

Análisis del control multivariable mediante lógica difusa de un sistema reactor- mezclador

Analysis of Multivariable Fuzzy Logic Control Scheme of a Reactor-Mixer System

Argemiro Palencia Diaz¹, Katty M. Cantero Vergara²,
César L. Barraza Botet³, Ricardo Mendoza Quiroga⁴

1, 3, 4 *Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor. Universidad Autónoma del Caribe.
Grupo GIIMA. apalencia@uac.edu.co*

2 *Ingeniero Mecánico, Profesor Asistente. Universidad Autónoma del Caribe.*

Recibido 28/04/2011, Aceptado 10/06/2011

RESUMEN

La utilización de nuevos métodos de control es una de las áreas de mayor interés en la industria en los últimos años ya que permite un mejor aprovechamiento de los recursos y por tanto se convierte en un factor importante en la disminución de costos asociados con el reproceso y el gasto innecesario de materia prima. En la presente investigación se evalúa el desempeño de un controlador basado en lógica difusa implementado sobre un sistema Mezclador-Reactor, El controlador por lógica difusa (FLC) es analizado para el caso multivariable en distintas condiciones de operación y su desempeño se compara con el logrado mediante la implementación de un controlador clásico PID para desviaciones del 10% de los valores de estado estable. En los resultados se puede apreciar que el controlador basado en lógica difusa FLC presenta un comportamiento adecuado mejorando en hasta un 30% al control clásico, esto sumado a la ventaja de poder incluir la experiencia que se tiene sobre el proceso en las acciones que son tomadas por la estrategia para mantener el proceso en los rangos de operación deseados.

Palabras Clave: Estrategias de Control, PID, Control por Lógica Difusa, FLC, MIMO.

ABSTRACT

The use of new methods of control is one of greatest interest in the industry in recent years because it makes better use of resources and thus becomes an important factor in reducing costs associated with reprocessing and unnecessary use of raw materials. This research has the goal to evaluate the behavior of a fuzzy logic controller implemented on a combined mixer-reactor system. The fuzzy logic controller (FLC) is analyzed for the multivariable case in different operating conditions and its performance is compared with obtain through the implementation of a classical PID controller for deviations of 10% of the steady-state. The results show that the fuzzy logic controller (FLC) has a proper performance and improve in about 20% the classical control, this combined with the advantage of being able to include experience on process in actions taken by the strategy to keep the process in desired operation ranges.

Key words: Control strategies, PID , Fuzzy Logic Control, FLC , MIMO.

1. Introducción

Los controladores clásicos (PID) siguen siendo hoy día una opción muy importante para el control de procesos y los más utilizados a nivel industrial, sin embargo su desempeño frente a algunos procesos altamente no lineales puede verse afectado debido a que se basa en una representación lineal de los sistemas, como resultado de esto durante muchos años se han desarrollado estrategias de control avanzadas que permiten enfrentar esos procesos y obtener un mejor desempeño. Los controladores basados en lógica difusa son una de estas estrategias de control diseñada para afrontar las no linealidades y representa una alternativa interesante debido a que se tiene la ventaja de incluir el conocimiento sobre el comportamiento del proceso en las acciones que realiza el controlador.

Varias investigaciones sobre lógica difusa aplicada al control de los parámetros de reactores se han llevado a cabo con anterioridad, es así como Iijima T. et al [1] utilizaron un controlador difuso sobre un sistema de agua de alimentación, en los resultados aparece que esta estrategia permitió un control más efectivo del nivel de fluido, aumentando la seguridad en este tipo de sistemas que constituye uno de los más críticos en las plantas nucleares. Muller A. et al [2] utilizaron una estrategia similar para realizar el control en un proceso de tratamiento de aguas residuales, la estrategia podía detectar la presencia de condiciones de entrada no seguras y basado en ese diagnóstico, un set de reglas de lógica difusa permitían tomar acciones para devolver el proceso a un estado de operación conveniente, se obtienen mejoras de hasta el 47% en la variable relevante.

Verbruggen H. et al [3] destacan la importancia del control por lógica difusa, en su investigación muestran el rol que puede tener esta herramienta para su implementación tanto en sistemas sencillos como complejos refiriéndose al caso multivariable, además comentan que el control clásico puede ser utilizado acompañado de la lógica difusa y así mejorar el control de los procesos.

