

UN NUEVO ENFOQUE DEL CONTROL POR MODO DESLIZANTE PARA SISTEMAS MULTIVARIABLES

(A NEW APPROACH OF SLIDING MODE CONTROL FOR MULTIVARIABLE SYSTEMS)

Recibido: 20/04/2016

Aprobado: 14/06/2016

Rafael Orellana

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela
rafael.orellana@ula.ve, rafael.orellana.prato@gmail.com

María Coronel

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela
maria.coronel@ula.ve, mcoronelmendez@gmail.com

Rubén Rojas

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela
rdrojas@ula.ve

Oriana Pérez

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela
oriana_244@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de control por modo deslizante (SMCr = *Sliding Mode Controller*) basado en alimentación hacia adelante (*feedforward*), aplicado a un sistema multivariable y sintonizado para especificaciones de la respuesta transitoria, usando modelos de primer orden más tiempo muerto (POMTM). Como caso de estudio se presenta el modelo multivariable de dos entradas y dos salidas de una columna de destilación Wood-Berry, la cual presenta un alto índice de interacción. Las pruebas demostraron que la estrategia de control propuesta mejora el desempeño de un sistema de control multivariable ante cambios en los valores de referencia y rechazo a las perturbaciones; sin embargo, el tiempo de establecimiento de las variables controladas aumenta el producto de dinámica considerada en el desacoplamiento. Se comprobó que en los sistemas con alta interacción las señales de control tienen cambios más suaves lo que indica menor desgaste en los elementos finales de control.

Palabras claves: Multivariable, Modo deslizante, Interacción, Control.

ABSTRACT

This paper presents the design of feedforward decoupling sliding mode control (SMCr) for multivariable systems, using models of first order plus dead time (FOPDT) for tuning transitory response specifications. As study case is used a first order plus dead time model

system of a Wood and Berry distillation column. The results shows the strategy control proposed improves the performance of multivariable control system for set-point tracking and reject disturbances, however, setting times of control outputs system is increase for dynamic characteristics of feedforward decoupling technique. It was probed for multivariable system with high interaction that the control signal has soft changes, indicating less wear and tear of control final elements.

Keywords: *Multivariable, Sliding mode, Interaction, Control.*

INTRODUCCIÓN

En los sistemas multivariables, el efecto más importante a ser considerado para el diseño y sintonización de lazos de control es la interacción que tiene lugar entre las variables [1]. Una de las técnicas empleadas para mitigar ese problema consiste en eliminar dicha interacción y transformar el sistema multivariable en “n” sistemas con una entrada y una salida, para finalmente aplicar técnicas de control en el sistema.

El uso de técnicas de control tradicionales puede comprometer el desempeño del sistema de control cuando persisten efectos, tales como altos índices de interacción y no linealidades. Para compensar de tales efectos se recurre al uso de técnicas de control robusto, siendo el control por modo deslizante (SMCr = *Sliding Mode Controller*) una de esas soluciones.

En ese sentido, en este trabajo se diseña una estrategia de control por modo deslizante o SMCr, para operar de manera global en el sistema multivariable, manejando conjuntamente toda la información de las variables controladas y así poder solventar el problema de las fuertes interacciones entre las variables, mejorando la respuesta dinámica de los lazos de control en cuanto a sobre-impulso y tiempo de establecimiento.

La síntesis del controlador es deducida a partir de un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) para sistemas multivariables de dos entradas y dos salidas [2], junto con técnicas de desacoplamiento por alimentación hacia adelante [3]. Se considera una superficie deslizante integro-diferencial y una aproximación continua no lineal para el diseño del controlador, cuyo objetivo es la supresión de efecto de *chattering* (oscilaciones de alta frecuencia) sin afectar la condición de error en estado estacionario logrado con la componente integral [4].

