

Ecuaciones de Sintonización para Controlador por Modos Deslizantes y Control de Matriz Dinámica a partir de un Módulo Difuso

Edinzo Jesús Iglesias Sánchez¹
Jesús Manuel García García²
Oscar Eduardo Camacho Quintero³
Silvia Margarita Calderón⁴
Andrés Rosales Acosta⁵

Autor para correspondencia: oscar.camacho@epn.edu.ec

¹Investigador Prometeo. Escuela Politécnica Nacional

²Asistente de Investigación. Universidad del Norte, Barranquilla – Colombia

³Profesor Titular. Departamento de Operaciones Unitarias y Proyectos Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes

⁴Profesor Asociado. Departamento de Química Industrial y Aplicada. Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes

⁵Director de Investigación y Proyección Social. Escuela Politécnica Nacional

Manuscrito recibido el 01 de junio de 2015
Aprobado tras revisión el 30 de junio de 2015

RESUMEN

El propósito de este trabajo es desarrollar ecuaciones de sintonización para varios esquemas de control, usando lógica difusa. Se desarrollan estas a partir de la función objetivo, las nuevas ecuaciones de sintonización se usan en un proceso químico no lineal para comparar las ecuaciones originales con las encontradas, finalmente unas conclusiones son presentadas.

Palabras clave: Parámetros de ajuste, FOPDT, PID, SMC, DMC.

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop tuning equations for multiple control schemes, using diffusion logic. They are developed from the target function; the new tuning equations are used in a nonlinear chemical process to compare the original equations with the information found. Therefore, this work presents the conclusions.

Keywords: Tuning Parameters, FOPDT, PID, SCM, DCM.

INTRODUCCIÓN

Uno de los factores fundamentales para mejorar el desempeño de un proceso está asociado a los parámetros de ajuste del controlador. Muchos de estos controladores, por muy complejos o sencillos que puedan ser, requieren parámetros de sintonización, que registren valores iniciales para ajustar el controlador y, a partir de estos, establecer el desempeño adecuado. De dichos valores dependerá en gran medida el éxito o fracaso de la estrategia de control empleada. Es importante que los controladores sean capaces de mantener el proceso de manera eficiente y automática dentro de la operación deseada.

El algoritmo de control más popular utilizado en la industria es el controlador PID, éste ha sido usado con éxito para diferentes aplicaciones tales como convertidores eléctricos, procesos de la industria petroquímica, robótica, tele operación, biomédica y muchos otros. O'Dwyer, A. (2006) presentó una recopilación de ecuaciones

de sintonización para estos controladores, este trabajo muestra que existe una gran cantidad de ecuaciones que sirven para sintonizar dicho controlador y que cada una de ellas puede dar un determinado desempeño, con lo cual se puede pensar que a pesar de la antigüedad, popularidad y adecuado desempeño que pueda presentar un controlador, siempre es posible encontrar una ecuación que permita lograr un mejor ajuste requerido.

En este trabajo se utilizará lógica difusa (García Y., Sanjuan M., y Smith C., 2005) con la finalidad de obtener ecuaciones de sintonización para dos controladores. El primero es un tipo de controlador robusto conocido como Controlador por Modos Deslizantes, por sus siglas en inglés SMC. El segundo controlador es un tipo de controlador predictivo que se usa tanto para sistemas una entrada-una salida como para sistemas multivariados con retardo, conocido como Controlador de Matriz Dinámica, por sus siglas en inglés como DMC. Ambos algoritmos de control han sido desarrollados y aplicados en una amplia gama de aplicaciones industriales (Camacho O. y Smith C., 2000, Qina S. J. y Badgwell, T., 2003 y Rawlings J. B., 2000).

El artículo está dividido de la siguiente manera, la sección 1 presenta una breve introducción, en la 2 se revisan de una manera breve ambas estrategias de control, en la sección 3 se desarrolla la función objetivo, en la sección 4 muestra las ecuaciones encontradas, se usa un ejemplo no lineal para comparar las ecuaciones originales con las encontradas, finalmente unas conclusiones son presentadas.

ESQUEMAS DE CONTROL

En esta sección se presentarán de una manera breve los fundamentos de los controladores a los cuales se les propondrán nuevas ecuaciones de sintonización. En primer lugar describiremos el SMC y en segundo lugar el DMC.

Control por modo deslizante (SMC)

El Control por Modo Deslizante (SlidingMode Control, SMC) es una técnica derivada del control por estructura variable (Variable Structure Control, VSC) estudiado originalmente por Utkin V. I. (1977). 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 mostrado ser robusto en plantas con incertidumbre, con procesos con elevados retardos (De La Cruz F., y Camacho O., 2015), así como con altas no-linealidades, donde técnicas tradicionales no presentan un buen desempeño.

