

Control para un sistema de aire acondicionado, empleando un desarrollo electrónico embebido con aplicación de técnicas de control difuso PD+I y control PID clásico

Control for an air-conditioning system, using an embedded electronic development applying PD + I fuzzy control techniques and classical PID control

Juan Carlos Zaragoza Hernández*,
Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México
zaragoza.jcarlos@gmail.com

Armando García Mendoza,
Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México
a_garmen60@yahoo.com.mx

Jaime Jalomo Cuevas,
Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México
jjalomo3@yahoo.com.mx

Recibido 15, diciembre, 2017

Aceptado 20, marzo, 2018

Resumen

El artículo presenta la implementación de algoritmos para el control de aire acondicionado. Los sistemas de aire acondicionado generalmente son operados mediante un controlador simple, proporcional, integral y derivado (PID) o mediante el uso de un controlador de encendido-apagado (ON-OFF), ya que estos son simples y fáciles de implementar. Sin embargo, el rendimiento de estos sistemas no suele ser preciso, tiene un alto consumo de energía y la vida del compresor suele ser corta. Con el objetivo de aumentar la eficiencia del sistema, mejorar el rendimiento y reducir el consumo de energía a través de un control suave del motor del compresor, se decidió aplicar y comparar dos algoritmos, los que fueron diseñados por medio de instrumentación virtual. Uno de ellos basado en la lógica difusa, utilizando el método PD+I y el otro empleando el método tradicional de control PID. Los resultados obtenidos en simulación y pruebas físicas demuestran la estabilidad y rapidez de respuesta de los controladores con errores no superiores al 2.5% y con un tiempo de estabilización del control difuso PD+I, 25% menor en comparación al control PID.

Palabras clave: Control difuso PD+I, Control PID, Instrumentación virtual, Sistema de aire acondicionado.

Mathematics Subject Classification (2010): 94D05

Abstract

The paper presents the implementation of algorithms for air conditioning control. Air conditioning systems are usually operated using a simple, proportional, integral and derivative controller (PID) or by using an ON-OFF controller, as these are simple and easy to implement. However, the performance of these systems is often not precise, has a high-energy consumption and compressor life is often short. In order to increase system efficiency, improve performance and reduce power consumption through a gentle control of the compressor motor, it was decided to apply and compare two algorithms, which were designed using virtual instrumentation. One is based on fuzzy logic, using the PD + I method and the other using the traditional PID control method. The results

obtained in simulation and physical tests demonstrate the stability and speed of response of the controllers with errors not greater than 2.5% and with a stabilization time of the diffusion control PD + I, 25% lower in comparison to the PID control.

Keywords: Fuzzy controller PD + I, PID controller, Virtual instrumentation, Air conditioning system.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de aire acondicionado convencionales tienen dos estados: on y off. En estado on, consumen una potencia eléctrica constante cuando están en funcionamiento (Booten, Christensen, & Winkler, 2014) y una vez alcanzada la temperatura deseada, la unidad exterior se apaga, siendo este el estado off.

Uno de los métodos ampliamente utilizados para la optimización de los parámetros PID es el método de Ziegler-Nichols (Meshram, Rohit, & Kanojiya, 2012). Los métodos de lógica difusa también se utilizan para mejorar el controlador PID (Zheng & Tao, 2011; Ahsan ur Rehman Omer & Muhammad, 2017) mediante el uso de funciones de membresía para disminuir el rebasamiento y aumentar el tiempo de respuesta. Además, el control de lógica difusa se utiliza en el aire acondicionado para mantener la temperatura y la humedad cerca de los valores objetivo y reducir la carga compresor-ventilador de energía eléctrica del aire acondicionado (Dash, Mohanty, & Mohanty, 2012).

El objetivo de esta investigación es implementar los dos algoritmos de control haciendo uso de la plataforma de desarrollo de Instrumentación Virtual de National Instrument y realizar una comparativa de respuesta de un sistema de aire acondicionado, realizando simulaciones propuestas en MATLAB-Simulink y pruebas físicas realizadas por medio de la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-6008.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Los materiales empleados fueron, el sistema de aire acondicionado marca YORK tipo ventana modelo YCUSC08-2S, la tarjeta NI USB-6008, el sensor de precisión de temperatura LM35, el relé contactor 3100-20Q6999 y un circuito de potencia para el acoplamiento de señal de salida de la tarjeta al compresor del aire acondicionado. El tipo de programación empleada fue instrumentación virtual por medio de LabVIEW. Una entrada y una salida analógica de la tarjeta fueron habilitadas con el propósito de comunicar el sensor de temperatura y el equipo de aire acondicionado. Los circuitos de potencia son aquellos elementos que sostienen mayores cargas eléctricas, puesto que son los encargados de ejecutar las órdenes dictaminadas por el circuito de mando. Este tipo de circuito se caracteriza sobre todo por trabajar a tensiones superiores 230 V, 400 V y más, en corriente alterna principalmente. Además, es el encargado de excitar el relé para activar la continuidad de corriente eléctrica en el arranque y paro del compresor del equipo de aire acondicionado. Con un optoacoplador estamos protegiendo la salida de la tarjeta USB-6008 aislándola de las altas tensiones de corriente eléctrica por parte del compresor.

