

Ecuaciones de sintonización para controladores difusos basadas en modelos de primer orden más tiempo muerto

Alfredo Andrés Gutiérrez Vivius* y Marco E. Sanjuán M.**

Resumen

La estrategia de control difuso (FLC) ha demostrado ser eficaz al manipular procesos que exhiben fuertes no linealidades, o cuyo modelo matemático es difícil de obtener. Sin embargo, el rendimiento y estabilidad de los FLC dependen de la adecuada sintonización de sus parámetros de escalamiento, procedimiento que hasta ahora ha recurrido al ensayo y error. Este artículo presenta unas ecuaciones de sintonización para los parámetros de escalamiento de un FLC basadas en la identificación de la respuesta dinámica del proceso como un modelo de primer orden más tiempo muerto (FOPDT). Con estas ecuaciones se disminuye el tiempo necesario para el diseño del FLC.

Palabras claves: Conjuntos difusos, controladores difusos, sintonización, experimento.

Abstract

Fuzzy Logic Controllers (FLC) has been effective dealing with high non-linear processes or those whose mathematical model is difficult to obtain. Nevertheless FLC stability and performance depend on suitable adjustment of its tuning parameters; up to date, the tuning process has used a trial and error approach. This paper presents a set of FLC tuning equations based on dynamical process response identification as a First Order Plus Dead Time (FOPDT) model. The FLC tuning equations obtained reduce design time.

Key words: Fuzzy sets, fuzzy controllers, tuning, experiments.

Fecha de recepción: 1 de agosto de 2005
Fecha de aceptación: 14 de febrero de 2006

*Magíster en Ingeniería Mecánica e Ingeniero electrónico, Universidad del Norte. Docente Departamento de Ingenierías Eléctrica y Electrónica. Miembro del Grupo de Robótica y Sistemas Inteligentes. Miembro estudiantil IEEE. agutierrez@uninorte.edu.co

**Ph.D. y M.Sc. en Ciencias de la Ingeniería, Universidad del Sur de la Florida (USF). Ingeniero mecánico, Universidad del Norte. Director Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte. Miembro Grupo para el Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente (URE-MA). Miembro IEEE. msanjuan@uninorte.edu.co

Dirección: Universidad del Norte, Km 5, vía a Puerto Colombia, A.A. 1569, Barranquilla (Colombia).

1. INTRODUCCIÓN

El control difuso, que ha demostrado ser muy eficiente al manipular procesos complejos y difíciles de modelar, busca reproducir o asemejar las capacidades y las acciones de control del operario humano. A diferencia de las estrategias de control clásico como los algoritmos de control proporcional integral derivativo (PID), la flexibilidad de implementación y operación, así como la capacidad de adaptarse y controlar procesos que exhiben fuertes no linealidades, han sido las principales ventajas de las estrategias de control basadas en los algoritmos difusos [2, 9, 10].

Sin embargo, una de las razones por la que las estrategias de control tradicional no han sido reemplazadas por las estrategias de control inteligente es que las primeras, a diferencia de las segundas, cuentan con métodos de sintonización basados en la identificación de la respuesta dinámica del proceso. La adecuada sintonización de los parámetros de escalamiento del controlador difuso es un procedimiento crítico para su estabilidad y rendimiento, y no existe una clara relación entre éstos y la respuesta dinámica del sistema [1]. En la práctica, la sintonización de los factores de escalamiento asociados a un FLC ha recurrido a métodos heurísticos como el basado en el ensayo y error.

El presente artículo recoge los resultados de un procedimiento experimental que permitió obtener un conjunto de expresiones que, basadas en la identificación de las características dinámicas de un proceso como un modelo de primer orden más tiempo muerto (FOPDT), facilitan la sintonización cuasi-óptima de un controlador difuso. Al encontrar esas expresiones se reducen los tiempos necesarios para el diseño de la estrategia.

En la primera parte se hace una revisión breve de los elementos de la investigación, analizando las características de un FLC y sus componentes. Posteriormente se revisan algunos detalles en relación con los experimentos ejecutados para la obtención de las ecuaciones de sintonización para los parámetros de escalamiento del FLC. Seguidamente se toma un modelo de proceso de reacción química para la neutralización del potencial de hidrógeno, de forma que contribuya al análisis del rendimiento en lazo cerrado del FLC sintonizado con las ecuaciones propuestas.