El SMC que será utilizado en este artículo es de estructura fija y fue propuesto por Camacho O. y Smith C. (2000). Las ecuaciones que describen a este controlador se muestran a continuación:

$$(1) \quad U(t) = \left(\frac{t_0 \cdot \tau}{K_p} \right) \cdot \left[\left(\frac{t_0 + \tau}{t_0 \cdot \tau} - \lambda_1 \right) \cdot \frac{dX(t)}{dt} + \frac{X(t)}{t_0 \cdot \tau} + \lambda_0 \cdot e(t) \right] + K_D \cdot \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta}$$

$$(2) \quad S(t) = \text{signo}(K_p) \cdot \left[\frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 \cdot e(t) + \lambda_0 \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \right]$$

Donde, $X(t)$ es la respuesta del proceso y $\lambda_0, \lambda_1, K_D, \delta$ son los parámetros de sintonización del controlador. El termino signo (K_p) solo sirve para indicar la acción del controlador, ya sea acción directa o acción reversa. Para completar el SMC, se usan las siguientes ecuaciones de ajuste:

Para la parte continua del controlador y la superficie deslizante.

$$(3) \quad \lambda_1 = \frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau}$$

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

Para la parte discontinua del controlador.

$$(5) \quad K_D = \frac{0.51}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} \quad [=\text{fracción CO}]$$

$$(6) \quad \delta = 0.68 + 0.12 |K| K_D \alpha_1 \quad [=\text{fracción TO/tiempo}]$$

Las ecuaciones de sintonización están basadas en los parámetros característicos del proceso (K_p, τ, t_0), las cuales son obtenidas a través del método de identificación a lazo abierto o curva de reacción (Smith, C y Corripio A.B, 2006).

Control basado en Matriz Dinámica (DMC)

El controlador DMC fue desarrollado por Cutler C. R. y Ramaker B. C. (1980) y ha sido aceptado ampliamente en el mundo industrial, principalmente por las industrias petroquímicas (Qina, S.J y Badgwell, 2003).

El DMC es una técnica de control lineal donde el proceso es representado dinámicamente por un modelo numérico en forma de respuesta escalón. Este modelo está formado por un conjunto de valores discretos que corresponden a la salida del sistema ante un cambio escalón en la entrada. Un modelo de respuesta al escalón unitario es utilizado para predecir la respuesta futura de las variables dependientes y produce una serie de cambios de control para todas las variables independientes, estos son seleccionados para minimizar el error del proceso sobre el horizonte de tiempo al estado estable.

Entre las ventajas que se pueden destacar para este tipo de controlador son: ajuste intuitivo y simple; puede ser utilizado en sistemas con dinámicas complejas; el caso multivariable puede tratarse fácilmente; es favorable para sistemas con grandes retardos; permite la compensación de las perturbaciones medibles; la incorporación de las restricciones es conceptualmente simple durante el proceso de diseño del controlador y permite la utilización de las referencias futuras.

El DMC presenta inconvenientes debido a la necesidad de disponer de un modelo apropiado del proceso. Cuando el sistema es no lineal, se puede dar el caso de comportamientos inestables, con lo cual queda afectada la robustez del sistema de control.

Este tipo de control se basa en la Ec. (7) propuesta por Cutler y Ramaker (1980)

$$(7) \quad \Delta M = (A^T \cdot A + \lambda^2 \cdot I)^{-1} \cdot A^T \cdot E$$

Donde:

A: Matriz de la respuesta del proceso, la cual será tan grande como los valores que se escojan del horizonte de control (CH) y del horizonte de predicción (PH).

λ : Factor de supresión, el cual sirve como parámetro de sintonización.

I: Matriz identidad.

E: Error.

ΔM : Cambio en la salida del controlador.

El exponente -1 indica que se trata de la matriz inversa y el exponente T indica que se trata de la matriz transpuesta.

Para finalizar, el factor de supresión es un parámetro de sintonización función de los parámetros característicos del proceso. Iglesias, E. (2006) demostró que el mejor valor es:

$$(8) \quad \lambda = 1.631 K_p \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{0.4094}$$

3. FUNCIÓN DE COSTO.

Dentro de este contexto, una función de costo es un parámetro capaz de medir el rendimiento de una respuesta del sistema, partiendo para ello del análisis de diferentes características de ésta. A medida que la función de costo es más compleja, mejora sustancialmente la capacidad que tiene para diferenciar una buena respuesta de otra que no lo es tanto.

