

Controlador de modelo interno con filtro difuso (IMCFD)

Yohn García*, Marco Sanjuán**, Carlos Smith***

Resumen

La constante de filtrado de un controlador de modelo interno (IMC) ha sido reemplazada por una variable de filtrado usando lógica difusa. Esta variable de filtrado aumenta su valor en los casos en que la variable controlada se aleja de su valor deseado, ayudando con esto a evitar oscilaciones excesivas que pueden conllevar a problemas de estabilidad en el lazo de control del controlador convencional IMC. El desempeño del controlador modificado (IMCFD) se prueba en simulaciones de procesos no lineales.

Palabras claves: Lógica difusa, controlador de modelo interno (IMC), procesos no lineales.

Abstract

The filter constant of the internal model controller (IMC) has been replaced by a fuzzy variable using fuzzy logic. This fuzzy variable increases its value for the cases when the controlled variable gets away from its set point, avoiding excessive oscillations, which could become in stability problems in the control system provided by the conventional IMC. The performance of the modified IMC (IMCFD) is tested on simulations of nonlinear processes.

Key words: Fuzzy logic, internal model controller (IMC), nonlinear processes.

Fecha de recepción: 12 de abril de 2005
Fecha de aceptación: 4 de junio de 2005

* Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes (ULA), Mérida 5101 (Venezuela).
Corresponding author. Tel.: [58] 0414-3746216; Fax:[58] 274-402954. yohn@ula.ve.

** Doctor en Filosofía en Ciencias de la Ingeniería. Profesor investigador del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte. Dirección postal: A.A. 1569, Barranquilla (Colombia).
msanjuan@uninorte.edu.co

*** Chemical Engineering Department, University of South Florida (Tampa), FL 33620, USA

1. INTRODUCCIÓN

Los ampliamente conocidos controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) siguen siendo hoy en día los controladores más usados en aplicaciones industriales [1]. Estos controladores poseen una estructura sencilla y son relativamente fáciles de sintonizar. Sin embargo, por su naturaleza lineal, el buen desempeño de los controladores PID se ve afectado en el control de procesos reales que a menudo presentan no linealidades, dinámica de orden superior y la inclusión de tiempo muerto.

Por otro lado, el controlador de modelo interno (IMC) es una técnica de control basado en el modelo del proceso que ha manifestado excelentes resultados tanto en el sistema control del proceso frente a las perturbaciones como en la robustez del mismo [2]. Sin embargo, el IMC, al igual que los controladores PID, también ha sido diseñado bajo la estructura de un modelo lineal, y ante la presencia de procesos no lineales su buen desempeño se ve disminuido. A fin de enfrentar las no linealidades de los procesos, en los últimos años se ha recurrido al uso de la inteligencia artificial, y la lógica difusa es una opción en la búsqueda de soluciones a este tipo de inconvenientes.

La Lógica Difusa es una técnica que usa los principios de razonamiento y lenguaje de manera similar a como lo hacen los humanos con el fin de resolver problemas [3]. Esta técnica, además de proporcionar los medios para tratar con funciones no lineales, cuenta con una flexibilidad y simplicidad que la hacen viable para su aplicación en muchos problemas industriales [4, 5, 6].

En el campo de control de procesos, el *boom* de la aplicación de lógica difusa con éxito comenzó en 1974 cuando Mandani controló una máquina de vapor usando esta técnica [7]. En años recientes ha sido aplicada exitosamente en el área del control de procesos no lineales [8, 9].

Recientes investigaciones han mostrado que combinar lógica difusa con IMC mejora el desempeño de la estrategia de control sobre una variedad de sistemas lineales [10, 11].

Este trabajo investigativo está enfocado en mejorar el desempeño de IMC convencional en procesos no lineales usando lógica difusa.

2. EL CONTROLADOR DE MODELO INTERNO (IMC)

La figura 1 representa la estructura del controlador de modelo interno (IMC). Tres funciones de transferencia más la planta misma constituyen el esquema general de la estrategia de control del IMC.

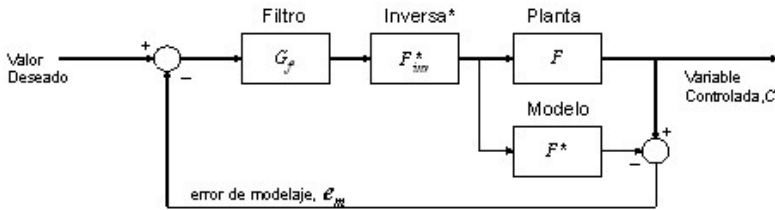


Figura 1. Esquema del controlador de modelo interno IMC

Las funciones de Transferencia involucradas en el esquema anterior pueden ser definidas mediante las siguientes expresiones en términos de Laplace:

$$\text{Modelo: } F^* = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1}$$

$$\text{Inversa*}: F_{inv}^* = \frac{\tau s + 1}{K}$$

$$\text{Filtro: } G_f = \frac{1}{\tau_f s + 1}$$

Donde K , τ y t_0 son los parámetros que determinan las características del proceso, y τ_f es la constante de filtrado para el controlador IMC. La función de transferencia del modelo, F^* , proviene de una ecuación diferencial de primer orden más tiempo muerto (POMTM) que identifica el comportamiento de la planta.