Wong C. et al [4] por su parte analizan el comportamiento de dos estrategias de control por relación que utilizan lógica difusa sobre un proceso altamente no lineal en un reactor, en sus resultados se comparan los resultados de dos algoritmos de identificación en línea, los cuales muestran buenos resultados en términos de estabilidad y con overshoot inferior al 5%. Abilov A. et al [5] en su investigación muestran el desempeño de un lazo de control multivariable MIMO utilizando lógica difusa, implementado sobre un proceso de la industria de refinación de petróleo, comentan que el control implementado tiene un mejor desempeño que el control clásico y el tiempo de estabilización es inferior en hasta el 20% que en lazo simple con PID. Sarma P. [6] analizó por su parte el desempeño de una

estrategia de control difusa implementada en un reactor exotérmico con altas no linealidades en dos de sus variables de salida, en los resultados se comenta que el control difuso tiene mejor desempeño para esta aplicación tanto en el control servo como en el regulatorio y se obtienen desviaciones de hasta el 15% inferiores a las logradas con el control clásico PID.

Las investigaciones en el uso de lógica difusa para el control de reactores continuaron y aparece Altınten A. et al [7] los cuales utilizaron la estrategia de lógica difusa acompañada de algoritmos genéticos (GA) en un tanque de polimerización, en sus resultados se aprecia que el GA usado realiza adecuadamente la función de sintonización de parámetros del controlador difuso y se logra controlar la temperatura en el reactor de polimerización. Antunes A. et al [8] probaron experimentalmente una estrategia de control difuso para la temperatura en un reactor en batch, en sus análisis comparan el desempeño de esta estrategia con un controlador PID, en los resultados se describe que el controlador basado en lógica difusa es más confiable y tiene un mejor desempeño que el controlador clásico obteniéndose disminuciones del orden del 30% en la integral absoluta del error IAE.

Fuente M. et al [9] investigaron el control de un proceso de neutralización de pH utilizando lógica difusa en una planta de laboratorio, comentan que el desempeño del sistema es adecuado y mantiene el pH en los rangos deseados para diferentes perturbaciones y parámetros de planta. Sagués C. et al [10] propusieron el control de un gasificador de biomasa utilizando lógica difusa, realizaron la comparación de varios conjuntos de reglas en distintos puntos de operación y en sus resultados muestran un adecuado comportamiento del sistema para la mayoría de los conjuntos de reglas utilizados.

Como se puede apreciar, existen varias investigaciones en el campo de la lógica difusa y su aplicación se ha realizado en muchos sistemas, las siguientes secciones muestran la implementación de este tipo de control en un reactor-mezclador y su comparación con el control clásico PID.

2. Metodología

2.1 Modelado Dinámico del Sistema

2.1.1 Descripción del Proceso

El proceso utilizado para la investigación se da en dos etapas, la primera ocurre en un tanque mezclador al cual ingresa un flujo f_1 con una temperatura T_1 , el cual tiene una concentración CA_1 del reactivo A, también entra un flujo de recirculación f_r con temperatura T_7 y concentración CA_7 del reactivo y CB_7 , CC_7 de los productos B y C

que proviene del reactor aguas abajo y que constituye la segunda etapa, el tanque mezclador es calentado por la acción del flujo de vapor w_s proveniente de un serpentín ubicado en su interior, de este sale un flujo de drenaje f_0 y un flujo de proceso f_2 los cuales tienen una temperatura T_2 y concentraciones CA_2, CB_2, CC_2 de A, B y C respectivamente.