Muchas de las ecuaciones de sintonización que se han creado se basan en criterios de minimización del error, o también conocidos como índices de desempeño tales como el IAE (Integral del valor Absoluto del Error) como función de costo. Este índice le otorga la misma importancia a todos los errores independientemente de su signo y del momento en que se presenten. En la Ec. (9) se muestra la ecuación del IAE.

$$(9) \quad IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

A medida que el valor de IAE es más pequeño, teóricamente la respuesta que se está midiendo es mejor. Aunque en general el IAE es muy utilizado debido a su sencillez, existen casos donde las respuestas que presentan el valor más bajo de IAE no necesariamente son las mejores. Es por esta razón que en ocasiones se usan otros índices como ITAE, ISE, ITSE, y se decidió crear una función de costo un poco más elaborada que fuese capaz de eliminar las respuestas no deseadas (Pérez, J., 2010).

Después de analizar un sistema de control por retroalimentación con un determinado controlador y un cambio de escalón en el punto de control, se obtuvo una serie de respuestas que debían ser evitadas por la función de costo creada.

De manera resumida, la función de costo implica las siguientes restricciones:

Si se presenta, luego del sobrepaso máximo de la primera oscilación, un punto con un valor más grande que éste, entonces la respuesta es rechazada. Para esto se multiplica la función de costo por un valor de 1 cuando las respuestas no infrinjan la regla y un valor cercano a cero en el caso contrario.

Se rechaza la respuesta cuyo primer mínimo local sea mayor que el valor del punto de estado estacionario. De igual forma que en el caso anterior, se multiplica la función de costo un valor de 1 cuando las respuestas no infrinjan la regla y un valor cercano a cero en el caso contrario.

Se realiza un escalado del IAE para que se tenga un valor comprendido entre 0 y 1. Para ello se multiplica por una constante negativa (la cual será establecida dependiendo del caso, quedando a juicio de la persona que use la función) y luego se aplica la función exponencial al valor obtenido por lo que, si el IAE es pequeño, el resultado será un número cercano a 1, de lo contrario el valor estará más cerca de 0.

Se cuentan el número de oscilaciones de cada respuesta para que, al momento de optimizar, se otorgue prioridad a una respuesta estable, de igual forma se escala el valor obtenido para tener un valor entre 0 y 1.

Una curva ideal debe ser totalmente cóncava por lo que, en cualquier punto, la segunda derivada debe ser menor que cero, en este sentido se obtiene el valor de la segunda derivada de la respuesta, se suman todos los valores mayores que cero y posteriormente se realiza un escalado para tener un valor dentro de 0 y 1.

El “peso” que tendrán los últimos tres ítems dentro de la función de costo dependerá del valor de la constante que se use. El valor de la función de costo viene dado por la multiplicación de cada uno de los apartados anteriores con el índice difuso.

Es así como la función de costo se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma:

$$(10) \quad F_{\text{costo}} = \prod_{n=1}^n R_n$$

$R_1 = \begin{cases} A \\ 1 \end{cases}$ Depende del tipo de respuesta. Ver ítem 1. El valor A depende del usuario, es de recordar que éste debe estar cercano a cero.

$R_2 = \begin{cases} B \\ 1 \end{cases}$ Depende del tipo de respuesta. Ver ítem 2. El valor B depende del usuario y debe estar cercano a cero.

$R_3 = e^{-C \cdot \text{IAE}}$ Donde C representa el escalado, el cual depende también del usuario.

$R_4 = e^{-D \cdot N}$ Donde D representa el escalado. Y el valor de N representa el número de oscilaciones.

$R_5 = e^{-E \cdot F}$ Donde E representa el escalado. Y el valor de F representa la sumatoria de los puntos en los cuales la segunda derivada de la curva en estudio es mayor que cero.

R_6 Representa el valor del módulo difuso.

RESULTADOS

Ecuaciones de sintonización obtenidas

Con el fin de obtener las ecuaciones de sintonización para los controladores estudiados, en primer lugar se realizó un análisis de varianza para determinar la influencia de la dinámica del proceso (K_p, τ, t_0) sobre la estrategia de control. Posteriormente, para cada una de las combinaciones posibles de los parámetros, se buscará la respuesta óptima de acuerdo a los valores arrojados por la función de costo realizada.

A partir de los valores obtenidos, se realizan regresiones no lineales. Para ello se usó la función *nonlinfiten* Matlab, ajustando los óptimos experimentales y las formas establecidas previamente mediante el análisis de varianza.

Ecuaciones de sintonización para el controlador por modo deslizante (SMC).

Luego de realizar las regresiones no lineales, se obtuvieron las ecuaciones de ajuste para el controlador por modos deslizantes, las mismas son:

$$(11) \quad \lambda_1 = \left[\frac{0,1670}{K_p^{0,00952006} \cdot \tau^{0,23411884}} + 0,8558 \cdot \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{0,0163} \right]^{27,8127}$$

$$(12) \quad \lambda_0 = 0,7072 \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{1,7331} \cdot \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{1,0898}$$

$$(13) \quad K_D = \frac{32,5364 \cdot \tau^{0,5924}}{K_p^{0,7997}}$$

$$(14) \quad \delta = \frac{27,9585}{K_p^{2,5890} \cdot \tau^{6,6041}} \cdot \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{7,4562} + 72,4675$$

En la Fig. 1 se comparan el desempeño de las ecuaciones obtenidas como el de las ecuaciones de referencia dadas por Camacho y Smith (2000). Ambos conjuntos de ecuaciones son probadas para un sistema de primer orden con retardo.