Ya en la parte final, se presentan unas conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

2. CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES DE UN CONTROLADOR DIFUSO

A. Descripción de un FLC

Un controlador difuso es un dispositivo capaz de interpretar señales de campo, y tomar una acción de control consecuente de acuerdo con la información que tenga consignada en su base de reglas difusas. En la figura 1 se tiene un diagrama esquemático de un controlador basado en la lógica difusa. El núcleo de un FLC consta de un cerebro procesador encargado de tomar las decisiones necesarias para corregir el valor de la variable de interés [6].

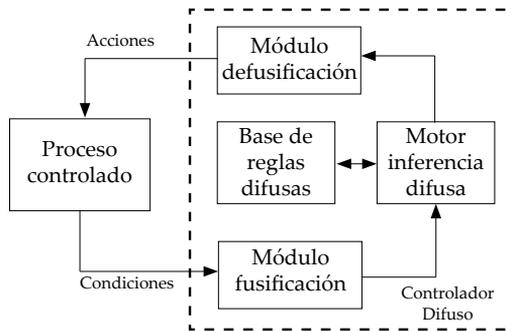


Figura 1

Diagrama esquemático de un controlador basado en lógica difusa

Para ello, el motor de inferencia difusa (el cerebro) cuenta con dos interfaces con el medio: el *módulo de fusificación* y el *módulo de defusificación*. Cada uno de ellos se encarga de transformar variables de campo (*crisp values*) en valores difusos y viceversa, respectivamente. Esto se hace pues el motor de inferencia difusa sólo trabaja con números difusos, mientras que los elementos finales de control, con los que se manipulan las variables de proceso, sólo operan con valores concretos [6].

En resumen, los sensores transmisores convierten las magnitudes físicas mesurables en señales eléctricas, que son enviadas al módulo de fusificación, el cual se encarga de convertir esas señales en valores difusos. Posteriormente, esos valores difusos pasan al motor de inferencia difusa, que se encarga de aplicar las reglas de implicación difusas que correspondan, generando así un conjunto difuso de salida, el cual recoge las decisiones que correspondan de acuerdo con los antecedentes entregados por el módulo de fusificación. Entonces, la decisión difusa es enviada al módulo de defusificación, que la

convierte en una decisión concreta que pasará a actuar sobre el elemento final de control a manera de una señal de control, manipulando la variable de proceso de forma tal que se corrija el error presente [3, 6].

B. Descripción del FLC empleado en la investigación

En la figura 2 se observa el diagrama de bloques del FLC tipo proporcional integral empleado en la investigación. Para su diseño se establecieron tres variables lingüísticas: dos de entrada, denominadas $e(n)$ y $\Delta e(n)$, y una de salida, denominada $\Delta m(n)$. Para las variables lingüísticas de entrada se asignaron cinco valores lingüísticos, a saber: Negativo Grande (NG), Negativo Pequeño (NP), Cero (z), Positivo Pequeño (PP) y Positivo Grande (PG). Para la variable lingüística de salida se asignaron siete valores lingüísticos, a saber: Negativo Grande (NG), Negativo Mediano (NM), Negativo Pequeño (NP), Cero (z), Positivo Pequeño (PP), Positivo Mediano (PM) y Positivo Grande (PG). El universo de discurso para cada variable lingüística está normalizado, y la forma como se distribuyeron estos valores lingüísticos en el universo de discurso se observa en la figura 3.

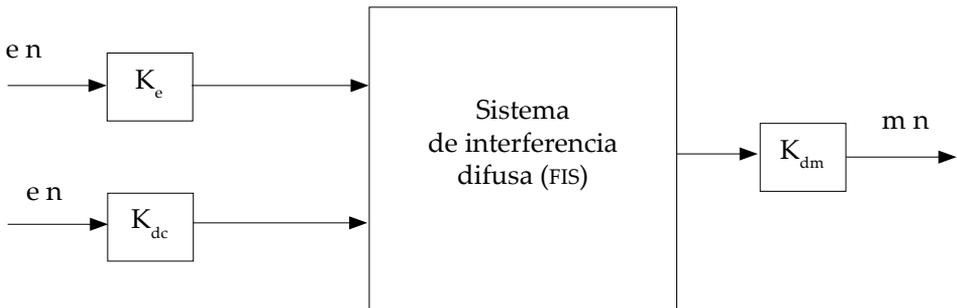


Figura 2

Diagrama de bloques de un FLC tipo PI

Por otra parte, el aumento en la cantidad de valores lingüísticos para la variable lingüística de salida se da por el interés de generar un controlador con un margen amplio de operación, y en especial porque no serán los números difusos los que se modifiquen para el diseño del FLC.

