

Ajuste difuso de salida de controladores usando modelo de referencia para un proceso de evaporación de circulación forzada

Juan Pablo Requez Vivas
1398086
juanrequez@gmail.com

Resumen: Se presenta el esquema de control adaptativo de la salida de los controladores PID del proceso de evaporación de circulación forzada. Este esquema de control adaptativo se describe a través de un sistema de inferencia difuso de tipo Takagi-Sugeno y usa la información de un modelo interno de referencia con la finalidad de establecer el comportamiento de cada lazo de control como un lazo simple y lineal, basado en la respuesta al escalón de cada variable involucrada. Se observa como el sistema de inferencia difuso adaptativo es capaz de modificar la salida del controlador PI para que el proceso siga la referencia deseada para cada variable de control de forma independiente.

Palabras clave: Control Adaptativo, Control por Modelo interno, Control Difuso, Control de Procesos de Evaporación, Control Multivariable.

I. INTRODUCCIÓN

Se presenta brevemente el esquema de control por modelo interno y de control adaptativo como referencias a la implementación de un sistema de control difuso que ajusta la salida de controladores PI convencionales. Este sistema de inferencia difuso se desea que pueda separar el comportamiento de cada lazo e imponerle una dinámica lineal a su comportamiento en lazo cerrado.

A. Control por modelo interno (Internal Model Control, IMC)

El Control por Modelo Interno se basa en el principio del modelo interno, que establece que el control solo puede ser logrado si el sistema de control engloba, de forma explícita o implícita, alguna representación del proceso a ser controlado [1].

Si el modelo del proceso es conocido exactamente, y si el modelo se ajusta a ciertas restricciones, entonces es posible hacer un control perfecto del proceso. Sin embargo, en la realidad estas condiciones impuestas no pueden lograrse y es muy difícil tener un modelo perfecto del proceso. Sin embargo, teniendo un modelo imperfecto, puede establecerse una estrategia de control que utilice la desviación del proceso real respecto a la esperada por el modelo.

Si una perturbación $d(s)$ desconocida entra al sistema, entonces la respuesta del proceso puede ser comparada con la respuesta esperada. Esta información puede usarse entonces para corregir la acción de control, como se observa en la Fig. 1.

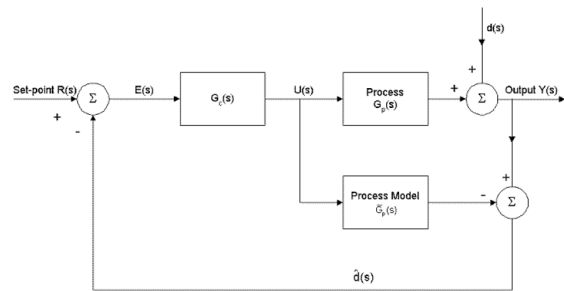


Fig. 1 Diagrama de un sistema de control con modelo interno

B. Control adaptativo

El término de Control Adaptativo es aplicado a aquellas estrategias de control que mide las características dinámicas de la planta en forma continua y automática y las compara con las características deseadas y use esa diferencia para variar algunos parámetros ajustables del sistema o generar una señal actuante, siendo capaz de acomodarse a modificaciones no predecibles del medio. El esquema básico de control adaptativo puede verse en la Fig. 2, que está compuesto de un lazo principal de realimentación negativa en el que actúa un controlador convencional, y de un lazo que mide un índice de funcionamiento que es comparado con un índice deseado y su error es comparado en un mecanismo de adaptación. El mecanismo de adaptación puede actuar directamente sobre el controlador convencional o actuar sobre la señal de control. [2]