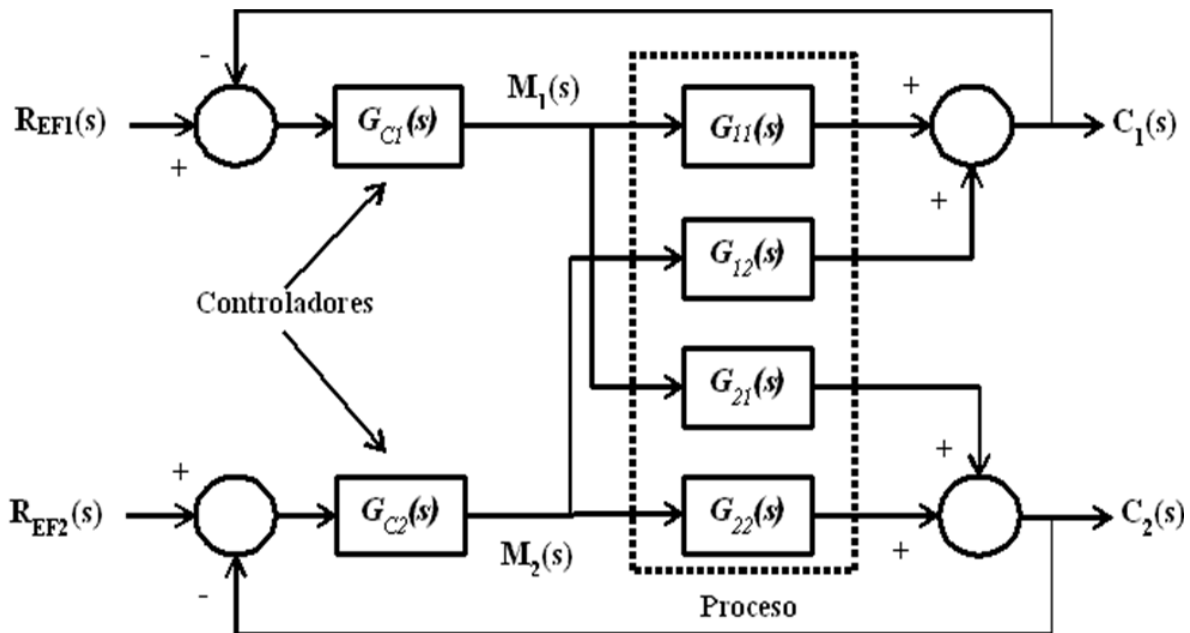
Adicionalmente, se evalúa el desempeño de la estrategia propuesta para especificaciones del régimen transitorio, cambios del tipo escalón en los valores de referencia, efecto ante perturbaciones y errores de modelaje en los parámetros del modelo multivariable POMTM de una columna de destilación Wood-Berry [5].

MARCO TEÓRICO

La Figura 1 muestra un esquema clásico de control multivariable para un sistema de dos entradas y dos salida (2x2). La interacción entre los lazos de control se representa por las funciones de transferencia $G_{12}(s)$ y $G_{21}(s)$. Los controladores $G_{c1}(s)$ y $G_{c2}(s)$ actúan

sobre los lazos directos de control modelados con las funciones de transferencia $G_{11}(s)$ y $G_{22}(s)$. Un cambio en los valores de referencia del sistema de control multivariable $R_{EF1}(s)$ y $R_{EF2}(s)$ afecta la estabilidad y desempeño de los lazos de control [6].

Figura 1. Sistema de control multivariable 2x2



Una solución para compensar el efecto de la interacción entre los lazos es el uso de un bloque desacoplador. Los desacopladores descomponen el sistema multivariable en múltiples subsistemas de una variable, lo que permite establecer un sistema de control multivariable con un controlador independiente para cada lazo [6].

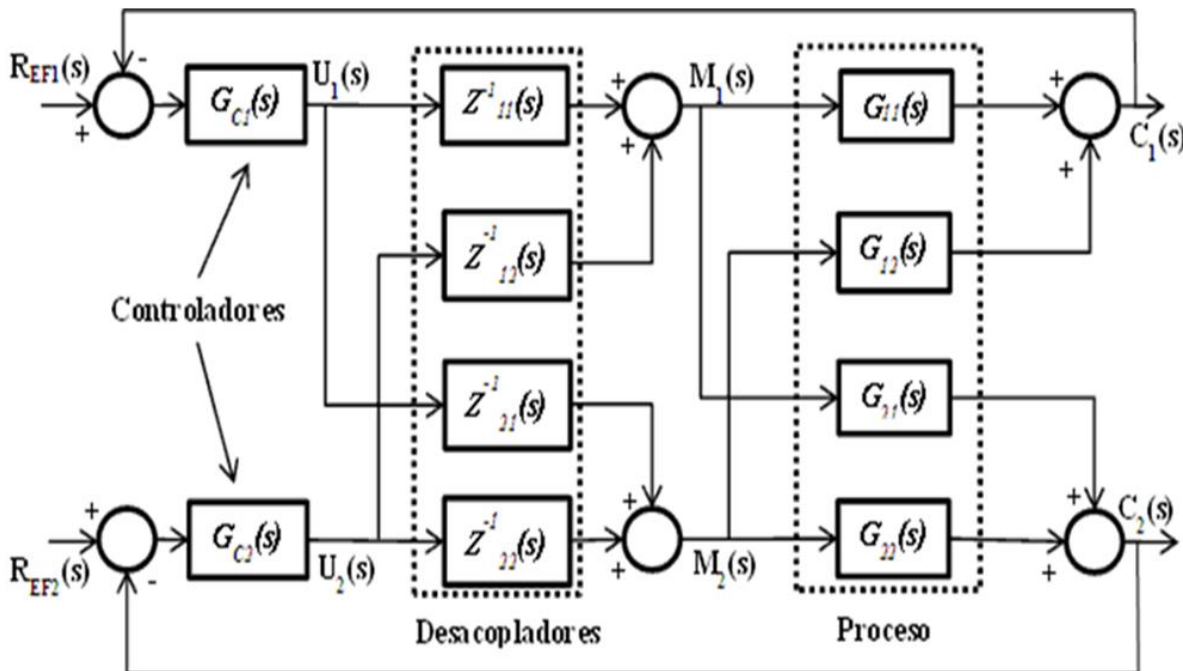
El uso de desacopladores basados en alimentación hacia adelante (*feedforward*) consiste en transformar la matriz de función de transferencia del sistema multivariable a la forma diagonal mediante la cancelación de los términos que producen la interacción; esto con el uso de una matriz adicional que tendría la función de desacoplamiento [3]. La Figura 2 muestra el esquema de control multivariable usando desacopladores basados en alimentación hacia adelante.