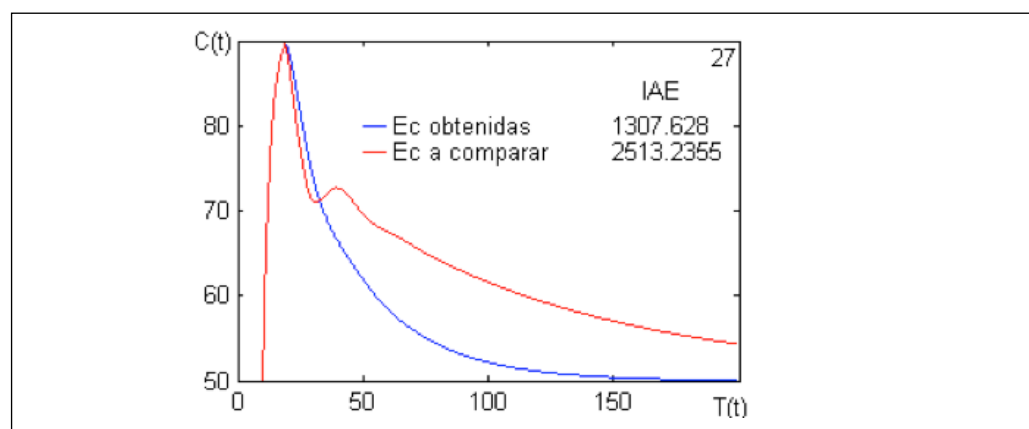


Figura 1.
 Respuestas para
 $K_p = 2.5, \tau = 3, t_0 = 9$
Fuente:
 Edinzo Iglesias, Jesús
 García, Oscar Camacho,
 Silvia Calderón, Andrés
 Rosales (2015)

La Fig. 1 muestra cómo la respuesta dada por las ecuaciones creadas es más rápida y, por lo tanto, permite llevar el sistema de una manera más efectiva hasta el estado estacionario.

Ecuación de sintonización para controlador estándar DMC.

La Ec. (15) muestra la expresión obtenida luego de realizar la regresión no lineal.

$$(15) \quad \lambda = \frac{0,0011347 \cdot K_p^{8,6578}}{\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{2,1375}} + 8,295 \left(\frac{K_p \cdot t_0}{\tau}\right)^{0,99335} \quad R^2 = 0,93034211$$

En la Fig. 2 se muestra el desempeño tanto de la ecuación obtenida como el de la ecuación de referencia, Iglesias E. (2006).

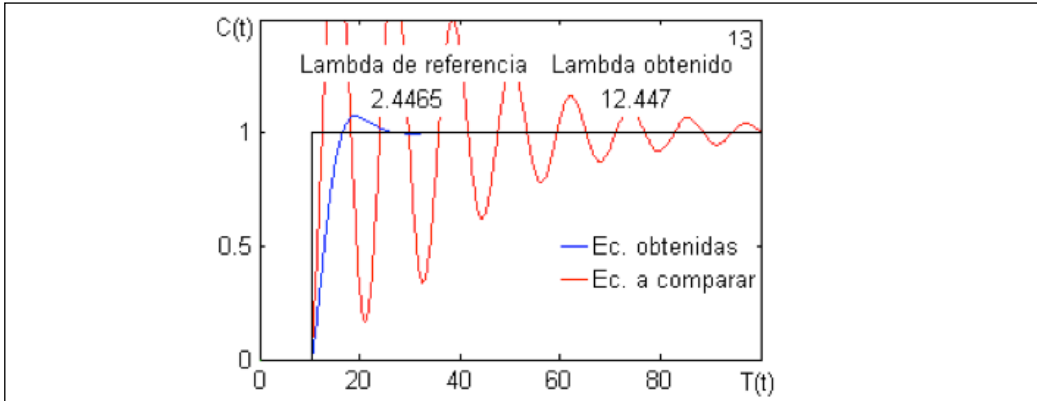


Figura 2.
Respuestas para $K_p = 1,5, \tau = 2, t_0 = 2$
Fuente:
Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

En la Fig. 2 se puede ver una gran mejoría de la respuesta del sistema cuando se usa la ecuación creada. Esta arroja una respuesta sin oscilaciones abruptas y además el tiempo de asentamiento es mejor y permite llevar el proceso a su nuevo valor de estado estacionario de una manera más rápida.

