

Genetics algorithms as a tuning tool for PID and sliding mode controllers

Juan C. Terán-Picón, José Anderez y Oscar Camacho

Postgrado en Automatización e Instrumentación, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
Tel.: +58-274-2402891. Fax: +58-274-2402890. ocamacho@ula.ve

Abstract

In this paper, the genetic algorithms are used as a searching tool of the tuning parameters of a controller. The algorithm works such a way that the new tunings improve the performance of the control system. Two studied cases are considered: the first case is the proportional-integral-derivative controller and the second study case is the sliding mode controller. The algorithms are applied from initial tunings, such as Ziegler and Nichols for the PID controller and the obtained from Camacho for sliding mode controller.

Key words: Genetic algorithms, tuning parameters, PID, sliding mode control

Algoritmos genéticos como herramienta de ajuste para controladores PID y de modo deslizante

Resumen

En este artículo los algoritmos genéticos se utilizan como una herramienta de búsqueda aleatoria de parámetros de sintonización de un controlador. El algoritmo funciona de tal manera que los nuevos parámetros de ajuste mejoran el desempeño del sistema de control. Dos casos de estudio son considerados: el primer caso es el controlador proporcional-integral-derivativo y el segundo caso de estudio es el controlador por modo deslizante. Los algoritmos son aplicados a partir de sintonizaciones iniciales, Ziegler y Nichols para la sintonización previa del PID, y las desarrolladas por Camacho para la sintonización inicial.

Palabras clave: Algoritmos genéticos, parámetros de sintonización, PID, control por modo deslizante.

1. Introducción

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Además de su extrema importancia, el control automático se ha convertido en una parte importante e integral en los procesos industriales.

En dichos procesos, existen estrategias de control, que permiten mantener la variable a controlar, en el valor apropiado para el buen funcionamiento del proceso. Estas estrategias a su vez, son ejecutadas por controladores industriales. Dentro de los controladores más comúnmente utilizados, se encuentran el proporcional-integral-derivativo (PID) [1]. Lógicamente, este no es el

único controlador a considerar para estudios o implementaciones. Existe un controlador, que ha sido estudiado ampliamente a nivel científico [2-5], cuya técnica deriva del control por estructura variable, la cual fue estudiada originalmente por Utkin [6]; este se denomina, controlador por modo deslizante (Sliding Mode Controller, SMCr). El SMCr, así como el controlador PID, está conformado por parámetros de ajuste, lo cual permite sintonizar al controlador y así obtener un desempeño lo más favorable posible para el proceso. Existe actualmente una enorme cantidad de procedimientos para sintonizar estos controladores mediante ecuaciones para cada parámetro involucrado en el comportamiento del proceso. Entre

PD y la característica de eliminación del error del controlador PI [7]. La ecuación que describe al controlador viene dado por:

$$m(t) = \bar{m} + K_C e(t) + \frac{K_C}{\tau_i} \int e(t) dt + K_C \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

donde $m(t)$ es la salida del controlador en psig o mA, \bar{m} es la salida del controlador cuando el error es cero y sus unidades son las mismas de $m(t)$, K_C es la ganancia del controlador en psig controlador/psig transmisor o mA controlador/mA transmisor, $e(t)$ es la señal de error en psig o mA, τ_i es el tiempo de integración en segundos o minutos y τ_D es el tiempo de derivación en segundos o minutos.

Parámetros de sintonización usando el método de Ziegler y Nichols: Estas ecuaciones representan un estándar en cuanto a parámetros de sintonización de controladores PID se refiere [8], para el caso de lazo abierto, las ecuaciones son las siguientes:

Controlador Proporcional (P)

$$K_C = \frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1} \quad (2)$$

Controlador Proporcional + Integral (PI)

$$K_C = \frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$\tau_i = 3.33 t_0 \quad (4)$$

Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

$$K_C = \frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$\tau_i = 2.0 t_0 \quad (6)$$

$$\tau_D = \frac{t_0}{2} \quad (7)$$

De las ecuaciones (2) hasta la (7), K es la ganancia del proceso cuya salida viene expresada como variable de salida (transmisor)/variable de entrada (controlador), t_0 es el tiempo muerto del proceso en segundos o minutos y τ es

la constante de tiempo del proceso en segundos o minutos, por lo tanto, el controlador PID tiene tres parámetros K_C a veces llamada K_P , τ_i y τ_D , que se deben ajustar para obtener un desempeño satisfactorio.