La figura 2 muestra la estructura de la planta del sistema de control señalado en la figura 1. Dos funciones de transferencia pueden ser asumidas para la planta en sí: la función de transferencia del proceso (G_p) y la función de transferencia de una perturbación en particular (G_D).

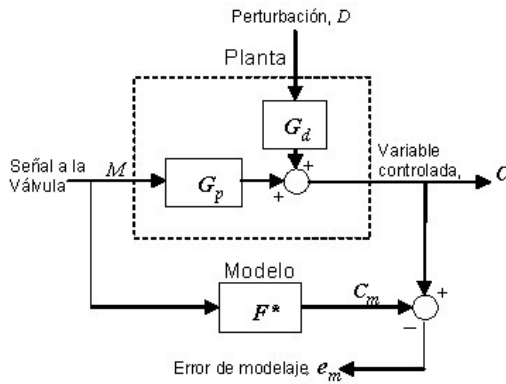


Figura 2. Esquema de la planta conteniendo las funciones de transferencia del proceso (G_p) y de una perturbación en particular (G_d) para el IMC

3. EL CONTROLADOR IMC CON FILTRO DIFUSO (IMCFD)

El controlador IMCFD consiste en agregar un módulo de lógica difusa al convencional IMC, el cual actúa cuando la variable controlada se aleja de su valor deseado (Punto de control), y de esta manera evita que se originen excesivas oscilaciones. Su incorporación al IMC convencional puede observarse en la figura 3. Este módulo es denominado Módulo de filtrado difuso (MFD). Las entradas al MFD son el error (e) y su cambio (Δe). La salida de este módulo lo constituye el incremento requerido en la constante de filtrado ($\Delta\tau_f$).

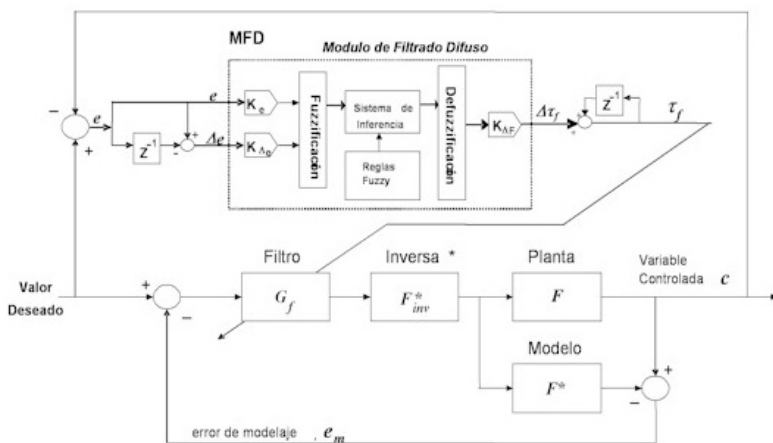


Figura 3. Esquema del controlador IMCFD

Para adaptar el IMCFD al proceso se requiere, además del modelo del proceso, tres factores de escalamiento, dos para las entradas (K_e y $K_{\Delta e}$) y uno para la salida ($K_{\Delta F}$).

La figura 4 muestra las regiones donde actúa el módulo difuso. Para evitar las oscilaciones excesivas, la constante de filtrado, τ_f , incrementa su valor cuando la variable controlada se aleja de su valor deseado, disminuyendo así la agresividad del controlador. Por arriba del punto de control, tanto el error (e) como su cambio (Δe) tienen signos negativos; por debajo del valor deseado ambos tienen signos positivos. Esta es la condición que se aplica en el modulo de lógica difusa (MFD) en el controlador IMCFD. En otras palabras, las acciones de compensación se toman en el primero y tercer cuadrante del plano de fase del error.

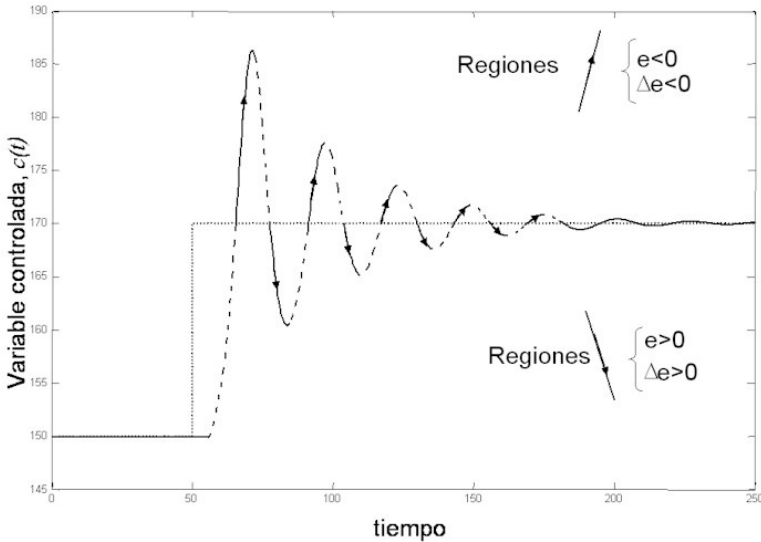


Figura 4. Regiones en la respuesta donde actúa el modulo difuso MFD

La tabla 1 contiene la matriz de información que usa el MFD para determinar el incremento necesario en la constante de filtrado ($\Delta\tau_f$). Los significados de las variables lingüísticas presentados en la tabla 1 son: Positivo Alto (PA), Positivo Medio (PM), Positivo Bajo (PB), Cero (Z), Negativo Bajo (NB), Negativo Medio (NM) y Negativo Alto (NA). Las reglas de la tabla 1 fueron escogidas con la finalidad de corregir el valor de la constante de filtrado cuando la variable controlada se aleja de su valor deseado.

