación.

Abstract

The article describes the design and implementation of the control system of the didactic thermal exchange plant - pit000, located in the center of electricity and industrial

automation, ceai - sena, as an investigative contribution to the needs of the institutions of education and of companies, sugar mills , petrochemical and paper mills, among others. The control system is based on a cascade strategy temperature-flow, implemented through the use of instrumentation and industrial control technology, which includes intelligent flow and temperature transmitters, programmable logic controllers and control valves with smart positioner. The design method of the control system included the development of diagrams (p & id) and strategy blocks, the definition of conditions of operation of the process, the modeling of control loops by means of transfer functions, the design of the flow and temperature controllers, the determination of the tuning parameters making use of matlab and the final implementation of the control system. The results of the research, which are associated with the implementation of the control system, are considered satisfactory, because they are validated with the simulation and test of the control strategy in the presence of operation, as well as the control strategy complied with the purpose of improving the behavior of temperature output of the product in the process.

Keywords: Heat exchange; cascade control; PID; PIDTunning; Simulation; implementation.

Introducción

El estudio de las estrategias de control en cascada, basado en acciones de control Proporcional, Integral y Derivativo, PID, es un tema habitual en cursos de control en Ingeniería y abordado por diferentes autores, quienes presentan diversas metodologías de implementación para esta estrategia en plantas de intercambio térmico.

Algunos de los resultados de implementación o simulación se presentan en Srinivas, Prasada y Vijaya, (2012), donde se aplican diferentes estrategias de control en una planta de intercambio térmico utilizando software de uso habitual a nivel académico – LabView; en Chacón, (2013), se aborda el diseño de sistemas de control a plantas didácticas de intercambio térmico, utilizando diferentes técnicas de control, el cual está enfocado a lazos de control independientes. En Abdulbasid y Mukhtar (2014), se desarrolla un controlador de temperatura para el flujo de salida de un intercambiador de calor, en el que la sintonía y el comportamiento del sistema controlado se realizaron y analizaron con SIMULINK de Matlab ®, y en el que los resultados se centraron en determinar los efectos de las variaciones en los tiempos de muestreo sobre los parámetros de sintonía y en el comportamiento en el

tiempo del proceso. De la revisión general de sistemas de control para intercambiadores se puede concluir que existe un gran número de artículos donde se exponen diferentes métodos de control, desde estrategias simples hasta estrategias avanzadas, lo cual muestra las bondades del control hacia el proceso. De igual forma, lo que más se reporta es el uso de estrategias de PID para el control de intercambiadores, siendo esta estrategia la más usada a todo nivel en la industria (O'Dwyer, 2009).

Como hipótesis de la investigación se plantea “La estrategia de control en cascada, utilizada para mejorar la regulación en el control de los procesos continuos, puede ser implementada satisfactoriamente en una planta de intercambio térmico, fabricada a baja escala de las existentes en las empresas industriales”.

Teniendo como referencia la hipótesis planteada, en el trabajo se reportó el diseño y la implementación de una estrategia de control cascada en una planta didáctica de intercambio térmico, basada en el uso de tecnología de instrumentación y control industrial, y aplicando metodologías modernas y herramientas computacionales de diseño.

La investigación tiene antecedentes en desarrollos tecnológicos y otros artículos escritos sobre plantas de operaciones unitarias realizados por la UIADTI - CEAI, que se encuentran en uso en el SENA a nivel nacional (Moreno, 2009).

Marco teórico

Un esquema típico del control cascada en una planta de intercambio térmico se muestra en la Figura 1, donde se puede reconocer un lazo de control primario establecido por la variable temperatura y un lazo de control secundario instaurado por la variable caudal. En este sistema de control se busca que la temperatura de salida del fluido de producto, $T(t)$, permanezca en valores establecidos a través de las referencias o valores deseados. El fluido caloportador (vapor), debe proporcionar la cantidad de energía necesaria para llevar la temperatura de entrada del producto - $T_i(t)$, al valor deseado. La temperatura de salida se controla mediante la manipulación de la posición de la válvula quien a su vez modifica el flujo caloportador. En algunos procesos, el flujo caloportador puede verse afectado por cambios de presión de la tubería o de temperatura lo que genera perturbaciones en el sistema de control, que normalmente no son compensados por un sistema de control simple. Para compensar los efectos de

estas perturbaciones en el sistema de control se implementa el lazo de control secundario de caudal (Creus, 2010).

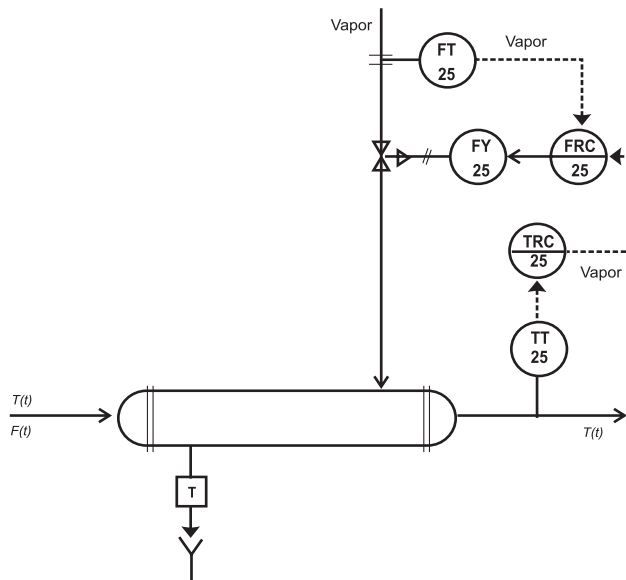


Figura 1. Esquema de Control en cascada para un intercambiador térmico. **Fuente:** (Smith & Corripio, 1991)

La metodología de diseño del sistema de control PID, que contiene diferentes métodos para el modelamiento de este tipo de procesos y posterior diseño del controlador, es abordada en Moradi, y Johnson, (2005), en el cual destaca el método de estimación de la función de transferencia por medio del modelamiento no paramétrico. Este método se tomó como herramienta de referencia en la investigación, en la que para obtener el modelo matemático del proceso de intercambio térmico se toman los datos y dinámicas de las variables de entradas y salidas, y mediante el uso de herramientas computacionales se obtiene la función de transferencia.

