

CONTROL DIFUSO PD+I TAKAGI-SUGENO-KANG PARA UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO

Juan Carlos Zaragoza Hernández

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
zaragoza.jcarlos@gmail.com

Jaime Jalomo Cuevas

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
a_garmen60@yahoo.com.mx

Armando García Mendoza

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán
jjalomo3@yahoo.com.mx

Resumen

Los sistemas de aire acondicionado generalmente son operados mediante un controlador simple ON/OFF, ya que estos son simples y fáciles de implementar o con el control tradicional PID. Sin embargo, el rendimiento de estos sistemas no suele ser preciso, tienen un alto consumo de energía y un gran desgaste en el funcionamiento del compresor. Este artículo presenta la implementación del método difuso Takagi-Sugeno-Kang (TSK) para el control de temperatura en el aire acondicionado, con el objetivo de aumentar la eficiencia del sistema, mejorar el rendimiento y reducir el consumo de energía. Los resultados obtenidos en simulación y pruebas físicas demuestran que el uso del control difuso PD+I con el método TSK es eficiente para ahorrar energía, es estable al cambio en la carga térmica y con una rapidez de respuesta en la regulación de temperatura con errores no superiores al 2%.

Palabra(s) Clave: Aire acondicionado, Control difuso PD+I, Método difuso.

Abstract

The air conditioning systems are generally operated by a simple ON/OFF controller since this is easy to implement or with the traditional PID control. However, the performance of these systems is not usually precise, they have a high energy consumption and a great mechanical wear on the compressor operation. This article presents the implementation of the Takagi-Sugeno-Kang fuzzy method (TSK) for temperature control in air conditioning, with the aim of increasing system efficiency, improving performance and reducing energy consumption. The results obtained in simulation and physical tests show that the use of PD + I fuzzy control with the TSK method is effective to save energy, stable to the change in thermal load and has a rapid response in temperature regulation with errors not exceeding 2%.

Keywords: Air conditioning, Fuzzy control PD+I, Fuzzy method.

1. Introducción

Debido al uso creciente de sistemas de aire acondicionado y al aumento en el consumo de energía, el uso de mejores técnicas de control para la regulación constante de la temperatura y el ahorro de energía se ha convertido en un tema importante en el estudio de los sistemas de aire acondicionado [Chiou, Chiou, Chu, & Lin, 2009]. Los sistemas de aire acondicionado convencionales utilizan el método ON/OFF, consumiendo una potencia eléctrica constante cuando están en funcionamiento [Booten, Christensen, & Winkler, 2014] generando grandes picos de consumo de energía. Con respecto al ahorro de energía y la regulación de la temperatura, de acuerdo con la literatura revisada, se han realizado algunas propuestas utilizando la lógica difusa; para mejorar un controlador PID [Ahsan ur Rehman Omer & Muhammad, 2017] mediante el uso de funciones de membresía para disminuir el sobreimpulso y aumentar el tiempo de respuesta. En la regulación de velocidad del compresor [Aprea, Mastrullo, & Renno, 2004] capaz de seleccionar la velocidad de compresor más adecuada en función de la temperatura. Además, el control de lógica difusa se utiliza en los sistemas para mantener la temperatura, la humedad cerca de los valores objetivo y reducir la

carga del compresor y ventilador de energía eléctrica del aire acondicionado [Dash, Mohanty, & Mohanty, 2012].

El objetivo de esta investigación es implementar el método de inferencia Takagi Sugeno Kang en el control difuso PD+I para lograr tanto ahorro de energía como estabilidad en la regulación de temperatura en los sistemas de aire acondicionado, realizando simulaciones propuestas en el software MATLAB & Simulink y pruebas físicas realizadas por medio de la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-6008.

2. Métodos

La metodología empleada en esta investigación ha sido la teoría de sistemas difusos y control, utilizando un controlador difuso PD+I [Jantzen, 2013]. En la figura 1 se muestra la estructura del control empleado.

