

## COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO ENTRE CONTROLADORES FUZZY Y CONTROLADORES PROPORCIONALES

### PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN FUZZY CONTROLLERS AND PROPORTIONAL CONTROLLERS

Sergio L. Martínez<sup>1</sup>, Enrique E. Tarifa<sup>1,2\*</sup>, Álvaro F. Núñez<sup>1</sup>

(1) Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy, Gorriti 237, 4600 San Salvador de Jujuy, Jujuy - Argentina

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires - Argentina

\*autor de contacto (e-mail: eetarifa@arnet.com.ar)

Recibido: 16/03/2011 - Evaluado: 05/05/2011 - Aceptado: 31/08/2011

#### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es comparar el desempeño de dos controladores fuzzy y un controlador proporcional. La variable controlada es el nivel de un tanque con descarga gravitatoria. Para realizar el estudio, se desarrolló un simulador dinámico implementado en Simulink® de MatLab®. Para cada controlador estudiado, se evaluó la respuesta producida ante un cambio escalón en el set point. Para realizar una comparación válida, los controladores fueron ajustados para producir offset iguales. Los resultados obtenidos muestran que los sistemas basados en heurísticas (controladores fuzzy) pueden ser tanto o más convenientes que aquellos basados en conocimiento determinístico (el controlador proporcional). Si bien el controlador proporcional actúa con mayor velocidad, los controladores fuzzy mejoran los valores de algunos de los índices más importantes de desempeño, como los sobrepicos, las oscilaciones y el factor de *ripple*.

#### ABSTRACT

The aim of this work is to compare the performance of two fuzzy controllers and a proportional controller. The controlled variable is the level of a tank with gravity discharge. For the study, a dynamic simulator was developed and implemented in Simulink ® of MATLAB ®. For each studied controller, the response produced by a step change in the set point was evaluated. To make a valid comparison, the controllers were adjusted to produce equal offsets. The results show that systems based on heuristics (fuzzy controllers) can be as or more convenient than those based on deterministic knowledge (the proportional controller). Although the proportional controller acts at a higher speed, fuzzy controllers improve the values of some of the most important performance rates, such as the overshoot, oscillations and ripple factor.

Palabras clave: controladores fuzzy; modelo Mamdani; controlador proporcional; simulación

Keywords: fuzzy controllers; Mamdani model; proportional controller; simulation

## INTRODUCCIÓN

La lógica fuzzy creada por Zadeh (1973) se origina con la idea de poder manejar conocimiento incierto en forma automática. En la década de 1970, los sistemas fuzzy y las teorías de control basadas en esta lógica añadieron una nueva dimensión a la ingeniería de sistemas de control. Desde sus inicios, con desarrollos ad-hoc y básicamente heurísticos, nuevos y más rigurosos enfoques de la teoría de control fuzzy han contribuido a afianzarla en la teoría de control moderna, avalada por gran cantidad de desarrollos y aplicaciones exitosos.

El control de equipos y procesos es una actividad indispensable en muchos campos, especialmente en la industria. Los sistemas de control convencionales requieren un conocimiento muy preciso del proceso sobre el que se aplican, ya que trabajan sobre un modelo de la planta a controlar y necesitan de los datos que éste proporciona. En muchos casos, la obtención del modelo exacto no es posible o sólo se puede contar con un modelo aproximado.

Un sistema de inferencia fuzzy (FIS – Fuzzy Inference System) –donde un FLC es un caso particular–, es capaz de aproximar a un nivel de precisión arbitrario, cualquier función lineal o no lineal, por lo cual los sistemas fuzzy se conocen también como “aproximadores universales”, y de hecho, también están incluidos los controladores fuzzy (Cox, 1999). Al considerar un controlador de lógica fuzzy (FLC – Fuzzy Logic Controller) o simplemente controlador fuzzy, se hace referencia a una ley de control descrita por un sistema basado en conocimiento, formado por reglas condicionales de tipo SI ENTONCES, donde sus antecedentes, consecuentes y mecanismos de inferencia se configuran mediante lógica fuzzy.

La utilización de esta lógica en el campo del control se ha extendido de manera considerable en las últimas décadas donde numerosos autores e investigadores produjeron una gran cantidad de artículos y libros de gran trascendencia en el ámbito científico (Zadeh, 1973; Mamdani, 1977; Takagi & Sugeno, 1985; Cox, 1999; Michels *et al.*, 2006; Jantsen, 2007; Driankov *et al.*, 1993; Seborg *et al.*, 2010). También se pueden mencionar exitosas aplicaciones industriales basadas en control fuzzy tales como una interesante y completa revisión de control fuzzy en procesos biológicos industriales (Horiuchi, 2002); el enfoque de diagnóstico de fallas basado en una estrategia off-line y en tiempo real para lazos de control de procesos (Chang & Chang, 2003); el diseño y desarrollo de un controlador de proceso automatizado para la separación de líquido-gas en petróleo, basado en lógica fuzzy y configurado sobre la experiencia de ingenieros en petróleo (Liao *et al.*, 2008) o el desarrollo de un controlador PID fuzzy auto sintonizado para mejorar el comportamiento de un actuador electro-hidráulico (Zulfatman & Rahmat, 2009), entre muchas otras.