En la tabla 1 se muestra el arreglo de las reglas de inferencia difusa basadas en una acción de control inversa. Esta acción de control puede convertirse en una acción de control directa [8], sólo con cambiar el signo del parámetro de escalamiento de salida de las reglas.

Tabla 1
Base de reglas de inferencia difusa

$\Delta m(n)$		$e(n)$				
		NG	NP	Z	PP	PG
$\Delta e(n)$	NG	NG	NG	NM	NP	Z
	NP	NG	NM	NP	Z	PP
	Z	NM	NP	Z	PP	PM
	PP	NP	Z	PP	PM	PG
	PG	Z	PP	PM	PG	PG

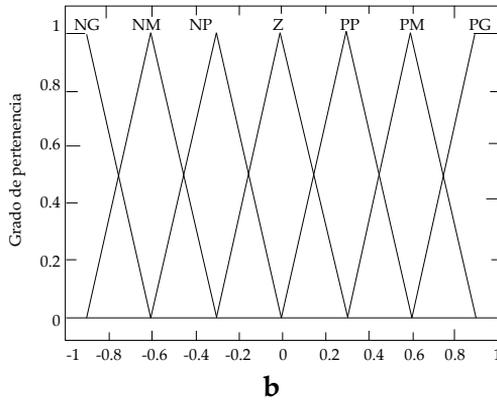
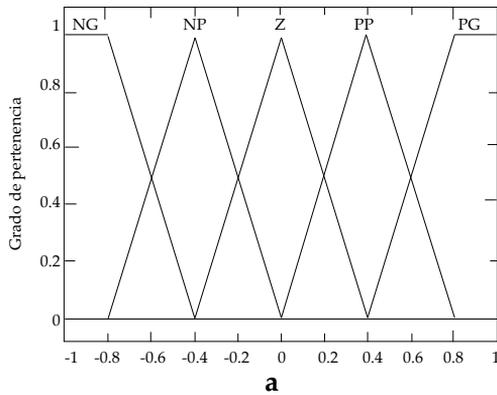


Figura 3
Variables y valores lingüísticos para (a) las variables de entrada, y para (b) la variable de salida, el fis

C. El objetivo de la investigación

El objetivo de la investigación es ofrecer un banco de ecuaciones para el ajuste de los parámetros de escalamiento de un FLC tipo PI, identificando la respuesta dinámica del proceso por controlar como un modelo FOPDT. Para flexibilizar el diseño de la estrategia, se dispone de un factor de escalamiento a la salida del FLC, que servirá para ajustar el esfuerzo de control de la estrategia de acuerdo con el criterio del supervisor de planta. Al contar con las ecuaciones, y una vez implementado el FLC escalable, cualquier clase de ajuste que sea necesario aplicar al esfuerzo de control siempre se podrá realizar en línea con el proceso, y de forma tan sencilla como seleccionar un valor numérico real.

3. DISEÑO Y ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO

A. Primer ciclo experimental

El experimento diseñado para la obtención de las ecuaciones de sintonización estuvo integrado por cinco factores de interés: (a) los tres primeros corresponden a los parámetros que identifican un modelo FOPDT [8], (b) el cuarto factor fue el período de muestreo, dado que el FLC es un controlador digital y su ajuste puede impactar la sintonización, y (c) el quinto se denominó Γ o factor de supresión, incluido para regular el esfuerzo de control del algoritmo FLC. En la tabla 2 se muestran los factores y los niveles asignados a cada uno de ellos.