EVALUACION DE ECUACIONES APLICADAS A UN PROCESO NO LINEAL

El reactor mostrado en la Fig. 3 es un tanque de reacción agitado continuamente (CSTR por sus siglas en inglés) en el cual se lleva a cabo la siguiente reacción exotérmica $A \rightarrow B$. Con la finalidad de retirar el calor de reacción producido, el reactor se encuentra rodeado por una chaqueta a través de la cual pasa el fluido de enfriamiento. En la simulación realizada para representar este sistema se despreciaron las pérdidas de calor, desde la chaqueta hacia el exterior, el nivel de líquido es constante y tanto las densidades como capacidades caloríficas de los reactivos y productos se asumieron iguales y constantes.

El sistema de control planteado consiste en un lazo sencillo, donde la variable controlada es la temperatura de salida de los productos del reactor y la variable manipulada es el flujo del fluido de enfriamiento. Este modelo es una adaptación del presentado en este (Smith y Corripio, 2006).

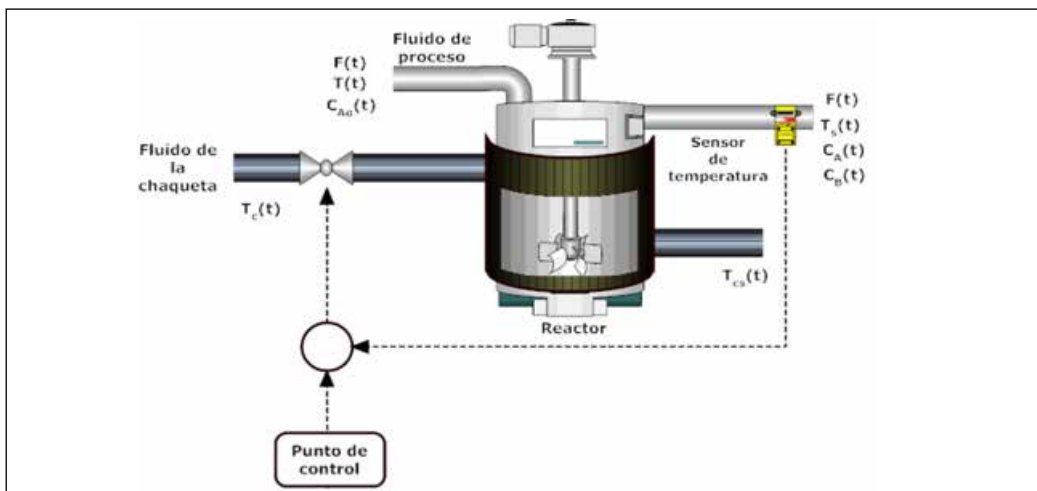


Figura 3.
Esquema general del reactor no isotérmico.
Fuente:
Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

En las dos siguientes secciones se compararán las ecuaciones obtenidas con respecto a las originales. En primer lugar se revisará el caso para el controlador por modos deslizantes y luego de manera similar para el controlador de matriz dinámica.

Comparación de las ecuaciones de sintonización del controlador SMC.

En la tabla 1 se presentan los valores para la sintonización del controlador SMC

Tabla 1.
Valores de sintonización para el controlador SMC.

Sintonización	_1	_0	K_D	
Ecuaciones de referencia	0,3925	0,0385	73,8955	71,8983
Ecuaciones obtenidas	0,4196	0,0445	96,9891	72,4720

Fuente:
Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

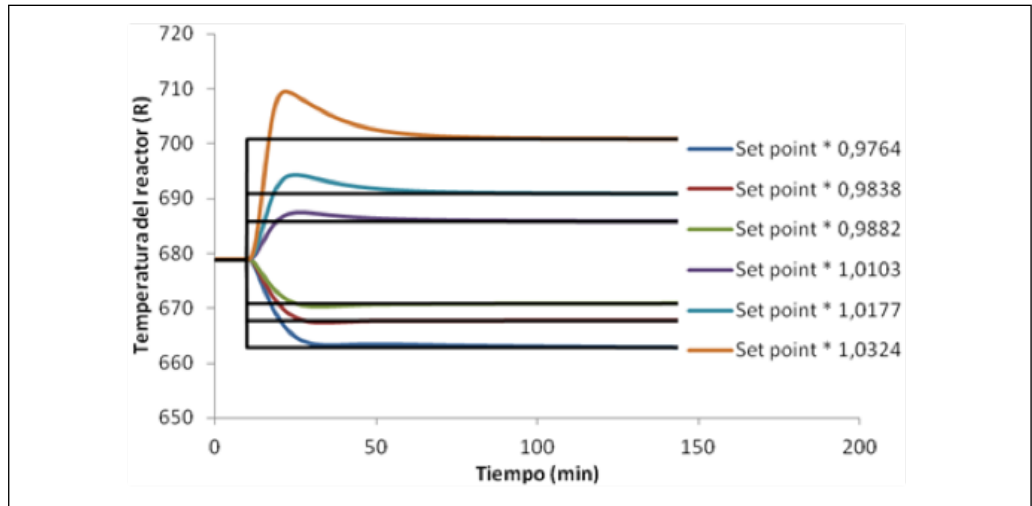


Figura 4.
Respuestas dadas por las ecuaciones obtenidas.