En este trabajo se modela y simula un tanque de reserva con descarga gravitatoria, controlando el nivel de descarga por medio de la válvula de salida. Sobre esta planta se implementaron un controlador clásico de tipo proporcional basado en el modelo y utilizado como referencia; y dos controladores fuzzy de diferente complejidad para comparar sus desempeños. Los resultados obtenidos muestran que los controladores basados en conocimiento global heurístico pueden alcanzar un comportamiento tanto o más convenientes que el controlador de tipo proporcional que requiere de conocimiento determinístico.

## METODOLOGÍA

Un componente crítico en la estrategia del diseño de un sistema de control convencional es el propio modelo del sistema a ser controlado. Un modelo exacto del sistema podría producir respuestas muy similares al sistema real. Sin embargo, la complejidad inherente en la mayoría de los sistemas físicos dificulta la obtención de un modelo exacto, por lo que es común contar solamente con un modelo aproximado.

En general, los controladores convencionales se configuran sobre la base de un modelo matemático del proceso a controlar para generar las correspondientes señales que requieren los actuadores, desplazándose eventualmente sobre una complicada hipersuperficie de control. En los casos en que tanto el modelo como sus

parámetros sean desconocidos, técnicas apropiadas conocidas como Identificación de Sistemas (System Identification) suelen ser aplicadas para superar este desconocimiento. Aún así, el problema puede no estar resuelto; los resultados alcanzados con las técnicas de Identificación de Sistemas podrían no ser adecuados si los datos iniciales no fueron apropiados, o bien, si el modelo identificado es demasiado complejo como para ser computacionalmente manejable (Michels *et al.*, 2006).

Enfocándose en las actividades que se desarrolla en la industria, cuando un operario se capacita en el manejo de una máquina o en el control de un proceso, no necesariamente adquiere un conocimiento profundo de ellos, simplemente aprende a realizar los movimientos adecuados, elaborando reglas intrínsecas que surgen de la experiencia que va adquiriendo cada vez que observa y analiza los resultados de las acciones que realiza (método de prueba y error). Se puede considerar que de allí surge la potencialidad de un FLC, al convertir el conocimiento experto en estrategias de control automático, basado en reglas condicionales que representan una acumulación de conocimiento preciso e impreciso que pueden ser matemáticamente modelado mediante la lógica fuzzy (Liao *et al.*, 2008).

Un controlador FLC operando sobre el mismo proceso respecto de un controlador convencional de tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) o sus variantes PI-PD-P, puede contar con significativas ventajas operativas, como el hecho de que las estrategias de control se basan en un lenguaje cotidiano que admite ambigüedades naturales en expresiones tales como "mucho", "poco", "cerca", "bajo", etc.; además de que el control fuzzy permite manipular muchas variables de entrada y salida que se combinan en reglas condicionales para ser ejecutadas en paralelo, donde la ocurrencia de algunas situaciones de conflicto pueden ser toleradas y resueltas por el mismo controlador (Jantzen, 2007).

Ésta es la idea que subyace en este trabajo, donde se ha planteado la comparación operacional de dos tipos de controladores sobre un proceso simple, de modo que se pueda identificar claramente cómo trabajan, tanto cualitativa como cuantitativamente. El primer tipo de controlador evaluado, corresponde a un modelo clásico y simple conocido como controlador proporcional (PC), cuya operatividad está basada en el modelo de la planta a controlar. El segundo tipo (del que se aplican dos variantes), se conoce como controlador de lógica fuzzy. En este caso la primera variante se plantea en su forma más simple, para ser equitativamente coherente con el modelo convencional a los efectos de la comparación. La segunda variante corresponde a un controlador fuzzy de mayor resolución que se plantea para determinar si es capaz de superar el desempeño de la primera variante.

## MODELOS DE CONTROLADORES

En un controlador proporcional, la salida o señal de control  $u(k)$  en el tiempo discreto  $k$ , es directamente proporcional a la entrada –usualmente una señal de error  $e(k)$ –, de manera que:

$$u(k) = K e(k) \quad k \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

siendo  $K$  una constante que se conoce como ganancia proporcional. Bajo este esquema, la señal de control depende únicamente del error en cada instante del tiempo, y puede interpretarse que el controlador proporcional funciona como un amplificador de la señal de error (Seborg *et al.*, 2010), que realimentada en forma adecuada puede controlar el proceso de interés (control feedback).