Tabla 2
Factores para el diseño experimental

Nivel	K_p	τ	t_d/τ	T/τ	Γ
(0) Bajo	0.5	0.5	0.2	0.05	2
(1) Medio	1.5	2.5	0.6	0.07	5
(2) Alto	2.5	4.5	1.0	0.10	8

El experimento factorial 3^5 ejecutado [4] se dedicó a minimizar una función de costos, con la cual se consideró el error de seguimiento y el esfuerzo de control, tal y como se observa en (1):

$$J(K_e, K_{dc}, K_{dm}) = \int |e(t)| dt + \Gamma \int |\Delta m(t)| dt \quad (1)$$

Los resultados del experimento fueron estudiados a través de un análisis de varianza definido con un intervalo de confianza del 99%. En el análisis se identificaron los efectos de factores principales, e interacciones de segundo

orden de los mismos factores, sobre la sintonización de los parámetros de escalamiento del FLC. Los factores más significativos, a partir de la figura 2, que se identificaron fueron: (a) para K_e fue K_p ; (b) para K_{dc} fueron K_p , t_0/τ , y T/τ ; (c) para K_{dm} fueron K_p , t_0/τ , T/τ y Γ .

Con estos elementos se plantearon diferentes estructuras de sintonización basadas en los resultados del análisis de varianza. A cada estructura se le asociaron diferentes coeficientes, que debieron ser ajustados de forma tal que el rendimiento en lazo cerrado del proceso controlado por un FLC y diseñado a partir de las ecuaciones que se desprenden de esta investigación fuere semejante a las sintonías óptimas que se obtuvieron con el desarrollo del experimento. Para tal efecto se depuraron estos resultados, observando el comportamiento en lazo cerrado del sistema controlado por un FLC.

Tabla 3
Resultados del proceso de optimización de ecuaciones de sintonización para el FLC

Ecuación	Coeficientes			J
	a	b	c	
$K_e = aK_p$	0.041	-	-	0.30
$K_e = K_e = \frac{\tau}{aK_p t_0}$	5	-	-	1.65
$K_e = K_e = \frac{a}{K_p}$	0.038	-	-	0.46
$K_{dc} = K_{dc} = aK_p \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^b \left(\frac{T}{\tau}\right)^c$	0.177	0.328	-0.752	131.64
$K_{dc} = K_{dc} = \frac{a}{K_p} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^b \left(\frac{T}{\tau}\right)^c$	0.177	0.379	-0.767	221.78
$K_{dm} = K_{dm} = \frac{aK_p}{\Gamma} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^b \left(\frac{T}{\tau}\right)^c$	8.285	-1.334	1.303	219.84
$K_{dm} = K_{dm} = \frac{a\Gamma}{K_p} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^b \left(\frac{T}{\tau}\right)^c$	0.128	-1.010	0.353	113.79
$K_{dm} = K_{dm} = \frac{a}{\Gamma K_p} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^b \left(\frac{T}{\tau}\right)^c$	5.110	-1.262	0.654	51.07

Cada resultado fue ponderado con una nota, cuyo máximo fue la unidad, que se le otorgó a aquellos comportamientos semejantes a una respuesta FOPDT. Cualquier comportamiento alejado de éste, y con tendencia a la inestabilidad, fue ponderado gradualmente con una nota inferior a la unidad.

De esta forma, se desarrolló un segundo experimento para minimizar una nueva función de costos a través de la cual se ajustan los coeficientes asociados a cada estructura de sintonización propuesta, de forma que la diferencia ponderada entre el valor óptimo ajustado a cada factor de escalamiento del FLC mediante el primer experimento (K_i^{OPT}) y el valor obtenido por un ajuste a priori de los coeficientes asociados a la ecuación evaluada (K_i^{EQ}) fuera el más pequeño posible. En (2) se tiene el modelo de la función de costos, y en la tabla 3 se muestran los resultados de la minimización de (2).

$$J(a,b,c) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \left(K_i^{OPT} - K_i^{EQ} \right)^2 \quad (2)$$

B. Segundo ciclo experimental

A manera de un segundo conjunto de ecuaciones para la sintonización de un FLC, se procedió a ofrecer, con base en los resultados del experimento anterior, una serie de recomendaciones por parámetro de escalamiento. Para el parámetro K_e se recomendó que su valor guarde relación con el máximo cambio del error esperado; esto es, que el universo de discurso de la variable lingüística $e(n)$ se escale al mayor cambio en el error esperado.

$$K_e = \frac{0.8}{\Delta e_{\max ep} (\%T O)} \quad (3)$$

donde 0.8 corresponde al valor en que el conjunto difuso que representa los valores lingüísticos de los extremos cambia de ser una pendiente a una línea recta paralela al eje del universo de discurso.