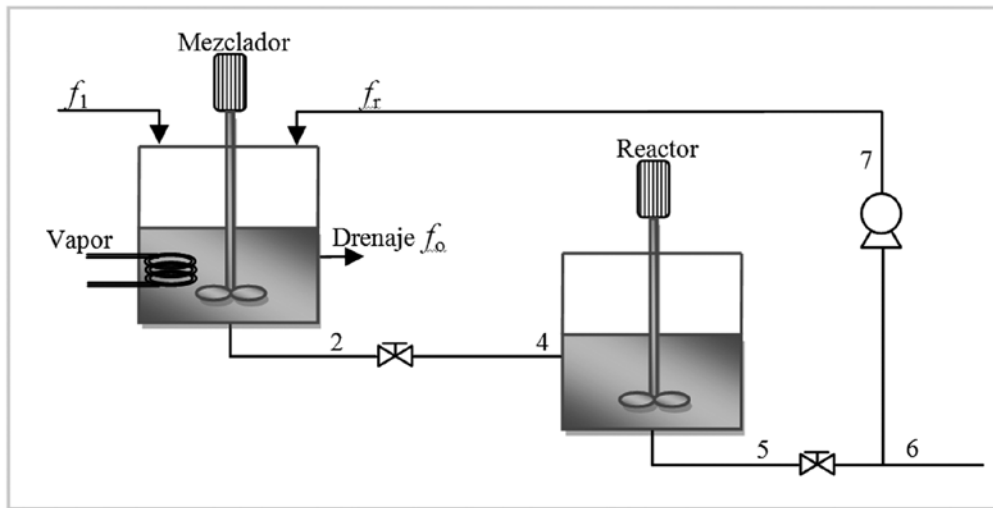
El tanque mezclador y el reactor están unidos mediante un sistema de tubería, al reactor entra el flujo f_4 con pro-

iedades diferentes a las del punto 2 debido al retardo por transporte en la tubería, en el reactor ocurre la reacción $A \rightarrow 2B + C$ y de este sale el flujo f_5 con temperatura T_5 y concentraciones CA_5, CB_5, CC_5 .

El flujo de retorno es suministrado por una bomba conectada a la salida del reactor por un sistema de tuberías, La figura 1 muestra un esquema del sistema

Figura 1. Sistema Mezclador-Reactor.

Figure 1. Mixer-Reactor System



2.1.2 Modelo Dinámico

Para el modelado dinámico se desarrollan las ecuaciones correspondientes, las cuales se muestran agrupadas a continuación, además se utilizan representaciones para el retraso por transporte:

Balances de masa

$$f_1(t)r_1(t) + f_r(t)r_5(t) - f_0(t)r_2(t) - f_2(t)r_2(t) = A_t \frac{d}{dt} [h_1(t)r_2(t)] \quad (1)$$

$$f_2(t)r_4(t) - f_5(t)r_5(t) = A_R \frac{d}{dt} [h_2(t)r_5(t)] \quad (2)$$

Balances molares

$$f_1(t)C_{A1}(t) + f_r(t)C_{A5}(t) - f_0(t)C_{A2}(t) - f_2(t)C_{A2}(t) = A_t \frac{d}{dt} [h_1(t)C_{A2}(t)] \quad (3)$$

$$f_r(t)C_{B5}(t) - f_0(t)C_{B2}(t) - f_2(t)C_{B2}(t) = A_t \frac{d}{dt} [h_1(t)C_{B2}(t)] \quad (4)$$

$$f_r(t)C_{C5}(t) - f_0(t)C_{C2}(t) - f_2(t)C_{C2}(t) = A_R \frac{d}{dt} [h_1(t)C_{C2}(t)] \quad (5)$$

$$f_2(t)C_{A4}(t) - f_5(t)C_{A5}(t) - 0.5A_R r_b(t)h_2(t) = A_R \frac{d}{dt} [h_2(t)C_{A5}(t)] \quad (6)$$

$$f_2(t)C_{B4}(t) - f_5(t)C_{B5}(t) + A_R r_b(t)h_2(t) = A_R \frac{d}{dt} [h_2(t)C_{B5}(t)] \quad (7)$$

$$f_2(t)C_{C4}(t) - f_5(t)C_{C5}(t) + 0.5A_R r_b(t)h_2(t) = A_R \frac{d}{dt} [h_2(t)C_{C5}(t)] \quad (8)$$

Balances de energía

$$f_1(t)r_1(t)c_p T_1(t) + f_r(t)r_5(t)c_p T_5(t) - f_0(t)r_2(t)c_p T_2(t) - f_2(t)r_2(t)c_p T_2(t) + W_s [T_s(t) - T_2(t)] = A_t c_v \frac{d}{dt} [h_1(t)r_2(t)T_2(t)] \quad (9)$$

$$w_s(t)l - W_s [T_s(t) - T_2(t)] = C_M \frac{d}{dt} [T_s(t)] \quad (10)$$

$$f_2(t)r_4(t)c_p T_4(t) - f_5(t)r_5(t)c_p T_5(t) + A_R h_2(t)r_b(t)DH_b = A_R c_v \frac{d}{dt} [h_2(t)r_5(t)T_5(t)] \quad (11)$$