Para un controlador FLC, un experto incorpora conocimiento en un conjunto de reglas condicionales encargadas de realizar las acciones de control, y se organizan en una base de reglas que constituye la parte más representativa del controlador, pues allí residen las estrategias que requiere el sistema para realizar su operación. El conjunto de reglas condicionales describen la relación entre las entradas y las salidas del controlador. Típicamente, considerando al error  $e(k)$  como la entrada y a la acción de control  $u(k)$  como la salida, se puede expresar un relación general entre ellos de la forma:

$$u(k) = f(e(k), e(k-1), \dots, e(k-\nu), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-\nu)) \quad (k, \nu) \in \mathbb{N} \quad (2)$$

donde  $f$  representa implícitamente a la ley de control contenida en la base de reglas y  $\nu$  representa la cantidad de muestras anteriores a la actual. En forma más concreta, un controlador FLC estándar describe la relación entre la variable de control  $u(k)$  o la variación de control  $\Delta u(k)$  respecto del error de control  $e(k)$  y eventualmente de su respectiva variación  $\Delta e(k)$  de la siguiente manera:

$$\Delta u(k) = f(e(k), \Delta e(k)) \quad k \in \mathbb{N} \quad (3)$$

La variable de control  $u(k)$  actualizada se puede obtener inmediatamente a partir de su valor anterior y la variación propuesta en la ecuación (3), como indica la ecuación siguiente:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad k \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Este tipo de controladores fue propuesto originalmente por el británico Ebrahim H. Mamdani en 1975, y debido a su amplia y exitosa aplicación en diversos ámbitos, estos sistemas se conocen como Controladores Fuzzy tipo Mamdani – MFLC (Jantzen, 2007).

La Figura 1 y la Figura 2 presentan una idea general –a nivel de bloques– del esquema de control que requiere cada uno de los sistemas de control utilizados en este trabajo –un controlador proporcional PC y un controlador fuzzy FLC–, actuando supuestamente sobre el mismo proceso a controlar.

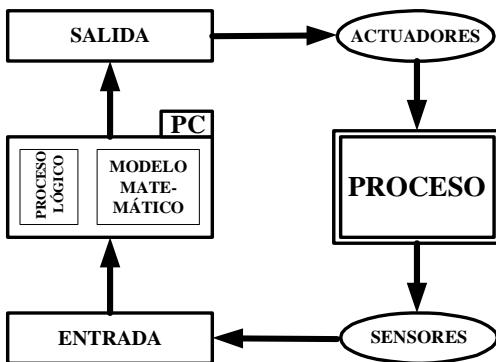


Fig. 1: Esquema de control basado en controlador convencional.

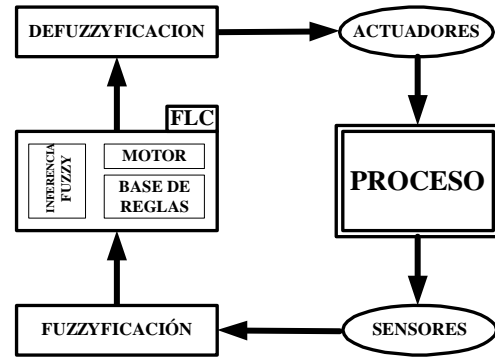


Fig. 2: Esquema de control basado en controlador fuzzy.

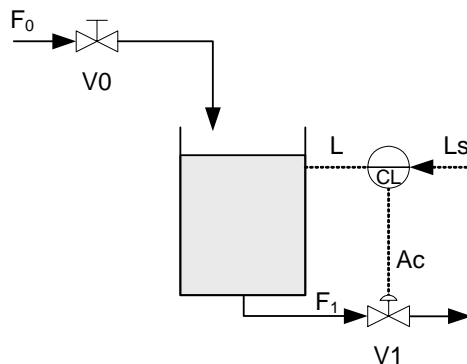


Fig. 3: Modelo de tanque con descarga gravitatoria y control de nivel por descarga.

## SISTEMA A CONTROLAR

La Figura 3 muestra el modelo del sistema que se utilizó como caso de estudio. Se trata de un tanque de reserva con descarga gravitatoria, que recibe un caudal de alimentación  $F_0$  a través de una válvula V0, y descarga con un caudal  $F_1$  a través de la válvula V1. En este caso, la válvula de alimentación no se manipula, por lo que el caudal de entrada permanece constante.

La variable controlada es el nivel  $L$  del tanque por medio de la apertura de la válvula V1, que es manipulada por el controlador bajo estudio CL. Las ecuaciones que definen al modelo de simulación del tanque con descarga gravitatoria son:

$$A \frac{dL}{dt} = F_0 - F_1 \quad (5)$$

$$\tau_1 \frac{dAcv}{dt} = Ac - Acv \quad (6)$$

$$x_1 = \begin{cases} 0 & Acv < 0 \\ Acv & 0 \leq Acv \leq 1 \\ 1 & Acv > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$F_1 = Cv_1 x_1 \sqrt{\rho g L} \quad (8)$$

donde;  $A = 0.785 \text{ m}^2$  es el área transversal del tanque,  $L$  es el nivel de líquido en metros (m),  $F_0 = 2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$  es el caudal de entrada y  $F_1$  es el caudal de salida ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). La válvula V1 es lineal, falla cerrada y tiene una demora de primer orden;  $\tau_1 = 3 \text{ s}$  es la constante de tiempo de la válvula;  $Cv_1 = 4.039 \times 10^{-4} \text{ m}^{3.5}/\text{kg}^{0.5}$  es el coeficiente de tamaño de la válvula;  $x_1$  es el factor de apertura de la válvula (en tanto por uno);  $Ac$  es la salida del controlador (en tanto por uno);  $Acv$  es la salida del controlador después de la demora de primer orden (en tanto por uno);  $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$  es la densidad del líquido y  $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$  es la aceleración de la gravedad.