El esquema general para el diseño de sistemas de control propuesto por MathWorks de Matlab® se representa en la Figura 2. El procedimiento muestra tres etapas: i) Diseño: en la que se obtiene el modelo del proceso, haciendo uso de la herramienta de identificación (Toolbox Ident), y el diseño del controlador, por medio del uso de la herramienta PIDTuning; ii) Implementación: en la que se desarrolla la estrategia de control, estrechamente asociada con la tecnología en que se implementó y se afinan los parámetros de sintonía si es necesario; iii) Verificación: donde se comprueba el comportamiento del lazo según condiciones de diseño. La metodología mostrada en la Figura 2, es la utilizada en la presente investigación.

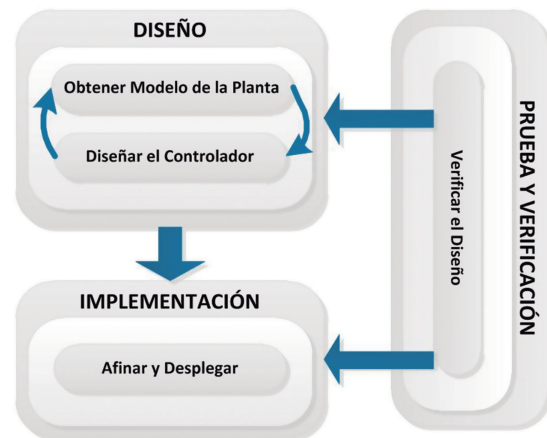


Figura 2. Etapas de desarrollo de un sistema de control.

Fuente: (MathWorks, 2016)

Metodología de diseño del sistema de control

Descripción del proceso

El diagrama de tuberías e instrumentos - (P&ID) de la planta didáctica, mostrado en la Figura 3, se elaboró aplicando la norma ANSI/ISA S5.1 para representar el sistema controlado de la PIT000(American National Estándar, 2009). En la Figura 3 se observa que por el intercambiador de calor - HE001, del tipo coraza y tubo, pasan dos corrientes de fluidos: la del producto (agua) que va por la coraza y la del fluido caloportador (agua caliente a 95 °C) que circula por los tubos. El flujo de producto entra al HE001, a través del transmisor de flujo por efecto coriolis - FIT002, de la válvula de control - FCV001 y del transmisor de temperatura - TIT001. A la salida del intercambiador el producto caliente se encuentra con el transmisor de temperatura - TIT003 y el transmisor de flujo electromagnético - FIT005. El fluido caloportador entra al HE001 a través del transmisor de flujo vortex - FIT004, de la válvula FCV002 y el transmisor de temperatura - TIT004, y a la salida, este flujo, se encuentra con el transmisor TIT002 y el transmisor de flujo por presión diferencial - FIT003. En la planta, tanto los transmisores como las válvulas cuentan con el protocolo de comunicación HART y señales de comunicación 4 a 20 mA.

En el proceso se reconocen las siguientes variables:

caudal de producto - $Q_p(t)$,

caudal de fluido caloportador - $Q_c(t)$,

temperatura de entrada - $T_{EP}(t)$, y salida $T_{SP}(t)$ de producto y temperatura de entrada - $T_{EC}(t)$ y salida $T_{SC}(t)$ de fluido caloportador.

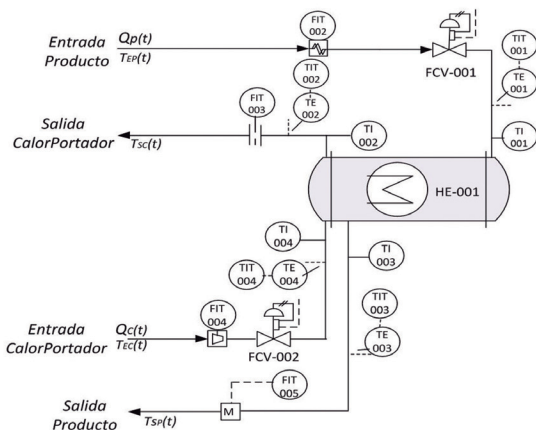


Figura 3. Diagrama (P&ID) de la PIT000, con lazo de control de cascada temperatura flujo.
Fuente: Los autores.

Plataforma de control y adquisición de señales

El sistema de control se implementó en una plataforma de hardware y software, dispuesta para la lectura, procesamiento y escritura de señales constituida por: i) un PLC de referencia AFPX, cuyo software de configuración y programación es FPwin Pro; ambos de marca Panasonic y ii) el software Kepserver como servidor OPC que permite la transferencia de datos a través de Ethernet entre el PLC y el PC. La plataforma también cuenta con scripts realizados en Matlab para el almacenamiento y generación de señales, utilizados en actividades como: definición del punto de operación, captura de datos para el modelado del proceso, realizar pruebas de control y hacer la supervisión del proceso en la planta.

Condiciones de operación del proceso

La caracterización de la FCV001 y la FCV002, para determinar los puntos de operación apropiados para el sistema de control, se realizó enviando, a través de la plataforma de control y adquisición, señales a las válvulas y leyendo los valores entregados por el FIT002 y el FIT004. La curva característica de la válvula FCV001 se muestra en la Figura 4, donde el eje "y" es el flujo medido y el eje "x" es el porcentaje de apertura de la válvula. Realizando el mismo procedimiento también se obtiene la curva característica de la válvula FCV002.

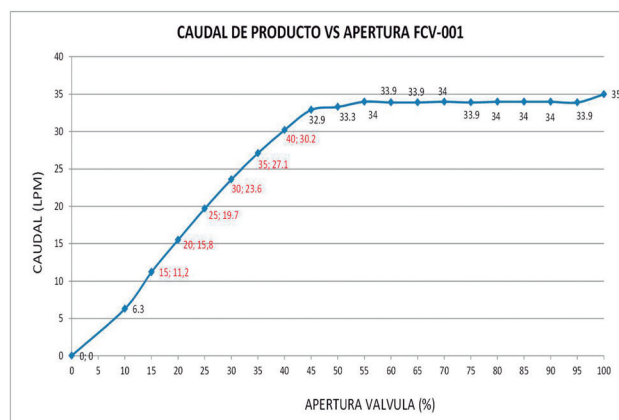


Figura 4. Curva característica de la FCV-001.
Fuente: Los autores

La Tabla 1 muestra las principales características de operación de las válvulas.

