

Esquema de control PI por planificación difusa de ganancias para un proceso de evaporación de circulación forzada

Juan Pablo Requez Vivas
1398086
juanrequez@gmail.com

Resumen. El diseño de un sistema de control PI de planificación difusa de ganancias fue realizado sobre un sistema de evaporación forzada no lineal a fin de controlar las variables de presión, nivel en el evaporador y concentración del soluto en el evaporador y mejorar el desempeño obtenido sobre el sistema de control usando un sistema de control PID obtenido a través del estudio de la respuesta al escalón unitario de las variables involucradas. El esquema de planificación difusa de ganancias del controlador PI usando integración ideal resultó más rápido y con una respuesta temporal más aceptable que el obtenido a través del control PI convencional.

Palabras Clave: Planificación de ganancia, control difuso, control adaptativo, Control PI, control de procesos de evaporación.

I. INTRODUCCION

A fin de mejorar el desempeño de los controladores PI, es posible considerar el comportamiento dinámico del proceso y su desviación del valor deseado y usar esa información para ajustar su comportamiento de manera que tenga más importancia el error cuando este término tenga mayor magnitud y cuando el error sea cero considerar que el tiempo alejado del valor deseado es más importante como acción de control. Este esquema descrito también es conocido como esquema de planificación de la ganancia. Se presenta el esquema de planificación de ganancia y una breve descripción teórica del modelo de inferencia difuso utilizado en esta investigación.

A. Planificación de la ganancia

El sistema de control PID por planificación de la ganancia (PID gain scheduling) es uno de los primeros acercamientos a la teoría de control adaptativo [1]. El objetivo es utilizar una variable auxiliar del proceso que se relacione bien con los cambios de la dinámica del mismo y usar esa información para compensar los controladores instalados. Algunas de las ventajas del esquema de planificación de ganancias son:

- Los parámetros de los controladores pueden ser cambiados rápidamente en respuesta a los cambios en la dinámica de la planta
- Puede implementarse fácilmente en procesos donde la dinámica cambia de manera conocida

en relación con pocas variables fácilmente medibles.

El esquema de la planificación de la ganancia es muy popular [1]. Los parámetros del controlador son calculados previamente para cada región de operación. Los valores calculados pueden estar basados en la operación de un modelo linealizado del proceso en cada región o sobre un modelo no lineal conocido. [2]. Los parámetros del controlador son tabulados y el valor de la variable de planificación (scheduling variable) permite seleccionar que parámetros se usarán y los parámetros tabulados son aplicados al controlador. En general el esquema de planificación de ganancia es considerado un esquema de adelanto. En la Fig. 1 se muestra el esquema de control por planificación de ganancias.

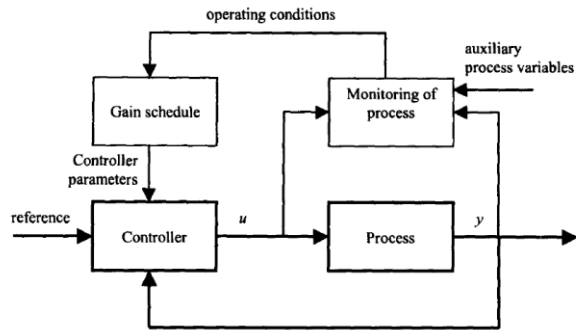


Fig. 1 Esquema de control por planificación de ganancias [2]

El esquema de planificación de la ganancia consiste en dos etapas [2]:

- Encontrar las variables de planificación
- Diseñar el controlador a diferentes condiciones de operación.

B. Planificación Difusa de la ganancia

La planificación de la ganancia desde la perspectiva difusa permite considerar las dinámicas transitorias del sistema no lineal que describe al proceso en vez de la consideración de las linealizaciones locales [3]. Se consideran tres etapas para el diseño del esquema de planificación de ganancia difusa

- Establecer conjuntos locales de operación del proceso
- Establecer el conjunto de parámetros que garantizan estabilidad y el comportamiento dinámico deseado en cada región.