## SISTEMAS DE CONTROL

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron dos modelos de controladores fuzzy tipo Mamdani (MFLC) para el control del nivel del tanque de reserva con descarga gravitatoria (Figura 3), y sus desempeños se compararon con el de un controlador convencional para establecer las características operativas de cada uno. Particularmente para este caso de estudio, se ha utilizado como referencia un controlador proporcional (PC), que para ser modelado, a las ecuaciones que conforman el modelo del tanque –ecs. (5), (6), (7) y (8)– se deben adicionar las siguientes ecuaciones:

$$Ac = Ab + K e \quad (9)$$

$$e = L - Ls \quad (10)$$

donde  $Ac$  es la salida o acción de control,  $Ab = 0.5$  es el valor de la componente en vacío del controlador (que en la literatura de sistemas de control se conoce como bias),  $K$  es la ganancia (en  $\text{m}^{-1}$ ),  $e$  es el error del controlador (en m) y  $Ls$  es el valor de nivel objetivo, usualmente conocido como set point del controlador.

Los controladores fuzzy propuestos responden a una arquitectura SISO (Single Input – Single Output). El primer formato es el más simple (Figura 4), sus variables de entrada  $e(k)$  y salida  $u(k)$  están configuradas con tres particiones y consta de una base de tres reglas de control, operando a partir del error de nivel y produciendo la acción de control de la válvula de descarga del sistema; puede considerarse que esta estructura es la mínima requerida para configurar un sistema de control. El segundo formato de controlador fuzzy se ha implementado con una mayor partición de las variables lingüísticas, con un incremento de la base de reglas a siete componentes que operan sobre las mismas variables. Teóricamente, esta modificación permitiría una mayor discriminación de la señal de error y, eventualmente, una salida con mayor precisión. La Figura 4 también puede servir como esquema de referencia, ya que en ambas arquitecturas la diferencia fundamental está en la base de reglas.

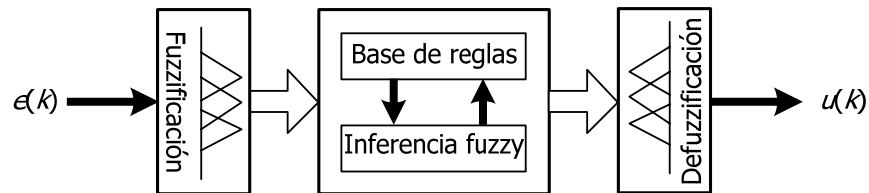


Fig. 4: Esquema en bloques de un controlador fuzzy tipo Mamdani (MFLC).

### OPERACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Para las pruebas experimentales se ha implementado el modelo del tanque a controlar sobre el entorno Simulink® de MatLab®. En la implementación se han incorporado los controladores de modo que, mediante un conmutador, puede activarse cualquiera de los tipos de controladores considerados como se observa en el esquema de la Figura 5 (Chau, 2002).

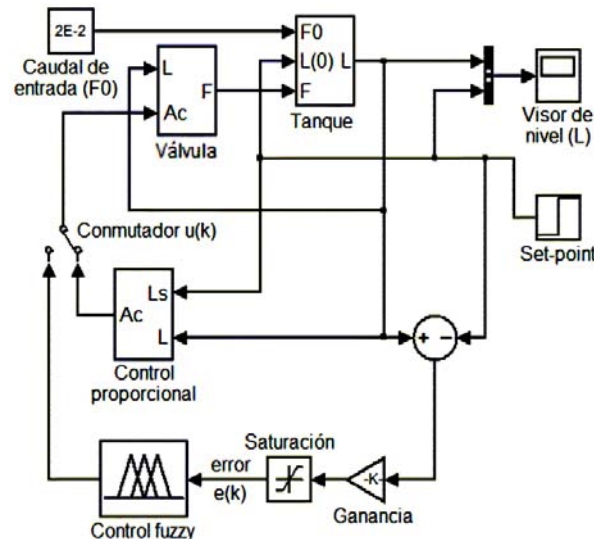


Fig. 5: Modelo de control de nivel de un tanque de reserva con sistemas de control conmutables.

Para el estudio comparativo, se realizó el control de nivel del tanque descrito en el apartado "SISTEMA A CONTROLAR" anterior, con un tiempo de simulación de 200 s, generando la variación del set point desde el nivel  $L = 1$  m al nivel  $L = 2$  m, en el tiempo  $t = 50$  s (en forma de escalón) y capturando las secuencias temporales de las señales de nivel producidas por cada controlador, conjuntamente con la señal de set point del sistema.