Tabla 1. Valores de caracterización de las válvulas

Caracterización válvula	FCV001	FCV002
Caudal máximo de operación	35	21
Apertura mínima de operación lineal	11,2	8
Apertura máxima de operación lineal	30,2	19
Punto de operación sugerido	11,2	12,2

Si el proceso se opera en los puntos sugeridos para las válvulas se establece una temperatura de salida de producto en 43 °C, considerando que la temperatura de entrada de producto es de 18 °C, y la temperatura del fluido caloportador esté en la banda del 90 a 95 °C.

Estrategia de control

La estrategia de control en cascada temperatura - flujo, propuesta para la planta de intercambio térmico, se representa por medio del diagrama de bloques en la Figura 5, en el que la variable controlada es la temperatura de salida del producto, $T_{SP}(t)$, que representa el lazo de control primario, y la variable manipulada del flujo del fluido caloportador el cual, a su vez es la variable controlada para el lazo secundario, $Q_c(t)$. Las variables perturbadoras son: i) la temperatura del fluido caloportador, que presenta variaciones debido a que el calentador es controlado por un controlador ON-OFF en una banda de temperatura de 90 a 95 °C, en el diagrama se identifica como $d2(t)$ y ii) el caudal de flujo de producto, $d1(t)$, que varía por las condiciones del proceso. La estrategia típica de control para este tipo de procesos es propuesto en Smith y Corripio (1991). La $Mv(t)$ representa el porcentaje de apertura de la válvula FCV002.

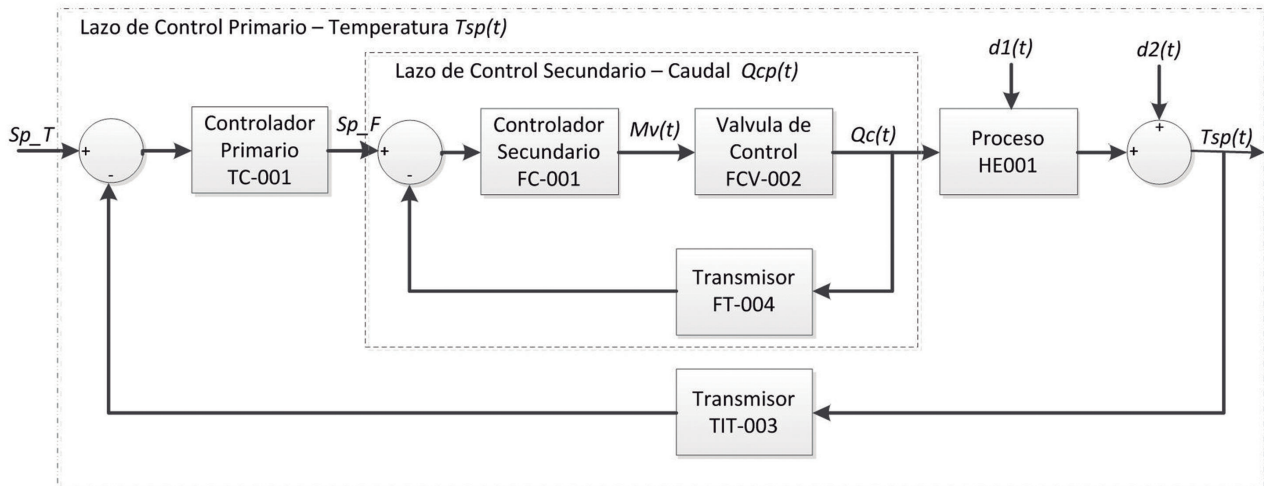


Figura 5. Diagrama de bloques del control cascada temperatura - flujo.

Fuente: Los autores.

Modelado del proceso

El modelado se inicia con la obtención de la función de transferencia del proceso de flujo que se utilizó para diseñar el lazo de control secundario. De acuerdo con las condiciones de operación definidas y haciendo uso de la

plataforma de adquisición, se generó una señal pseudo-aleatoria que se aplicó como la señal $Mv(t)$ y se midió el caudal $Qc(t)$, cuyo comportamiento se presenta en la Figura 6.

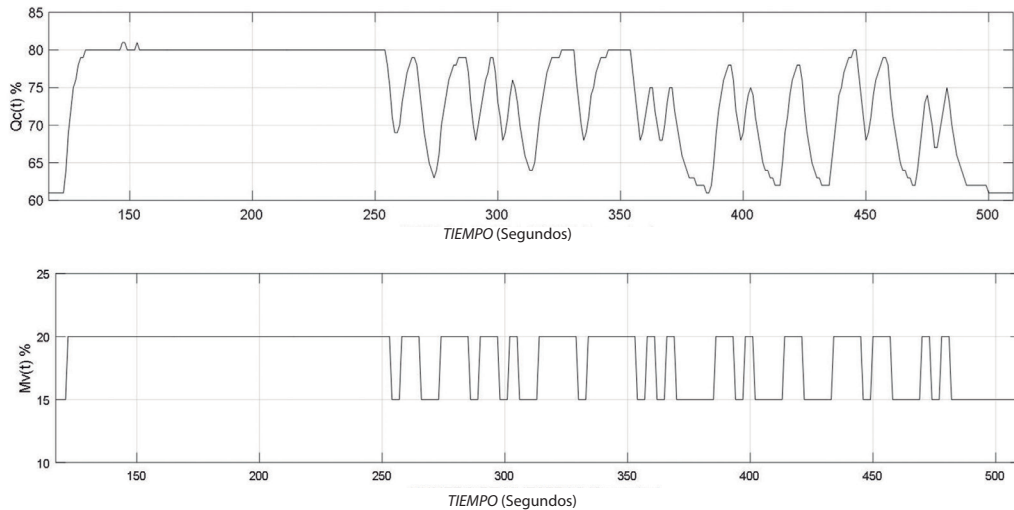


Figura 6. Señales $Mv(t)$ y $Qc(t)$ generadas.

Fuente: Los autores.