	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 rehervidor	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

El modelo matemático del evaporador de circulación forzada de tubos verticales descrito por [6], 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 (2) a (13). 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. 1. En la **¡Error! La autotreferencia al marcador no es válida.** se listan parámetros que son asumidos como constantes en el modelo.

Tabla 2. Parámetros constantes del modelo [6].

	Descripción	Valor	Unidad
ρA	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)

$$\rho A \frac{dL2}{dt} = F1 - F4 - F2 \quad (2)$$

$$\frac{MdX2}{dt} = F1X1 - F2X2 \quad (3)$$

$$C \frac{dP2}{dt} = F4 - F5 \quad (4)$$

$$T2 = 0.5616P2 + 0.3126X2 + 48.43 \quad (5)$$

$$T3 = 0.507P2 + 55 \quad (6)$$

$$F4 = \frac{Q100 - F1 C_p (T2 - T1)}{\lambda} \quad (7)$$

$$T100 = 0.1538 P100 + 90 \quad (8)$$

$$Q100 = UA1 (T100 - T2) \quad (9)$$

$$UA1 = 0.16(F1 + F3) \quad (10)$$

$$F100 = \frac{Q100}{\lambda_s} \quad (11)$$

$$T201 = T200 + \frac{Q200}{F200 C_p} \quad (12)$$

$$F5 = \frac{Q200}{\lambda} \quad (13)$$

El sistema descrito [6] 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 [8], estos parámetros se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parametros de controladores PI convencionales para el proceso [8]

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 difuso de planificación de la ganancia PI. Para ello se sigue el siguiente conjunto de pasos:

- Paso 1. Implementar los controladores diseñados para el modelo lineal sobre el sistema no lineal. Esto implica la normalización del modelo no lineal y su implementación en simulink
- Paso 2. Obtener, a través del estudio del comportamiento del sistema no lineal, los rangos de las variables de pertenencia para la implementación del esquema de planificación de ganancias PI a través del uso de un sistema de inferencia difuso de Takagi-Sugeno.
- Paso 3. Implementar el sistema de inferencia difuso de planificación de las ganancias PI para un controlador P y dos controladores PI sobre el

proceso no lineal y comparar los resultados contra los controladores PI convencionales.

III. RESULTADOS

Se implementaron tres esquemas de planificación de ganancia sobre los tres lazos del sistema no lineal con el apareamiento sugerido en la Tabla 3. Utilizando los controladores PI convencionales sobre el modelo no lineal normalizado, se realizan las comparaciones a través del diagrama de bloques mostrado en la Fig. 5. El esquema de planificación de ganancias mostrado calcula la ganancia K_p y K_i de un controlador PI mostrado en la ec (14). El diagrama de implementación del controlador PI usando el esquema de planificación de ganancia se muestra en la Fig. 4, donde K_p y K_i se obtienen de los sistemas de inferencias difusos correspondientes. Se puede observar que el controlador implementa un integrador ideal implementado en simulink.

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e * dt \quad (14)$$

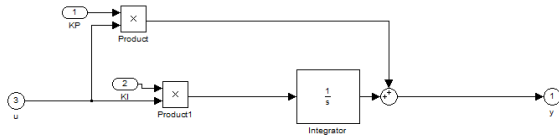


Fig. 4. Diagrama de bloques del controlador PI para la planificación de ganancias.

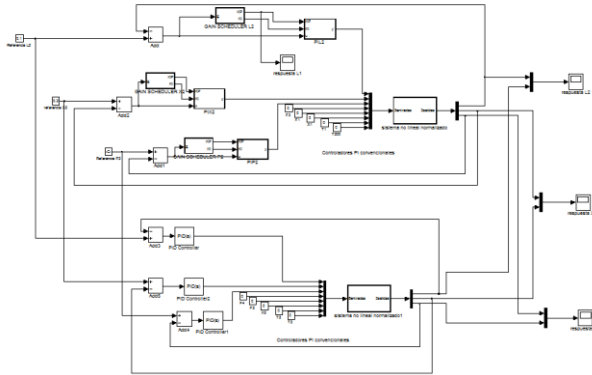


Fig. 5. Diagrama de bloques del esquema de planificación de ganancia y el sistema de control PI convencional.