La matriz que logra el desacoplamiento viene dada por la matriz inversa de $Z(s)$ la cual considera características dinámicas del sistema [3, 4]. Las variables $U(s)$ son dadas por la sintonización de una estrategia de control y junto con el bloque desacoplador permite obtener las entradas al sistema $M(s)$.

El control por modo deslizante o SMCr, es una técnica derivada de control por estructura variable. Su fundamento radica en lograr el movimiento del sistema en un subespacio de estado llamado superficie deslizante, $s(t)$, y que éste permanezca sobre dicha superficie [7]. Por ello, la ley de control emplea una acción de conmutación que permite al sistema alcanzar la superficie deslizante en un tiempo finito (acción generalmente llamada

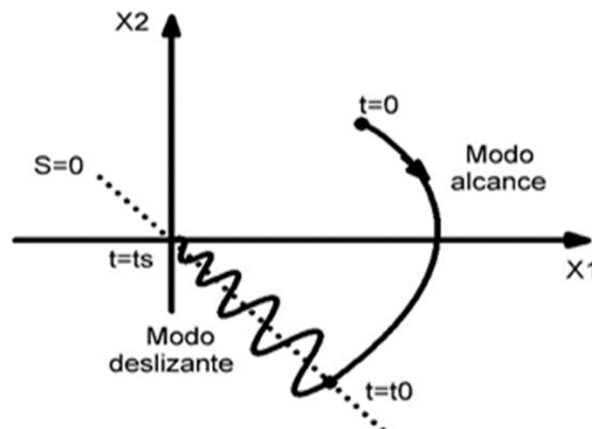
“discontinua”), así como también permite que el sistema en cuestión permanezca sobre la misma una vez alcanzada la mencionada superficie (acción por lo general denominada “continua”) [4, 8].

Figura 2. Sistema de control multivariable 2x2 con desacopladores basados en alimentación adelantada



En sistemas reales, los elementos finales de control que ejecutan la conmutación tienen imperfecciones, por lo que los cambios ocurren a una frecuencia finita y la trayectoria del sistema oscila alrededor de la superficie deslizante [8]. Ese efecto se conoce como *chattering* y se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Oscilaciones alrededor de la superficie deslizante





SÍNTESIS DEL CONTROLADOR SMC_r BASADO EN ALIMENTACIÓN HACIA ADELANTE

La matriz de función de transferencia de un proceso multivariable de dos entradas y dos salidas (2x2) para un modelo POMTM puede ser descrita de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{C(s)}{M(s)} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}}{\tau_{11}s+1} e^{-t_{011}s} & \frac{K_{12}}{\tau_{12}s+1} e^{-t_{012}s} \\ \frac{K_{21}}{\tau_{21}s+1} e^{-t_{021}s} & \frac{K_{22}}{\tau_{22}s+1} e^{-t_{022}s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde K_{ij} representa las ganancias estáticas, τ_{ij} las constantes de tiempo y t_{0ij} el tiempo muerto. La matriz de función de transferencia del proceso (2x2) dada por la ecuación (1) se puede transformar de la siguiente manera:

$$C(s) = G'(s)Z(s)M(s) = G'(s)U(s) \quad (2)$$

$$G'(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{(\tau_{11}s+1)(\tau_{12}s+1)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(\tau_{21}s+1)(\tau_{22}s+1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z(s) = \begin{bmatrix} K_{11}(\tau_{12}s+1)e^{-t_{011}s} & K_{12}(\tau_{11}s+1)e^{-t_{012}s} \\ K_{21}(\tau_{22}s+1)e^{-t_{021}s} & K_{22}(\tau_{21}s+1)e^{-t_{022}s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