Tabla 1
Reglas utilizadas por el MFD

$\Delta_{e e}$	NA	NM	NB	Z	PB	PM	PA
NA	PA	PA	PM	Z	Z	Z	Z
NM	PA	PM	PB	Z	Z	Z	Z
NB	PM	PB	Z	Z	Z	Z	Z
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PB	Z	Z	Z	Z	Z	PB	PM
PM	Z	Z	Z	Z	PB	PM	PA
PA	Z	Z	Z	Z	PM	PA	PA

Las figuras 5 y 6 corresponden a las representaciones gráficas de las funciones de membresía para las entradas y salidas del MFD. Cinco funciones de membresía triangulares y dos funciones de membresía trapezoidales son usadas para clasificar las variables lingüísticas en las entradas ($e, \Delta e$). Tres funciones de membresía triangulares y una función de membresía trapezoidal son requeridas para la salida ($\Delta\tau_p$).

La figura 7 es la representación gráfica de la superficie generada por la salida del módulo difuso en función de sus dos entradas.

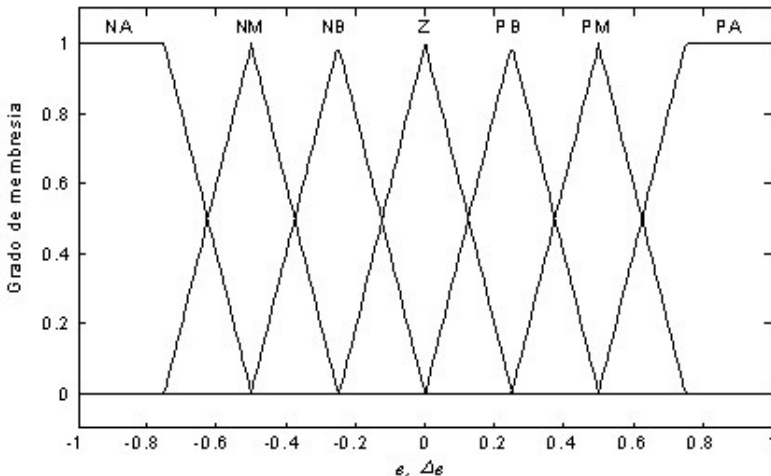


Figura 5. Funciones de membresía para las entradas del MFD

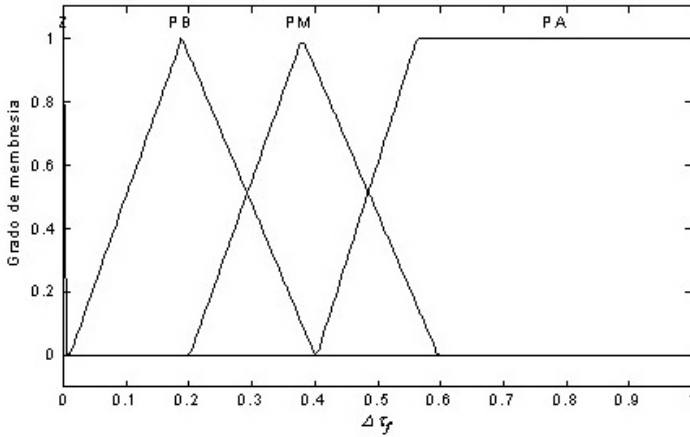


Figura 6. Funciones de membresía para la salida del MFD

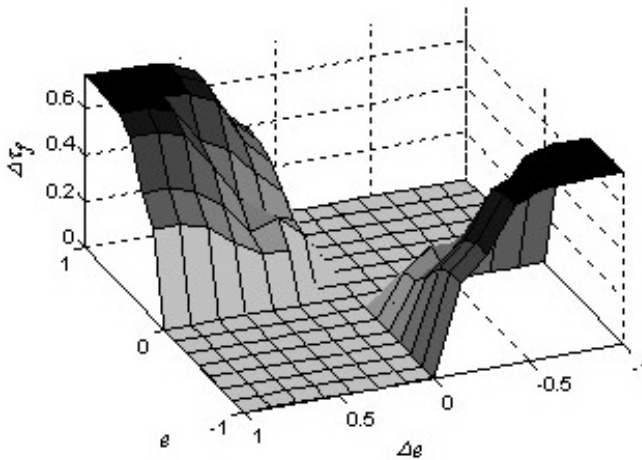


Figura 7. Superficie generada por el MFD

4. RESULTADOS

4.1. Desempeño del IMCFD sobre un modelo de primer orden como planta

Los resultados reportados en este artículo se basan en simulaciones realizadas con Simulink 5.0 de Matlab 6.5.

La planta del sistema está constituida por dos funciones de transferencia: una ecuación diferencial de primer orden más tiempo muerto (POMTM) para el proceso (G_p) y otra con la misma dinámica pero sin el retraso del tiempo muerto para la perturbación (G_D).

$$G_P = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} = \frac{2e^{-3s}}{5s + 1}$$

$$G_D = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} = \frac{1}{5s + 1}$$

La función de transferencia de la planta que se muestra en la figura 8 corresponde a la función de transferencia del proceso (G_p) en ausencia de perturbaciones. Esta figura también contiene una serie de curvas que muestran cómo responde el controlador IMC para diferentes valores de la constante de filtrado frente a un cambio en el punto de control de 10. Para simular un efecto no lineal se ha incrementado el tiempo muerto en un 50%.