Fuente:
Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

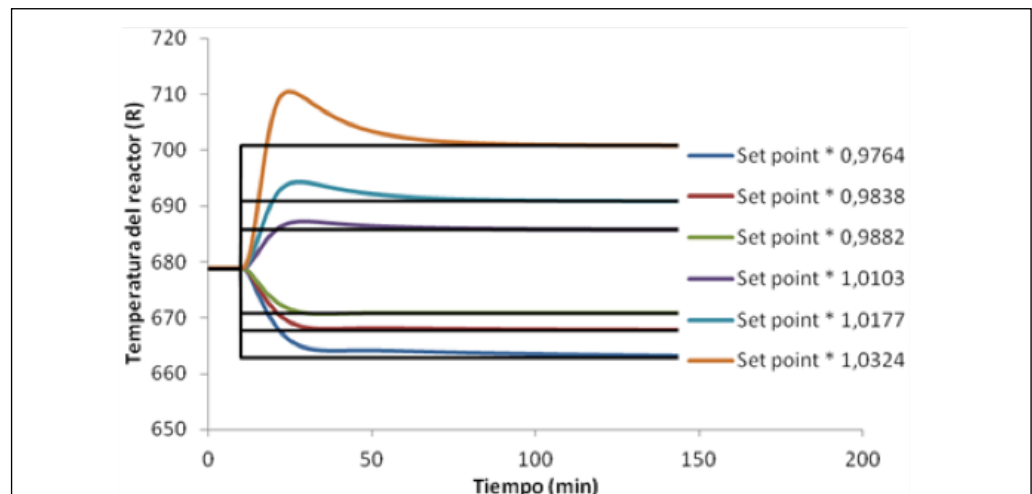


Figura 5.
Respuestas dadas por las ecuaciones originales.

Fuente:
Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

Los resultados de las respuestas del proceso para diferentes valores en la consigna, se pueden observar en las figuras anteriores, las respuestas son bastante similares. Las respuestas dadas por las nuevas ecuaciones son ligeramente más rápidas. La siguiente figura muestra la respuesta del proceso para diferentes cambios en el flujo.

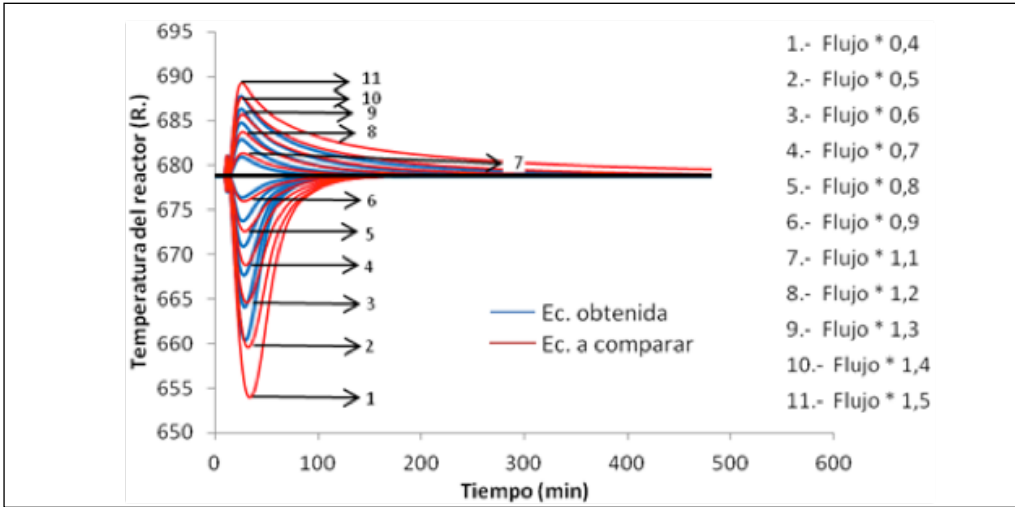


Figura 6. Respuestas obtenidas para diferentes cambios del flujo de proceso.

Fuente: Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

La Figura 6 muestra el comportamiento del sistema, cuando ambos conjuntos de ecuaciones, controlador SMC, son usados. El conjunto de ecuaciones encontradas u obtenidas producen una respuesta con un menor sobre pico y un poco más rápida que la arrojada por el conjunto de ecuaciones originales, por lo cual se puede observar cómo el desempeño de éstas es un poco mejor que las originales. Esto coincide con los resultados obtenidos en las figuras previas.