Para organizar apropiadamente el proceso comparativo, se configuró el controlador proporcional (PC) para operar con ganancias  $K \in \{5, 10, 20, 40\}$ , junto a los controladores MFLC equivalentes, y se determinaron los siguientes parámetros:

- Offset ( $\Delta L_{\text{off}}$ ): diferencia entre el set point prefijado y el valor alcanzado por el controlador en régimen estacionario, luego de un tiempo de simulación de 200 s.
- Velocidad ( $t_{\text{TAO}}$ ): tiempo requerido para alcanzar el 63% del valor final prefijado ( $L = 2$  m).
- Sobrepico ( $L_{\text{max}}$ ): máximo valor alcanzado en el primer acercamiento al valor final.
- Sobrepico porcentual ( $L\%$ ): valor porcentual excedente del primer sobrepico respecto del valor final prefijado.
- Tiempo de estabilización ( $t_E$ ): tiempo requerido por el controlador para entrar en una franja de +/- 1% del valor final.
- Factor de ripple ( $FR\%$ ): mide el contenido armónico de la secuencia, se expresa en porcentaje y se calcula con la ecuación (11).

$$FR\% = 100 \sqrt{\frac{V_{\text{RMS}}^2}{V_{\text{med}}^2} - 1} \quad (11)$$

siendo  $V_{\text{RMS}}$  el valor eficaz (Root Mean Square) y  $V_{\text{med}}$  el valor medio de la señal en consideración. Si bien los controladores fuzzy no requieren de un conocimiento preciso del modelo a controlar, para este estudio en particular, considerando que se utiliza como referencia al controlador proporcional (PC), es necesario realizar un ajuste previo de la ganancia de los MFLC para alcanzar el mismo nivel de offset ( $\Delta L_{\text{off}}$ ) del controlador de referencia que permita comparar los diferentes parámetros sobre una base equivalente ( $\Delta L_{\text{off}}$  en este caso). Luego, con las secuencias de salida del sistema controlado, se calculan los restantes parámetros.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las siguientes tablas (Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4), se resumen los parámetros característicos calculados para cada conjunto de controladores, para diferentes valores de ganancia –donde el controlador proporcional (PC) se utiliza como referencia– y agrupados por similar valor de offset que hace posible la comparación. Conjuntamente, en las figuras adjuntas (Figura 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9) se muestran –completas y ampliadas– las curvas de aproximación al nivel de set point final ( $L=2$  m) para cada conjunto de controladores agrupados con el mismo criterio.

Tabla 1: Comparación de parámetros de los controladores PC y MFLC con referencia  $K_{\text{PC}} = 5$ .

Controlador	Parámetros						
	$K$ (adim)	$\Delta L_{\text{off}}$ (m)	$t_{\text{TAO}}$ (s)	$L_{\text{max}}$ (m)	$L\%$ (%)	$t_E$ (s)	$FR\%$ (%)
#1 – Proporcional	5	0.029	25.9	2.015	0.73	47.0	0.44
#2 – Fuzzy 3 reglas	7.5	0.028	28.9	2.001	0.02	49.0	0.26
#3 – Fuzzy 7 reglas	10.2	0.029	28.8	2.000	-0.09	49.0	0.24

Como se deduce de la Tabla 1 y Figura 6 anterior, el controlador proporcional es un poco más rápido ( $t_{\text{TAO}}$ ) pero presenta un sobrepico ( $L\%$ ) y contenido de ripple ( $FR\%$ ) mayores que sus homólogos fuzzy, requiriendo todos ellos casi el mismo tiempo de establecimiento ( $t_E$ ). Los controladores MFLC demandan mayor nivel de ganancia.

En la segunda prueba, como se infiere de la Tabla 2 y Figura 7, un mayor nivel de ganancia aproxima el valor estacionario de todos los controladores al valor del set point con menos error, pero el tiempo de estabilización ( $t_E$ ) tiende a aumentar. El controlador proporcional genera un mayor sobrepico ( $L\%$ ) y un mayor nivel de ripple ( $FR\%$ ).

Tabla 2: Comparación de parámetros de los controladores PC y MFLC con referencia  $K_{PC} = 10$ .