Para la obtención de la función de transferencia del sistema de aire acondicionado se realizó la medición de temperatura producida por el equipo al cambio de referencia de temperatura mostrado en la Figura 1 y empleando el comando *ident* de MATLAB se estimó el modelo de la función de transferencia descrito en la ecuación (1)

$$G(s) = \frac{0.8529}{s + 0.7942} * Y(s) \quad (1)$$

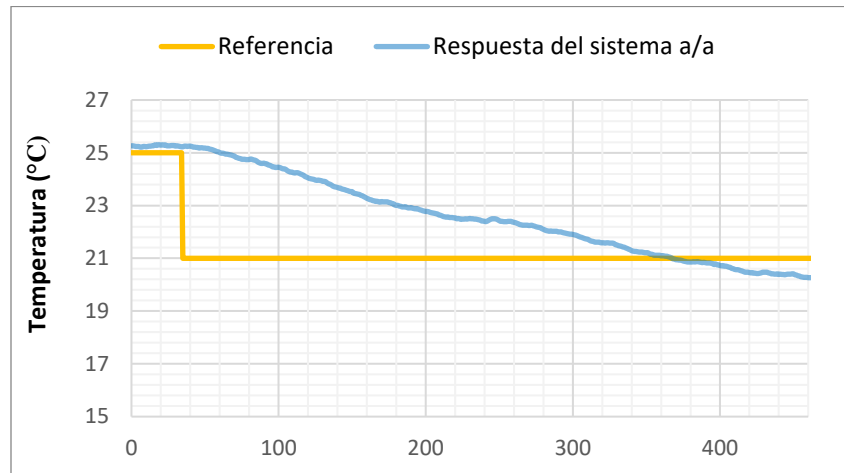


Figura 1. Gráfica del comportamiento del sistema a un cambio escalón.

La metodología empleada en esta investigación ha sido la teoría de control, utilizando un controlador PID que puede ser considerado como una forma extrema de un compensador de retardo de fase con un polo en el origen y el otro en el infinito. Un controlador PID estándar también se conoce como el controlador de <<tres términos>>, cuya función de transferencia se escribe generalmente en la forma paralela dada por (2) o la forma ideal dada por (3) (Heong Ang, Chong, & Li, 2005).

$$G(s) = Kp + Ki \frac{1}{s} + Kd_s \quad (2)$$

$$G(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Ti_s} + Td_s \right) \quad (3)$$

Donde Kp es la ganancia proporcional, Ki la ganancia integral, Kd la ganancia derivada, Ti la constante de tiempo integral y Td la constante de tiempo derivativa (Kuo, 1991). En la Figura 2, se muestra el lazo de control para el sistema de aire acondicionado aplicando un control PID, simulaciones propuestas en Matlab-Simulink.

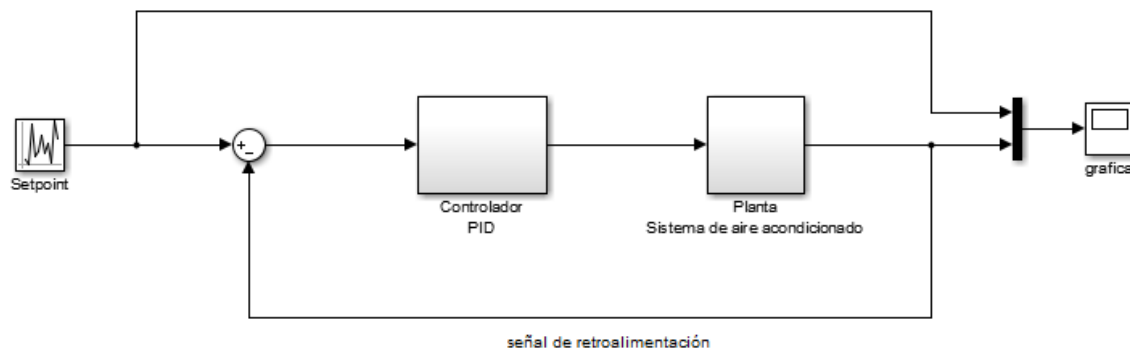


Figura 2. Diagrama a bloques del lazo de control PID.