4. Controlador por Modo Deslizante (SMCr)

El Control por Modo Deslizante (Sliding Mode Control, SMC) es una técnica derivada del control por estructura variable (Variable Structure Control, VSC), estudiado originalmente por Utkin [6]. En el VSC, el control puede modificar su estructura. La teoría de sistemas dinámicos con modo deslizante, ha sido desarrollada en profundidad durante los últimos treinta años. Este es un método bastante efectivo en control no-lineal el cual ha sido probado en procesos con no-linealidades e incertidumbre, donde las técnicas tradicionales no presentan un buen desempeño [2]. El SMCr estudiado en este artículo presenta un algoritmo de estructura fija, propuesta por Camacho [5].

Las ecuaciones del SMCr, propuestas en [5], son como sigue:

$$U(t) = \left(\frac{t_0 \tau}{K} \right) \left[\frac{X(t)}{t_0 \tau} + \lambda_0 e(t) \right] + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (8)$$

con

$$S(t) = \text{sign}(K) \left[-\frac{dX(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int e(t) dt \right] \quad (9)$$

donde $U(t)$ es la salida del controlador, $X(t)$ es la variable controlada, λ_0 es un parámetro de sintonización de la parte continua del controlador en [tiempo]⁻², $e(t)$ es la señal de error, la cual tiene las mismas unidades del transmisor (TO), K_D es la ganancia del controlador en unidades de salida del controlador (CO), $S(t)$ es la superficie deslizante, unidades de TO/tiempo, δ es un parámetro de ajuste del controlador, y viene dado en unidades de TO/tiempo y λ_1 es otro parámetro de entonamiento de la parte continua del controlador en [tiempo]⁻¹.

Las ecuaciones (8) y (9) constituyen las ecuaciones del controlador. Para completar el SMCr, es necesario tener unas ecuaciones para

sintonizar los parámetros inicialmente, las cuales se describen a continuación.

Para la parte continua del controlador y la superficie deslizante

$$\lambda_1 = \frac{t_0 + \tau}{\tau_0 \tau} \quad (10)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} \right)^2 \quad (11)$$

Para la parte discontinua del controlador

$$K_D = \frac{0,51}{|K|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0,76} \quad (12)$$

$$\delta = 0,68 + 0,12|K|K_D\lambda_1 \quad (13)$$

Las ecuaciones de sintonización utilizan los parámetros característicos del proceso (K , τ , t_0), al igual que las dadas en las de Ziegler-Nichols. Estos son fácilmente obtenidos a través del método curva de reacción [1].

5. Metodología

El procedimiento que a continuación se describe es aplicado a dos procesos químicos: Un reactor con agitación continua cuya estrategia de control es un PID, y un tanque de mezclado con retardo variable, para caso en que se usa un SMCr.

El primer elemento a considerar, es el individuo, en el código binario, cada individuo está formado por 54 bits, es decir, cada parámetro está constituido por 18 bits de precisión ya que se busca obtener números reales con más de dos decimales en la conversión de números binarios a números reales. Esto se realiza sólo para el caso del PID, ya que para el caso del SMCr, se trabaja directamente con números reales.

El siguiente paso, es la determinación del universo de búsqueda para cada parámetro del controlador. Consiste en establecer los rangos dentro de los cuales el algoritmo realizará la búsqueda de manera paralela. Para la determinación de estos rangos, se siguió una metodología basada en criterios de minimización del error, la cual permite ubicar de manera rápida los valores mí-

nimos para cada parámetro y el efecto que tiene sobre el desempeño del controlador.

Se inicia la búsqueda a partir de los valores obtenidos por las ecuaciones de Ziegler y Nichols, para el controlador PID y por las ecuaciones propuestas por Camacho para el SMCr. Partiendo de los parámetros del proceso: $K = 1,448$ TO/CO, $t_0 = 37,33$ s y $\tau = 707,47$ s, los valores obtenidos por las ecuaciones de Ziegler y Nichols, son:

$$K_C = Kp = 4,27, \quad Ki = \frac{K_C}{\tau_I} = 0,0155, \quad y$$

$$K_d - K_C * \tau_D = 293,20,$$

siendo estos valores los que se introducen en el controlador.

En la Figura 2, se muestran las curvas que permiten visualizar los valores mínimos posibles para cada parámetro, siendo los rangos seleccionados aquellos enmarcados en las regiones señaladas. Estas curvas se obtienen al variar parámetro por parámetro del controlador, y graficar cada uno de ellos con respecto al criterio de Integral del Error Cuadrático (IEC).