La matriz $Z(s)$ con los elementos de tiempo muerto surge de transformación de la matriz de función de transferencia del proceso $G(s)$ en una aproximación diagonal $G'(s)$, por lo que cada lazo se puede analizar de forma independiente [3]. Una aproximación válida para los términos del tiempo muerto en $Z(s)$ es la expansión por serie de Taylor de primer orden [9]:

$$e^{-t_{0ij}} \cong \frac{1}{t_{0ij}s+1} \quad (5)$$

El vector $U(s)$ representa las variables manipuladas que controlarán el sistema diagonal $G'(s)$ y son dadas por la sintonización de una estrategia de control. Es posible obtener $U(s)$ de las ecuaciones que definen el control por modo deslizante partiendo del modelo en espacio de estado del sistema diagonal $G'(s)$. La dinámica de $G'(s)$ descrita en espacio de estado [2] para $j = 1, 2$ viene dada por:

$$\dot{x}_{2j-1}(t) = x_{2j}(t) \quad (6)$$

$$\dot{x}_{2j}(t) = -\frac{1}{\tau_{j1}\tau_{j2}} x_{2j-1}(t) - \frac{\tau_{j1}+\tau_{j2}}{\tau_{j1}\tau_{j2}} x_{2j}(t) + \frac{1}{\tau_{j1}\tau_{j2}} u_j(t) \quad (7)$$

$$c_j(t) = x_{2j-1}(t) \quad (8)$$



La superficie deslizante, $s(t)$, se define en términos del error, variante referida en aplicaciones de control de procesos químicos con tiempo muerto y fase no mínima [10, 11]. Considerando el error de estado, entre los valores de referencia $[x_{2j-1REF}(t)]$ y los estados $[x_{2j-1}(t)]$ que representan las variables controladas, se obtiene, para $j = 1, 2$:

$$s_{2j-1}(t) = \frac{d}{dt}e_j(t) + 2\lambda_{jj}\lambda_{0j}e_{2j-1}(t) + \lambda_{0j}^2 \int_0^t e_{2j-1}(t)dt \quad (9)$$

$$e_{2j-1}(t) = x_{2j-1REF}(t) - x_{2j-1}(t) \quad (10)$$

El modo deslizante existe solamente cuando la trayectoria satisface la ecuación de la superficie deslizante $s_{2j-1}(t) = 0$ [8]. Esto exige la presencia de la parte continua del controlador $[U_{eqj}(t)]$ cuya función es mantener el movimiento del sistema restringido en la superficie deslizante, y la parte no lineal del controlador $[U_{Nj}(t)]$ que asegura el alcance del modo deslizante [10]. Usando el método del control equivalente [7] para la existencia del modo deslizante, se obtiene la estructura continua del controlador asumiendo $x_{2j-1REF}(t)$ constantes (regulación) para $j = 1, 2$:

$$U_{eqj}(t) = \frac{1}{b_{jj}} [(a_{j1} - 2\lambda_{1j}\lambda_{0j})x_{2j}(t) + a_{j2}x_{2j-1}(t) + \lambda_{0j}^2 e_{2j-1}(t)] \quad (11)$$

$$a_{j1} = \frac{\tau_{j1} + \tau_{j2}}{\tau_{j1}\tau_{j2}} \quad a_{j2} = b_{jj} = \frac{1}{\tau_{j1}\tau_{j2}} \quad (12)$$

La parte discontinua del controlador $U_{Nj}(t)$ asegura que se alcance la superficie deslizante y por tanto, debe satisfacer la condición de alcanzabilidad [8]. El problema del *chattering* generalmente asociado a este tipo de controlador se reduce si la componente discontinua del controlador se diseña como [12]:

$$U_{Nj}(t) = K_{Dj} \frac{s_{2j-1}(t)}{|s_{2j-1}(t)| + \delta_j}; K_{Dj}, \delta_j > 0 \quad (13)$$