Aplicando el procedimiento de identificación definido en MathWorks, (2014b) y mediante la herramienta IDENT del MATLAB, se generó la función de transferencia de primer orden con retardo, la cual se muestra en (1).

$$G_1(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{t_o} = \frac{3,8512}{1 + 1,65s} e^{-0,592s} \quad (1)$$

Una vez generado el modelo matemático, se realizó la validación del mismo a través de un análisis de correlación entre los valores reales y los generados por la función de transferencia obtenida. El porcentaje de similitud del modelo es de 89,5%, tal como se muestra en la Figura 7.

El mismo procedimiento cumplió para determinar el modelo matemático entre $Mv(t)$ y la temperatura $Tsp(t)$. Las señales generadas que fueron utilizadas para identificar la función de transferencia son mostradas en la Figura 8.

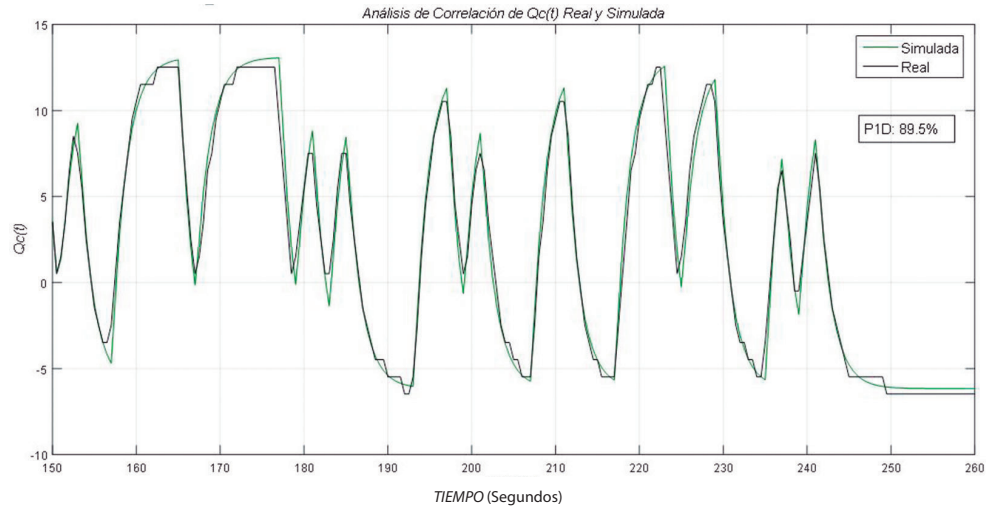


Figura 7. Análisis de correlación de la función de transferencia para el lazo secundario.

Fuente: Los autores.

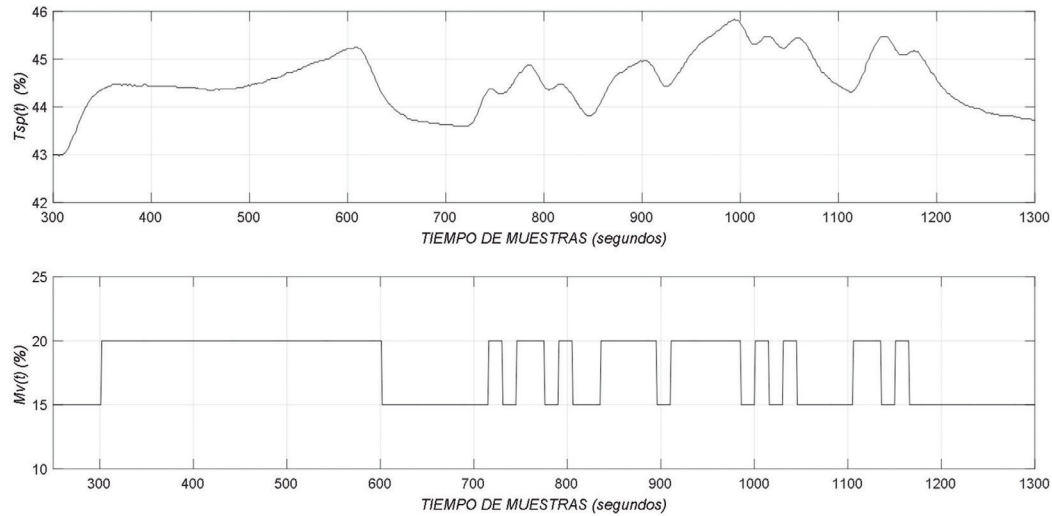


Figura 8. Señales $Mv(t)$ y $Tsp(t)$ generadas.

Fuente: Los autores.

La función de transferencia obtenida para el proceso de temperatura se muestra en (2).

$$G_2(s) = \frac{0,4298}{1 + 21,197s} e^{-15,942s} \quad (2)$$

El análisis de correlación del modelo matemático obtenido es del 78%, el cual es un porcentaje aceptable considerando que el modelo es para control. La Figura 9 muestra el análisis de correlación.

De la ecuación (2) se puede observar que el proceso presenta un retardo de 15,94s. Característica muy común en los procesos relacionados con la variable temperatura.

Controladores y parámetros de sintonía

Los controladores a diseñar son del tipo PID. La sintonía de los lazos se realiza con la obtención de los parámetros del controlador: ganancia proporcional - K_p , Tiempo integral - T_i y Tiempo derivativo - T_d . Dichos parámetros se determinaron mediante dos metodologías; la primera, por medio de la herramienta PIDTuner de Matlab y la segunda, según los cálculos propuestos en Smith y Corripio (1991), presentados en la Tabla 2, los cuales se calculan a partir de los parámetros de un modelo de primer orden con retardos definidos en (1).