En la Figura 2 se puede apreciar el universo de valores posibles para cada parámetro, pero es necesario evaluar como los valores que se encuentran por encima y por debajo al valor inicial pueden afectar la estabilidad del controlador ante una perturbación del +10% en el flujo de entrada al proceso. Esto se puede ver en la Figura 3.

Para valores K_C , por encima de 15, el controlador tiende a oscilar, y para valores de 0,2 el sistema se hace inestable. Con respecto a K_i , se tiene que al introducir un valor de 0,04 el controlador tiene a ser marginalmente estable y para valores menores de 0,01 no logra alcanzar el punto de operación del reactor (88 °C). Finalmente, para valores de K_d , por encima de 500, el controlador se hace muy lento (unos 2000 s para alcanzar el valor deseado) y para valores pequeños tal como 20, la respuesta es inestable.

Partiendo de estos resultados, es posible establecer un estimado para rangos del 90% por encima y por debajo de los valores iniciales obtenidos por las ecuaciones de Ziegler y Nichols, que son las áreas señaladas en la Figura 2, de tal manera de establecer un universo de búsqueda que garantice un buen desempeño en el controlador

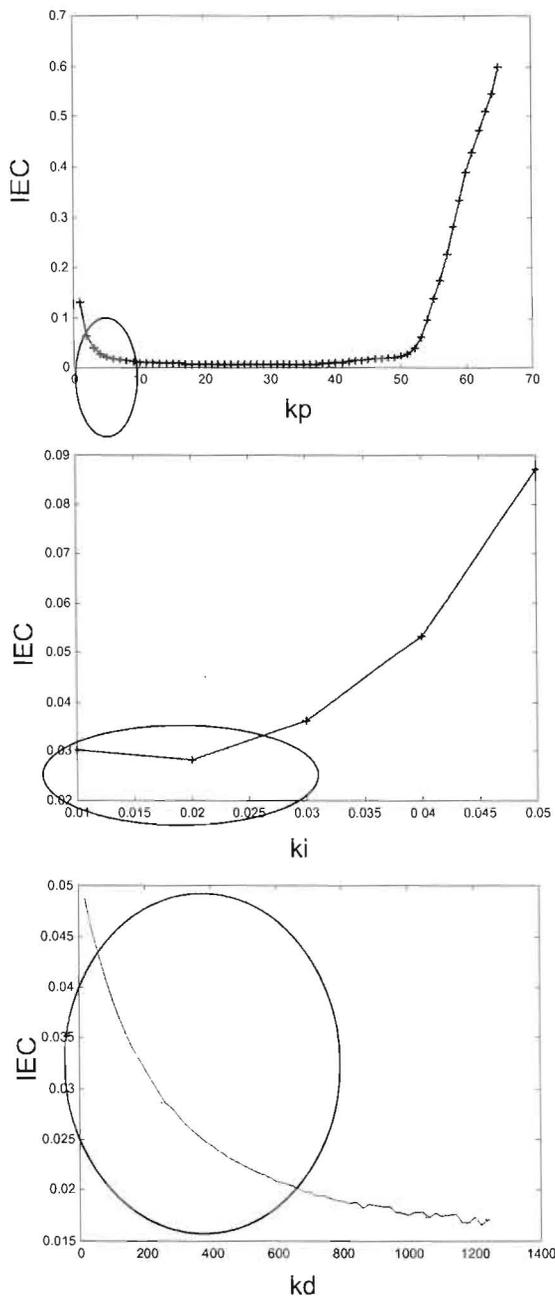


Figura 2. IEC en función de K_C , K_i y K_d para un controlador PID.

al introducir los valores obtenidos por el algoritmo. Los rangos propuestos son los siguientes:

$$K_C \in [0,427-8,11], \quad K_i \in [0,0015-0,0294] \text{ y } K_d \in [29,32-557,08].$$

El otro proceso bajo estudio es el tanque de mezclado donde se utiliza modo deslizante como