Donde K_{Dj} permite asegurar que sea alcanzado del modo deslizante para las superficies deslizantes, mientras el ajuste de δ_j permite la supresión del *chattering*. De manera general, la ley de control multivariable, $U_i(t)$, se forma por la suma de $U_{eqj}(t)$ y $U_{Nj}(t)$. Finalmente, las señales de control $M_i(s)$ se obtienen de la ecuación (2) usando transformada inversa de Laplace (\tilde{Z}^{-1}) y considerando la aproximación de la ecuación (5) para la inversa de la matriz $Z(s)$:

$$M(t) = \iota^{-1}\{\tilde{Z}^{-1}(s)U(s)\} \quad (14)$$

La ley de control por modo deslizante descrita para sistemas multivariables guarda estrecha relación con el comportamiento que se requiere en las variables controladas, que hace posible obtener una respuesta deseada del sistema en cuanto a características transitorias se refiere. En ese sentido, con el ajuste de los parámetros del controlador se

obtiene la ley de control que garantice la existencia y el alcance del modo deslizante [13, 14]

Considerando el máximo sobrepaso $M_{Pjmax}(\%)$ y el tiempo de establecimiento T_{Smaxj} con límite de asentamiento del 2%, como los parámetros que describen la respuesta transitoria de un sistema de segundo orden [15,] se obtienen las ecuaciones de $U_{eqj}(t)$:

$$\lambda_{1j} \geq \frac{\ln\left(\frac{M_{Pjmax}(\%)}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left[\ln\left(\frac{M_{Pjmax}(\%)}{100}\right)\right]^2}} \quad (15)$$

$$\lambda_{0j} > \frac{4}{T_{Smaxj} \lambda_{1j}} \quad (16)$$

Donde T_{Smaxj} y $M_{Pjmax}(\%)$ representan el máximo tiempo de establecimiento y sobrepaso, respectivamente, que puede tener la respuesta transitoria del sistema de control multivariable. Por otro lado, para el ajuste de los parámetros K_{Dj} y δ_j de la parte discontinua del controlador, se utilizan las ecuaciones propuestas por [11], considerando un sistema multivariable para un modelo POMTM, tal que para $i = 1,2$ y $j = 1,2$ con $i \neq j$:

$$K_{Dj} = 0,51 \left[\frac{\tau_{ii}}{\tau_{ij}} \right]^{0.76} \quad (17)$$

$$\delta_j = 0,68 + 0,12(K_{jj}K_{Dj}\lambda_{1j}) \quad (18)$$

METODOLOGÍA

El modelo lineal de una columna de destilación Metanol-Agua, basado en modelos POMTM, es el siguiente [5]:

$$\begin{bmatrix} X_T(s) \\ X_F(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8}{16,7s+1} e^{-s} & \frac{-18,9}{21s+1} e^{-3s} \\ \frac{6,6}{10,9s+1} e^{-7s} & \frac{-19,4}{14,4s+1} e^{-3s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(s) \\ M_2(s) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde $X_T(s)$ y $X_F(s)$ representan el porcentaje de las concentraciones de producto de tope y fondo de la columna de destilación, respectivamente, mientras que $M_1(s)$ y $M_2(s)$ son los flujos manipulados para controlar la concentración de los productos de la columna.

En primer lugar, se calcula la matriz de ganancia relativa (MGR) para determinar el mejor par de variables manipuladas-controladas [6]. Partiendo del modelo POMTM del sistema mutivariable, se obtiene el modelo desacoplado diagonal $G'(s)$, en el cual, describiendo la dinámica en modelo de espacio de estado, se obtiene la ley de control equivalente $U_{eqj}(t)$.

El ajuste de los parámetros de la parte continua del controlador (λ_{0j} y λ_{1j}) se lleva a cabo de acuerdo a las características de la respuesta transitoria deseada, es decir, un máximo



sobrepaso, $M_{p\max}(\%)$, de 15%, y tiempo de establecimiento, $T_{s\max}$, menor a $2(\tau_{ij} + \tau_{ij})$ (min).

Para la sintonización de la parte discontinua del controlador $U_{Nj}(t)$, se elige una sintonización inicial de los parámetros δ_j y K_{Dj} usando las ecuaciones (17) y (18).

Posteriormente, se re-ajusta el parámetro K_{Dj} tomando en cuenta sólo al efecto de la parte discontinua del controlador multivariable en el sistema, utilizando como criterio de selección cuando los estados del sistema logran la convergencia a la superficie deslizante. Seguidamente, se calcula las señales de control $M_i(t)$ usando la ecuación (14).

Para evaluar el desempeño de la estrategia de control multivariable SMCr propuesta, se realizan cambios de 10% del valor de referencia correspondiente a los productos de tope y fondo ($X_{TREF} = 70\%$ y $X_{FREF} = 10\%$). La variación se realiza de manera independiente para cada uno de los puntos de operación en $t = 10$ min. En este caso, se determinan las especificaciones de la respuesta transitoria [$M_p(\%)$ y $T_s(\text{min})$]; además, se analiza el esfuerzo de la señales de control, $M_i(t)$.