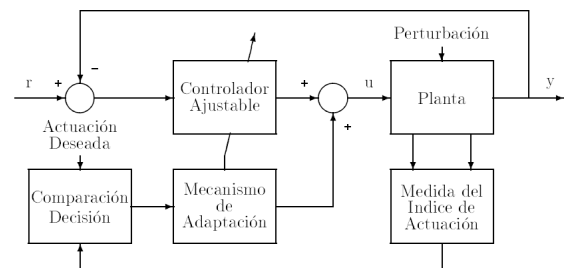


Fig. 2 Diagrama de un sistema de control adaptativo

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A. Modelo del evaporador

En el modelo del evaporador de circulación forzada presentado en [3] [4], la alimentación se mezcla con un gran flujo volumétrico de recirculación de disolución concentrada, y se bombea hacia el intercambiador de calor vertical. En el intercambiador de calor se emplea vapor de agua que condensa en la pared exterior de los tubos. El líquido que pasa por el interior de los tubos, en ebullición, pasa al separador, donde el líquido y el vapor se separan. Parte del líquido concentrado es retirado como producto, mientras la mayor parte es recirculado al sistema. El vapor es condensado por enfriamiento, utilizando agua como refrigerante.

El modelo matemático del evaporador de circulación forzada de tubos verticales descrito por [3], fue obtenido a partir de balances de materia y energía. El modelo está conformado por tres ecuaciones diferenciales y nueve ecuaciones algebraicas mostradas en las ecuaciones de (1) a (12). En la Tabla 1 se presentan las variables dinámicas relacionadas con la descripción del proceso, sus valores en estado estacionario y las unidades de ingeniería en que son expresadas, y se muestran esquemáticamente en la Fig. 3 En la Tabla 2 se listan parámetros que son asumidos como constantes en el modelo.

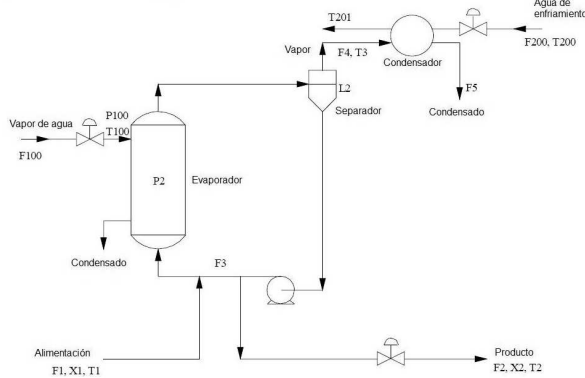


Fig. 3 Diagrama del proceso

Tabla 1. Variables del evaporador [3].

	Descripción	Valor	Unidad
F1	Flujo másico de alimento diluido	10,0	kg/min
F2	Flujo másico de alimento concentrado	2,0	kg/min
F3	Flujo másico de recirculación	50,0	kg/min
F4	Flujo de vapor	8,0	kg/min
F5	Flujo de condensado	8,0	kg/min
X1	Concentración de soluto en el alimento diluido	5,0	%
X2	Concentración de soluto en el alimento concentrado	25,0	%

T1	Temperatura del alimento diluido	40,0	°C
T2	Temperatura del alimento concentrado	84,6	°C
T3	Temperatura del vapor	80,6	°C
L2	Nivel en el separador	1,0	m
P2	Presión de operación del evaporador	50,5	kPa
F100	Flujo de vapor de agua	9,3	kg/min
T100	Temperatura de vapor de agua	119,9	°C
P100	Presión de vapor de agua	194,7	kPa
Q100	Potencia del rehedor	339,0	kW
F200	Flujo de agua de enfriamiento	208,0	kg/min
T200	Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	25,0	°C
T201	Temperatura de salida del agua de enfriamiento	46,1	°C
Q200	Potencia del condensador	307,9	kW

Tabla 2. Parámetros constantes del modelo [3].