En relación con el período de muestreo, experimentalmente se comprobó que un buen comportamiento en lazo cerrado, entendiéndose como semejante a un modelo FOPDT, se obtiene cuando éste se ajusta a una décima parte de la mayor constante de tiempo que exhiba en proceso. Bajo el mismo criterio de comportamiento, para el factor de supresión se recomendó tomar el valor más alto otorgado por el experimento; esto significó contar con unas expresiones de sintonización que ajustan un esfuerzo de control no agresivo.

Con estas recomendaciones se plantearon unas nuevas estructuras de sintonización, cada una de ellas asociadas con unos nuevos coeficientes de ajuste y optimización. Bajo la misma consideración de la ecuación (2), se procedió a reajustar estos parámetros. En la tabla 4 se tienen los resultados de este nuevo ciclo de optimización.

A partir de los resultados obtenidos de un conjunto de pruebas de rendimiento, se concluyó que era necesario corregir las ecuaciones de este segundo banco de sintonización, ya que el rendimiento en lazo cerrado estaba provocando un sobre impulso mayor al 40%. Como factor de corrección, se empleó el valor de 0.3. En la tabla 5 se presentan los bancos de sintonización definitivos.

Tabla 4
Estructuras para el segundo banco de ecuaciones de sintonización

Ecuación	Coeficientes		WSSE
	a	b	
$K_{dc} = \frac{a}{K_p} \left(\frac{t_0}{t} \right)$	1.011	-	5.185
$K_{dc} = \frac{a}{K_p} \left(\frac{t_0}{t} \right)^b$	0.835	0.358	4.005
$K_{dm} = \frac{a}{K_p} \left(\frac{t}{t_0} \right)$	0.374	-	1.283
$K_{dm} = \frac{a}{K_p} \left(\frac{t_0}{t} \right)^b$	0.436	-0.9	1.229

Tabla 5
 Bancos de ecuaciones de sintonización para
 los parámetros de escalamiento de un FLC

Primer banco de ecuaciones	Segundo banco de ecuaciones
$K_e = 0.0407K_p$	$K_e = \frac{0.8}{\Delta e_{\max e p}(\%T O)}$
$K_{dc} = 0.1773 K_p \cdot \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{0.3284} \cdot \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-0.7521}$	$K_{dc} = \frac{2.782}{K_p} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{0.36}$
$K_{dm} = \left(\frac{5.1}{\Gamma \cdot K_p}\right) \cdot \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1.2624} \cdot \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{0.6544}$	$K_{dm} = \frac{0.1306}{K_p} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-0.9}$

4. PROCESO DE PRUEBA

Como proceso de prueba para evaluar el rendimiento del FLC sintonizado con las ecuaciones de la tabla 5, se escogió un modelo de neutralización de pH, como el que se observa en la figura 4. Al reactor ingresan tres fluidos: fluido ácido (q1), fluido básico (q3) y un buffer (q2). El objetivo es controlar el nivel del pH dentro del tanque, midiéndolo en la tubería de salida y regulando el flujo de fluido básico [12]. La respuesta dinámica de la variable controlada, frente a un estímulo tipo paso escalón en la señal de control, se caracterizó como un modelo FOPDT, y con estos factores se evaluó el funcionamiento del FLC.

En la figura 5 se observa un contraste entre la estrategia FLC: (a) sintonizada a través del ensayo y error, (b) a través de las ecuaciones de sintonización obtenidas, y (c) el rendimiento con un controlador en modo PID. Se observa cómo el comportamiento del proceso controlado por un FLC sintonizado a través del segundo banco de ecuaciones generó un índice de seguimiento significativamente mayor que las demás estrategias, pero al observar la convergencia al punto de operación indicado logró reducir sensiblemente el sobre impulso y las oscilaciones de baja amplitud alrededor de la nueva condición de proceso.

Se indujo una perturbación correspondiente a una disminución del 20% en el caudal del fluido básico. Los resultados presentados en la figura 6 muestran comportamiento en lazo cerrado, controlador por un FLC sintonizado a través

del segundo banco de ecuaciones, que corrige el valor de la variable de proceso exhibiendo la mayor desviación de la prueba.