Luego, se introducen perturbaciones del tipo escalón de $\pm 5\%$ en las variables controladas, en $t = 50$ min y $t = 300$ min, tomando como índice de eficiencia la integral absoluta del error (IAE), debido a que la respuesta de las variables controladas presenta pocas oscilaciones en el régimen transitorio.

Finalmente, se introducen errores de modelaje en los parámetros del modelo multivariable POMTM de manera independiente (es decir, sólo se varía un parámetro a la vez) en un rango de $\pm 50\%$. Se analiza la robustez del controlador multivariable ante cambios del punto de operación usando el índice de eficiencia IAE.

RESULTADOS

Utilizando la MGR [6], los mejores pares de variables manipuladas-controladas corresponden a (M_1, X_T) y (M_2, X_F) , es decir, con la entrada M_1 controlar el producto de tope y con la entrada M_2 el producto de fondo de la columna de destilación.

Las Figuras 4 y 5 ilustran el comportamiento de los estados del sistema ante cambios del valor de referencia para el re-ajuste de K_{Dj} . Se observa que el valor inicial de K_{Dj} no logra que los estados del sistema alcancen la superficie deslizante. Luego, se logra la convergencia a la superficie deslizante.

En ese sentido, la Tabla 1 muestra los valores ajustados para los parámetros λ_{0j} y λ_{1j} de la parte continua del controlador en base a las especificaciones de la respuesta transitoria, así como los valores de los parámetros δ_j y K_{Dj} de la parte discontinua del controlador.

Por su parte, las Figuras 6 y 7 muestran las salidas del sistema ante cambios del valor de referencia de X_T y X_F respectivamente. Puede observarse, en cada caso, el seguimiento del sistema al nuevo punto de operación, presentando un sobrepaso y un tiempo de establecimiento en una banda del 2%. Además, se aprecia que los lazos de control rechazan el efecto de la interacción presente en el sistema multivariable. Para X_T se logra un sobrepaso aproximado de 13,7% y tiempo de establecimiento de 121 min. En cuanto a X_F , se obtiene un sobrepaso de 12,98%, con tiempo de establecimiento aproximado de 70 min. En ambos casos se cumple con las especificaciones de diseño.



Figura 4. Trayectoria $e_1(t)$ para el ajuste inicial y re-ajuste de K_{D1} en el producto de tope X_T

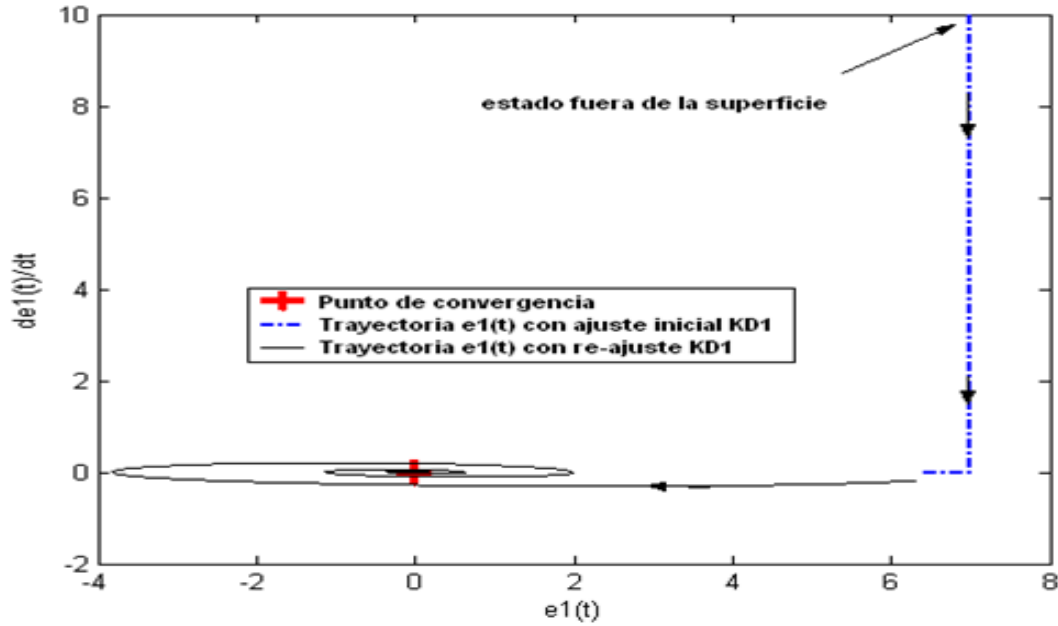


Figura 5. Trayectoria $e_3(t)$ para el ajuste inicial y re-ajuste de K_{D2} en el producto de tope X_F