	Descripción	Valor	Unidad
ρ_A	Producto de la densidad del líquido y el área de la sección transversal del separador	20,0	kg/m
M	Cantidad de líquido en el evaporador	20,0	kg
C	Constante que convierte la masa de vapor en su equivalente de presión	4,0	kg/kPa
C_p	Capacidad calorífica del líquido y del agua de enfriamiento	0,07	kW/(K.kg.min)
λ	Calor latente de vaporización del líquido y del agua de enfriamiento	38,5	kW/(kg.min)
λ_s	Calor latente del vapor de agua a las condiciones de saturación.	36,6	kW/(kg.min)

$$\rho_A \frac{dL2}{dt} = F1 - F4 - F2 \quad (1)$$

$$\frac{M dX2}{dt} = F1X1 - F2X2 \quad (2)$$

$$C \frac{dP2}{dt} = F4 - F5 \quad (3)$$

$$T2 = 0.5616P2 + 0.3126X2 + 48.43 \quad (4)$$

$$T3 = 0.507P2 + 55 \quad (5)$$

$$F4 = \frac{Q100 - F1 C_p (T2 - T1)}{\lambda} \quad (6)$$

$$T100 = 0.1538 P100 + 90 \quad (7)$$

$$Q100 = UA1 (T100 - T2) \quad (8)$$

$$UA1 = 0.16(F1 + F3) \quad (9)$$

$$F100 = \frac{Q100}{\lambda_s} \quad (10)$$

$$T201 = T200 + \frac{Q200}{F200 C_p} \quad (11)$$

$$F5 = \frac{Q200}{\lambda} \quad (12)$$

El sistema descrito [3] posee ocho entradas y tres salidas y se indica que el apareamiento adecuado para las variables se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Apareamiento sugerido de las variables del proceso

Variable manipulada	Variable Controlada
F2	L2
F200	P2
P100	X2

Un controlador P y dos controladores PI fueron diseñados para el modelo lineal normalizado basados en la curva de respuesta de las variables ante el proceso basado en el apareamiento sugerido [5], estos parámetros se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parametros de controladores PI convencionales para el proceso [5]

Función de transferencia	Kp	Ti
$\frac{L2(s)}{F2(s)} \approx -\frac{0.15}{s}$	-7.5	0
$\frac{P2(s)}{F200(s)} = -\frac{0.2112}{33s+1} e^{-3.3s}$	42.61364	10.989
$\frac{X2(s)}{P100(s)} = \frac{1.822}{6s+1} e^{-0.8s}$	3.70472	2.664

B. Diseño de los experimentos

Se plantea el esquema de control de ajuste difuso de salida del controlador PID. Usando los parámetros de entonamiento obtenidos en [5] y mostrados en la Tabla 4, se describen tres modelos de internos para el sistema controlado considerando la entrada como la referencia. Para la definición de estos modelos de referencia se desea que la variable controlada se comporte como si no hubiera interacción con los otros lazos y con un comportamiento lineal. Para ello se siguen los siguientes pasos:

Paso 1. Obtención del modelo de referencia: se desea que la respuesta deseada sea la del lazo cerrado de la función de transferencia y del controlador PI indicado en la Tabla 4.

Paso 2. Diseño del ajuste difuso del lazo: Se diseña, usando el modelo de inferencia de Takagi-

Sugeno, un sistema difuso que, midiendo la variable controlada y la salida del modelo de referencia, ajuste la salida del controlador PID implementado sobre el modelo no lineal para que se parezca al modelo de referencia obtenido.

Paso 3. Comparación contra el sistema de control PID aplicado al proceso multivariable no lineal: el sistema de control con ajuste difuso es comparado con el sistema de control sin ajuste aplicado sobre el mismo proceso no lineal descrito.

III. RESULTADOS

A. Obtención de los modelos de referencia

Para la obtención de los modelos de referencia, se establece que se desea el comportamiento lineal del sistema sin interacción. Para cada función de transferencia en la Tabla 4, se eliminan todas las no linealidades y luego, dada por la ecuación (13), se escribe el modelo de referencia como ec. (14). Los modelos de referencia obtenidos se presentan en la Tabla 5. Estos modelos de referencia son estables, y representan el comportamiento de un sistema lineal bajo la acción de un controlador PID y sin las interacciones presentes en el modelo no lineal presentado.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_p(s) \quad (13)$$

$$H(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) G_p(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) G_p(s)} \quad (14)$$