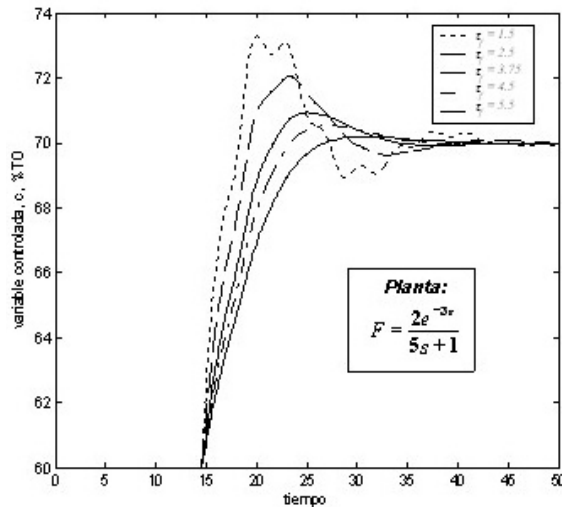


Figura 8. Respuestas del controlador IMC para diferentes valores de τ_f .

En la figura 8 se observa que mientras más pequeño es el valor de la constante de filtrado, la respuesta del control proporcionada por el IMC tiene un mayor sobrepaso, lo cual se traduce en términos de inestabilidad para futuras perturbaciones. Para valores altos de la constante de filtrado, la respuesta del controlador se hace muy lenta. Como criterio de sintonización de la constante de filtrado en el IMC se tomará aquel valor que no sobrepase más del 10% de desviación en la variable controlada para un cambio de magnitud 10 en el punto de control, cuando el tiempo muerto es incrementado en un 50%. Para la función de transferencia en estudio se tiene que $\tau_f = 3.75$.

La figura 9 muestra las respuestas de los controladores convencionales IMC y PID para un sistema lineal donde ninguno de los parámetros del sistema manifiesta cambio alguno. El controlador PID ha sido sintonizado utilizando las ecuaciones de síntesis de Dahlin [1]. Estas ecuaciones producen respuestas más suaves que las obtenidas por las ecuaciones de sintonía de Ziegler-Nichols, lo que las hacen más viables para trabajar en procesos con tiempo muerto [1,12].

Los parámetros de sintonización del PID son: $K_c = 0.6944 \%CO/\%TO$, $\tau_i = 5\text{min}$ y $\tau_d = 1.5\text{min}$; y la constante de filtrado para el IMC es 3.75.

La magnitud de la perturbación (D) en todos los casos es $D = +10$ a los 250min y $D = +10$ a los 500min.

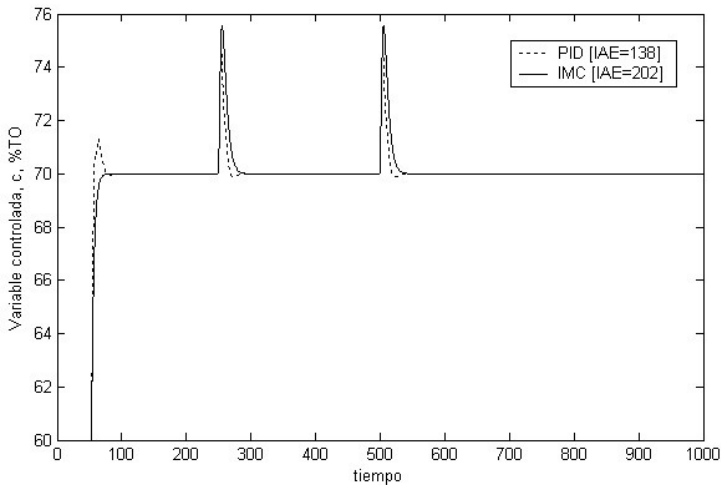


Figura 9. Respuestas del PID y del IMC para un cambio en el punto de control, seguido de dos perturbaciones en un proceso lineal

En la figura 9 se puede apreciar la similitud entre el controlador IMC y el PID en un proceso lineal. El valor obtenido del Integral Absoluto del Error (IAE) para el IMC es mayor en comparación con el obtenido para el PID; sin embargo, este último muestra un mayor sobrepaso en el cambio del punto de control, lo que hace al PID más susceptible a problemas de inestabilidad.

La figura 10 muestra las respuestas de los controladores IMC y PID para un proceso no lineal. El tiempo muerto ha sido incrementado gradualmente para simular no linealidades en el proceso. Se puede apreciar claramente

cómo el IMC supera al PID frente a los problemas de estabilidad cuando se ha incrementado el tiempo muerto del proceso. El valor del IAE del PID en este caso es muy superior (3 veces mayor) al valor del IAE del IMC, lo que da una idea de la robustez del IMC frente al PID bajo estas condiciones.