Controlador	Parámetros						
	$K$ (adim)	$\Delta L_{off}$ (m)	$\hat{t}_{TAO}$ (s)	$L_{max}$ (m)	$L\%$ (%)	$\hat{t}_E$ (s)	$FR\%$ (%)
#1 – Proporcional	10	0.015	26.0	2.045	2.23	51.0	0.53
#2 – Fuzzy 3 reglas	15	0.014	28.9	2.019	0.94	51.0	0.31
#3 – Fuzzy 7 reglas	20.5	0.014	28.8	2.015	0.75	47.0	0.27

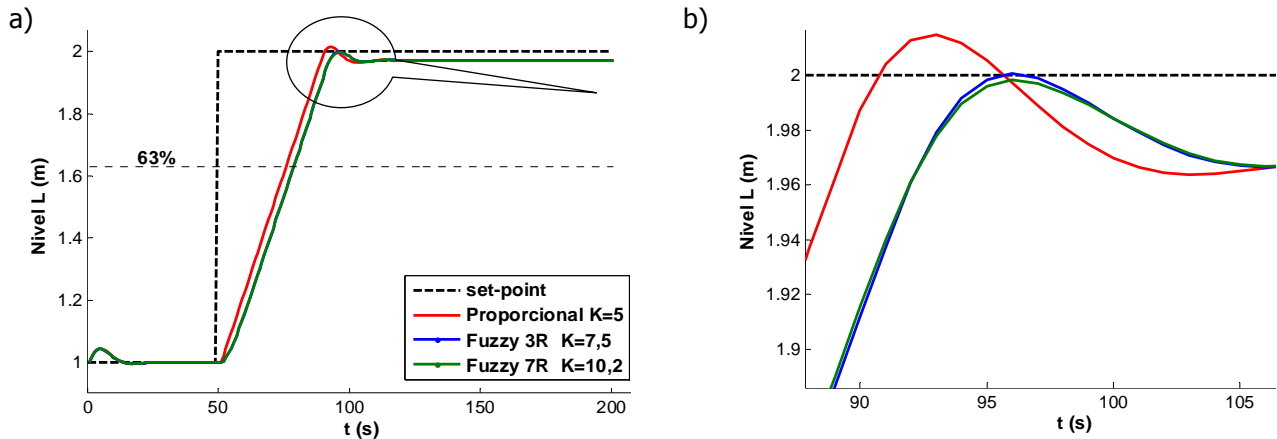


Fig. 6: a) Curvas de respuesta para controladores MFLC y PC con referencia  $K_{PC} = 5$ . b) Ampliación.

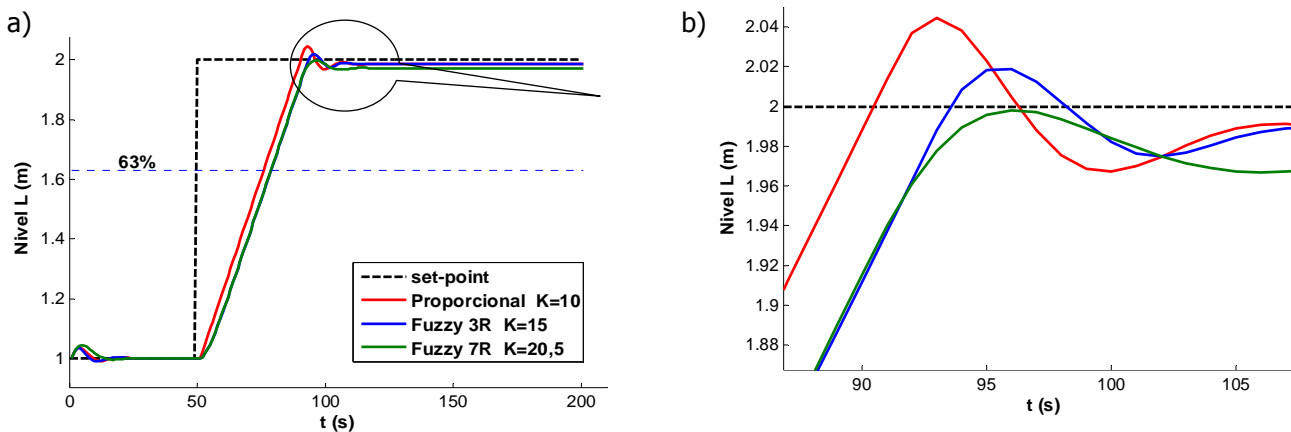


Fig. 7: a) Curvas de respuesta para controladores MFLC y PC con referencia  $K_{PC} = 10$ . b) Ampliación.

Tabla 3: Comparación de parámetros de los controladores PC y MFLC con referencia  $K_{PC} = 20$ .

Controlador	Parámetros						
	$K$ (adim)	$\Delta L_{off}$ (m)	$\hat{t}_{TAO}$ (s)	$L_{max}$ (m)	$L\%$ (%)	$\hat{t}_E$ (s)	$FR\%$ (%)
#1 – Proporcional	20	0.007	25.9	2.060	3.00	52.0	0.55
#2 – Fuzzy 3 reglas	30	0.007	28.9	2.017	0.82	45.0	0.17
#3 – Fuzzy 7 reglas	40.5	0.007	28.8	2.025	1.23	50.0	0.28



En la siguiente prueba se aumentó a 20 el nivel de ganancia del controlador de referencia (PC). Los controladores fuzzy requieren de ganancias aún mayores para mantener el nivel de comparación  $\Delta L_{off}$  (Tabla 3 y Figura 8). El valor de offset ( $\Delta L_{off}$ ) decrece prácticamente al 0.3%, pero hay más demora en alcanzar el estado estacionario. El controlador fuzzy de tres reglas muestra un mejor comportamiento al generar el mínimo factor de ripple ( $FR\%$ ) y menor sobrepico ( $L\%$ ).