Tabla 5. Modelos de referencia para el sistema de evaporación

Y	Gp(s)	Kp	Ti	H(s)
L2	$-\frac{0.15}{s}$	-7.5	0	$\frac{8}{8s+9}$
P2	$-\frac{0.2112}{33s+1}$	42.61	10.98	$\frac{0.273s+0.0248}{s^2+0.303s+0.0248}$
X2	$\frac{1.822}{6s+1}$	3.70	2.664	$\frac{3.375s+1.267}{3s^2+3.875s+1.267}$

B. Diseño del sistema difuso de ajuste del lazo

Se consideraron las variables de entrada para el sistema difuso a las variables X, que representa la salida del modelo de referencia o el valor deseado de la variable, y la variable Y, que representa la salida del proceso real controlado o la salida actual de la variable. Esto permitió describir a cada variable como cinco etiquetas lingüísticas a saber: Muy Negativo (MN), Negativo (N), Cero (C), Positivo (P), y Muy positivo (MP). Los rangos

de cada variable depende de las características propias del sistema no lineal normalizado.

1) Sistema difuso de ajuste del lazo de control de L2

Para el ajuste del lazo de control de L2, que es un controlador proporcional puro, se definieron los subconjuntos difusos mostrados en las Fig. 4 y Fig. 5. Usando esta definición, se escribieron las reglas de inferencia mostradas en la Tabla 6, para un sistema de inferencia de Takagi Sugeno. Este controlador de ajuste tiene una superficie de respuesta como la mostrada en la Fig. 6

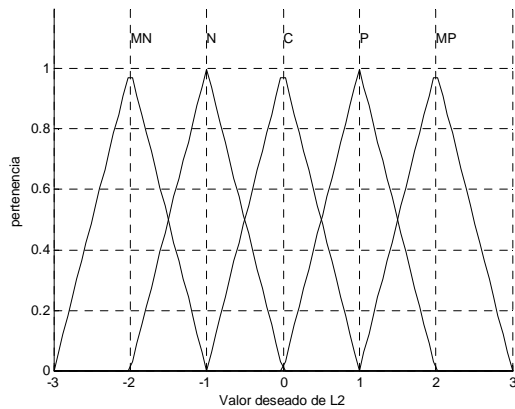


Fig. 4 Funciones de pertenencia de la variable de referencia L2

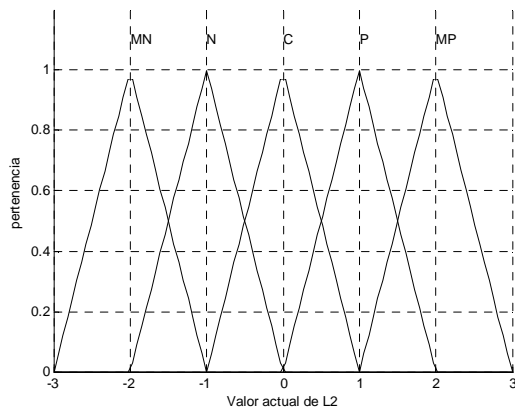


Fig. 5 Funciones de pertenencia de la variable actual L2

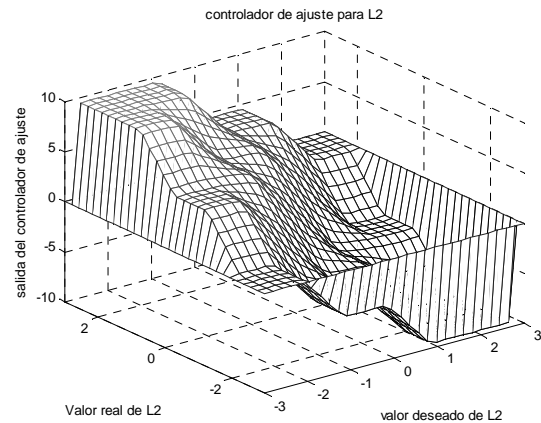


Fig. 6 Superficie de respuesta del controlador de ajuste de L2

Tabla 6. Reglas de inferencia para el ajuste del lazo L2

ref y	MP	P	C	N	MN
MP	0		5	10	10
P	-5	0	5	5	10
C	-5	-5	0	5	5
N	-10	-5	-5	0	5
MN	-10	-10	-5	-5	0