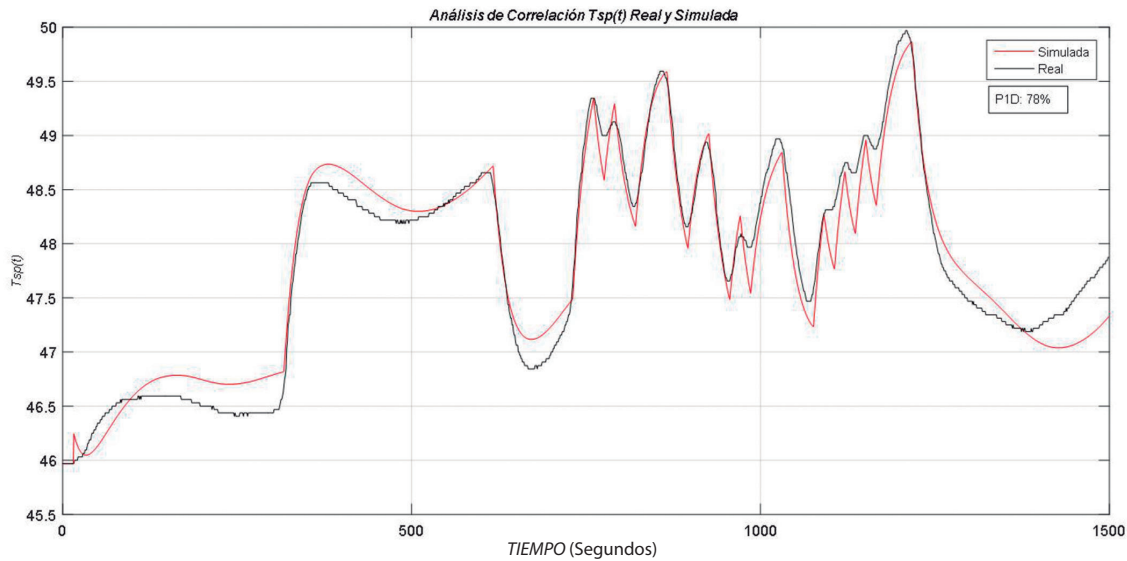


Figura 9. Análisis de correlación de la función de transferencia para el lazo primario.
Fuente: Los autores.

Tabla 2. Metodología para determinar parámetros de sintonía

Tipo de Controlador		Ganancia Proporcional K_c	Tiempo Integral T_i	Tiempo Derivativo T_d
Proporcional	P	$\frac{1}{k} \left(\frac{T}{t_o} \right)$	-	-
Proporcional-Integral	PI	$\frac{0,9}{k} \left(\frac{T}{t_o} \right)$	$3,3t_o$	-
Proporcional – Integral - Derivativo	PID	$\frac{1,2}{k} \left(\frac{T}{t_o} \right)$	$2,0t_o$	$0,5t_o$

Fuente: Control automático de proceso (Smith & Corripio, 1991)

Parámetros de sintonía del controlador del lazo de control secundario

Los resultados obtenidos con la herramienta PID Tuner (MathWorks, 2014a), para el cálculo de los parámetros de sintonía, se muestran en la Figura 10, donde se muestran la parametrización de la herramienta y los parámetros resultado. Los criterios de sintonía se fundamentan en mejorar la velocidad de respuesta del lazo cerrado respecto al lazo abierto con sobre impulso menor al 15%. Al controlador ajustado con los parámetros de sintonía de la Figura 10 se le denomina para propósitos de simulación PID1. Posteriormente se aplica la segunda metodología. Al realizar los cálculos definidos en la Tabla 2, los parámetros son: $K_p= 0,6$, $T_i= 1,9$ y $T_d= 0$. Al controlador ajustado

con estos valores se le denomina PID2. Mediante ambos métodos se establece que el controlador a implementar para el lazo secundario debe ser de tipo PI. Típico para el control de flujo.

Parámetros de sintonía del controlador del lazo de control primario

Desarrollando un proceso similar al realizado en el lazo de control secundario se obtienen los parámetros de sintonía del lazo de control primario por los dos métodos. El resultado de aplicar PID Tuner a la función de transferencia del lazo de control primario se muestra en la Figura 11. Los parámetros de sintonía generados son: $K_p= 2,32$, $T_i= 24,45$ y $T_d= 1,84$. A este controlador se le denomina PID3. Los parámetros de sintonía calculados según Tabla 2 son:

$K_p = 3,7$, $T_i = 31,88$ y $T_d = 7,971$. A este controlador se le denomina PID4. El parámetro T_d se reajustó, mediante ensayo y error, a un valor de 1,5 ya que la respuesta presentó un comportamiento no deseado generado por el

valor de T_d "grande". Se implementó un controlador PID para temperatura, debido a que es el algoritmo típico para esta variable.

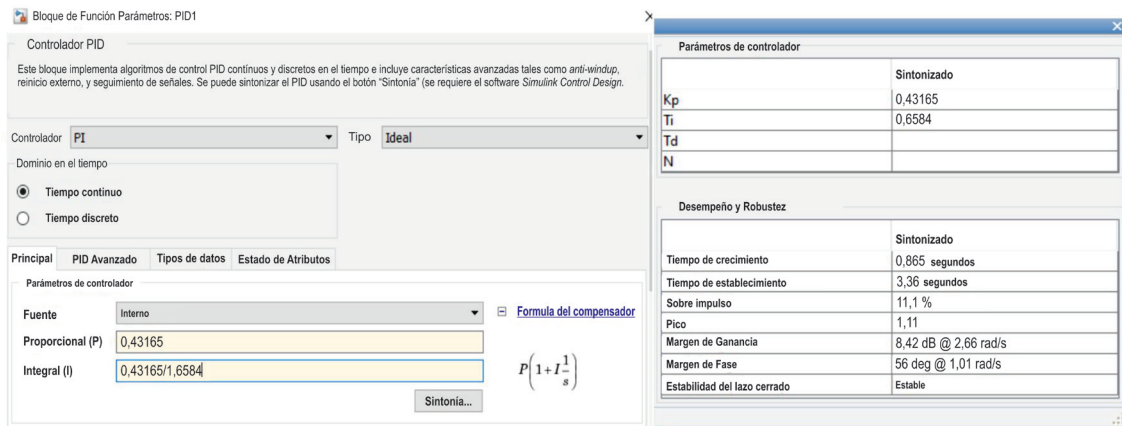


Figura 10. Parámetros de sintonía del controlador secundario, establecidos mediante el PID Tuner de Matlab.

Fuente: Los autores.