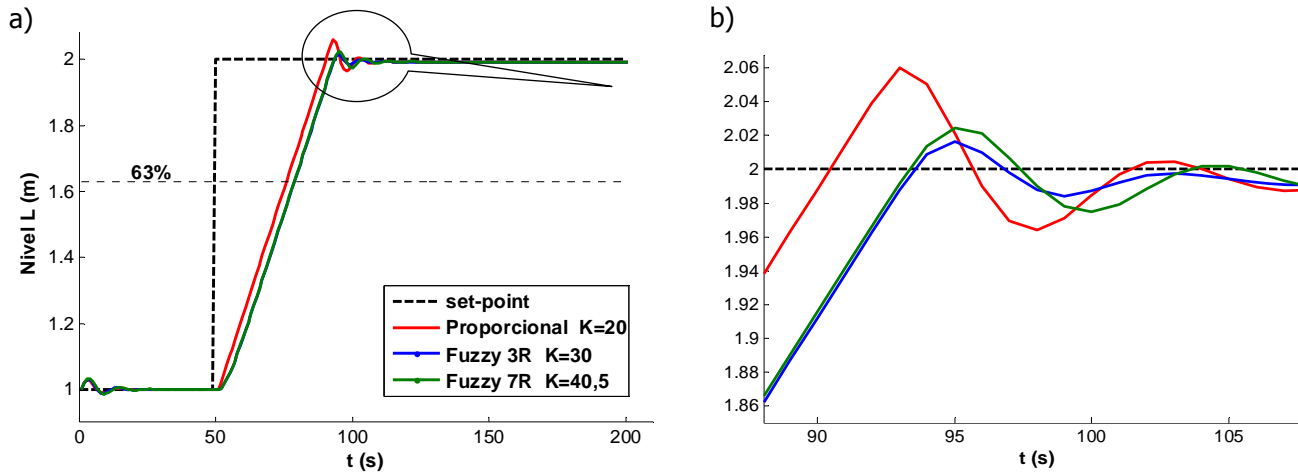


Fig. 8: a) Curvas de respuesta para controladores MFLC y PC con referencia  $K_{pC} = 20$ . b) Ampliación.

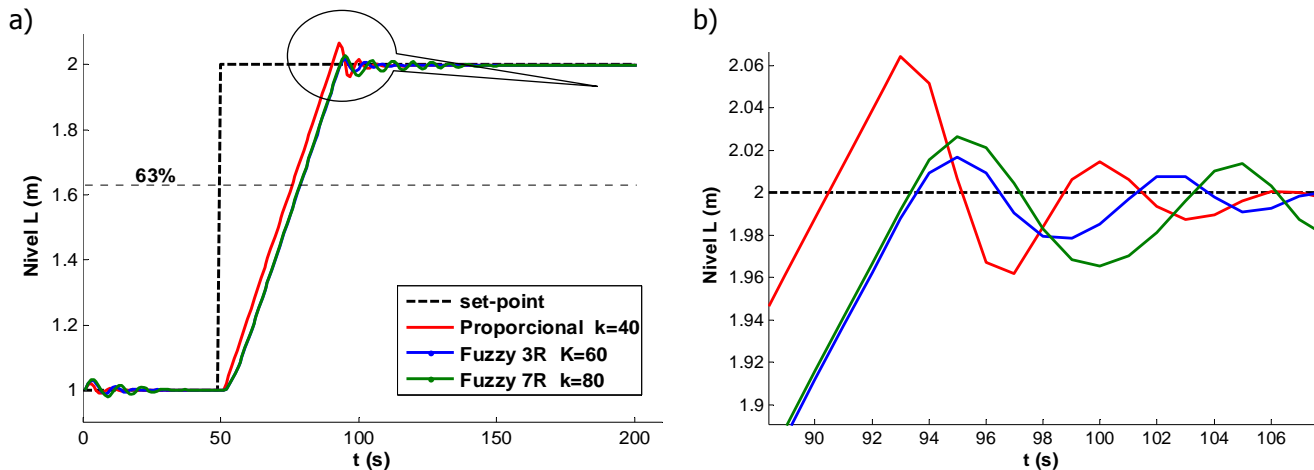


Fig. 9: a) Curvas de respuesta para controladores MFLC y PC con referencia  $K_{pC} = 40$ . b) Ampliación.

En la última prueba a continuación, de acuerdo a los resultados mostrados en Tabla 4 y Figura 9, los niveles de ganancia se han incrementado casi al límite, pues a partir de allí los controladores generan regímenes inestables. Se puede considerar que alcanzaron el nivel de offset, pero con mayores tiempos de estabilización. Nuevamente el controlador fuzzy de 3 reglas presentó el mejor comportamiento con menor sobrepico ( $L\%$ ) y menor factor de ripple ( $FR\%$ ).