Densidades

$$r_1(t) = r_0 + a_1 C_{A1}(t) \quad (12)$$

$$r_5(t) = r_0 + a_1 C_{A2}(t) + a_2 C_{B2}(t) + a_3 C_{C2}(t) \quad (13)$$

$$r_5(t) = r_0 + a_1 C_{A5}(t) + a_2 C_{B5}(t) + a_3 C_{C5}(t) \quad (14)$$

$$r = r_0 + a_1 C_A + a_2 C_B + a_3 C_C \quad (15)$$

Velocidad de reacción

$$r_B = K_0 C_A C_{B5}(t) e^{-\frac{E}{R}} \quad (16)$$

El sistema de ecuaciones 1 a 16 en conjunto con las de retraso por transporte, son suficientes para representar la dinámica del proceso estudiado.

Finalmente se introducen las ecuaciones dentro del software de modelado matemático y se observa el desempeño

de las variables en estado estable. La figura 2 y 3 muestran el comportamiento de la temperatura de salida del reactor y la concentración CA de la corriente 5 frente a perturbaciones en el flujo de alimentación y de vapor. Ahora se procede a evaluar el comportamiento de los sistemas basados en lógica difusa y en control clásico PID.

Figura 2. Respuesta de la temperatura ante variaciones en las entradas.

Figure 2. Response of temperature to inputs changes

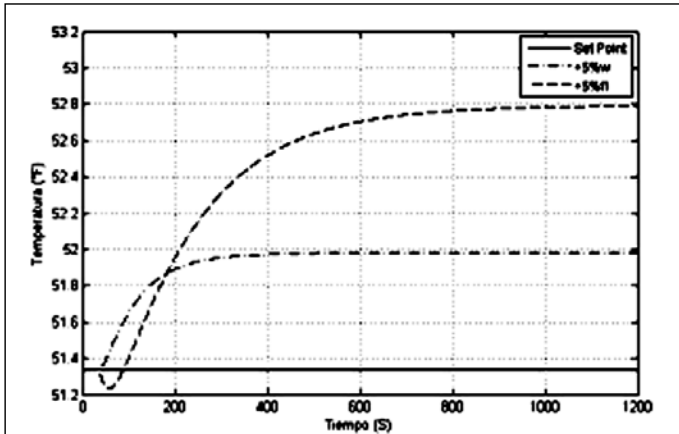
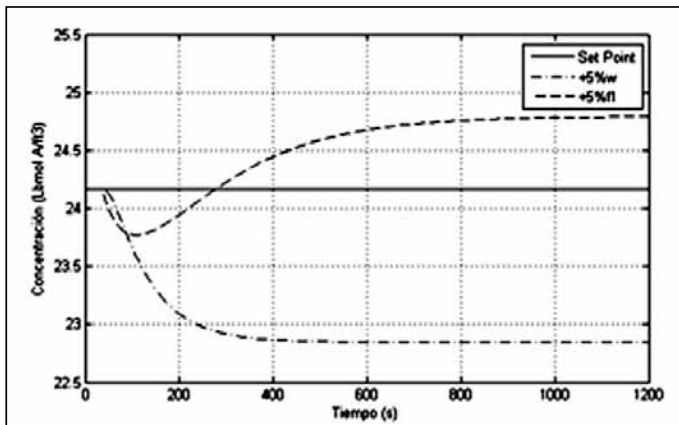


Figura 3. Respuesta de la concentración ante variaciones en las entradas.