Comparación de la ecuación de sintonización del DMC.

En la tabla 2 se presentan los valores para la sintonización del controlador DMC

Sintonización	λ
Ecuación de referencia	1,4074
Ecuaciones obtenidas	4,94221

Tabla 2. Valores de sintonización para el controlador DMC.

Fuente: Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

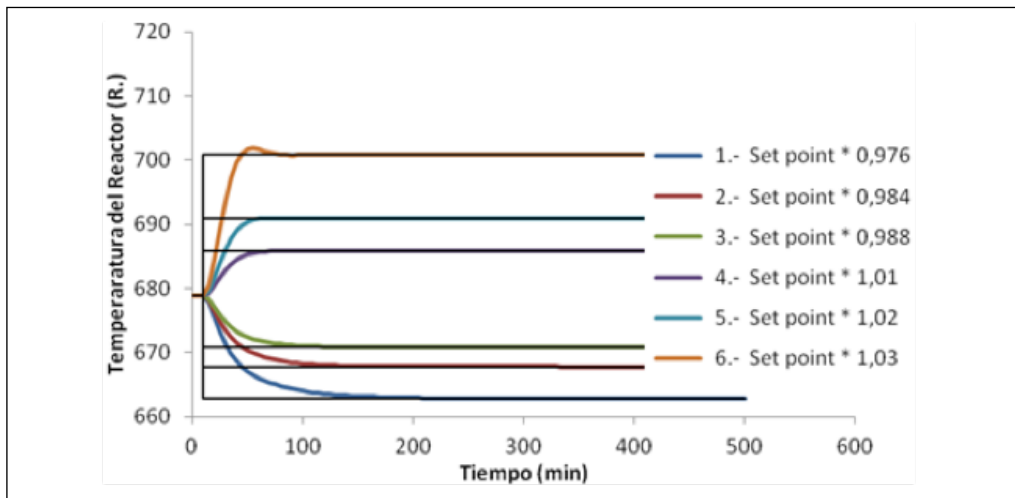


Figura 7. Respuestas obtenidas con la ecuación encontrada.

Fuente: Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

Figura 8.
Respuestas obtenidas con la ecuación original.
Fuente:
Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)

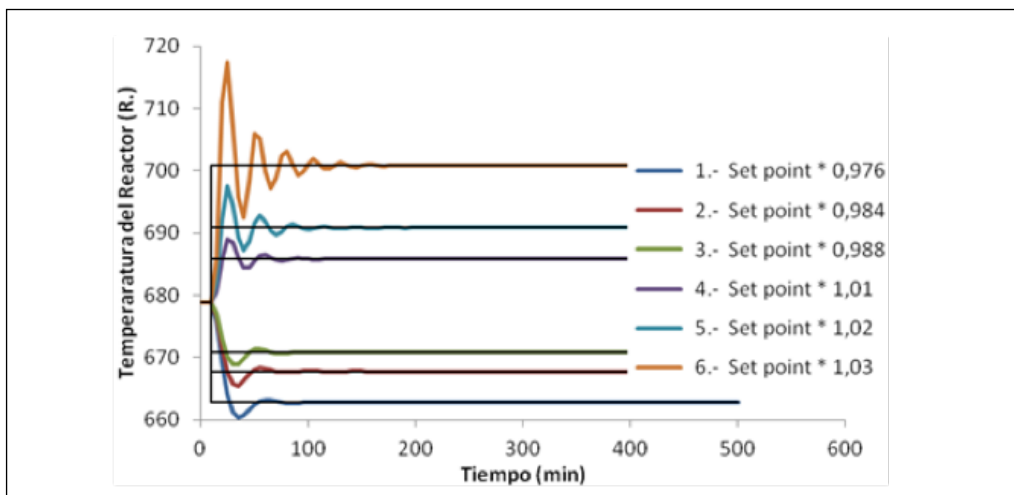
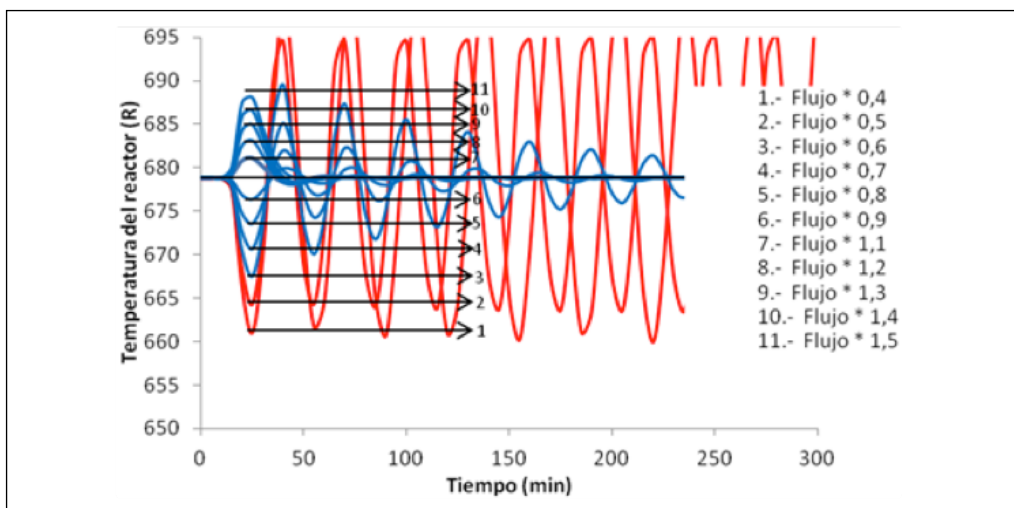