Debido a la descripción del proceso en funciones de transferencia de la Tabla 4, se sabe que las variables $L2$ y $P2$ son de acción inversa respecto a sus variables de control y por lo tanto los controladores implementados sobre ellos deben tener ganancias K_p y K_i negativas. Se desarrollaron dos sistemas de inferencia para la planificación de cada ganancia para cada lazo, lo que da lugar a 6 sistemas de inferencia difusos.

1) Sistema de inferencia difuso para la planificación de ganancias del lazo de control de $L2$

Para el lazo de control de $L2$, se plantearon 5 subconjuntos difusos para el error, que se muestran en la Fig. 6. Estas funciones de pertenencia fueron etiquetadas como Muy Negativo (MN), Negativo (N), Cero (C), Positivo (P), y Muy positivo (MP). Sobre estas funciones de pertenencia se definieron cinco reglas para la ganancia K_p y cinco reglas para la determinación de la ganancia K_i usando un sistema de inferencia difuso de Takagi-Sugeno. Estas reglas son mostradas en la Tabla 5 y Tabla 6.

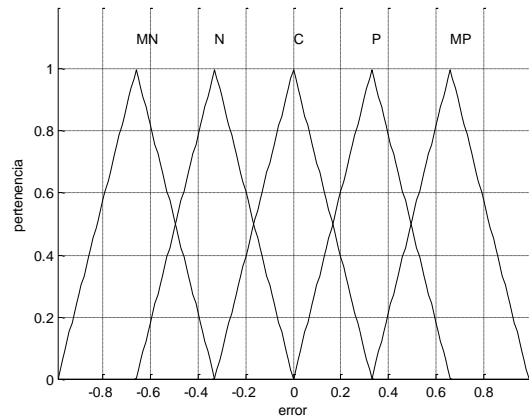


Fig. 6. Subconjuntos difusos para el error, esquema de planificación de ganancias para K_p y K_i del controlador de $L2$

Tabla 5. Reglas difusas para la determinación de K_p del controlador de $L2$

e	K_p
MP	-30
P	-15
C	-30
N	-15
MN	-30

Tabla 6. Reglas difusas para la determinación de K_i del controlador de $L2$

e	K_i
MP	0
P	-1
C	-2
N	-1
MN	0

Estas reglas para el sistema de inferencia de Sugeno describen dos curvas de funcionamiento del controlador. Estas curvas se muestran en la Fig. 7 y Fig. 8. La Fig. 9 muestra que el controlador por esquema de planificación difusa de ganancias es considerablemente

más eficiente, más rápido y con una respuesta transitoria más corta que su contraparte por diseño convencional de controladores PI para el sistema.

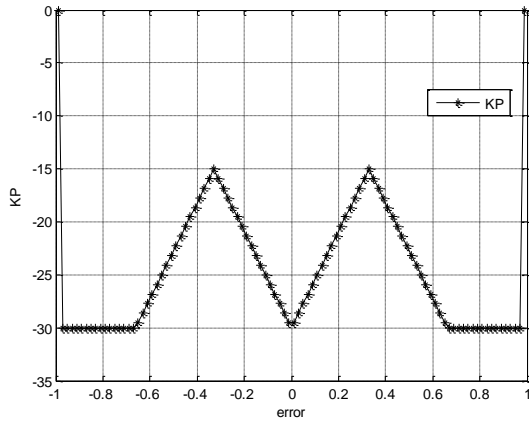


Fig. 7 Curva de respuesta de la planificación de la ganancia K_p para el controlador de L2