Esto permite afirmar que las ecuaciones de sintonización obtenidas facilitan el diseño de un controlador FLC tipo PI para control servo; es decir, para cambios en el punto de operación.

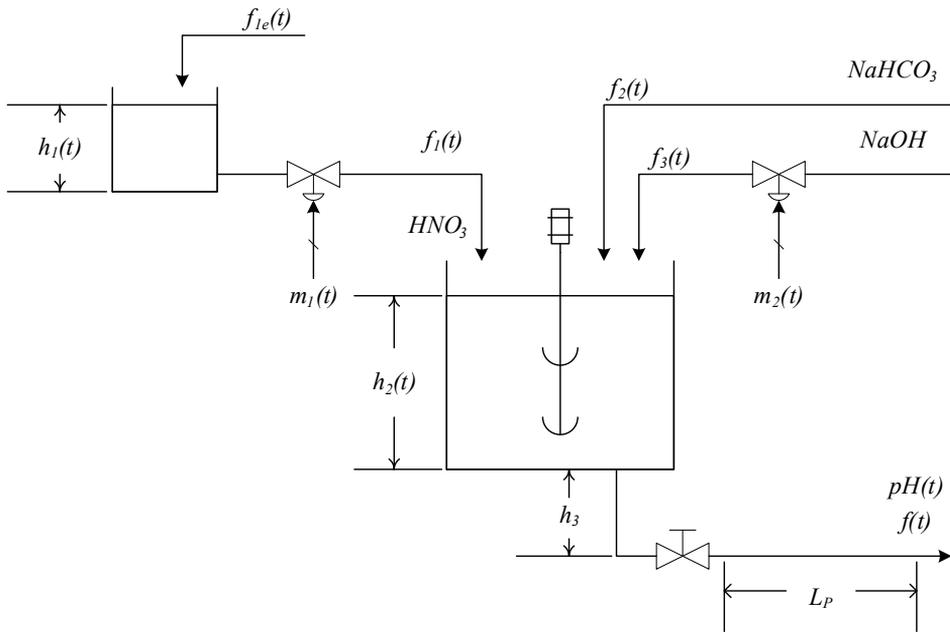


Figura 4
Tanque de neutralización de pH

De ambas figuras se concluye que el rendimiento del FLC sintonizado a través de los bancos de ecuaciones propuestos por la investigación, ofrecen un satisfactorio rendimiento global y una mejora sensible en la estabilidad del lazo cerrado, que se manifiesta en una disminución en la cantidad de oscilaciones alrededor del punto de operación.

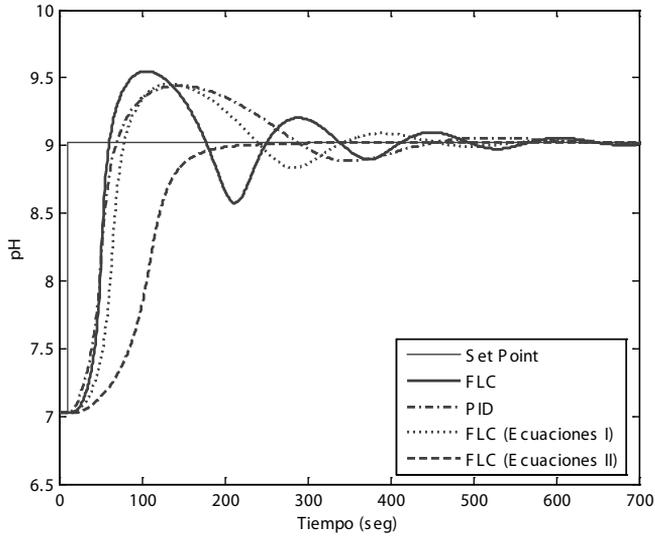


Figura 5
Contraste estrategias en el tanque de mezclado, frente a un cambio en el punto de operación