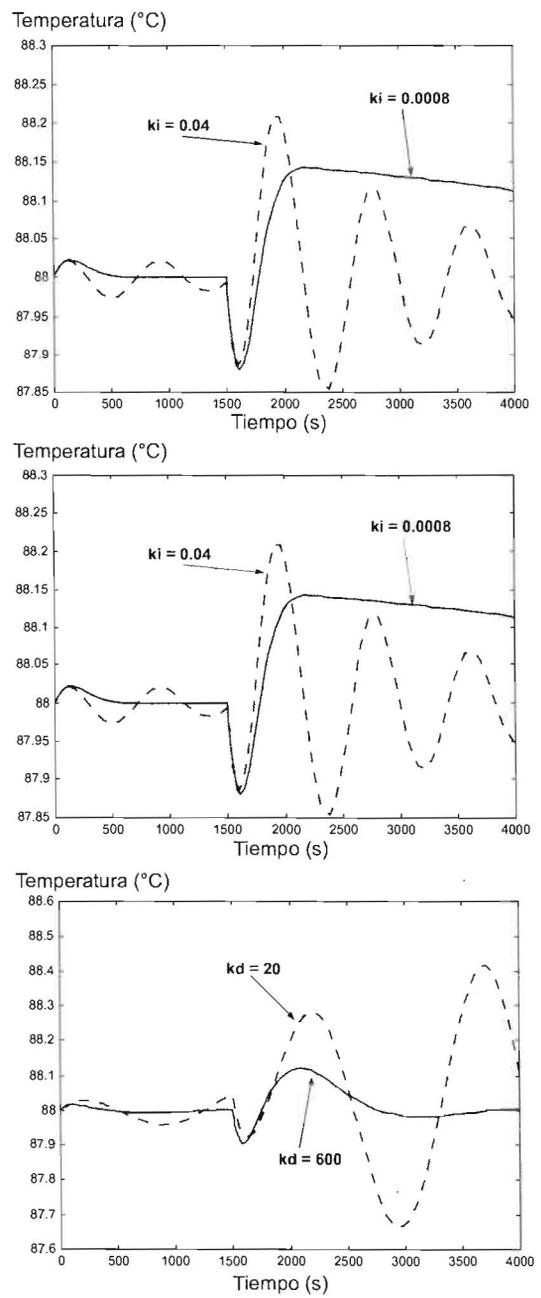


Figura 3. Desempeño del controlador PID al variar sus parámetros de sintonización.

controlador. Los valores obtenidos por las ecuaciones dadas por Camacho son: $K_D = 0,54 \text{ CO}$, $\delta = 0,719 \text{ TO/min}$, $\lambda_1 = 0,76 \text{ min}^{-1}$ y $\lambda_0 = 0,147 \text{ min}^{-2}$. En la Figura 4, se muestran las curvas de IEC con respecto a cada parámetro, donde se puede visualizar los valores mínimos posibles para cada uno de ellos y los rangos seleccionados.