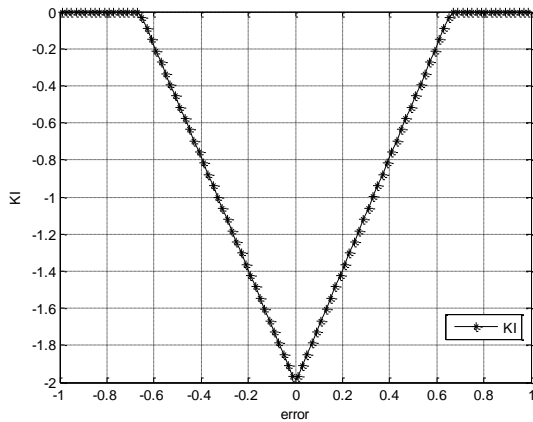


Fig. 8 Curva de respuesta de la planificación de la ganancia K_i para el controlador de L2

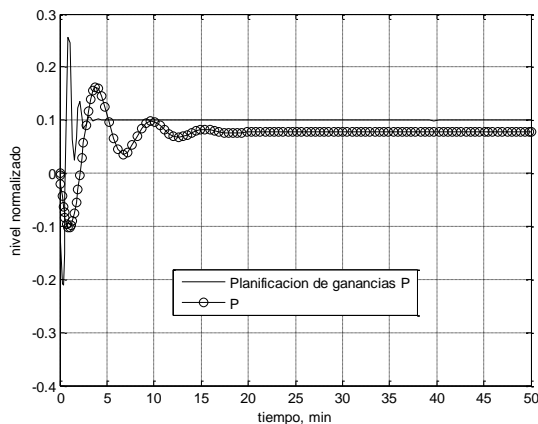


Fig. 9. Comparación de la respuesta de L2 controlado para esquema PI a través de planificación de ganancias y PI convencional.

2) Sistema de inferencia difuso para la planificación de ganancias del lazo de control de P2

Para el lazo de control de P2, se plantearon cinco subconjuntos difusos para el error en el sistema de inferencia de K_p y cinco subconjuntos difusos para el error en el sistema de inferencia de K_i , que se muestran en la Fig. 10 y Fig. 11. Estas funciones de pertenencia fueron etiquetadas como Muy Negativo (MN), Negativo (N), Cero (C), Positivo (P), y Muy positivo (MP).

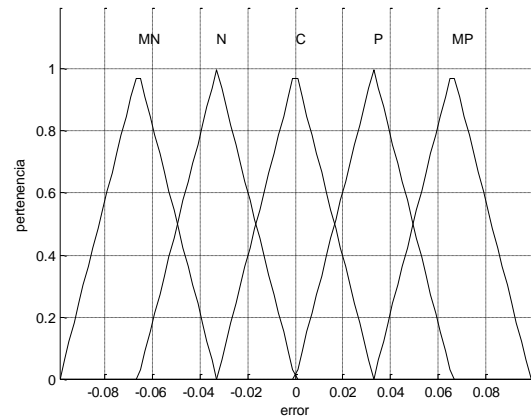


Fig. 10. Subconjuntos difusos para el error, esquema de planificación de ganancias para K_p del controlador de P2

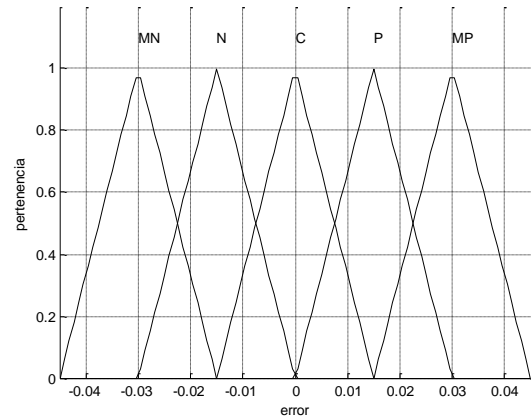


Fig. 11. Subconjuntos difusos para el error, esquema de planificación de ganancias para K_i del controlador de P2

Sobre estas funciones de pertenencia se definieron cinco reglas para la ganancia K_p y cinco reglas para la determinación de la ganancia K_i usando un sistema de inferencia difuso de Takagi-Sugeno. Estas reglas son mostradas en la Tabla 7 y en la Tabla 8.