2) Sistema difuso de ajuste del lazo de control de P2

Para el ajuste del lazo de control de P2 que es un controlador PI, se definieron los subconjuntos difusos mostrados en las Fig. 7 y Fig. 8. Las reglas de inferencia de este lazo se presentan en la Tabla 7 y la superficie de respuesta en la Fig. 9

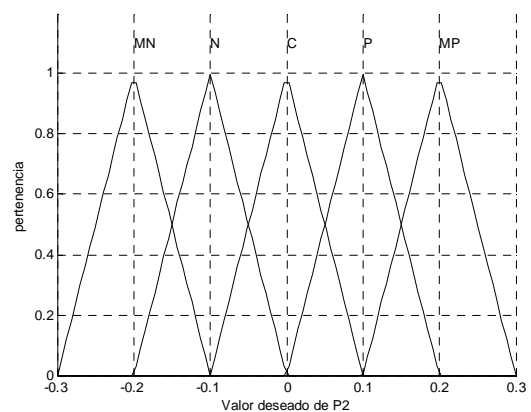


Fig. 7 Funciones de pertenencia de la variable de referencia P2

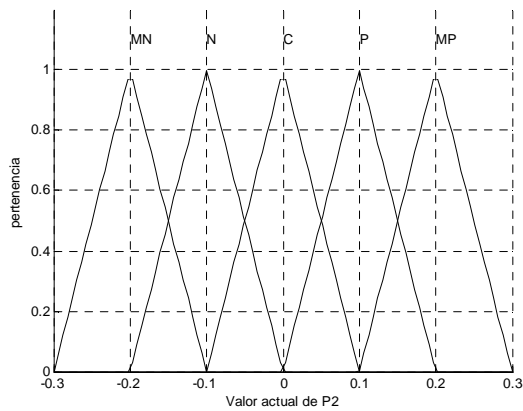


Fig. 8 Funciones de pertenencia de la variable actual P2

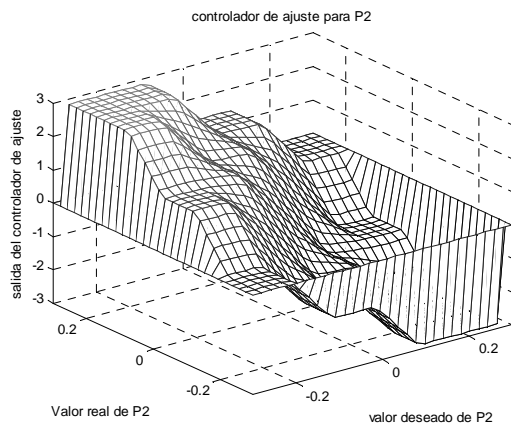


Fig. 9 Superficie de respuesta del controlador de ajuste de P2

Tabla 7. Reglas de inferencia para el ajuste del lazo P2

ref\y	MP	P	C	N	MN
MP	0	1.5	1.5	3	3
P	-1.5	0	1.5	1.5	3
C	-1.5	-1.5	0	1.5	1.5
N	-3	-1.5	-1.5	0	1.5
MN	-3	-3	-1.5	-1.5	0

3) Sistema difuso de ajuste del lazo de control de X2

Para finalizar con la descripción de los sistemas de inferencia difusos diseñados, se presenta en las Fig. 10 y Fig. 11 los subconjuntos difusos de las variables de entrada del sistema de inferencia difuso para la corrección del lazo de control de X2, que es un lazo de control PI convencional, y la respuesta del sistema de inferencia como una superficie en

Fig. 12, sobre las reglas de inferencia descritas por la Tabla 8.