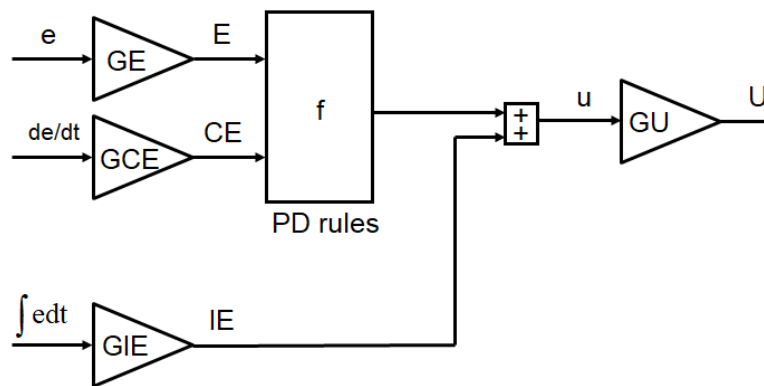


Figura 1 Estructura del control difuso PD+I.

Donde U la salida del controlador está dada por la ecuación 1.

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

Los valores de las ganancias K_p , T_d y T_i para este tipo de control se obtienen por medio de las siguientes ecuaciones 2, 3 y 4.

$$GE * GU = K_p \quad (2)$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d \quad (3)$$

$$\frac{GIE}{GE} = \frac{1}{T_i} \quad (4)$$

El control 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 con una alta ganancia integral.

Para el diseño del controlador se obtuvo una función de transferencia de un sistema de aire acondicionado siendo esta la planta [Panda, 2012] utilizada en simulación. Empleando el comando *ident* de MATLAB se estimó el modelo de la función de transferencia descrito por la ecuación 5.

$$G(s) = \frac{0.8529}{s + 0.7942} * Y(s) \quad (5)$$

De acuerdo a [Jang, Sun, & Mizutani, 1997] una estructura básica de un sistema de inferencia difusa consiste en tres componentes conceptuales: una base de reglas, que contiene una selección de reglas difusas; una base de datos, que define las funciones de membresía utilizadas en las reglas difusas; y un mecanismo de razonamiento, que realiza el procedimiento de inferencia sobre las reglas y los hechos dados para derivar un resultado o conclusión razonable.

El método propuesto en este trabajo es el Takagi-Sugeno-Kang (TSK) [Nguyen & Sugeno, 1998]. Este modelo está formado por reglas lógicas que tienen una parte antecedente difusa y un consecuente funcional, esencialmente son una combinación de modelos difusos y no difusos. Los modelos difusos basados en el método de razonamiento TSK [Leski, 2005] integran la capacidad de los modelos lingüísticos para la representación cualitativa del conocimiento con un efectivo potencial para expresar información cuantitativa. Además, este tipo de modelo difuso permite una aplicación relativamente fácil de técnicas de aprendizaje para su identificación a partir de los datos [Schnitman, Felipe de Souza, & Yoneyama, 2001].

La principal diferencia entre el método Mamdani y TSK son las funciones de membresía de salida ya que en TSK son lineales o constantes. Estas se construyen a partir de reglas representadas en la ecuación 6 [Wang, 1997].

$$\text{IF } x_1 \text{ is } Z_1 \text{ and ... and } x_n \text{ is } Z_n, \text{ THEN } y = c_0 + c_1x_1 + \dots + c_nx_n \quad (6)$$

Donde x_n son las variables de entrada, Z_n son los conjuntos difusos correspondientes a las variables de entrada, la y representa la variable de salida y c_n son los parámetros de la función consecuyente.

El diseño propuesto para simulación fue desarrollado en MATLAB, por medio del *toolbox fuzzy logic designer*. Creando un sistema de múltiple entrada y salida única (MISO) [Rezaee & Fazel Zarandi, 2010], las variables de entrada llamadas GP y GD-e y la señal de salida del controlador formada por las funciones creadas por el conjunto de reglas difusas. Primero se necesita conocer la curva de control del aire acondicionado como se muestra en la figura 2.