En la lógica difusa, la salida del sistema se evalúa en función de las entradas del sistema. Las entradas son fusificadas utilizando la función triangular de membresía. Basándose en estos valores, la salida fusificada se produce utilizando reglas difusas. La salida fusificada se convierte a la salida del sistema por medio del método de defusificación (Kozlova & Kozlova, 2014). El proceso de control del aire acondicionado se muestra en la Figura 3. En esta figura, el punto de ajuste es la temperatura seleccionada o requerida por el usuario. La salida del controlador es utilizada por el convertidor de energía que proporciona la potencia que debe suministrarse al compresor del equipo de aire

acondicionado para alcanzar la temperatura solicitada. El diseño propuesto para simulación fue desarrollado en MATLAB, por medio del toolbox *fuzzy logic designer*. El sistema MISO (de múltiple entrada y salida única), GP-error y GD-error las señales de entrada y voltaje la señal de salida del controlador acoplada al compresor del aire acondicionado.

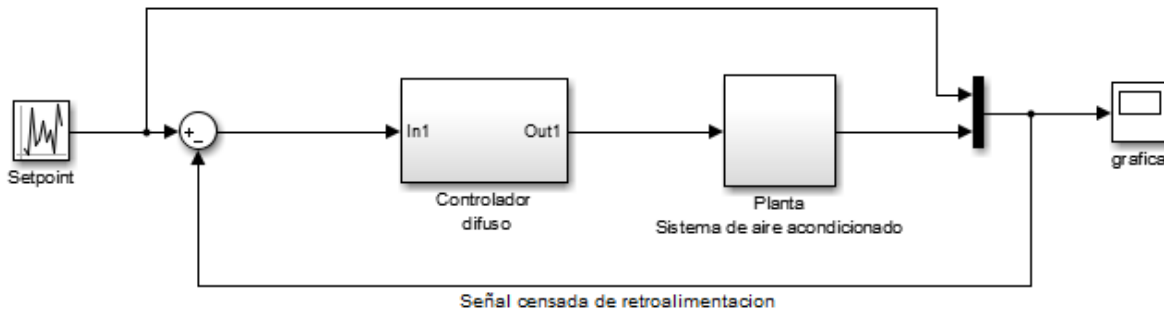


Figura 3. Diagrama a bloques del lazo de control difuso.

En la Figura 4, se muestra las funciones de membresía, el rango de GP-error y GD-error es de 1-5 y es dividido en tres rangos para la evaluación del grado de valor de membresía de tres funciones triangulares. Además, la señal de salida con un rango de 1-5 dividido en tres funciones triangulares de membresía, para facilitar el acoplamiento de señal de salida al compresor del aire acondicionado.

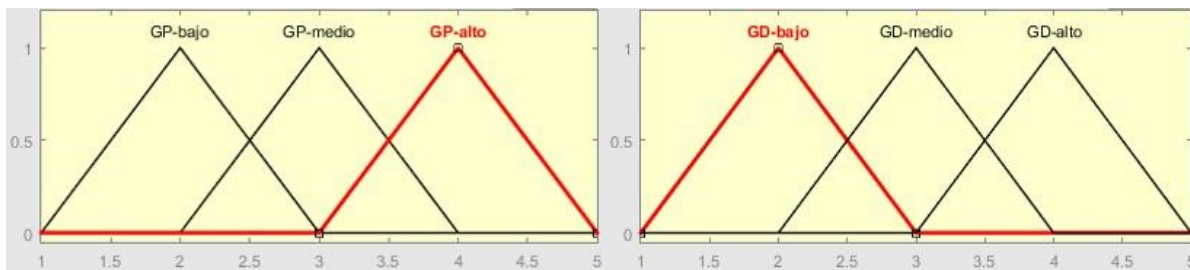


Figura 4. Funciones de membresía.