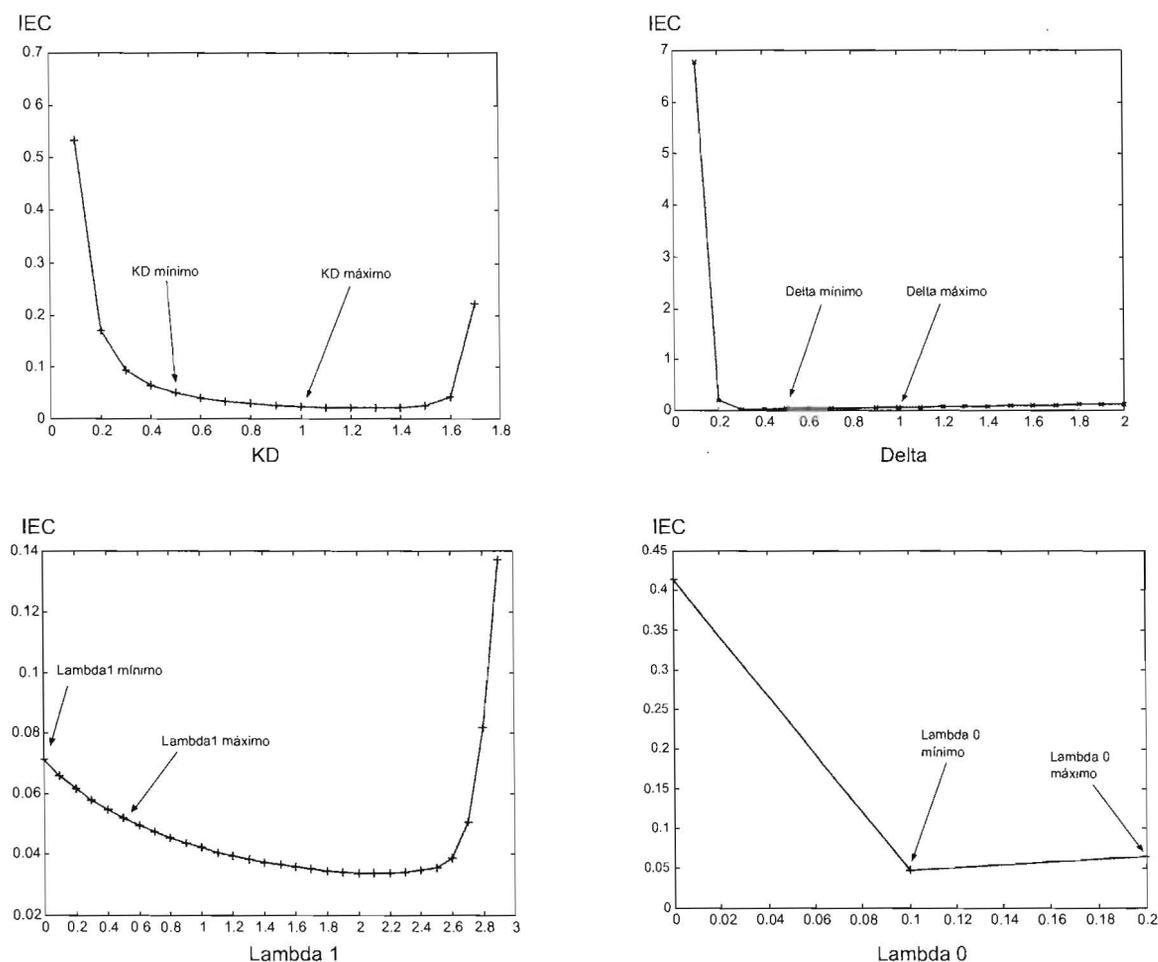


Figura 4. Valores mínimos de los parámetros del controlador por modo deslizante y los rangos seleccionados.

La Figura 4 muestra un universo de valores mínimos para cada uno de los parámetros de sintonización, pero no todos los valores son adecuados para sintonizar el controlador, lo que se puede observar en la Figura 5.

La Figura 5 muestra que para valores de K_D valores por encima de 1 el controlador presenta fuertes oscilaciones, y para valores por debajo de 0,5 resulta muy poco agresivo. Para el caso de δ , valores cercanos a 2 hacen que el controlador sea muy lento en alcanzar el valor de referencia. Con respecto a λ_1 valores cercanos a 0 hacen muy agresivo al controlador, presentando sobrepicos en el transitorio, mientras que λ_0 es un parámetro muy crítico y no permite fuertes variaciones respecto al valor inicial. Finalmente se obtienen los rangos finales para cada parámetro. $K_D \in [0,5-1]$, $\delta \in [0,5-1]$, $\lambda_1 \in [0,5-1]$ y $\lambda_0 \in [0,1-0,2]$.

El siguiente paso es establecer la función objetivo y la función fitness. La función objetivo, está basada en el índice IEC. Inmediatamente el valor de IEC, es tomado por la función fitness, posteriormente, se ejecuta un lazo generacional, en el cual se realiza la selección basada en fitness, el cruce y la mutación. Para el caso del PID, que son individuos binarios, es necesario luego de la mutación, convertirlos en valores numéricos reales para que puedan ser evaluados. Para el caso del SMCr, esto no es necesario ya que los individuos están formados por valores numéricos reales.

Finalmente se obtiene el resultado arrojado por el algoritmo, el cual consiste en un individuo que contiene los valores para los parámetros de sintonización del controlador.