Tabla 7.Reglas difusas para la determinación de Kp del controlador de P2

e	Kp
MP	-60
P	-30
C	-60
N	-30
MN	-60

Tabla 8.Reglas difusas para la determinación de Ki del controlador de P2

e	KI
MP	0
P	-15
C	-30
N	-15
MN	0

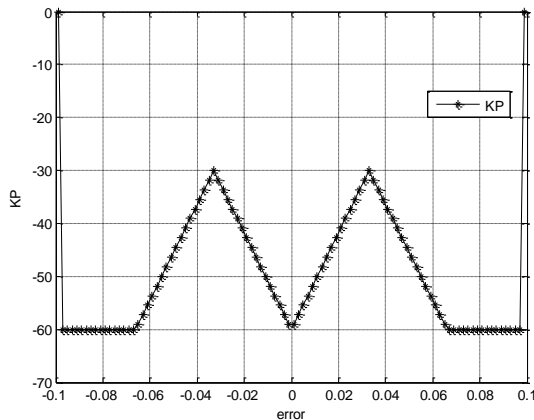


Fig. 12 Curva de respuesta de la planificación de la ganancia Kp para el controlador de P2

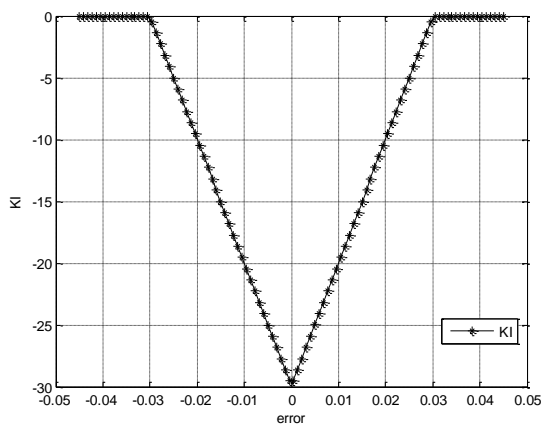


Fig. 13 Curva de respuesta de la planificación de la ganancia Ki para el controlador de P2

Las curvas de respuesta de los sistemas de inferencias difusos para Kp y Ki se muestran en la figura Fig. 12 y

Fig. 13. Este sistema de control también es de acción inversa por lo que las ganancias Kp y Ki deben ser negativas. Las reglas descritas para la ganancia Kp asigna un valor más negativo para Kp cuando el error es grande y mas cercano a cero para valores medianos del error; a fin de minimizar el error de estado estacionario se asigna un grande de ganancia proporcional cuando el error es cero. En el caso de Ki, a medida que el error se hace más pequeño más grande se hace la ganancia para producir una integración mayor y afectar mejor a la salida del controlador. Esto disminuye el error de estado estacionario hasta cero.

El comportamiento de P2 bajo la acción del controlador es el más sujeto a no linealidades. Por restricciones del modelo, los valores de P2 no pueden alejarse significativamente del valor de estado estacionario, lo que permite variaciones de apenas 2% por encima y por debajo de su valor de proceso, ya que la presión afecta la temperatura de evaporación. El comportamiento es considerablemente no lineal para esta variable, y el controlador con planificación de ganancia muestra un mejor desempeño y una respuesta más rápida para variaciones de la referencia sujeto a variaciones de la referencia de los otros controladores implementados como se muestra en la Fig. 14.