Figure 3. Response of Concentration to inputs changes



3. Resultados

3.1 Control Clásico Multivariable (PID MIMO)

La estrategia PID implementada tiene como variables controladas la Concentración de A en la corriente de salida del reactor y la temperatura de salida de esta corriente, Con el objetivo de establecer los parámetros del controlador se realizan pruebas para caracterizar el proceso variando el flujo de vapor (ws) y el flujo de alimentación (f1) de su estado estable en un 5%. Los resultados permitieron implementar la técnica de ganancias relativas para escoger las parejas de variable controlada y manipulada, la matriz de ganancias relativas se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Matriz de ganancias relativas

Table 1. Relative gains matrix

	m_1	m_2
C_1	0,830	0,169
C_2	0,169	0,830

Se obtiene que las parejas para cada lazo son: Flujo de vapor (w)-Concentración de A (CA5) y flujo de alimentación (f1)-Temperatura (T5), siendo este ultimo el lazo principal. Ahora se utilizan las ecuaciones de sintonización para lazos multivariable 2x2 desarrolladas por Smith C. [11], los parámetros obtenidos son:

Tabla 2. Parámetros de controladores (MIMO)

Table 2. Controller parameters (MIMO)

	LAZO 1		LAZO 2	
PI/PID	ti1	67,481	ti2	28,936
	td1		td2	40,760
	Kc1	7,221	Kc2	-4,279

Las figura 4 y 5 muestran el comportamiento de la estrategia de control por retroalimentación MIMO para cambios en el setpoint y ante perturbaciones, es necesario destacar la utilización de desacopladores para disminuir el efecto de cada variable manipulada en la controlada del lazo opuesto.

Figura 4. Comportamiento CA5 frente a cambio en el setpoint (20 s) y de -5% en CA1 (750 s) (PID MIMO).

Figure 4. Behavior CA5 against changes in setpoint (20 s) and -5% in CA1 (750 s) (PID MIMO).

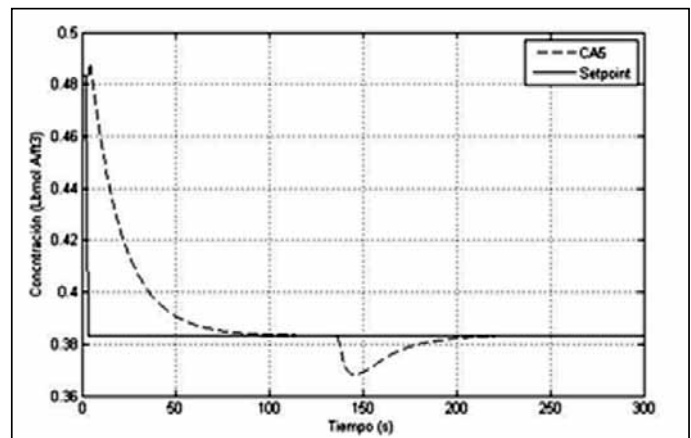
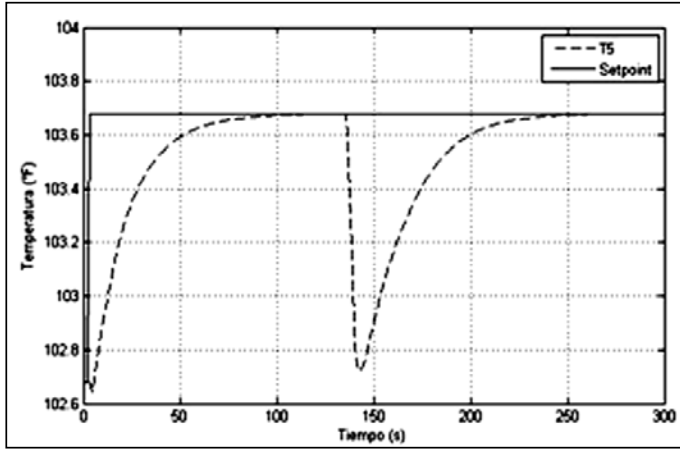


Figura 5. Comportamiento T5 frente a cambio en el setpoint (20 s) y de 5% en CA1 (750 s) (PID MIMO).

Figure 5. Behavior T5 against changes in setpoint (20 s) and 5% in CA1 (750 s) (PID MIMO).



3.2 Control Multivariable Mediante Lógica Difusa (FLC MIMO)

Para lograr desarrollar una correcta estrategia de control mediante logica difusa se requiere establecer el comportamiento del error en terminos de su valor absoluto al igual que su tasa de cambio, en la presente investigacion se utilizaron las siguientes variables linguisticas: (NB) negativo grande, (NS) Negativo pequeño, (Z) Cero, (PS) Positivo pequeño y (PB) Positivo Grande, las cuales estuvieron acompañadas de reglas basadas en el consimieto del sistema analizado para obtener los resultados deseados. En las figuras 6 y 7 se muestran las estructuras de las variables implementadas.