El control difuso utiliza reglas en forma de frases para controlar un proceso (Jantzen, 2013). El número de reglas difusas depende de posibles combinaciones de funciones de membresía de entrada. Como hay tres funciones de membresía para GP-error y tres para GD-error, nueve reglas difusas son suficientes. Estas combinaciones de funciones de membresía de entrada determinan la regla apropiada de disparo. Estas reglas son:

1. If (GP-error is GP-bajo) and (GD-error is GD-bajo) then (voltaje is V-Media)
2. If (GP-error is GP-bajo) and (GD-error is GD-medio) then (voltaje is V-Alta)
3. If (GP-error is GP-bajo) and (GD-error is GD-alto) then (voltaje is V-Alta)
4. If (GP-error is GP-medio) and (GD-error is GD-bajo) then (voltaje is V-Baja)
5. If (GP-error is GP-medio) and (GD-error is GD-medio) then (voltaje is V-Media)
6. If (GP-error is GP-medio) and (GD-error is GD-alto) then (voltaje is V-Alta)
7. If (GP-error is GP-alto) and (GD-error is GD-bajo) then (voltaje is V-Baja)
8. If (GP-error is GP-alto) and (GD-error is GD-medio) then (voltaje is V-Baja)
9. If (GP-error is GP-alto) and (GD-error is GD-alto) then (voltaje is V-Media)

En la Tabla 1, se muestra la relación de las reglas difusas.

Tabla 1. Base de reglas difusas.

GP-error\GD-error	bajo	medio	alto
bajo	V-Media	V-Alta	V-Alta
medio	V-Baja	V-Media	V-Alta
alto	V-Baja	V-Baja	V-Media

Los resultados de las simulaciones del lazo de control del sistema de aire acondicionado aplicando los algoritmos de control vistos se discuten más adelante.

El método utilizado en el control difuso descrito en este documento es el tipo Mamdani, que incluye fusificación de datos de entrada basados en funciones de membresía, una base de datos de reglas de inferencia y defusificación de la señal de salida (Kovacic & Bogdan, 2005). La inferencia de tipo Mamdani espera que las funciones de pertenencia de salida sean variables difusas, en consecuencia, después de la agregación de las salidas de señal hay un conjunto difuso para cada variable de salida a defusificar. En la Figura 5, se muestra la estructura de in control PD+I difuso (Jantzen, 2013).

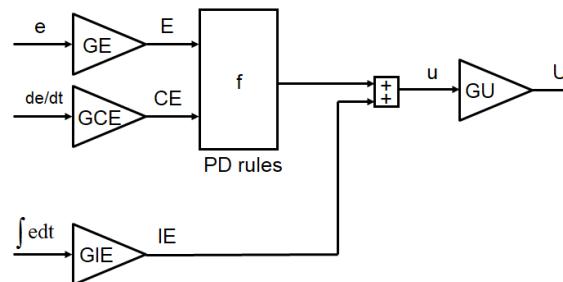


Figura 5. Control difuso PD+I

Donde U está dada por la ecuación (4).

$$U(n) = \left[f(GE \times e(n), GCE \times \dot{e}(n)) + GIE \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right] \times GU \quad (4)$$

Los valores de las ganancias se obtienen de las siguientes ecuaciones (5), (6) y (7).

$$GE * GU = K_p \quad (5)$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d \quad (6)$$

$$\frac{GIE}{GE} = \frac{1}{T_i} \quad (7)$$

El controlador difuso PD+I proporciona todos los beneficios del control PID, pero también las desventajas con respecto a la reacción de la señal de error derivada. El error integral elimina cualquier error de estado estacionario, pero también puede provocar inestabilidad del integrador. El toolbox de LabVIEW *fuzzy logic control* es una excelente plataforma para soportar el diseño, implementación y prueba de los dos tipos de métodos de control vistos. En la Figura 6, se muestra el diagrama a bloques del control difuso PD+I programado en LabVIEW utilizando las referencias de diseño mismas en las que se realizaron en MATLAB. Además, en el diseño se incluye el almacenamiento del registro de temperatura del aire acondicionado en tablas de Excel, entrada y salida analógicas configuradas en la tarjeta con valores de trabajo de 1-5 V. Mismo para el caso del diseño del controlador PID en LabVIEW. En la Figura 7, se muestra el diagrama a bloques programado y ejecutado en la tarjeta USB-6008.