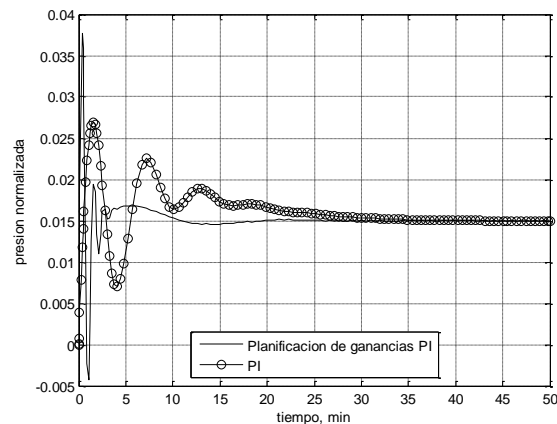


Fig. 14. Comparación de la respuesta de P2 controlado para esquema PI a través de planificación de ganancias y PI convencional

3) Sistema de inferencia difuso para la planificación de ganancias del lazo de control de X2

Para el estudio de X2 se definieron los subconjuntos del error como cinco funciones de pertenencia para el sistema de inferencia de Kp y Ki que se muestran en la Fig. 15. Estas funciones de pertenencia fueron etiquetadas como Muy Negativo (MN), Negativo (N), Cero (C), Positivo (P), y Muy positivo (MP).

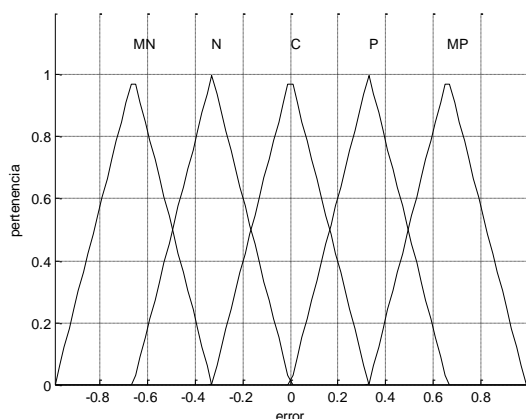


Fig. 15. Subconjuntos difusos para el error, esquema de planificación de ganancias para K_p y K_i del controlador de X_2

Las reglas difusas para estos sistemas de inferencia siguen el mismo razonamiento que para los sistemas anteriores, pero ahora la variable es de acción directa respecto a su entrada, por lo que las salidas de ganancia proporcional y ganancia integral de los sistemas de inferencia son positivas. Las reglas que describen a los dos sistemas de inferencia se muestran en la Tabla 9 y Tabla 10.

La curva de respuesta de los sistemas de inferencia de K_p y K_i muestran un comportamiento similar a los de los sistemas de inferencia descritos para P_2 y L_2 , con una ganancia K_p más grande cuando el error es cero, pequeña cuando el error es mediano y grande cuando el error es grande. De igual manera, a medida que el error se acerca a cero, la ganancia integral se hace más grande. Esto puede observarse en la Fig. 16 y Fig. 17.

Tabla 9. Reglas difusas para la determinación de K_p del controlador de X_2

e	K_p
MP	30
P	15
C	30
N	15
MN	30

Tabla 10. Reglas difusas para la determinación de K_i del controlador de X_2

e	K_i
MP	0
P	1
C	2
N	1
MN	0

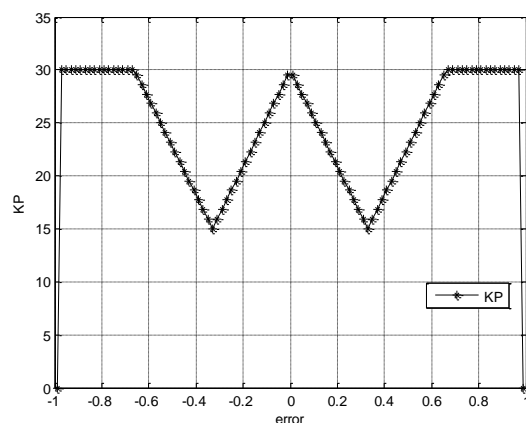


Fig. 16 Curva de respuesta de la planificación de la ganancia K_p para el controlador de X_2

Al igual que en la descripción de las otras variables controladas, el sistema de control con planificación difusa de ganancias fue considerablemente más rápido, con menor tiempo de establecimiento, con respuesta transitoria más breve y una frecuencia mayor que el controlado a través del controlador PI convencional, como puede observarse en la Fig. 18.