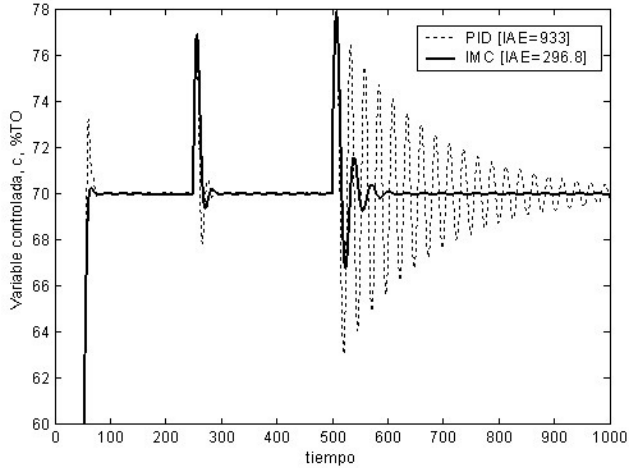


Figura 10. Respuestas del PID y del IMC frente a cambios de tiempo muerto en la planta. +30% a los 50min, +35% a los 250min y +40% a los 500min

Los controladores convencionales IMC y PID han sido diseñados para procesos lineales; al cambiar uno o cualquiera de los parámetros del proceso, la estabilidad del sistema de control puede verse seriamente afectada, tal como se ha mostrado en la figura 10.

Para cambios más severos en las condiciones de operación, las figuras 11, 12, 13 y 14 muestran el desempeño de los controladores IMC y IMCFD ante sistemas altamente no lineales.

La figura 11 muestra a) la variación gradual en la ganancia del proceso +70% a los 50min, +80% a los 250min y +20% a los 500min, b) el desempeño de los controladores IMC y el IMCFD, y c) la variación de la constante de filtrado para ambos controladores.

La figura 12 muestra a) la variación gradual del de la constante de tiempo del proceso, -50% a los 50min, -60% a los 250min y -45% a los 500min, b) el desempeño de los controladores IMC y el IMCFD, y c) la variación de la constante de filtrado para ambos controladores.

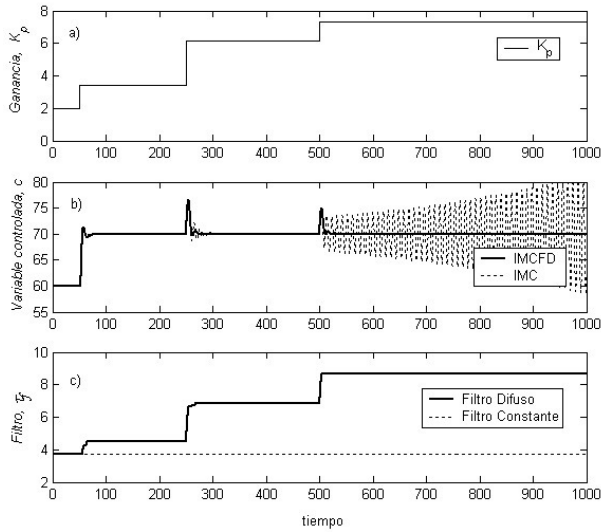


Figura 11. Respuestas del IMC y del IMCFD frente a cambios en la ganancia del proceso

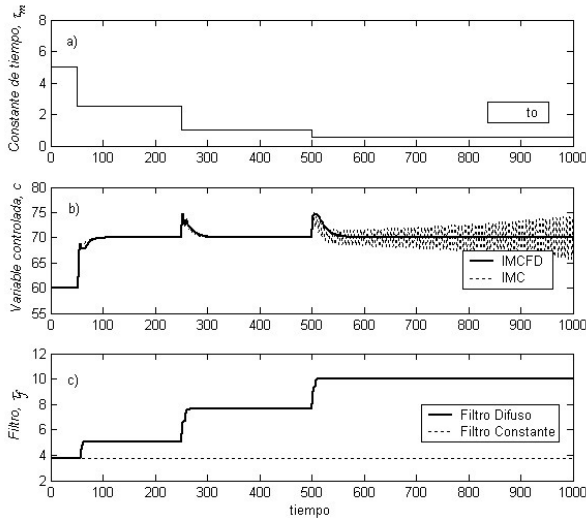


Figura 12. Respuestas del IMC y del IMCFD frente a cambios en la constante de tiempo del proceso

La figura 13 muestra a) la variación gradual del tiempo muerto, +50% a los 50min, +55% a los 250min y +60% a los 500min, b) el desempeño de los controladores IMC y el IMCFD, y c) la variación de la constante de filtrado para ambos controladores.

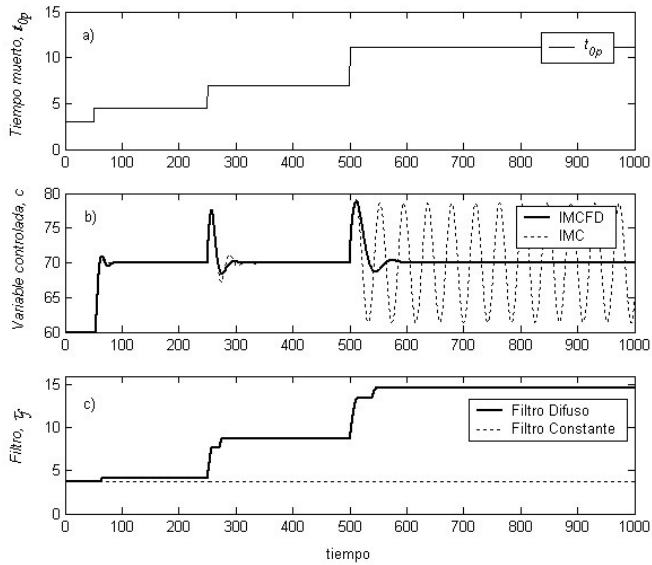


Figura 13. Respuestas del IMC y del IMCFD frente a cambios en el tiempo muerto del proceso

La figura 14 muestra el desempeño de los controladores IMC y el IMCFD frente todas las variaciones de los parámetros realizadas en las figuras 11, 12 y 13.