Como comportamiento general para todos los modelos de controladores utilizados, se deduce que al aumentar la ganancia el error de offset disminuye, pero aumenta el tiempo requerido para la estabilización ( $t_E$ ) y el factor de ripple ( $FR\%$ ).

Tabla 4: Comparación de parámetros de los controladores PC y MFLC con referencia  $K_{PC} = 40$ .

Controlador	Parámetros						
	$K$ (adim)	$\Delta L_{off}$ (m)	$t_{TAO}$ (s)	$L_{max}$ (m)	$L\%$ (%)	$t_E$ (s)	$FR\%$ (%)
#1 – Proporcional	40	0.004	25.9	2.064	3.22	50.0	0.53
#2 – Fuzzy 3 reglas	60	0.004	28.9	2.017	0.85	52.0	0.21
#3 – Fuzzy 7 reglas	80	0.004	28.8	2.027	1.34	72.0	0.43

## CONCLUSIONES

Se ha modelado e implementado un tanque de reserva con descarga gravitatoria. Sobre este proceso se han incorporado tres controladores para comparar su operatividad. Uno de ellos corresponde a una típica estructura de control proporcional (PC), mientras que los dos restantes son variantes del mismo tipo, conocido como controlador fuzzy tipo Mamdani (MFLC).

La primera conclusión destacable y confirmada en la experimentación realizada, es que los controladores fuzzy no requieren de un conocimiento preciso del proceso, ni del modelo exacto para realizar su acción de control.

Considerando la información cuantitativa contenida en las Tablas 1, 2, 3 y 4, y a favor del control tradicional (PC), se determinó que éste responde con mayor velocidad de acuerdo al parámetro  $t_{TAO}$  aunque la diferencia es un poco menor al 10%, habiendo aplicado como señal de entrada una variación de tipo escalón.

A favor de los controladores fuzzy, se observa que generan sobrepicos de menor amplitud, menos oscilaciones y una producción de ripple bastante menor que el controlador proporcional, lo que es muy deseable en la mayoría de los procesos de control.

Se han utilizado dos variantes de controladores fuzzy, una de ellas con una base de tres reglas (la estructura más simple que puede implementarse en un controlador de este tipo) y otra con una base de reglas ampliada a siete y mayor partición de las variables involucradas, que teóricamente propiciaría un control más preciso y eficiente que su homólogo simplificado. Aunque quizás requiera de más variables de entrada y una configuración más especializada en sus funciones de fuzzyficación/defuzzyficación, se determinó que el controlador fuzzy ampliado no ha tenido un comportamiento más relevante que su homólogo de tres reglas, por lo que se considera a este último como el de mejor desempeño.

El control fuzzy tiene un amplio campo de aplicación que aún está en investigación y desarrollo. Frente a muchas aplicaciones exitosas que ya se conocen y la potencialidad de los sistemas fuzzy, se pueden pronosticar impresionantes desarrollos para el futuro.

## REFERENCIAS

1. Chang, S.Y. & Chang, C.T. (2003). A fuzzy-logic based fault diagnosis strategy for process control loops. *Chemical Engineering Science*, 58, 3395-3411.
2. Chau, P.C. (2002). *Process Control: A First Course with MATLAB*. 1º ed. Cambridge, Ed. Cambridge University Press, 328 p.
3. Cox, E. (1999). *The Fuzzy Systems Handbook*. 2º ed. San Diego, Ed. Academic Press Inc., 716 p.
4. Driankov, D., Hellendoorn, H. & Reinfrank, M. (1993). *An Introduction to Fuzzy Control*. 1º ed. New York, Ed. Springer-Verlag, 316 p.

5. Horiuchi, J.I. (2002). Fuzzy Modeling and Control of Biological Processes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 94 (6), 574-578.
6. Jantzen, J. (2007). Foundations of Fuzzy Control. 1º ed. Chichester, England, Ed. John Wiley and Sons Inc., 230 p.
7. Liao, R.F., Chan, C.W., Hromek, J., Huang, G.H. & He, L. (2008). Fuzzy logic control for a petroleum separation process. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21, 835-845.
8. Mamdani, E.H. (1977). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*: 26, (12), 1182-1191.
9. Michels, K., Klawonn, F., Kruse, R. & Nürnberger, A. (2006). Fuzzy Control: Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers. 1º ed. Berlín, Ed. Springer-Verlag, 411 p.
10. Seborg, D.E., Mellichamp, D.A., Edgar, T.F. & Doyle, F.J. (2010). Process Dynamics and Control. 3º ed. New York, Ed. John Wiley & Sons, 514 p.
11. Takagi, T. & Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15 (1), 116-132.
12. Zadeh, L.A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, 3 (1), 28-44.
13. Zulfatman & Rahmat, M.F. (2009); Application of self-tuning fuzzy PID controller on industrial hydraulic actuator using system identification approach. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2 (2), 246-261.