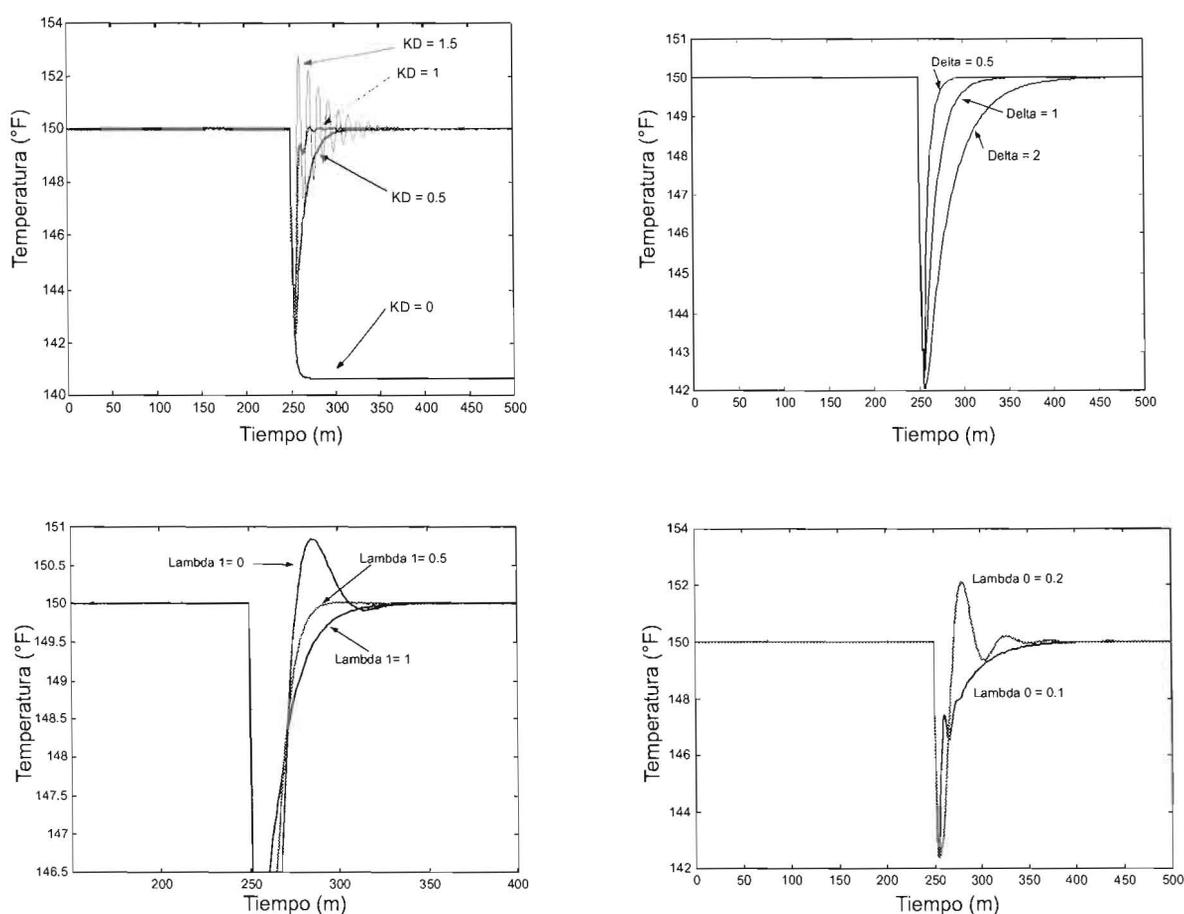


Figura 5. Efecto al variar los valores de los parámetros en el desempeño del SMCr.

6. Resultados

6.1. Tanque de reacción con agitación continua

En este tanque se produce una reacción exotérmica $A \rightarrow B$. Para eliminar el calor de la reacción el reactor es rodeado por una chaqueta por donde circula un líquido refrigerante. La estrategia de control está basada en un controlador PID. En primer lugar describiremos lo referente a la programación genética usada:

La programación posee las siguientes características:

- Individuos codificados en números binarios
- Número de individuos: 50
- Número de generaciones: 10
- Función objetivo: basado en el integral del error al cuadrado (IEC)

- Fitness: operador ranking (presión selectiva 2)
- Operador de selección: muestreo universal estocástico
- Operador de cruce: cruce sencillo con probabilidad de 0,8
- Operador de mutación: aleatoria con probabilidad de 0,05
- Espacio de búsqueda: $K_C \in [0,427, 8,11]$, $K_I \in [0,0015, 0,0294]$, $K_D \in [29,32, 557,08]$.

Los resultados obtenidos usando la sintonización de Ziegler-Nichols y los algoritmos genéticos se muestran en la Tabla 1.

En la Figura 6(a) se muestra la salida del transmisor y en la Figura 6(b) se muestra la salida del controlador ante una perturbación del 10% en el flujo de alimentación.