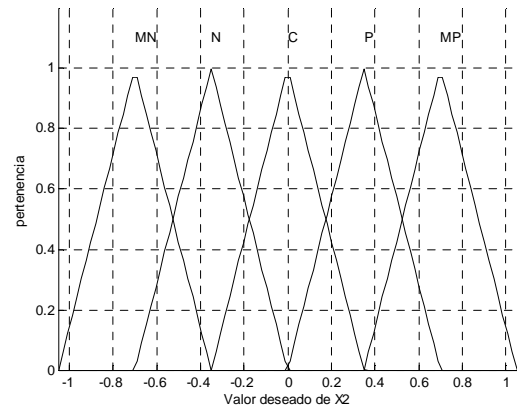


Fig. 10 Funciones de pertenencia de la variable de referencia X2

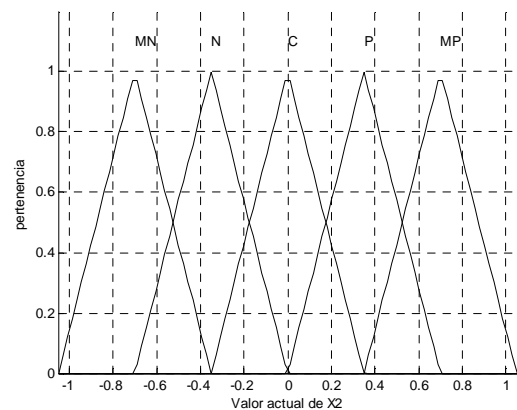


Fig. 11 Funciones de pertenencia de la variable actual X2

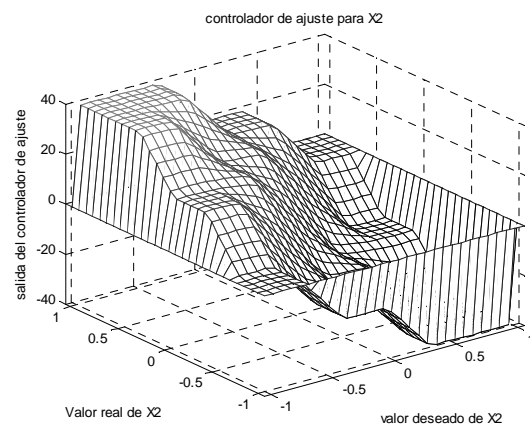


Fig. 12 Superficie de respuesta del controlador de ajuste de X2

Tabla 8. Reglas de inferencia para el ajuste del lazo X2

ref y	MP	P	C	N	MN
MP	0	20	20	40	40
P	-20	0	20	20	40
C	-20	-20	0	20	20
N	-40	-20	-20	0	20
MN	-40	-40	-20	-20	0

C. Comparación contra el sistema de control PID aplicado al proceso multivariable no lineal

El diagrama de bloques de la implementación de los sistemas de ajuste de salida de los controladores se presentan en la Fig. 13. Los nuevos sistemas controlados son comparados contra la salida de los controladores PID diseñados en [5] aplicados sobre el sistema no lineal que fue normalizado para ser compatible con el diseño de los controladores realizado sobre el sistema linealizado.

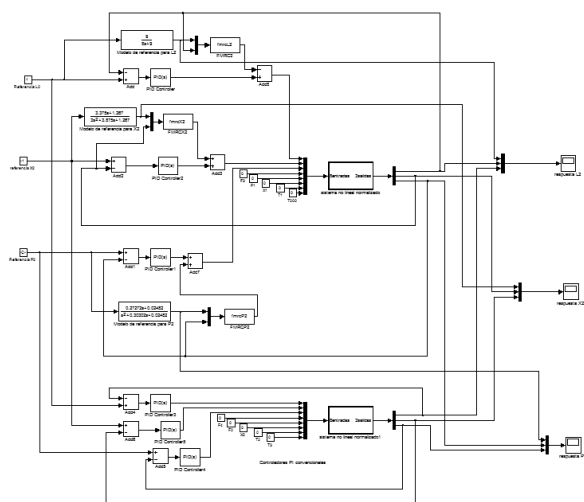


Fig. 13 Diagrama de bloques de implementación de los sistemas de ajuste difuso de los controladores del proceso de evaporación

La respuesta del sistema cuando se modificaron las referencias de las tres variables se presenta en las figuras Fig. 14, Fig. 15 y Fig. 16. Como puede observarse, la respuesta del sistema con ajuste difuso es más rápida que la del sistema controlado solo por acción P o PI en los tres lazos implementados. El sistema ajustado sigue al modelo de referencia durante un mayor tiempo, lo que permite suavizar su comportamiento dinámico y disminuir su oscilación alrededor de su valor final.