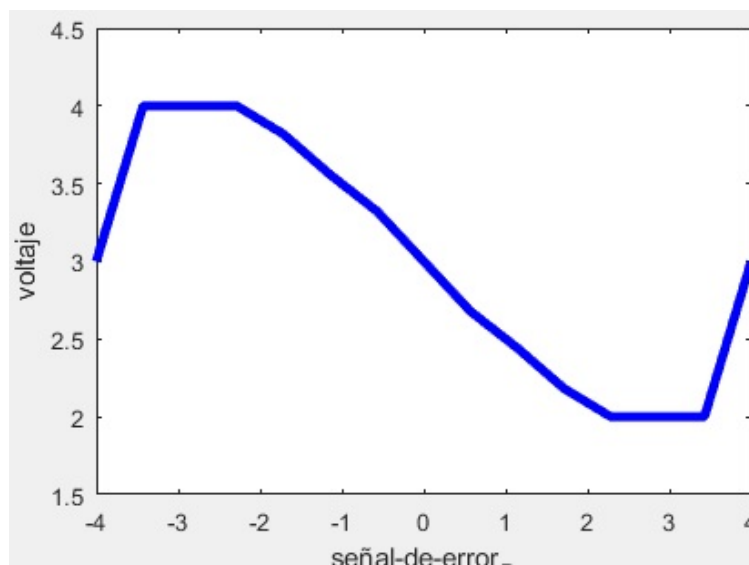


Figura 2 Curva de control.

A partir de esta señal se generan las funciones por los puntos de cambio generados por el comportamiento de la curva de control. Siendo cinco funciones por cada variable de entrada, como se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Funciones de las variables de entrada del método TSK.

Variable GP	Variable GD-e
$f_1(x) = 2x_1 + 11$	$f_1(x) = -2x_2 - 5$
$f_2(x) = 4$	$f_2(x) = 2$
$f_3(x) = -0.5x_1 + 3$	$f_3(x) = 0.5x_2 + 3$
$f_4(x) = 2$	$f_4(x) = 4$
$f_5(x) = 2x_1 - 5$	$f_5(x) = -2x_2 + 11$

En la figura 3 se muestra las funciones de membresía de las funciones de entrada del controlador, el rango de trabajo de las variables GP y GD-e es de -4 a 4 y son divididas en cinco rangos para la evaluación del grado de valor de membresía por medio de cinco funciones singleton.

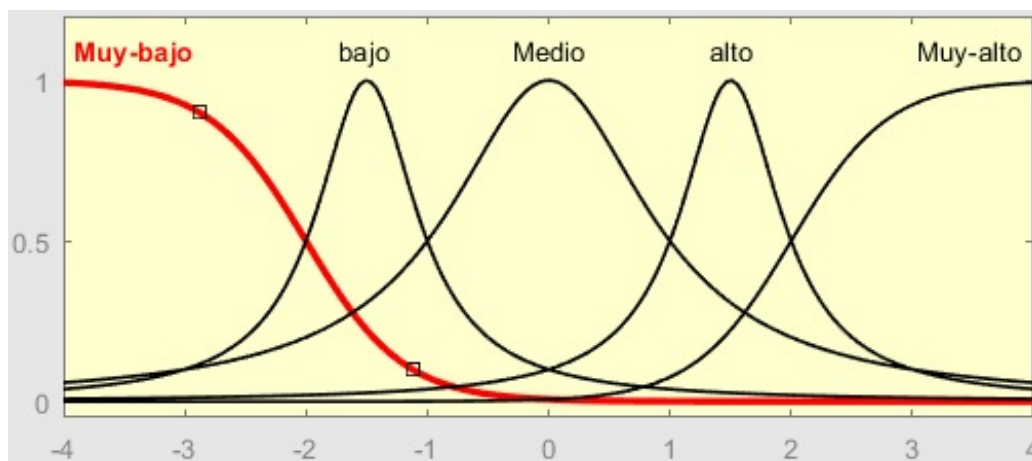


Figura 3 Funciones de membresía de las variables GP y GD-e.