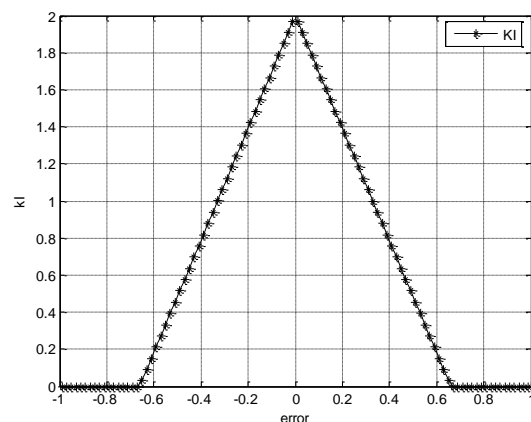


Fig. 17 Curva de respuesta de la planificación de la ganancia K_i para el controlador de X_2

El proceso de evaporación es controlado de manera más rápida usando este esquema de planificación de ganancia. Es importante resaltar que este sistema no lineal es sensible, por su descripción matemática, a variables que se alejan considerablemente de sus valores físicos aceptables, lo que permite indicar que estos controladores con planificación difusa de ganancia producen cambios sobre el sistema más rápidos que sus contrapartes convencionales sin someterlos a valores de entrada sin significado físico o más bruscos que los que soporta modelo no lineal.

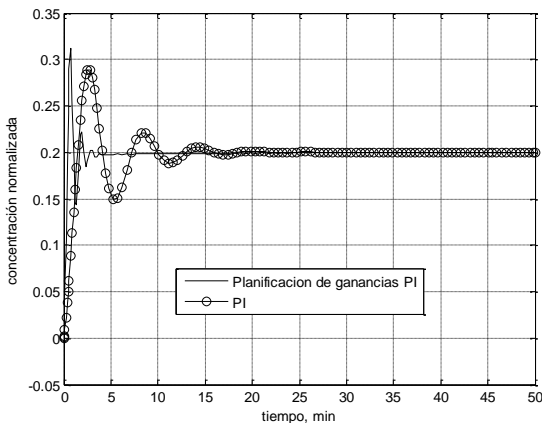


Fig. 18. Comparación de la respuesta de X2 controlado para esquema PI a través de planificación de ganancias y PI convencional

IV. CONCLUSIONES

El esquema de planificación difuso de ganancias permite establecer un controlador adaptativo basado en un controlador difuso con cambios en los parámetros de entonamiento del controlador PI en cada región del proceso. En especial, por las características propias del sistema de inferencia difuso, se logra que los parámetros de entonamiento del controlador PI se ajusten en cada punto del proceso, dependiendo del error. La planificación de la ganancia de este trabajo fue obtenida exclusivamente sobre la variable error del proceso, a través de dos sistemas de inferencia difusos independientes para cada ganancia de cada controlador PI estudiado, sin embargo la planificación de ganancia puede plantearse en distintas regiones de funcionamiento del proceso donde se deseen mantener las variables no controladas dentro de regiones deseadas. Los resultados para el sistema de evaporación forzada estudiado muestran que las variables de control tienen una respuesta más rápida para el sistema controlador a través del esquema de planificación difusa de ganancias que para un esquema de control convencional PI.

V. REFERENCIAS

- [1] S. Sastry y M. Bodson, Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness, Prentice-Hall, 1994.
- [2] E. Ikonen y K. Najim, Advanced Process Identification and Control, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [3] G. J. L. Naus, «Gain Scheduling Robust Design and Automated Tuning of Automotive Controllers,» University of Technology Eindhoven, 2009.
- [4] L. Reznik, Fuzzy Controllers, Melbourne: Elsevier, 1997.
- [5] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun y E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice-Hall, 1997.
- [6] R. B. Newell y P. L. Lee, Applied Process Control, Melbourne: Prentice Hall, 1989.
- [7] 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.
- [8] J. P. Requez, «Controladores PID difusos para un proceso de evaporación de circulación forzada,» Caracas, 2013.