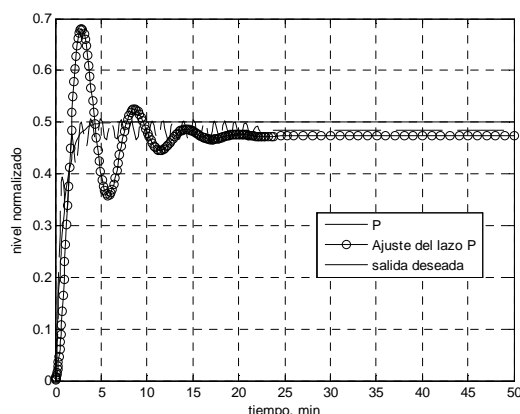


Fig. 14 Comparación de L2 del sistema controlado con el esquema PI convencional y el sistema controlado con ajuste difuso

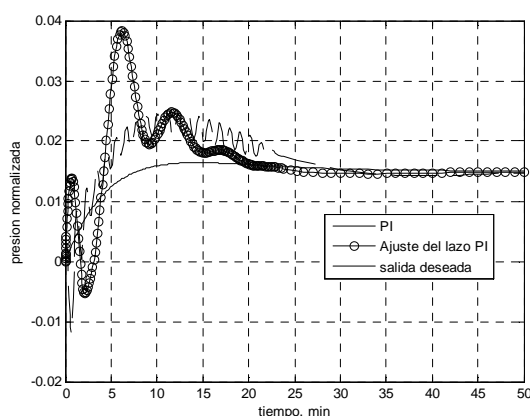


Fig. 15 Comparación de P2 del sistema controlado con el esquema PI convencional y el sistema controlado con ajuste difuso

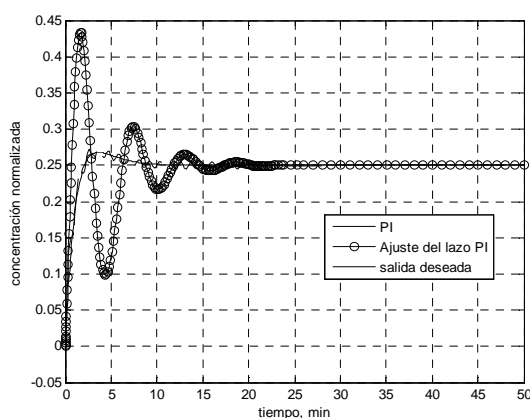


Fig. 16 Comparación de X2 del sistema controlado con el esquema PI convencional y el sistema controlado con ajuste difuso

El nivel L2 normalizado de respuesta del sistema con ajuste de lazo sigue, con bastante cercanía, al modelo de referencia como se muestra en la Fig. 17, con una oscilación pequeña por continuas correcciones. Estas oscilaciones pueden evitarse con un diseño cuidadoso del sistema de inferencia o con la inclusión de un filtro de la señal de corrección. Tal oscilación en el comportamiento oscilatorio ocurre en las otras variables de control, como se muestra en la Fig. 18 y Fig. 19. En el caso de la variable X2, esta sigue con bastante precisión el modelo de referencia establecido. Solamente P2 presenta una desviación considerable, y esto es debido a que el modelo no lineal es afectado profundamente por los cambios en la presión, que no puede desviarse de la presión de operación considerablemente porque produce impactos sobre la temperatura de evaporación en el seno del proceso. Sin embargo, el ajuste de lazos permite, como se muestra, convertir a cada respuesta en una respuesta similar a la del sistema lineal sin interacción impuesto, lo que permitiría establecer al ajuste de lazo como un procedimiento para la implementación de un control linealizante del proceso.