El conjunto de reglas utilizadas en el controlador difuso depende del número de posibles combinaciones de las variables de entrada, como en este diseño son dos variables de entrada, veinticinco reglas difusas son las necesarias para generar una señal en la variable de salida del controlador. Estas reglas con:

- If (GP is Muy-bajo) and (GD-e is Muy-bajo) then (f(u) is $f_1 = 2x_1 - 2x_2 + 6$)
- If (GP is Muy-bajo) and (GD-e is bajo) then (f(u) is $f_2 = 2x_1 + 13$)
- If (GP is Muy-bajo) and (GD-e is Medio) then (f(u) is $f_3 = 2x_1 + 0.5x_2 + 14$)
- If (GP is Muy-bajo) and (GD-e is alto) then (f(u) is $f_4 = 2x_1 + 15$)

- If (GP is Muy-bajo) and (GD-e is Muy-alto) then (f(u) is $f_5 = 2x_1 - 2x_2 + 22$)
- If (GP is bajo) and (GD-e is Muy-bajo) then (f(u) is $f_6 = -2x_2 - 1$)
- If (GP is bajo) and (GD-e is bajo) then (f(u) is $f_7 = 6$)
- If (GP is bajo) and (GD-e is Medio) then (f(u) is $f_8 = 0.5x_2 + 7$)
- If (GP is bajo) and (GD-e is alto) then (f(u) is $f_9 = 8$)
- If (GP is bajo) and (GD-e is Muy-alto) then (f(u) is $f_{10} = -2x_2 + 15$)
- If (GP is Medio) and (GD-e is Muy-bajo) then (f(u) is $f_{11} = -.5x_1 - 2x_2 - 2$)
- If (GP is Medio) and (GD-e is bajo) then (f(u) is $f_{12} = -.5x_1 + 5$)
- If (GP is Medio) and (GD-e is Medio) then (f(u) is $f_{13} = -.5x_1 + 0.5x_2 + 6$)
- If (GP is Medio) and (GD-e is alto) then (f(u) is $f_{14} = -.5x_1 + 7$)
- If (GP is Medio) and (GD-e is Muy-alto) then (f(u) is $f_{15} = -.5x_1 - 2x_2 + 14$)
- If (GP is alto) and (GD-e is Muy-bajo) then (f(u) is $f_{16} = -2x_2 - 3$)
- If (GP is alto) and (GD-e is bajo) then (f(u) is $f_{17} = 4$)
- If (GP is alto) and (GD-e is Medio) then (f(u) is $f_{18} = 0.5x_2 + 5$)
- If (GP is alto) and (GD-e is alto) then (f(u) is $f_{19} = 6$)
- If (GP is alto) and (GD-e is Muy-alto) then (f(u) is $f_{20} = -2x_2 + 13$)
- If (GP is Muy-alto) and (GD-e is Muy-bajo) then (f(u) is $f_{21} = 2x_1 - 2x_2 - 10$)
- If (GP is Muy-alto) and (GD-e is bajo) then (f(u) is $f_{22} = 2x_1 - 3$)
- If (GP is Muy-alto) and (GD-e is Medio) then (f(u) is $f_{23} = 2x_1 + 0.5x_2 - 2$)
- If (GP is Muy-alto) and (GD-e is alto) then (f(u) is $f_{24} = 2x_1 - 1$)
- If (G is Muy-alto) and (GD-e is Muy-alto) then (f(u) is $f_{25} = 2x_1 - 2x_2 + 6$)

En la figura 4 muestra la gráfica de superficie del comportamiento de la señal de salida del controlador en relación con las dos entradas, obteniendo una curva de control semejante a la deseada.

Se creó el lazo de control difuso PD+I con el método TSK con el sistema de aire acondicionado como se muestra en la figura 5.

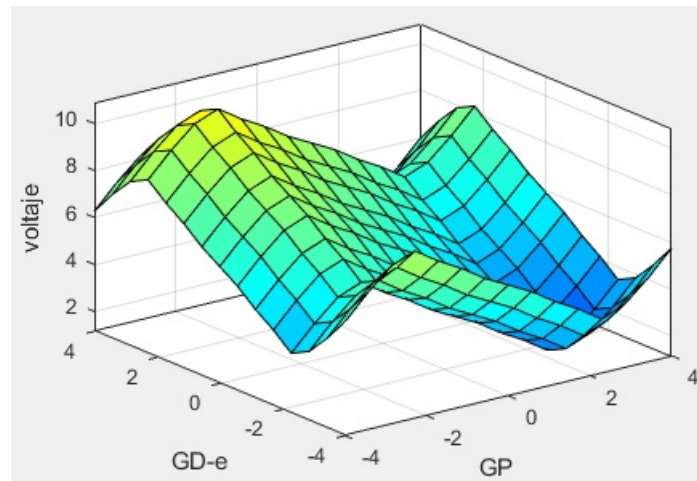


Figura 4 Representación gráfica del comportamiento de la salida del controlador TSK.