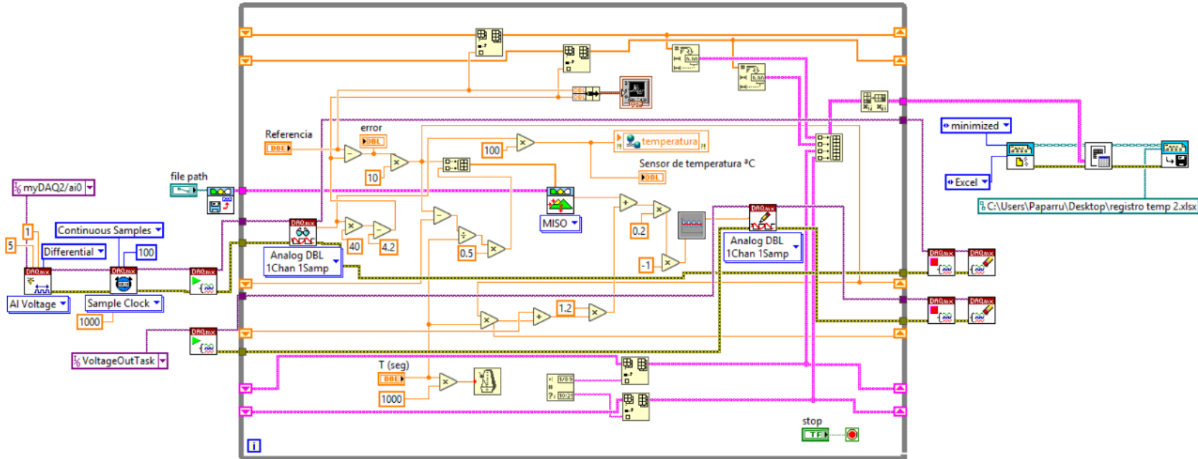


Figura 6. Diagrama a bloques del control difuso PD+I en LabVIEW.

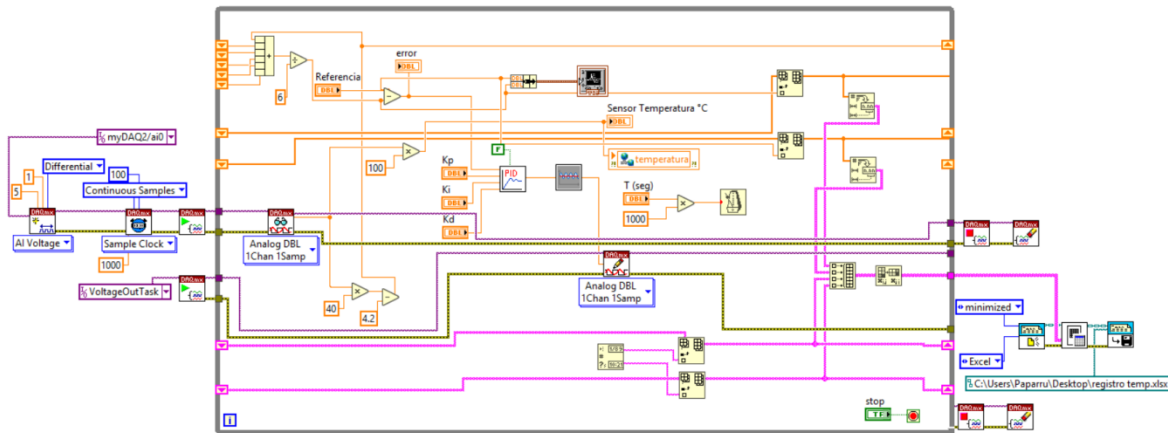


Figura 7. Diagrama a bloques del control PID en LabVIEW.

Los resultados de las pruebas físicas del lazo de control del sistema de aire acondicionado aplicando los algoritmos de control vistos se discuten más adelante.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las simulaciones, se realizaron aplicando una entrada aleatoria de valores simulando los rangos de funcionamiento de la temperatura de 16°C a 23°C del equipo de aire acondicionado. En la simulación con el control difuso PD+I en MATLAB-Simulink mostrada en la Figura 8, aplicando las ganancias obtenidas de las fórmulas (5), (6), (7), se obtuvieron los parámetros $Kp = 2$, $Td = 0.05$ y $1/Ti = 0.12$, una constante de tiempo del sistema de $T = 4.23$ equivalente al 63.2% del valor final, un tiempo de estabilización $t_s = 9.753$ el tiempo necesario en alcanzar el 2% del valor final y un tiempo $t_r = 2.02$ en alcanzar la respuesta de 0 a 100% del valor final.

En la Figura 9, se muestra el resultado obtenido de la simulación ejecutando el control PID clásico aplicado a la planta representado por el modelo matemático de la ecuación (3) del equipo de aire acondicionado, las ganancias empleadas en la simulación son: $Kp = 2$, $Ki = 1.97$, $Kd = 0.05$. El resultado obtenido es un tiempo de estabilización $t_s = 1.641$ necesario para alcanzar el 2% del valor final. Además, de un tiempo $t_r = 2.07$ en alcanzar la respuesta de 0 a 100% del valor final.