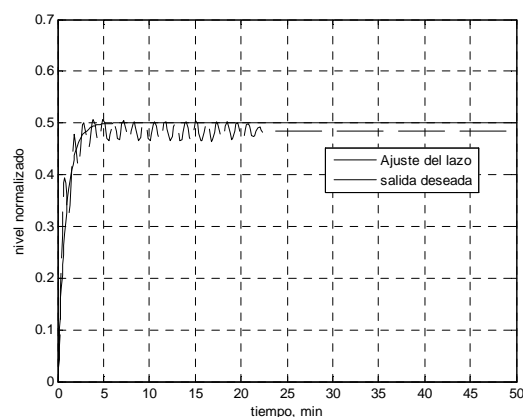


Fig. 17 seguimiento del ajuste difuso de lazo al modelo de referencia para L2

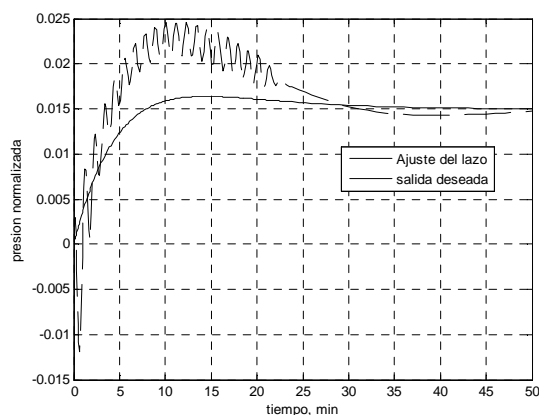


Fig. 18 seguimiento del ajuste difuso de lazo al modelo de referencia para P2

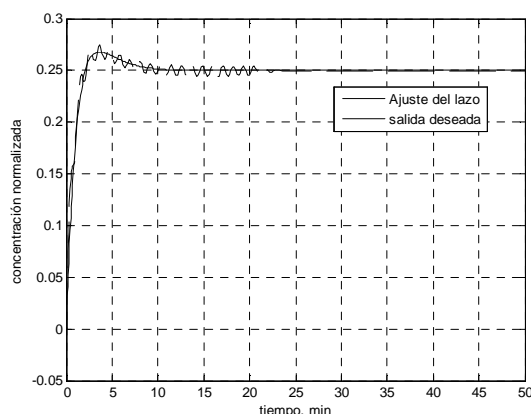


Fig. 19 seguimiento del ajuste difuso de lazo al modelo de referencia para X2

IV. CONCLUSIONES

La utilización de un esquema de ajuste de la salida de un controlador PI a través de un sistema de inferencia difuso permite mejorar el desempeño dinámico del sistema de control sobre procesos no lineales como el descrito, permitiendo que el sistema se ajuste a un comportamiento lineal, a pesar de las interacciones presentes para un sistema multivariable. El funcionamiento combinado de los tres controladores con salida ajustada es más rápido y con menor sobrepaso que el del sistema controlado únicamente por la acción de controladores PI. El diseño requiere conocer un modelo de referencia del comportamiento de cada variable.

V. REFERENCIAS

- [1] M. T. Tham, «Newcastle University School of Chemical Engineering and Advanced Materials,» 2002. [En línea]. Available: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/robust/imc.pdf>. [Último acceso: 14 11 2013].
- [2] F. Rodríguez Rubio y M. J. López Sanchez, Control Adaptativo y Robusto, Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1996.
- [3] R. B. Newell y P. L. Lee, Applied Process Control, Melbourne: Prentice Hall, 1989.
- [4] E. Barreto y J. P. Requez, «Sistema de control PID-difuso de la concentración de soluto a la salida de un evaporador de circulación forzada de tubos verticales,» UNEXPO, Venezuela, Barquisimeto, 2012.
- [5] J. P. Requez, «Controladores PID difusos para un proceso de evaporación de circulación forzada,» Caracas, 2013.