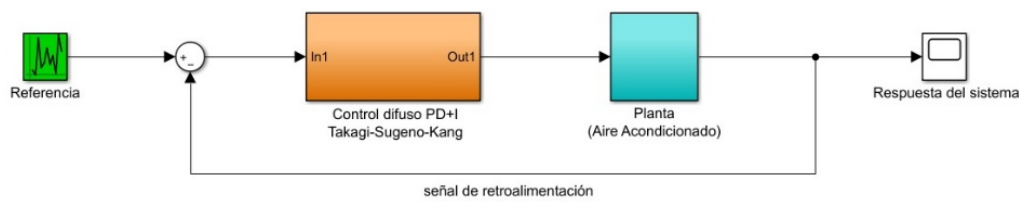


Figura 5 Diagrama a bloques del lazo de control difuso.

Los materiales empleados para las pruebas en físico del control difuso 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 DPST 3100 y un circuito de potencia para el acoplamiento de señal de salida de la tarjeta al compresor del aire acondicionado, estos circuitos son aquellos elementos que sostienen mayores cargas eléctricas, puesto que son los encargados de ejecutar las órdenes dictaminadas por el circuito de mando, se caracterizan sobre todo por trabajar a tensiones superiores a los 230 y 400 Volts, 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 y para proteger la salida analógica de la tarjeta NI USB-6008 con un aislador acoplado óptico aislándola de las altas tensiones de corriente eléctrica por parte del compresor.

En la figura 6 se muestra el diagrama del control difuso PD+I con el método TSK programado en Simulink utilizando las referencias de diseño mismas en las que se realizaron en MATLAB. Con el *Toolbox Data Acquisition* se logra la conexión entre la tarjeta y el software, programando una entrada y una salida analógica de la tarjeta con el propósito de comunicar al sensor de temperatura y al equipo de aire acondicionado con el controlador con rangos de trabajo de 1-5 Volts.

Los resultados de las pruebas físicas del lazo de control del sistema de aire acondicionado aplicando el algoritmo de control visto se discuten más adelante.

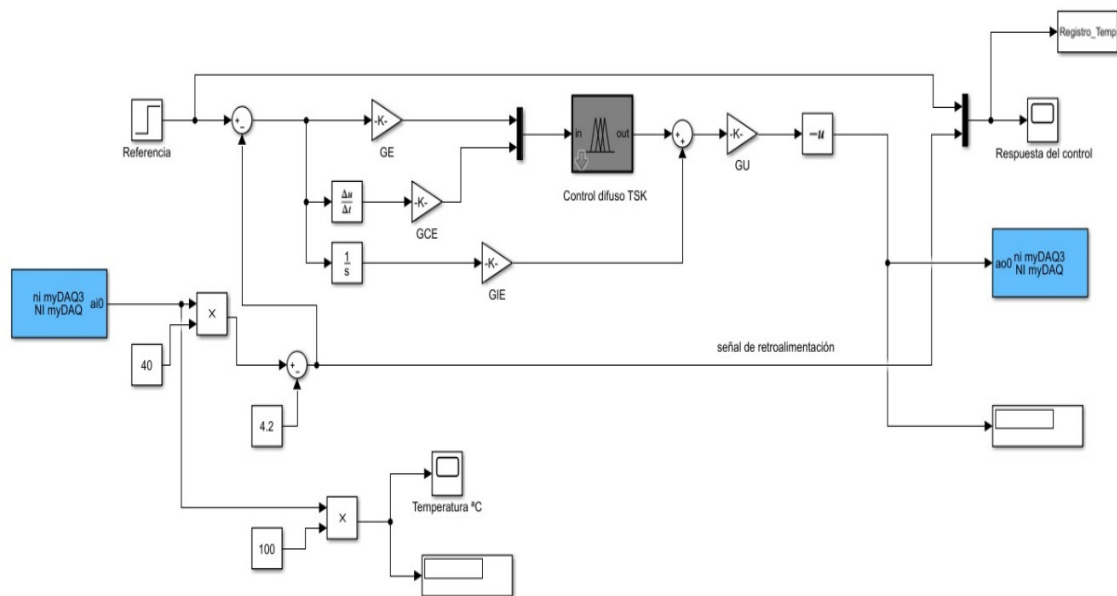


Figura 6 Diagrama a bloques del control difuso PD+I TSK en Simulink.