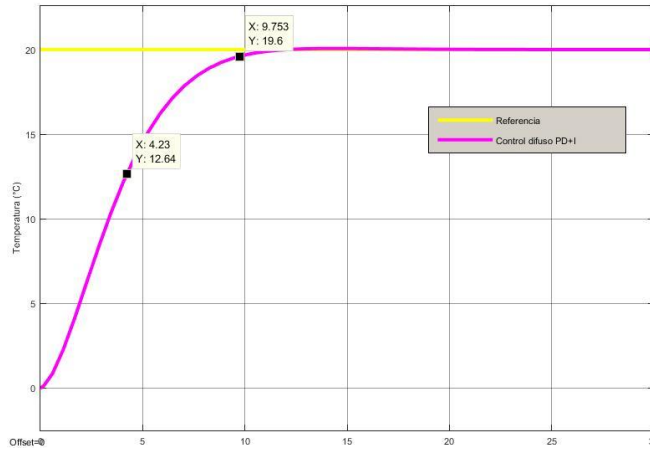


Figura 8. Gráfica de la respuesta del sistema aplicando control difuso PD+I

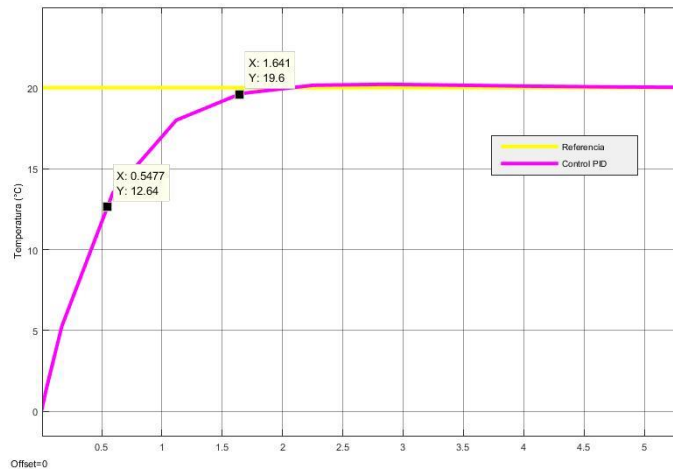


Figura 9. Gráfica de la respuesta del sistema aplicando control PID

Al comparar las respuestas de los dos controladores en simulación en la Figura 10, se muestra gráficamente la comparativa de los dos métodos de control aplicados al mismo modelo del sistema de aire acondicionado.

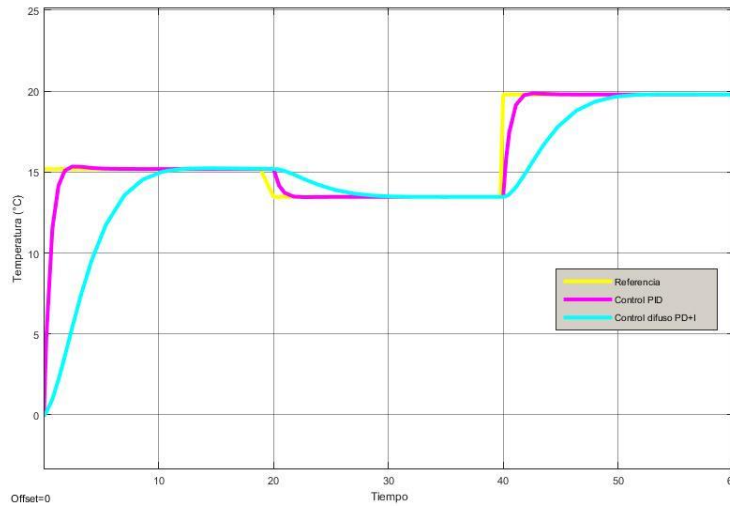


Figura 10. Gráfica comparativa de respuesta del control difuso PD+I y control PID.

En las pruebas físicas realizadas con el equipo de aire acondicionado por medio de la tarjeta USB-6008 y visualizadas en el panel frontal de LabVIEW. La Figura 11 muestra gráficamente el resultado obtenido aplicando el control PID al equipo de aire acondicionado, el registro de temperatura se genera en tablas de Excel almacenando la referencia, tiempo y medición de temperatura de la respuesta al control. El error en estado estacionario es generado al cambio del valor de referencia es de 2.34265% y el tiempo de estado estable $t_s = 20.4$ min.