En la Tabla 2, se muestran los índices de desempeño IEC para ambos métodos, como se

Tabla 1
Parámetros iniciales de sintonización para el controlador PID

Parámetros	Ziegler y Nichols	Algoritmos Genéticos
	Valores	Valores
K_C	4,27	7,965
K_i	0,0155	0,0289
K_d	293,20	547,11

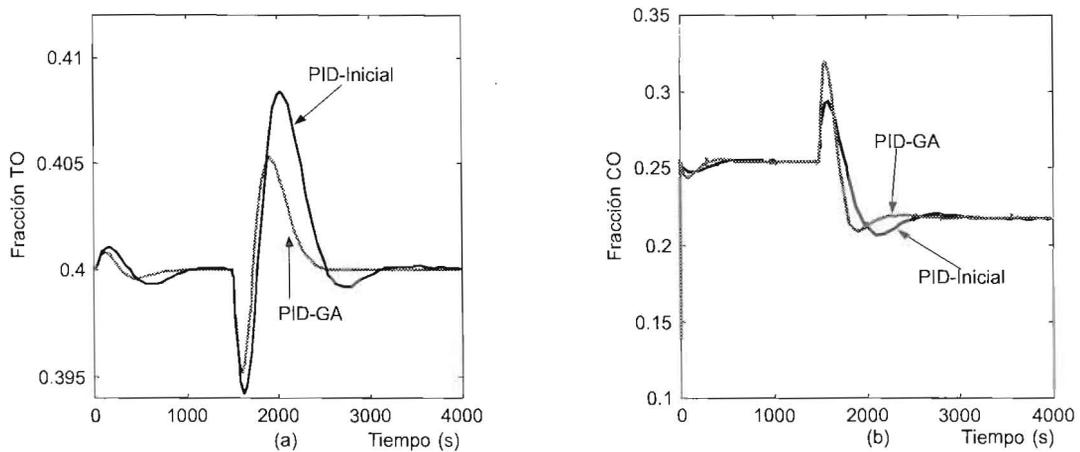


Figura 6. (a) Respuesta del sistema ante una perturbación, (b) Salida del controlador.

observa el resultado arrojado por los valores obtenidos mediante algoritmos genéticos mejora el desempeño del controlador, como era de esperarse.

6.2. Tanque de mezclado

En este tanque se mezclan dos flujos uno caliente y uno frío. La variable a controlar es la temperatura. Este proceso presenta un retardo variable. La estrategia de control está basada en un controlador por modo deslizante.

Al igual que en el caso anterior, la programación genética es descrita mediante las características siguientes:

- Individuos codificados en números reales
- Número de individuos: 30
- Número de generaciones: 8
- Función objetivo: basado en el integral del error al cuadrado (IEC)
- Fitness: operador ranking (presión selectiva 2)

Tabla 2
Índices de desempeño al perturbar el flujo de alimentación F

Métodos de sintonización	IEC
Ajuste Z-N	0,2750
Reajuste usando GA	0,0098

- Operador de selección: muestreo universal estocástico
- Operador de cruce: cruce de punto sencillo con probabilidad de 0,7
- Operador de mutación: aleatoria con probabilidad de 0,03.
- Espacio de búsqueda del algoritmo: $K_d \in [0,5, 1]$, $\delta \in [0,5, 1]$, $\lambda_1 \in [0,5, 1]$, $\lambda_0 \in [0,5, 0,2]$.

Los valores que se obtuvieron para la sintonización inicial usando las ecuaciones propues-

tas por Camacho [5], y por algoritmos genéticos se muestran en la Tabla 3.

Una de las perturbaciones que afecta más el sistema, es la disminución del flujo caliente $W_1(t)$, ya que este sistema presenta un tiempo muerto que varía con esta variable. La consecuencia de esta disminución en $W_1(t)$ es el aumento en el tiempo muerto, que puede hacer al sistema inestable [4]. En la Figura 7(a), se aprecia el comportamiento de la temperatura, ante una disminución del 20% en el flujo caliente de la entrada. Se observa como los parámetros del SMCr obtenidos por el GA, hacen que la salida sea un poco más agresiva en comparación con la obtenida usando los parámetros iniciales. La salida del controlador se muestra en la Figura 7(b), y presenta un pequeño sobrepico debido al incremento de la agresividad del controlador.

Los índices de desempeño ante esta perturbación, se muestran en la Tabla 4.

7. Conclusiones

Este artículo mostró que es posible mejorar la sintonización de un controlador usando algoritmos genéticos, partiendo de una sintonización inicial, en este trabajo se usaron las ecuaciones de Ziegler, Nichols y Camacho como valores iniciales de ajuste de los controladores.