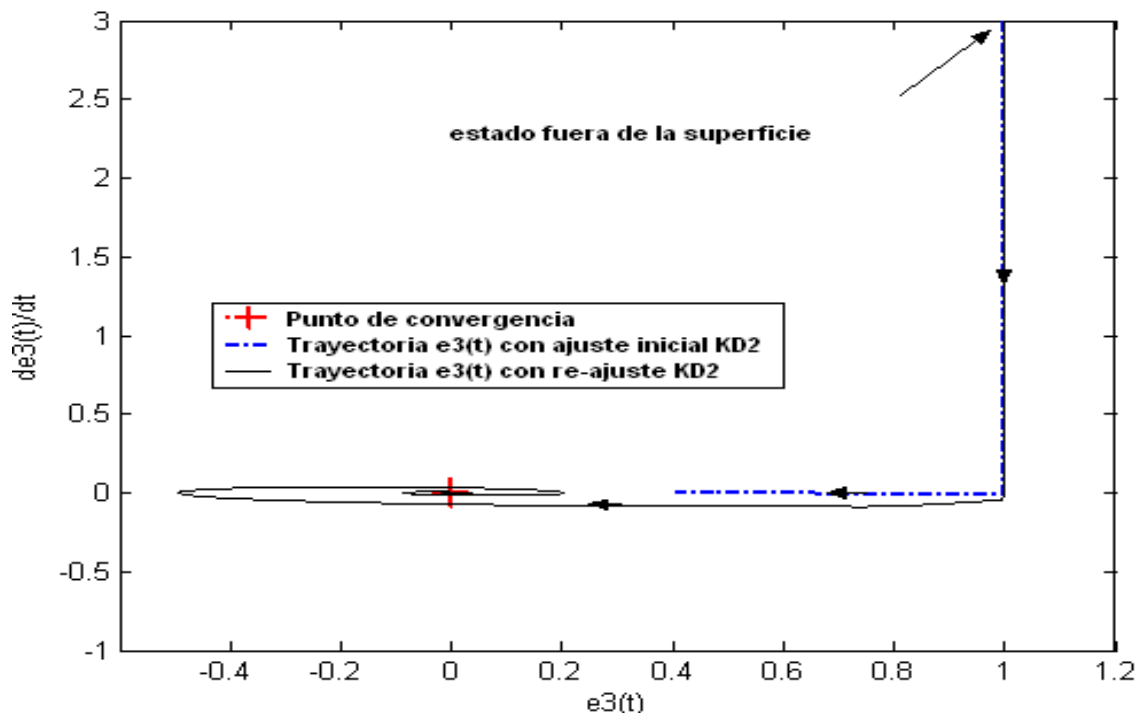
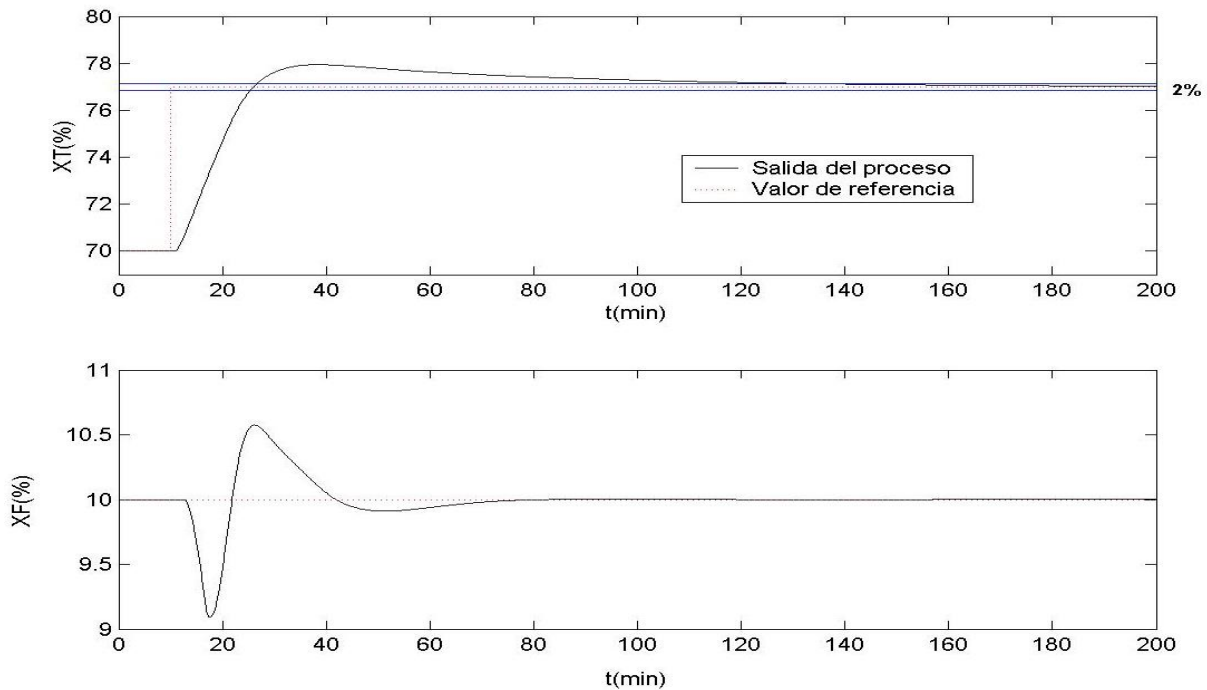