3. Resultados

En la simulación con el control difuso PD+I Takagi-Sugeno-Kang en MATLAB mostrada en la figura 7, los resultados obtenidos en las simulaciones se ejecutaron aplicando una entrada aleatoria de valores simulando los rangos de funcionamiento de la regulación de la temperatura de 16 a 23 °C del equipo de aire acondicionado, aplicando las ganancias obtenidas de las ecuaciones 2, 3 y 4, se obtuvieron los parámetros $K_p = 2$, $T_d = 0.05$ y $T_i = 0.12$. Al especificar las características de la respuesta del sistema de control para una entrada escalón

unitario, es común precisar lo siguiente [Ogata, 2010]: tiempo de retardo (t_d), tiempo de subida (t_r), tiempo pico (t_p) y tiempo de asentamiento (t_s).

En la figura 7 se determinaron los tiempos de la respuesta del sistema aplicando un escalón de 19 como referencia a la temperatura deseada. El tiempo de retardo t_d obtenido fue de 0.216 equivalente al 50% del valor final; un tiempo de asentamiento $t_s= 44.33$ que es el tiempo necesario para alcanzar el 2% cerca del valor final y un tiempo de subida $t_r= 25.38$ para alcanzar la respuesta de 10 a 90% del valor final.

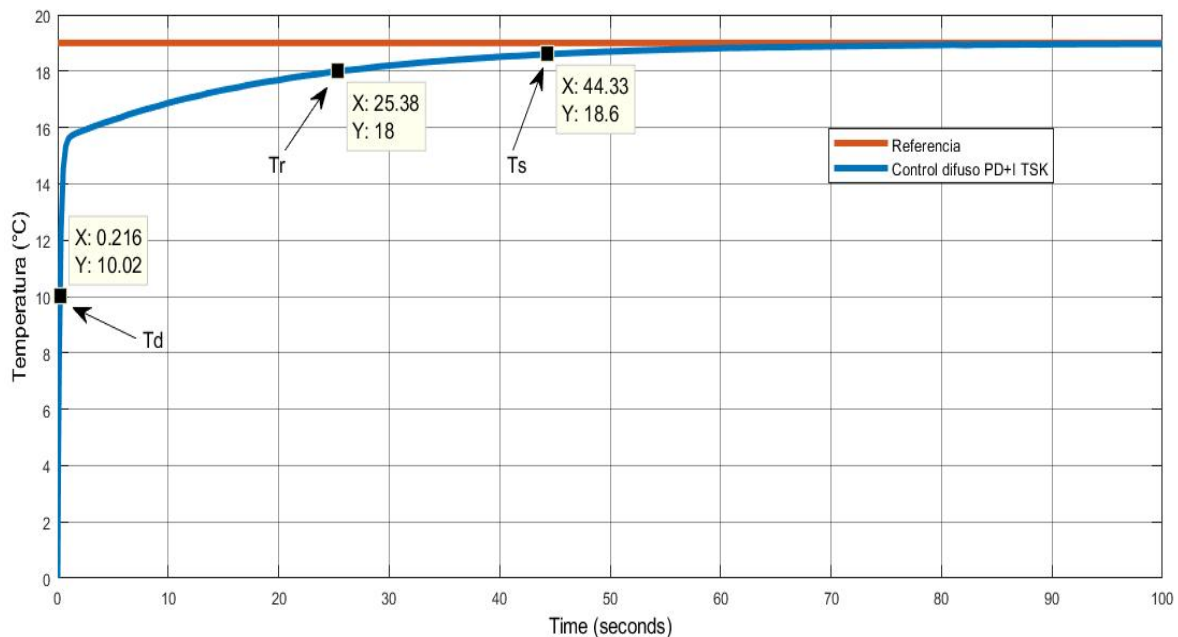


Figura 7 Gráfica de la respuesta del sistema aplicando el control difuso PD+I TSK.