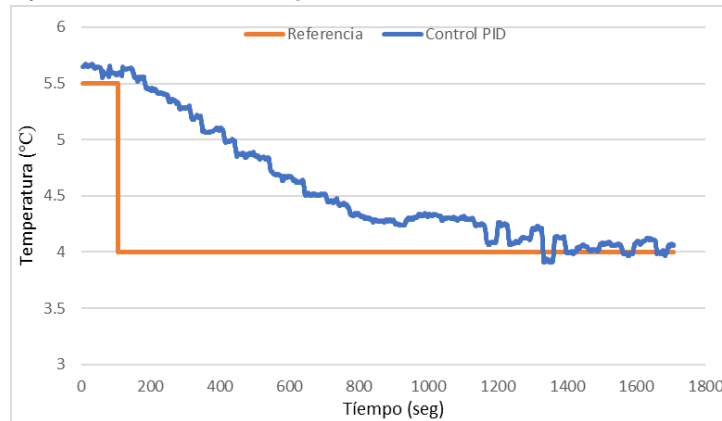


Figura 11. Gráfica comportamiento de respuesta del control PID.

En la Figura 12, se muestra la gráfica de respuesta del comportamiento del control difuso PD+I aplicado al equipo de aire acondicionado, las ganancias del controlador aplicadas son los mismos valores que en simulación. El error generado al cambio del valor de referencia es de 2.2059% y el tiempo de estado estable $t_s = 15.8$ min. Los valores de referencia están adaptados en un rango de trabajo a la temperatura de 13°C a 23°C, linealizados por el sensor de temperatura acoplado la señal de entrada al control de 1 a 5 como valores de referencia para el usuario.

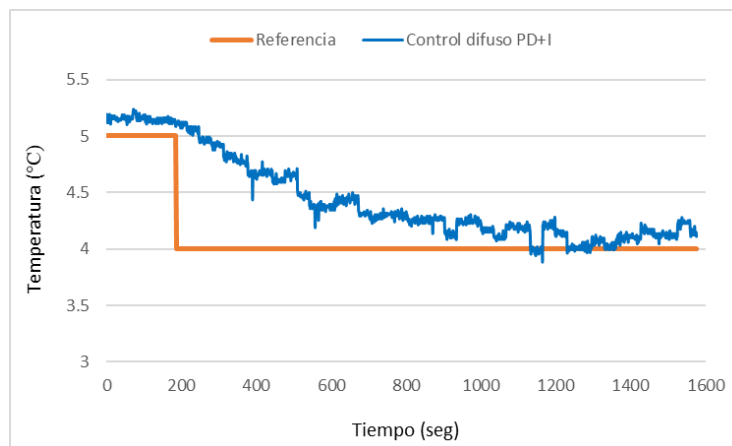


Figura 12. Gráfica comportamiento de respuesta del control difuso PD+I.

4. DISCUSIÓN

El principal hallazgo de este estudio fue que el control difuso PD+I es mejor en comparación con el control PID clásico al implementarlo en el sistema de aire acondicionado ya que se encontró que el tiempo de estabilización es más corto y el error generado al cambio del valor de referencia es menor.

En la literatura revisada se encontró el uso del control PID en sistemas de aire acondicionado de igual manera que el control difuso (Dash, Mohanty, & Mohanty, 2012; Al-Ghasem & Ussaleh, 2012; Ahsan

ur Rehman Omer & Muhammad, 2017; Heong Ang, Chong, & Li, 2005; Jantzen, 2013) utilizando métodos diferentes de control difuso y de sintonización en el control PID.

Al comparar el trabajo realizado con respecto a la literatura, se encontró el método difuso PD+I no había sido implementado con anterioridad en sistemas de aire acondicionado convencionales.

El resultado obtenido a través de este estudio permite identificar futuras áreas de desarrollo, tales como la introducción de nuevas variables al control, como por ejemplo humedad.

Una desventaja encontrada en este estudio es la dificultad en el manejo de los ciclos de trabajo del compresor, ya que éste es de corriente alterna.

5. CONCLUSIÓN

De la presente investigación se obtienen diversos resultados con base en las diferentes pruebas realizadas que se hicieron en simulación por medio de MATLAB-Simulink y las pruebas físicas realizadas por medio de la tarjeta NI USB-6008 en ejecución y comparación con de cada algoritmo diseñado de control en LabVIEW. En las simulaciones al poner a prueba el diseño del control PID clásico y haber sintonizado el controlador por los métodos de Ziegler-Nichols para la obtención de los parámetros K_p , K_i y K_d , claramente observamos en las gráficas de las Figuras 8 y 9 que la respuesta en el tiempo del controlador difuso PD+I y PID son diferentes, reflejados principalmente en los tiempos t_s y t_r . No se registró sobreimpulso en el controlador difuso a pesar de que el tiempo de crecimiento fue de 9.95 segundos más lento que el PID. En las pruebas físicas con el equipo de aire acondicionado realizadas aplicando el control PID se observó un comportamiento de respuesta suave y estable.