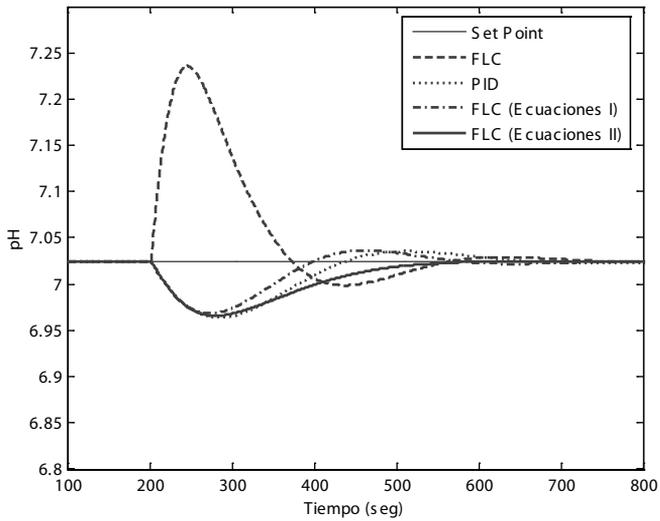


Figura 6
Contraste entre estrategias, para una perturbación en el fluido básico del proceso

CONCLUSIONES

Las ecuaciones de sintonización obtenidas reducen el tiempo necesario para ajustar los factores de escalamiento de un FLC. A diferencia de otras expresiones de sintonización, las ecuaciones obtenidas no partieron del supuesto de que éstas debían parecerse a las expresiones de sintonización del PID por el hecho de ser estrategias de control lineal, sino que se componen de los factores dinámicos de un proceso caracterizado como un modelo FOPDT.

El esfuerzo de control FLC ajustado a través de las expresiones consignadas en la tabla 5 no es inflexible; es decir, no es único; se puede ajustar conservando los valores de los parámetros del modelo FOPDT de acuerdo con el peso que quiera dársele al esfuerzo de control que se requiera o que se permita. El ingeniero de procesos cuenta ahora con unas expresiones de sintonización para la estrategia FLC, que puede ajustar al esfuerzo de control de acuerdo con las necesidades y demandas, sin tener que recurrir siempre a un ajuste en la forma como se dispusieron los conjuntos difusos para cada variable lingüística.

Como un siguiente paso en el proceso de sintonización para controladores digitales difusos escalables, convendría extender la búsqueda a procesos en los que la razón tiempo muerto a constante de tiempo sea mayor que la unidad, y evaluar rendimiento y consumo de recursos al implementarse en un dispositivo de tecnología dura.

REFERENCIAS

- [1] BRAAE M., RUTHERFORD DA. Selection of parameters for a fuzzy logic controller. *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 2, No. 3, 1979. pp. 185–199.
- [2] ANDRÉS A, VIVIUS G, SANJUÁN M ME. Ecuaciones de sintonización para controladores digitales difusos, en realimentación sencilla basados en la identificación de proceso como un modelo FOPDT. *Tesis profesional*.
- [3] KLIR GJ, YUAN B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*. Prentice Hall PTR, 1995. 575 p.
- [4] Douglas C. MONTGOMERY. *Design and analysis of experiments*. 5ª edición. Jhon Wiley and Sons, Inc. 2001. 685 p.
- [5] MUDI RK, PAL NR. A self-tuning fuzzy PI controller. *Fuzzy Sets and Systems* 115 (2000) 327–338.
- [6] PASSINO KM, YURKOVICH S. *Fuzzy control*. Addison Wesley Lonhman, Inc. 1997. 475 p.
- [7] SANTOS M, DE LA CRUZ JM, DORMIDO S, DE MADRID AP. Between fuzzy-PID and PID-conventional controllers: A good choice, *Proceedings of the 1996 Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society*, Berkley, IEEE, 1996 123–127.

- [8] SMITH C, CORRIPIO A. *Principles and practice of automatic process control*. Segunda edición. Jhon Wiley and Sons, 1997. 770 p.
- [9] TSANG KM. Auto-tuning of fuzzy logic controllers for self-regulating processes. *Fuzzy Sets and Systems* 120 (2001) 169–179.
- [10] VERBRUGGEN HB, BRUJIN PM. Fuzzy control and conventional control: What is (and can be) the real contribution of fuzzy systems? *Fuzzy Sets and Systems* 90 (1997) 151–160.
- [11] YURKOVICH S, PASSINO KM. A laboratory course on fuzzy control. *IEEE Transactions on Education*. Vol 42, no 1, February 1999.
- [12] HENSON, M.A. and SEBORG, D.E. Adaptive nonlinear control of a pH neutralization process. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 2 No. 3 (August, 1994); p. 169–182.