Figura 9.
Respuestas obtenidas para diferentes cambios del flujo de proceso.
Fuente:
Edinzo Iglesias, Jesús García, Oscar Camacho, Silvia Calderón, Andrés Rosales (2015)



Como se puede ver en las figuras previas, el valor arrojado por la ecuación de referencia, no proporciona una respuesta suave; por el contrario, es demasiado agresiva y aunque trae como consecuencia un sistema más rápido, también lo hace más oscilatorio y probablemente se haga inestable. Por otra parte, la ecuación creada aunque presenta una respuesta con ligeras oscilaciones en ningún caso tornó al sistema inestable.

Por otro lado en el análisis de las respuestas para ambos controladores, se observa que el controlador SMC presenta un mejor desempeño que el controlador DMC, siendo suaves y sin oscilaciones, pareciendo más robusto.

CONCLUSIONES

Se logró el desarrollo de una función de costo bastante completa. A partir del uso de esta función de costo, se propusieron las ecuaciones para sintonizar el controlador por modos deslizantes y el controlador por matriz dinámica.

Se propuso un conjunto de ecuaciones para sintonizar los parámetros de ajuste de un controlador por modo deslizante (SMC). Se encontró una ecuación para determinar el valor del factor de supresión necesario para el control por matriz dinámica (DMC).

Se compararon las respuestas dadas en ambas estrategias de control (SMC, DMC) sobre un modelo no lineal de un reactor no isotérmico, de tal manera para estimar el desempeño de las ecuaciones obtenidas con respecto a las ecuaciones consideradas como referencia.

RECONOCIMIENTO

Oscar Camacho agradece al Proyecto Prometeo de la Secretaria de Educación Superior, Ciencia Tecnología e Innovación – SENESCYT de la República del Ecuador, por su patrocinio para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Camacho O., and Smith C. (2000). *Sliding Mode Control: An Approach to Regulate Nonlinear Chemical Processes*. ISA Transactions, 39 (2), Pp. 205-218.
- Cutler C. R. and Ramaker B. C. (1980). *Dynamic Matrix Control-A Computer Control Algorithm. Proceeding of the 86th National Meeting of the American Institute of Chemical Engineering*, Houston, TX. WP5-B.
- De La Cruz F., y Camacho O. (2015). *Controlador de Modos Deslizantes basado en Predictor de Smith y Modelo de Segundo Orden para Procesos con Elevado Retardo*. Revista Politécnica. Vol. 35. Pp. 18-23.
- García Y., Sanjuan M., y Smith C. (2005). *Controlador de modelo interno con filtro difuso (IMCFD)*. Revista Ingeniería & Desarrollo, Vol. 1, N° 17. Pp 68-86.
- Iglesias, E. (2006). *Using Fuzzy Logic to Enhance Control Performance of Sliding Mode Control and Dynamic Matrix Control*, Ph. D Thesis. University of South Florida.
- O'Dwyer, A. (2006). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Ireland: Imperial College Press.
- Pérez, J. (2010). *Desarrollo de ecuaciones de sintonización para diferentes estrategias de control a partir de un módulo difuso de evaluación de rendimiento de lazos de control*. Tesis pregrado. Universidad de Los Andes.
- Rawlings J. B. (2000). *Tutorial Overview of Model Predictive Control*. IEEE Control System Magazine. Pp. 38-52.
- Qina S. J. and Badgwell, T. (2003). "A survey of industrial model predictive control technology". *Control Engineering Practice* 11. Pp. 733-764.
- Smith, C.A. and Corripio, A.B. (2006). *Principles and Practices of Automatic Process Control*, 3rd Edition. USA: WILEY.
- Utkin V. I. (1977). *Variable Structure Systems with Sliding Modes*. IEEE Transactions On Automatic Control, VOL. AC-22, NO. 2. Pp. 212-222.