Uno de los principales inconvenientes al usar un aire acondicionado es su gran consumo de energía eléctrica, siendo la conservación de ésta misma de vital importancia para la industria y el hogar. Los resultados obtenidos a través de la simulación y experimentación en este estudio demuestran que, al emplear el control difuso PD+I en sistemas de aire acondicionado convencionales, se observó un desempeño del compresor más eficiente en comparación con el control PID clásico implementado en las mismas condiciones, lo que se traduce en ahorro de energía eléctrica.

6. REFERENCIAS

- Ahsan ur Rehman Omer, S., & Muhammad, E. (2017). Design of Intelligent Air Conditioner Controller. *Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*. Karachi, Pakistan.
- Al-Ghasem, A., & Ussaleh, N. (2012). Air Conditioner Control Using Neural Network and PID Controller. *Mechatronics and its Applications (ISMA)*. Sharjah, United Arab Emirates.
- Al-Ghasem, A., & Ussaleh, N. (2012). Air Conditioner Control Using Neural Network and PID Controller. *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2012 8th International Symposium on*. Sharjah, United Arab Emirates: IEEE.
- Booten, C., Christensen, C., & Winkler, J. (2014). Energy Impacts of Oversized Residential Air Conditioners—Simulation Study of Retrofit Sequence Impacts. *National Renewable Energy Laboratory*, 2-10.
- Cao, S., Liu, F., & Weng, W. (2010). An Innovation PID Control Method of Split Air-conditioner Based on Online Prediction. *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference*. Wuhan, China.

- Chengyi Guo, Q. S. (2007). A Neural Network Assisted Cascade Control System for Air Handling Unit. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, LIV(1), 620 - 628.
- Dash, S. K., Mohanty, G., & Mohanty, A. (2012). Intelligent Air Conditioning System using Fuzzy Logic. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, III(12).
- Heong Ang, K., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 559 - 576.
- Jantzen, J. (2013). *Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach*. John Wiley & Sons Inc.
- Kovacic, Z., & Bogdan, S. (2005). Fuzzy Controller Design: Theory and Applications. *Control Engineering Series*, 9–40.
- Kozlova, L. P., & Kozlova, O. A. (2014). Using of fuzzy set theory when designing technical systems. *training manual*, SP.
- Kuo, B. C. (1991). *Automatic Control Systems*. Prentice Hall.
- Meshram, P. M., Rohit, G., & Kanojiya. (2012). Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor. *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*(12818603).
- Shein, W. W., Tan, Y., & Lim, A. O. (2012). PID Controller for Temperature Control with Multiple Actuators in Cyber-Physical Home System. *Network-Based Information Systems (NBIS), 2012 15th International Conference*. Melbourne, VIC, Australia.
- Vadirajacharya G. Kinhal, P. A. (2011). Performance Investigation of Neural-Network-Based Unified Power-Quality Conditioner. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(1), 431 - 437.
- Zheng, & Tao. (2011). Second-order system's velocity feedback gain control based on PID variable damping ratio controller. *Communication Software and Networks, 3rd International Conference*. Xi'an, China.

Este artículo puede citarse de la siguiente forma:

Citación estilo APA sexta edición

Zaragoza Hernández, J.C., García Mendoza, A. & Jalomo Cuevas, J. (enero-abril de 2018). Control para un sistema de aire acondicionado, empleando un desarrollo electrónico embebido con aplicación de técnicas de control difuso PD+I y control PID clásico. *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, 4(1), 23-33.

Citación estilo Chicago decimoquinta edición

Zaragoza-Hernández, Juan Carlos, García-Mendoza, Armando & Jalomo-Cuevas, Jaime. Control para un sistema de aire acondicionado, empleando un desarrollo electrónico embebido con aplicación de técnicas de control difuso PD+I y control PID clásico. *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, 4 No. 1 (enero-abril de 2018): 23-33.

Citación estilo Harvard Anglia

Zaragoza Hernández, J.C., García Mendoza, A. & Jalomo Cuevas, J., 2018. Control para un sistema de aire acondicionado, empleando un desarrollo electrónico embebido con aplicación de técnicas de control difuso PD+I y control PID clásico. *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, enero-abril, 4(1), pp. 23-33.

Citación estilo IEEE

[1] J.C. Zaragoza-Hernández, A. García-Mendoza y J. Jalomo-Cuevas. Control para un sistema de aire acondicionado, empleando un desarrollo electrónico embebido con aplicación de técnicas de control difuso PD+I y control PID clásico. *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, vol. 4 No. 1, pp. 23-33, enero-abril de 2018.