Figura 6. Superficie de Reglas

Figure 6. Surface of Rules

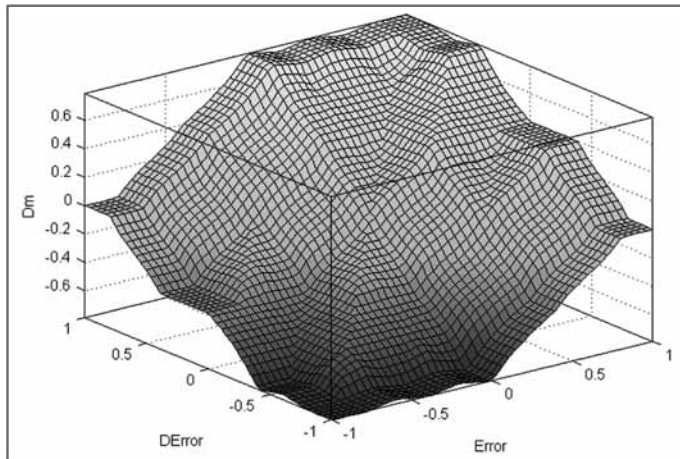
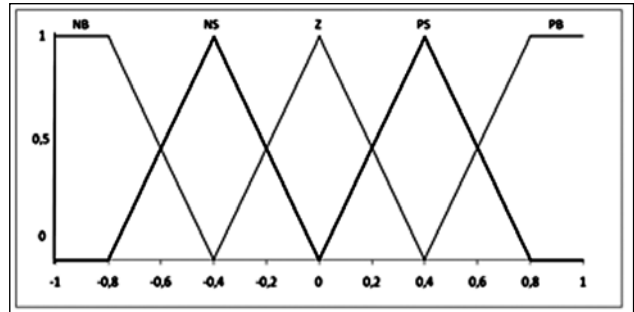


Figura 7 Variables Lingüísticas

Figure 7 Linguistic Variables



Las figura 8 y 9 muestran el comportamiento de la estrategia de control por lógica difusa multivariable para cambios en el setpoint y ante perturbaciones, en ellas se puede apreciar un desempeño adecuado ante los diferentes niveles de prueba.

Figura 8. Comportamiento CA5 frente a cambio en el setpoint (2 s) y de -5% en CA1 (130 s) (FLC MIMO).

Figure 8. Behavior CA5 against changes in setpoint (2 s) and -5% in CA1 (130 s) (FLC MIMO).

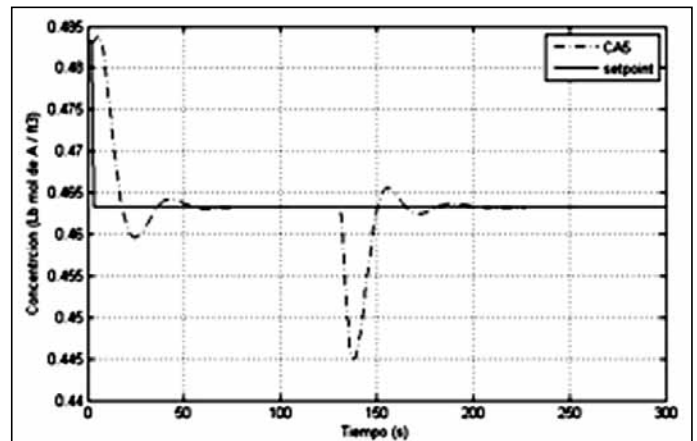
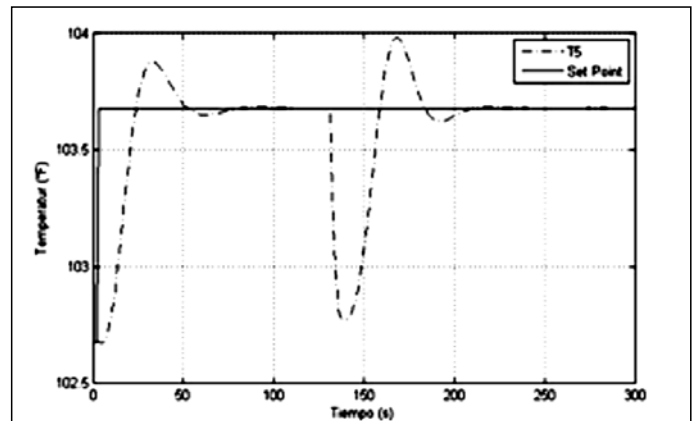


Figura 9. Comportamiento T5 frente a cambio en el setpoint (2 s) y de 5% en CA1 (130 s) (FLC MIMO).