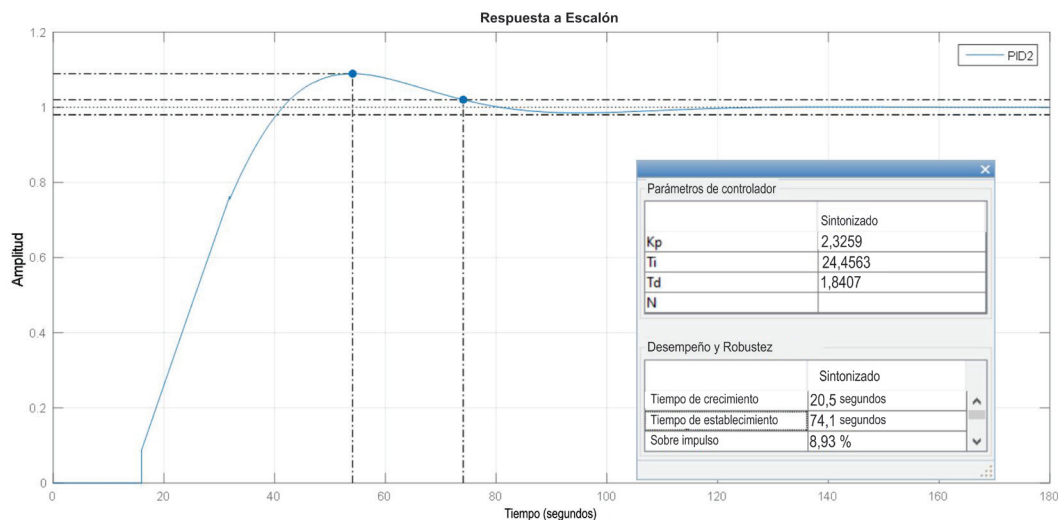


Figura 11. Parámetros de sintonía del controlador primario, establecidos mediante el PID Tuner de Matlab.

Fuente: Los autores.

Simulación de los lazos de control

Por medio del SIMULINK del Matlab se simuló el lazo de control secundario, lazo de flujo, para evaluar el comportamiento en el tiempo de acuerdo con los parámetros de sintonía obtenidos. El diagrama de bloques del lazo de control secundario implementado en la herramienta se muestra en la Figura 12, en la que se observó la simulación de los dos controladores PID1 y PID2.

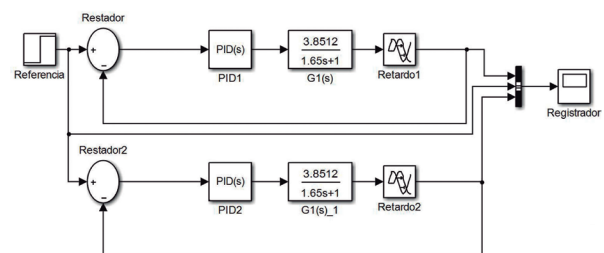


Figura 12. Simulación de Controladores PID1 y PID2.

Fuente: Los autores.

La respuesta en el tiempo de los dos controladores se muestra en la Figura 13. La comparación de los dos controladores se realizó considerando el máximo sobre

impulso, $Mp(\%)$, el tiempo de establecimiento, Ts (s), y el error de estado estacionario, Ess .

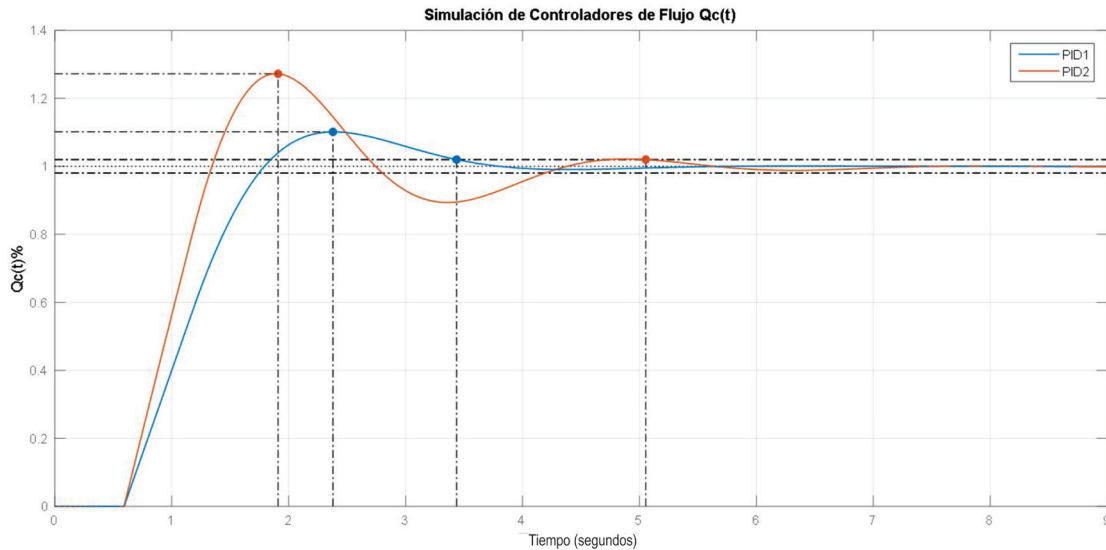


Figura 13. Respuesta de simulación de los controladores PID1 y PID2.

Fuente: Los autores.

La comparación se muestra en la Tabla 3. Considerando “la mejor respuesta” la que tiene menor sobreimpulso y menor tiempo de establecimiento, y a partir de un simple análisis, se concluye que la mejor respuesta es la que ofrece el controlador denominado PID1.

Tabla 3. Comparación de los controladores PID1 y PID2

Controlador	$Mp(\%)$	Ts (s)	Ess
PID1	27,2	5,05	0
PID2	11,1	3,36	0

Se realizó la simulación de los lazos de control primario y secundario, y se compararon las respuestas de los controladores PID3 y PID4.

La respuesta simulada del lazo de control primario con los dos controladores se representó en la Figura 14. La Tabla 4 muestra los parámetros de comparación de las dos respuestas en el tiempo.