En los ejemplos mostrados, se observa una mejora importante en el desempeño de los controladores, cuando se usan los resultados de sintonización a partir de los algoritmos genéticos.

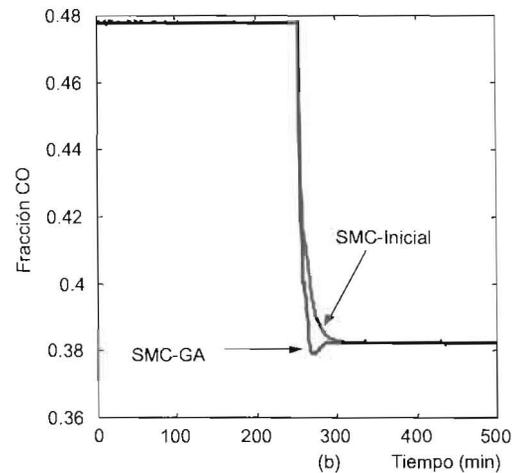
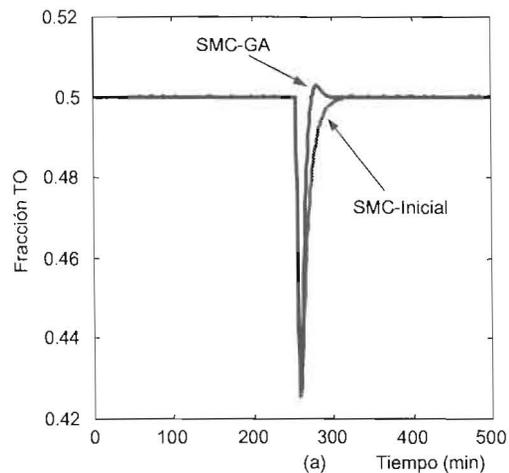


Figura 7. (a) Salida del transmisor al perturbar $W_1(t)$ un -20% (b) Salida del controlador.

Tabla 3
Parámetros iniciales del controlador SMCr

Parámetros	Valores	
	EC. Camacho	Algoritmos Genéticos
K_D	0,540	0,764
d	0,719	0,650
λ_1	0,760	0,574
λ_0	0,147	0,150

Tabla 4
Índices de desempeño para el SMC
ante una perturbación en $W_1(t)$ un -20%

Métodos de sintonización	IEC
Ajuste Z-N	0,4610
Reajuste usando GA	0,0323

Para los procesos no-lineales, tratados en este trabajo, las mejoras en el desempeño del controlador son hasta de un 95% con respecto al desempeño del controlador sintonizado por las ecuaciones mencionadas previamente.

Los resultados de la sintonización mediante GA muestran que no hay diferencia al usar una población de codificación binaria o una codificación de valores numéricos reales. Siendo la única

ventaja que al trabajar con individuos de codificación numérica real, el tiempo de procesamiento de datos disminuye.

Referencias Bibliográficas

1. Smith C., Corripio A., "Control automático de procesos. Teoría y práctica". Limusa, Noriega editores.
2. Camacho O., Rojas R., García W., "Variable structure control applied to chemical processes with inverse response". ISA Transactions 38 (1999) 55-72.
3. Ng K. C., Y. Li., Murray-Smith, Y Sharman K. C., "Genetics Algorithms Applied to Fuzzy Sliding Mode Controller Design". In Proc. First IEE/IEEE Int. Conf. on GA in Eng. Syst.: Innovations and Appl., pages 220-225, Sheffield, U.K., September 1995.
4. Camacho O., Smith C. A., "Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes". ISA Transactions 39 (2000) 205-218.
5. Camacho O., "A new approach to design and tune sliding mode controllers for chemical processes". Doctoral dissertation, University of South Florida, Tampa, Florida, August 1996.
6. Utkin V. I., "Variable structure systems with sliding modes", Transactions of IEEE on Automatic Control AC (22) (1977) 212-222.
7. Ziegler, J. G. and Nichols N. B., "Optimum Setting for Automatic Controllers", ASME Trans. 64, 1942.
8. Camacho O. y Rojas R., "Notas de Control del Postgrado en Automatización e Instrumentación". Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 1998.
9. Mitchell M., "An introduction to genetic algorithms". Eighth printing first MIT press paperback edition, 1998, Massachusetts Institute of Technology. 2002.

Recibido el 15 de Junio de 2004

En forma revisada el 3 de Octubre de 2005