Figure 9. Behavior T5 against changes in setpoint (2 s) and 5% in CA1 (130 s) (FLC MIMO).



El desempeño del sistema basado en lógica difusa presenta un comportamiento adecuado en términos de estabilización y agresividad, se logra mantener las variables de procesos en los rangos establecidos de operación. La tabla 3 muestra los resultados de la integral absoluta del error donde se pueden apreciar valores de IAE menores para el caso de lógica difusa.

Tabla 3. Integral absoluta del error para las estrategias.
Table 3. Strategies IAE.

Estrategia	IAE	
	Temperatura	Concentración
PID	241	892
FLC	192	338

4. Conclusiones

- El objetivo de la investigación es comparar el desempeño de la estrategia de control clásico PID con los resultados de un controlador basado en lógica difusa FLC, para lo cual se utilizó como medio la representación dinámica de un sistema Mezclador-Reactor, se debe resaltar que el control clásico sigue siendo una opción viable, ya que en los resultados se puede apreciar un comportamiento adecuado en las condiciones de operación analizadas.
- Como resultado del estudio realizado y desde el punto de vista de la integral absoluta del error, la estrategia basada en lógica difusa presenta un mejor comportamiento que el control clásico, lo que permite afirmar que se tienen menores desviaciones del punto de control cuando se utilizan estos controladores, por otra parte la implementación de esta estrategia avanzada constituye una alternativa atractiva debido a que permite desarrollar el control de varios lazos con la implementación de un solo sistema y además permite utilizar el conocimiento y la experiencia sobre el comportamiento del proceso en las estrategias

Referencias

[1] Iijima T., Nakajima Y. and Nishiwaki Y., Application of fuzzy logic control system for reactor feed-water control, *Fuzzy Sets and Systems*, 74, 61-72, 1995.

[2] Muller A., Marsili-libelli S., Aivasidis A., Lloyd T., Kroner S. and Wandrey C., Fuzzy Control of Disturbances in a Wastewater Treatment Process, *Water Research*, 31 (12), 3157-3167, 1997

[3] Verbruggen H. and Bruijn P., Fuzzy control and conventional control: What is (and can be) the real contribution of Fuzzy Systems?, *Fuzzy Sets and Systems*, 90, 151-160, 1997.

[4] Wong C., Shah S., Bourke M. and Fisher D., Adaptive fuzzy relational predictive control, *Fuzzy Sets and Systems*, 115 247-260, 2000.

[5] Abilov A, Zeybek Z., Tuzunalp O. and Telatar Z. Fuzzy temperature control of industrial refineries furnaces through combined feedforward/feedback multivariable cascade systems, *Chemical Engineering and Processing*, 41, 87-98, 2002.

[6] Sarma P., Multivariable gain-scheduled fuzzy logic control of an exothermic reactor, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14, 457-471, 2001.

[7] Altınten A., Erdog S., Hapog H. and Alpbaz M., Control of a polymerization reactor by fuzzy control method with genetic algorithm, *Computers and Chemical Engineering*, 27, 1031-1040, 2003.

[8] Antunes A., Pereira J. and Fileti A. Fuzzy control of a PMMA batch reactor: Development and experimental testing, *Computers and Chemical Engineering*, 30, 268-276, 2005.

[9] Fuente M., Robles C., Casado O., Syafie S. and Tadeo F., Fuzzy control of neutralization process, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19, 905-914, 2006.

[10] Sagués C., García-Bacaicoa P. and Serrano S., Automatic control of biomass gasifiers using fuzzy inference systems, *Bioresource Technology*, 98, 845-855, 2007.

[11] Smith C. and Corripio A., Principles and Practice of Automatic Process Control, John Wiley & Sons Inc., USA, 1997.