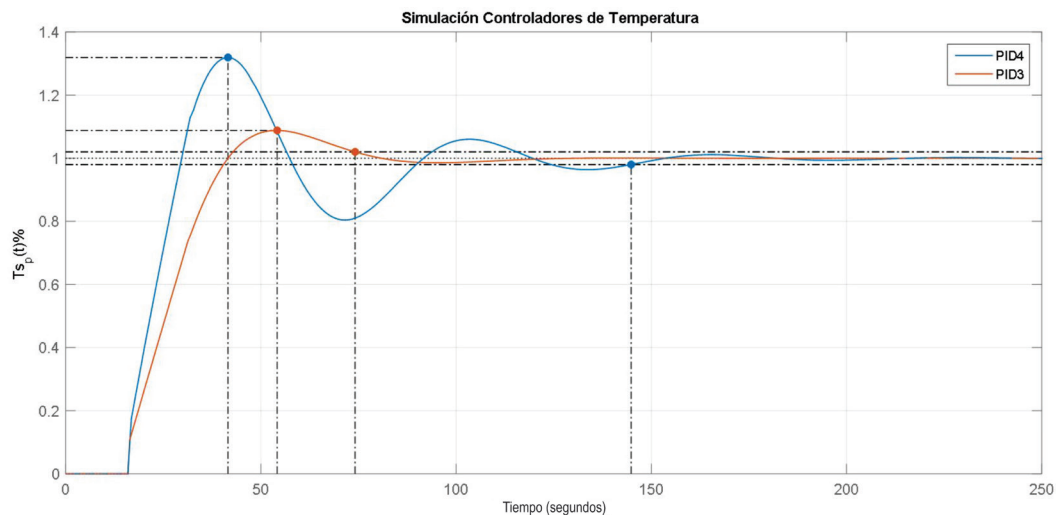


Figura 14. Respuesta de controladores para el lazo temperatura.

Fuente: Los autores.

Tabla 4. Comparación de los controladores PID3 y PID4

Controlador	Mp(%)	Ts (s)	Ess
PID3	34,7	149	0
PID4	11,3	80,9	0

De la comparación se deduce que la mejor respuesta del lazo de control primario o temperatura es la que ofrece la parametrización del controlador denominado PID3. La

simulación completa de la estrategia de control cascada con los controladores PID1 y PID3 se muestra en la Figura 15, en la que se puede visualizar la capacidad del controlador de flujo de seguir la referencia de flujo, parte alta de la figura, y la respuesta dinámica del lazo de control de temperatura, parte baja.

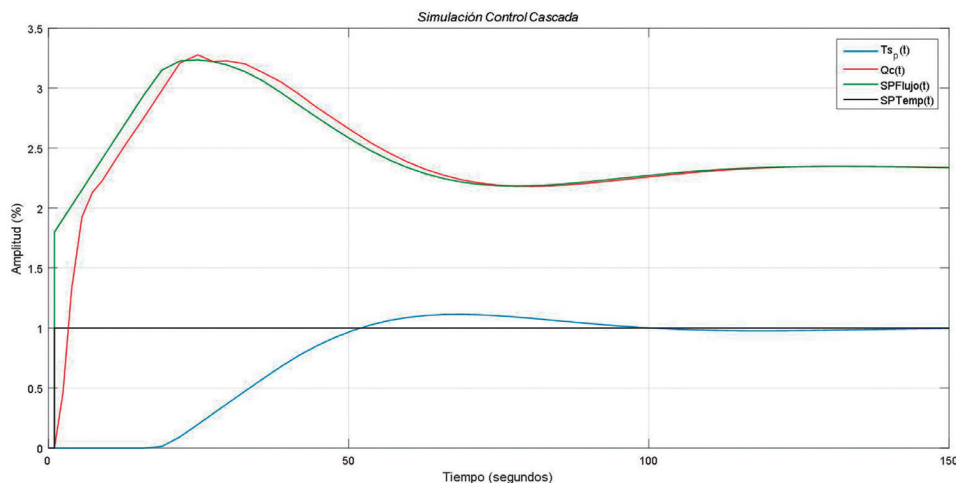


Figura 15. Respuesta del lazo de control cascada Flujo – Temperatura en Simulación.

Fuente: Los autores.

Resultados

Como resultado de la investigación se realizó la implementación de la estrategia de control de cascada temperatura - flujo en la PIT000. La implementación implicó la revisión y ajuste de instrumentos, la programación del PLC, puesta en servicio del proceso en modo automático, parametrización de los lazos de control con los valores obtenidos y desarrollo de pruebas en el proceso en modo automático.

En el desarrollo de pruebas sobre el sistema implementado, un script del Matlab se estableció la señal SP ya sea para caudal o para temperatura, según la prueba realizada. A través de la plataforma se capturaron los datos y se graficó el comportamiento de las variables de interés. Primero se verificó el lazo de caudal. La respuesta del lazo de control de caudal se muestra en la Figura 16, en la que se visualizó la capacidad del controlador de seguir el cambio de SP_F.

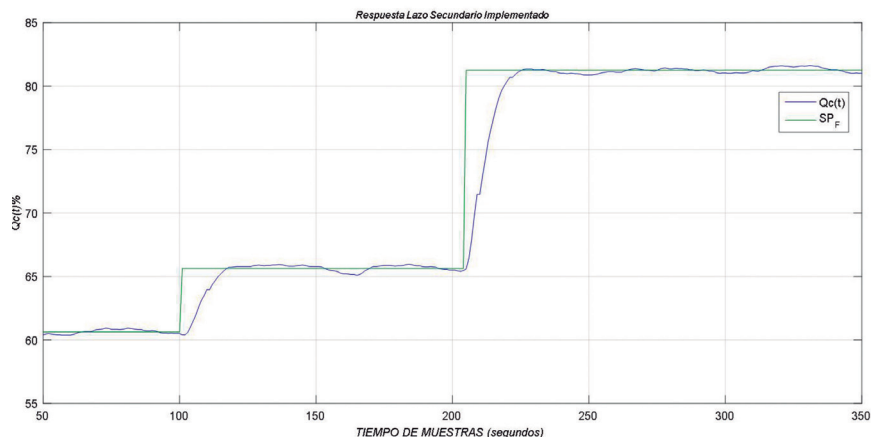


Figura 16. Prueba del lazo de control secundario de flujo de fluido energético.

Fuente: Los autores.