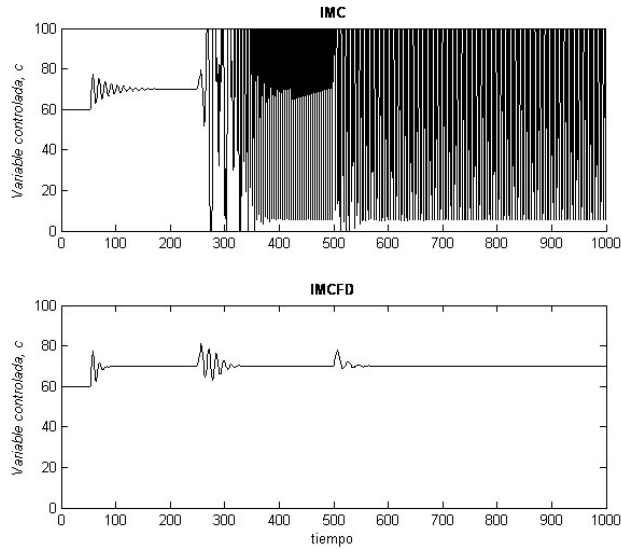


Figura 14. Respuestas del IMC y del IMCFD frente a los cambios en los parámetros del proceso mostrados en las figuras 11, 12 y 13

La figura 15 ilustra cómo la constante de filtrado debe aumentar (filtro difuso) para compensar los cambios en los parámetros del proceso de la figura 14, y así mantener la estabilidad del sistema. Esta es la acción proporcionada por el IMCFD.

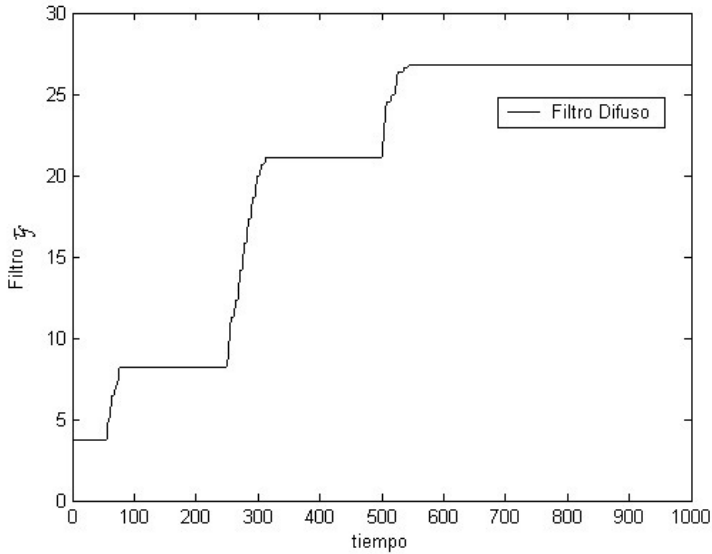


Figura 15. Valor de la constante de filtrado del IMCFD (filtro difuso) para superar los problemas de estabilidad presentados en figura 14

En todos los casos anteriores, los valores de los factores de escalamiento utilizados en las entradas del modulo difuso MFD son: $K_e = 0.45$ y $K_{\Delta e} = 15$, y el factor de escalamiento a la salida es $K_{\Delta F} = 0.033$. Estos valores fueron determinados mediante ensayos de prueba y error para obtener un mínimo IAE del desempeño del controlador IMCFD en la figura 13.

4.2. Desempeño del IMCFD sobre un proceso real

El proceso seleccionado es el tanque de mezclado mostrado en la figura 16. El tanque recibe dos corrientes: una corriente de fluido caliente $W_1(t)$ y una corriente de fluido frío, $W_2(t)$. La temperatura de salida se mide a 125 pies desde el tanque. Para el desarrollo del modelo matemático se considerará constante el volumen en el tanque, el mezclado es perfecto y la tubería se encuentra bien aislada térmicamente.

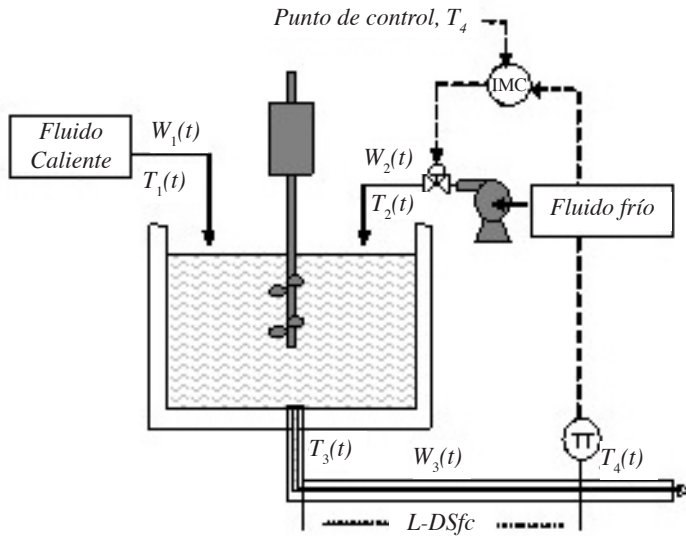


Figura 16. Tanque de mezclado

El transmisor de temperatura tiene un rango de 100 a 200 F. La tabla 2 contiene la información acerca de las condiciones de operación del proceso en estudio en dos sistemas de unidades.