Al comparar la respuesta del control difuso PD+I TSK con la respuesta de la planta del sistema de aire acondicionado en simulación, en la figura 8 se muestra gráficamente el resultado de la respuesta en transición del sistema.

Las pruebas físicas realizadas con el equipo de aire acondicionado fueron por medio de la tarjeta USB-6008 programada y visualizada por medio de Simulink. La figura 9 muestra gráficamente el resultado obtenido aplicando el control difuso PD+I TSK al equipo de aire acondicionado a un cambio de referencia de 3.5, ya que el controlador fue diseñado con entre los valores de referencia de 1-5

correspondiendo a 16 a 23 °C. Al analizar la respuesta del sistema, el error en estado estacionario generado al cambio del valor de referencia es de 1.4%, el tiempo de retardo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final $t_d = 3.66$ min, con un tiempo de subida $t_r = 4.84$ min, un tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobreelongación $t_p = 6.29$ min y con un tiempo de asentamiento $t_s = 6.48$ min.

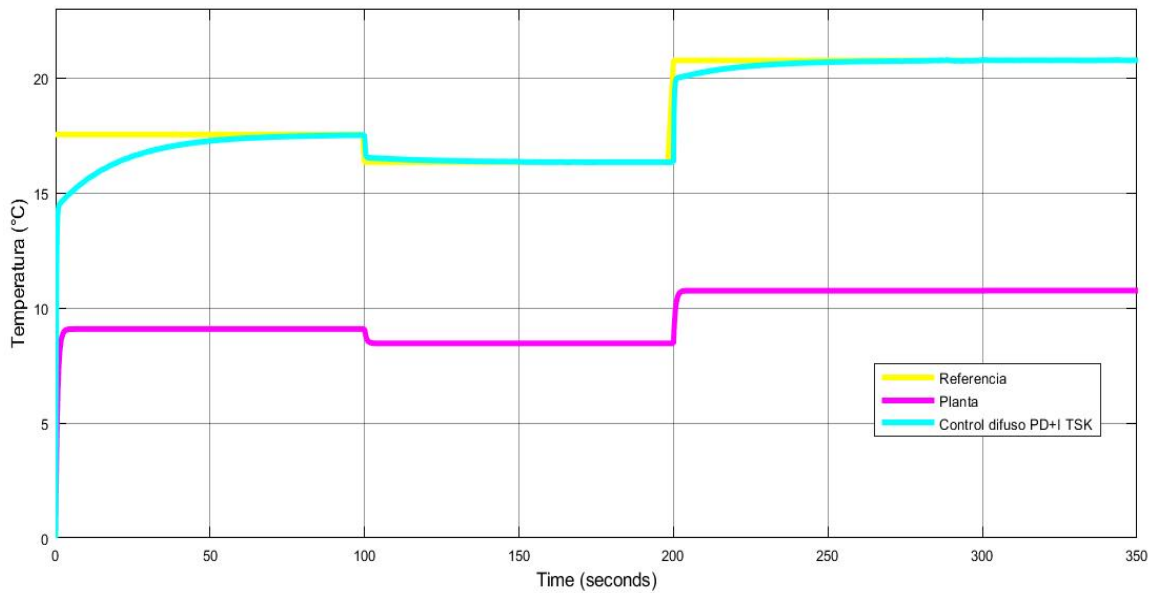


Figura 8 Respuesta del control difuso PD+I TSK y la planta.