Se verifica luego el comportamiento del lazo de control cascada temperatura – flujo implementado en la PIT000. La respuesta se muestra en la Figura 17. Se puede observar que la señal $Tsp(t)$ muestra un pequeño sobreimpulso y una buena velocidad de respuesta, con lo que se confirma que la simulación y los parámetros de sintonía cumplen con lo esperado en la respuesta del sistema. Los resultados alcanzados en el proyecto validan la hipótesis planteada,

por cuanto muestran que el diseño y la implementación de la estrategia de control en cascada en una planta de intercambio térmico semi-industrial son exitosos. En tal sentido, la discusión planteada por los autores es que a nivel académico e investigativo se deben afrontar retos de diseño e implementación en procesos propiamente industriales, lo cual, es en nuestro caso, es lo que nos anima.

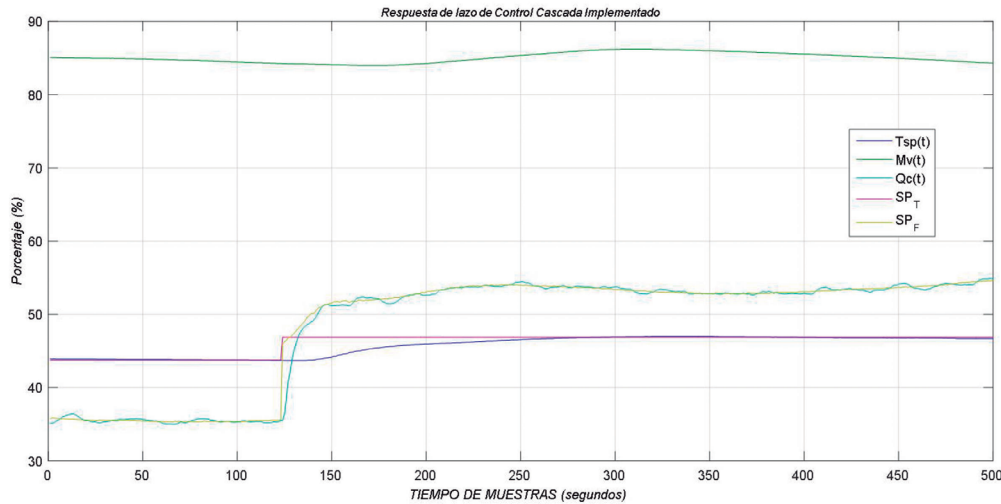


Figura 17. Señales del lazo de control cascada Temperatura - Flujo.

Fuente: Los autores.

Conclusiones

La metodología estudiada y aplicada en el desarrollo de la investigación conlleva a resultados satisfactorios, representados en el buen desempeño de la estrategia de control, por lo que se reconoce su pertinencia para la solución de problemas en las empresas, considerando que la planta PIT000 es de carácter industrial por su tamaño y su dotación tecnológica.

El *Matlab* y sus aplicativos fueron una herramienta fundamental en este trabajo. *Simulink* para la simulación y comparación de controladores, *Ident* para identificación de modelos matemáticos a través de funciones de transferencia, *PID Tuner* para obtener los parámetros de sintonía de los controladores, y el *OPC Tool* para la captura de datos del PLC. Prácticamente es una herramienta que proporciona los medios para dar solución a un problema de control real y que puede ser perfectamente aplicada en la industria.

En la simulación se puede observar que la velocidad de respuesta en lazo cerrado ha mejorado para ambos controladores en relación con la respuesta de los sistemas en lazo abierto. De igual forma en ambos lazos de control, se muestra la capacidad de seguimiento de las consignas,

error de estado estacionario casi nulo y porcentajes de sobreimpulso pequeños.

Las curvas obtenidas de la implementación presentan características generales muy similares a las logradas en simulación. Lo anterior muestra que la metodología propuesta para el diseño del lazo de control es muy práctica, se puede desarrollar en poco tiempo y se consiguen buenos resultados, respecto a los métodos teóricos basados en modelos grises del proceso y de cálculos de parámetros a través de métodos cuantitativos teóricos.

Las prestaciones de la tecnología utilizada en la implementación del sistema de control representan un factor clave en la obtención de los resultados y un referente necesario para su adaptación a escala industrial.

Los resultados obtenidos en la investigación se constituyen en un aporte metodológico y experimental de referencia, para ser adaptado por las empresas que requieren mejorar la regulación de sus procesos en general.

Bibliografía

- Abdulbasid Ismail Isa, Mukhtar F. Hamza. (Oct 2014). Effect of sampling time on pid controller design for a heat exchanger system. Adaptive Science & Technology (ICAST), IEEE 6th International Conference. Covenant University 10 Idioko Road Ota.
- American National Standar. (2009), Instrumentation Symbols and Identification. ANSI/ISA-5.1-2009.
- Chacón A. (2013) Plataforma didáctica para el estudio de procesos térmicos en el laboratorio de instrumentación industrial. (Tesis de Maestría). Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá.
- Creus A., (2010) Instrumentación Industrial. España: Alfaomega grupo editor.
- MathWorks (2016). Mathworks.com. Design, test, and implement control systems. Recuperado de <http://www.mathworks.com/solutions/control-systems/>
- MathWorks. (2014a). Mathworks.com. ControlSystemToolbox: user's guide. Matlab. Recuperado de: <https://www.mathworks.com/help/control/>
- MathWorks. (2014b). Mathworks.com. System Identification Toolbox: user's guide. Matlab. Recuperado de: <https://www.mathworks.com/help/ident/>
- Moradi, MH & Johnson MA. (2005). PID Control. New Identification and Design Methods. United States of America: Springer.
- Moreno, J., (2009) Gestión del diseño e implementación de los sistemas didácticos, tecnológicos y técnicos de una planta de intercambio térmico. Unidad de Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico. Biblioteca SENA.
- O'Dwyer, A. (2009). Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. Imperial College Press. Tercera Edición. doi: <https://doi.org/10.1142/p575>
- Smith CA & Corripio AB. (1991). Control Automático de Procesos: Teoría y práctica. Limusa Noriega editores.
- Srinivas, P. Prasada P. D. Vijaya K, L. (2012) Modelling and Simulation of complex Control System Using Lavbiew. International Journal of Control Theory and Computer Modelling, 2(4). 1-19. doi: <https://doi.org/10.5121/ijctcm.2012.2401>