Tabla 2
Condiciones de operación

Variable	Valor	Valor
W_1	250.00 lbm/min	1.892 kg/s
W_2	191.17 lbm/min	1.447 kg/s
C_{p1}	0.8 Btu/lbm-F	3.344 kJ/(kg.K)
C_{p2}	1.0 Btu/lbm-F	4.180 kJ/(kg.K)
C_{p3}, C_v	0.9 Btu/lbm-F	3.762 kJ/(kg.K)
$PC(T_4)$	150F	338.889 K
T_1	250F	394.444 K
T_2	50F	283.333 K
T_3	150F	338.889 K
ρ	62.4 lbm/ft ³	1000 kg/m ³

V	15 ft ³	0.425 m ³
TO	50 %TO	50 %TO
V_p	0.4779	0.4779
C_{VL}	12 gpm/psi ^{0.5}	$9.118 * 10^{-6} (m^3 / s) Pa^{0.5}$
ΔP_v	16 psi	$1.103 * 10^5 Pa$
τ_T	0.5 min	30 s
τ_{Vp}	0.1 min	6 s
A	0.2006 ft ²	0.019 m ²
L	125 ft	38.1 m
m	47.79%CO	47.79%CO

A continuación se muestran las ecuaciones que conforman el modelo matemático del proceso:

- Balance de masa en el tanque de mezclado:

$$W_1(t) + W_2(t) - W_3(t) = 0$$

- Balance de energía:

$$W_1(t)Cp_1T_1(t) + W_2(t)Cp_2T_2(t) - W_3(t)Cp_3T_3(t) \\ = V\rho C_v \frac{d}{dt}[T_3(t)]$$

- Relación entre la temperatura a la salida del tanque y la temperatura en la localización del sensor:

$$T_4(t) = T_3(t - t_0)$$

- Tiempo muerto variable:

$$t_0 = \frac{LAp}{W_3(t)}$$

- Transmisor de temperatura:

$$\tau_T \frac{d}{dt}[TO(t)] + TO(t) = 1 * (T_4(t) - 100)$$

- Posición de la válvula:

$$\tau_{Vp} \frac{d}{dt}[V_p(t)] + V_p(t) = 0.01m(t)$$

- Ecuación de la válvula:

$$W_2(t) = \frac{500}{60} C_{VL} V_p(t) \sqrt{G_f \Delta P_V}$$

Donde

- $W_1(t)$ = masa de fluido caliente, lbm/min
- $W_2(t)$ = masa de fluido frío, lbm/min
- $W_3(t)$ = masa de fluido a la salida del mezclador, lbm/min
- C_p = capacidad calorífica del líquido a presión constante, Btu/lb-F
- C_v = capacidad calorífica del líquido a volumen constante, Btu/lb-F
- $T_1(t)$ = temperatura del fluido caliente, F
- $T_2(t)$ = temperatura del fluido frío, F
- $T_3(t)$ = temperatura del líquido en el tanque de mezclado, F
- $T_4(t)$ = temperatura $T_3(t)$ retrasada por t_0 , F
- t_0 = tiempo muerto o tiempo de retraso, min
- ρ = densidad del fluido, lbm/ft³
- V = volumen del líquido en el tanque, ft³
- $TO(t)$ = señal de salida del transmisor de temperatura, %TO
- $V_p(t)$ = posición de la válvula, fracción de 0 (válvula cerrada) a 1 (válvula abierta)
- $m(t)$ = señal de salida del controlador, %CO
- C_{VL} = coeficiente de flujo de la válvula, gpm/psi^{0.5}
- G_f = gravedad específica, sin dimensiones
- ΔP_v = caída de presión a través de la válvula, psi
- τ_T = constante de tiempo del sensor de temperatura, min
- τ_{Vp} = constante de tiempo de la válvula, min
- A = área transversal de la tubería, ft²
- L = longitud de la tubería, ft.

En la figura 17 se muestra el desempeño del PID, del IMC y del IMCFD enfrentando dos cambios en el punto de control, seguido de dos perturbaciones. El punto de control cambia de 150F a 160F a los 50 min, y luego a 180F a los 200 min. La temperatura del fluido caliente cae en 20F a los 400 min y su flujo cae en 10% a los 600 min.