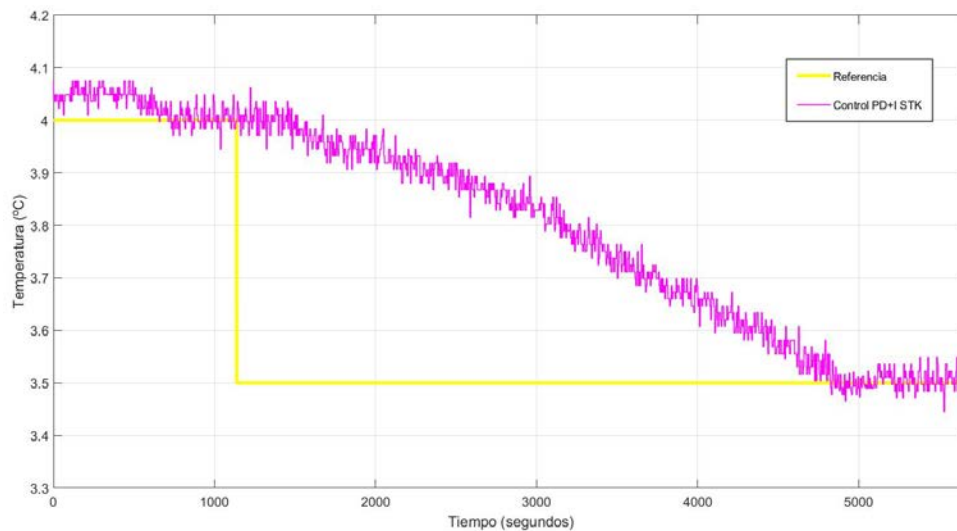


Figura 9 Respuesta del control difuso PD+I TSK en la regulación de la temperatura.

4. Discusión

En las figuras 7 y 9 se puede observar un comportamiento estable en la regulación de temperatura, siendo la respuesta en simulación mostrada en la figura 7 más rápida en comparación con la prueba en físico mostrada en la figura 9. Lo anterior puede deberse a que el equipo de aire acondicionado presenta un desgaste en sus componentes mecánicos inherentes al uso del mismo.

En la literatura revisada se encontró el uso del método Takagi-Sugeno-Kang en el control difuso para sistemas de aire acondicionado [Chiou, Chiou, Chu, & Lin, 2009], [Aprea, Mastrullo, & Renno, 2004] y [Dash, Mohanty, & Mohanty, 2012]. Al comparar este trabajo con la literatura, se encontró que el método difuso PD+I TSK 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 e implementarlo en diferentes sistemas de aire acondicionado.

Uno de los principales inconvenientes al usar un aire acondicionado es su gran consumo de energía eléctrica, siendo la conservación de esta 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 TSK en sistemas de aire acondicionado convencionales, se observó un desempeño del compresor muy eficiente y estable, lo que se traduce en ahorro de energía eléctrica.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Ahsan ur Rehman Omer, S., & Muhammad, E. (2017). Design of Intelligent Air Conditioner Controller. Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT). Karachi, Pakistan.
- [2] Jang, J.-S. R., Sun, C.-T., & Mizutani, E. (1997). Neuro-Fuzzy and Soft Computing. United States of America: Prentice-Hall.
- [3] Jantzen, J. (2013). Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach. John Wiley & Sons Inc.

- [4] Aprea, C., Mastrullo, R., & Renno, C. (2004). Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant. *International Journal of Refrigeration*, 639-648.
- [5] 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.
- [6] Chiou, C. B., Chiou, C. H., Chu, C. M., & Lin, S. L. (2009). The application of fuzzy control on energy saving for multi-unit room air-conditioners. In *Applied Thermal Engineering*, 29, 310-316.
- [7] Dash, S. K., Mohanty, G., & Mohanty, A. (2012). Intelligent Air Conditioning System using Fuzzy Logic. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, III(12).
- [8] Leski, J. M. (2005). TSK-fuzzy modeling based on /spl epsiv/-insensitive learning. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 13, 181-193.
- [9] Nguyen, H. T., & Sugeno, M. (1998). *Fuzzy Systems*. Springer Science+Business Media New York.
- [10] Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna (Quinta edición ed.)*. (M. Martín-Romo, Ed., S. Dormido Canto, & R. Dormido Canto, Trads.) Madrid, España: Prentice-Hall.
- [11] Panda, R. C. (2012). *Introduction to PID Controllers Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*. InTech.
- [12] Rezaee, B., & Fazel Zarandi, M. H. (2010). Data-driven fuzzy modeling for Takagi–Sugeno–Kang fuzzy system. *Information Sciences*, 180, 241-255. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.08.021>
- [13] Schnitman, L., Felipe de Souza, J. A., & Yoneyama, T. (2001). Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Structures in Dynamic System Modeling. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.493.8878&rep=rep1&type=pdf>
- [14] Wang, L.-X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice-Hall International.