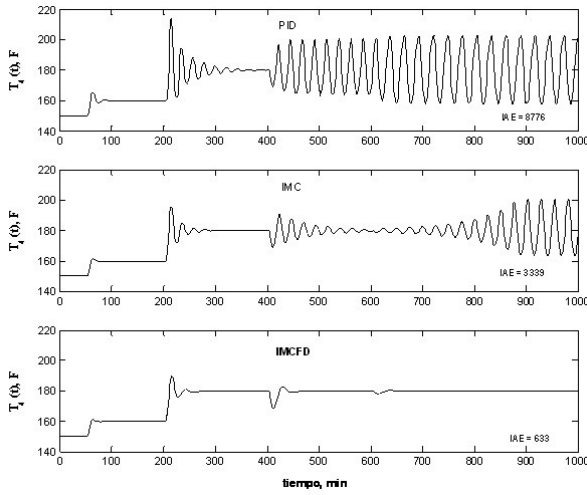


Figura 17. Respuestas del PID, del IMC y del IMCFD a cambios en el punto de control y a perturbaciones en el sistema

En la figura anterior puede apreciarse cómo los controladores convencionales PID e IMC son incapaces de mantener la estabilidad del sistema de control. Por su parte, en controlador IMCFD es el único que lleva el sistema a la estabilidad presentando más bajo valor de IAE. El PID presenta el más bajo rendimiento de los tres controladores.

La figura 18 muestra el cambio en la constante de filtrado del controlador IMCFD a manera de compensar las no linealidades del sistema.

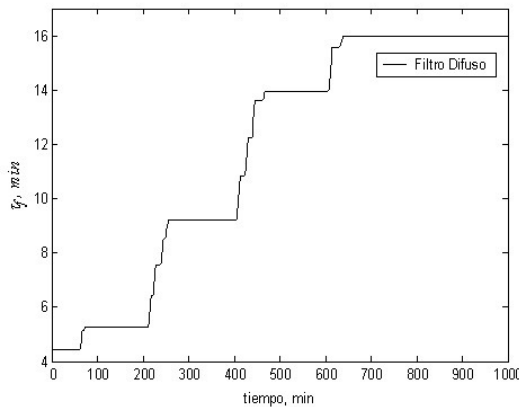


Figura 18. Valor de la constante de filtrado difuso del IMCFD para superar los problemas de inestabilidad presentados en figura 16

Basado en los parámetros del proceso para el tanque de mezclado: $K = -0.785$, $\tau = 2.0836$ min y $t_0 = 3.746$ min y tomando los criterios de sintonización señalados en la sección 4.1, los parámetros de sintonización del PID son: $K_c = -0.5905$ %CO/%TO, $\tau_i = 2.0838$ min y $\tau_D = 1.8730$ min, y la constante de filtrado para el IMC es 4.10

Los valores de los factores de escalamiento utilizados en las entradas del módulo difuso MFD son: $K_e = 0.7$ y $K_{\Delta e} = 15$, y el factor de escalamiento a la salida es $K_{\Delta F} = 0.075$. Estos valores fueron determinados mediante ensayos de prueba y error para obtener un mínimo IAE del desempeño del controlador IMCFD en la figura 17.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN A FUTURO

El uso de lógica difusa en este trabajo ha permitido modificar el valor de la constante de filtrado en la estructura de un controlador de modelo interno (IMC) cuando la variable de control se aleja de su punto de control. Esta particularidad le da al IMC una capacidad de superar problemas en la estabilidad del sistema de control por la presencia de no linealidades.

Aunque está claro que el incremento en la constante de filtrado del controlador convencional IMC hace el controlador más eficiente (controlador IMCFD), también es bueno señalar que debe realizarse un estudio que permita calcular el valor de la constante de filtrado para el controlador IMCFD bajo las nuevas condiciones de operación, y así evitar que el sistema de control se torne demasiado lento para futuras perturbaciones, debido al incremento en la constante de filtrado.

Para estudios futuros se recomienda utilizar estructuras de lógica difusa como los sistemas de inferencia de Takagi Suegeno para la identificación de los parámetros del proceso, lo cual representaría una ayuda en la resintonización de la constante de filtrado bajo las nuevas condiciones de operación.

Referencias

- [1] SMITH, C. & CORRIPIO, A. (1997). *Principles and practice of automatic process control*. John Wiley and Sons.
- [2] MORARI & ZAFIRIOU (1989). *Robust process control*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- [3] ZADEH. L. (1965). "Fuzzy Sets". *Inform. Control*, vol. 8, 8-353.

- [4] MING KUN, G. *et al.* (1994). A cascade architecture of adaptive fuzzy controllers for inverted pendulums. *IEEE Trans.*, vol. 3, 1514-1519.
- [5] MARTINS, A. & CARVALHO, A. (1997). Contribution of fuzzy logic to control an industrial process. *IEEE Trans.*, vol. 1, 105-110.
- [6] SUGENO, M. (ed.) (1985). *Industrial applications of Fuzzy Control*. North-Holland, Amsterdam.
- [7] RESNICK, L. (1997). *Fuzzy Controllers*. Oxford, Newnes.
- [8] DE SILVA, C.W. (1995). *Intelligent Control-Fuzzy Logic Applications* New York: CRC Press.
- [9] CHEN, C.-L. & KUO, F.-C. (1995). "Design and analysis of a fuzzy logic controller". *Int. J. Systems Sci.*, vol. 26, 1223-1248.
- [10] EDGAR, C.R. & POSTLETHWAITE, B.E. (2002). "Model based control using fuzzy relational models". *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 3 (*IEEE cat n 01ch37297*), 1581-1584.
- [11] GORMANDY, B.A. & POSTLETHWAITE, B.E. (2000). MIMO fuzzy internal model control. *Automatica*, vol. 36 (6), 867-877.
- [12] OSCAR, C. & SMITH, C. (2000). "Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical process". *ISA Transactions* 39, 205-218.