Tabla 1. Parámetros de sintonización de los controladores para la columna de destilación

| Variables controladas | Parámetros | | | |
|-----------------------|----------------|----------------|----------|------------|
| | λ_{0j} | λ_{1j} | K_{Dj} | δ_j |
| $X_T(\%) (j = 1)$ | 0,169 | 0,775 | 33,38 | 3,79 |
| $X_F(\%) (j = 2)$ | 0,225 | 0,739 | 12,61 | 1,80 |

Figura 6. Respuesta a lazo cerrado del sistema para cambio de referencia de X_T , en $t = 10$ min



Las Figuras 8 y 9 se muestra el esfuerzo en las señales de control, $M_1(t)$ y $M_2(t)$, ante los cambios del punto de operación. Para ambos casos, la respuesta es suave, lo que implica que no se introducen aperturas o cierres bruscos en el elemento final de control, conservando así, su vida útil.



Figura 7. Respuesta a lazo cerrado del sistema para cambio de referencia de X_F , en $t = 10$ min

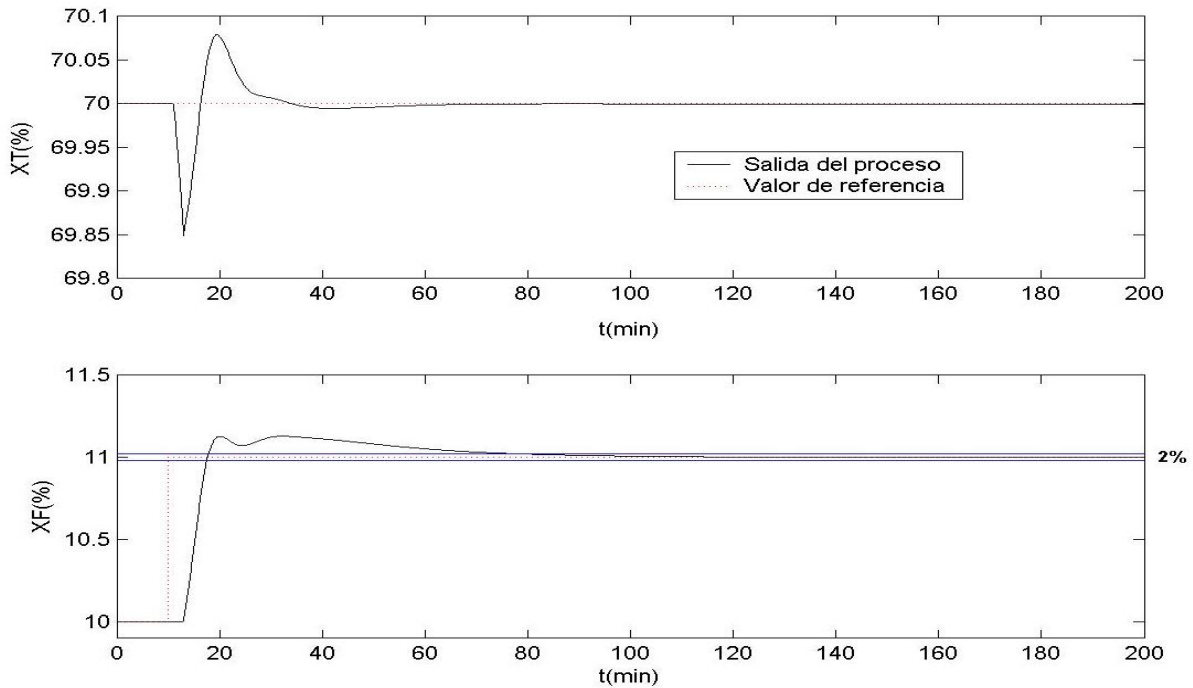


Figura 8. Esfuerzo de la señal de control, $M_1(t)$, para cambio de referencia de X_T , en $t = 10$ min

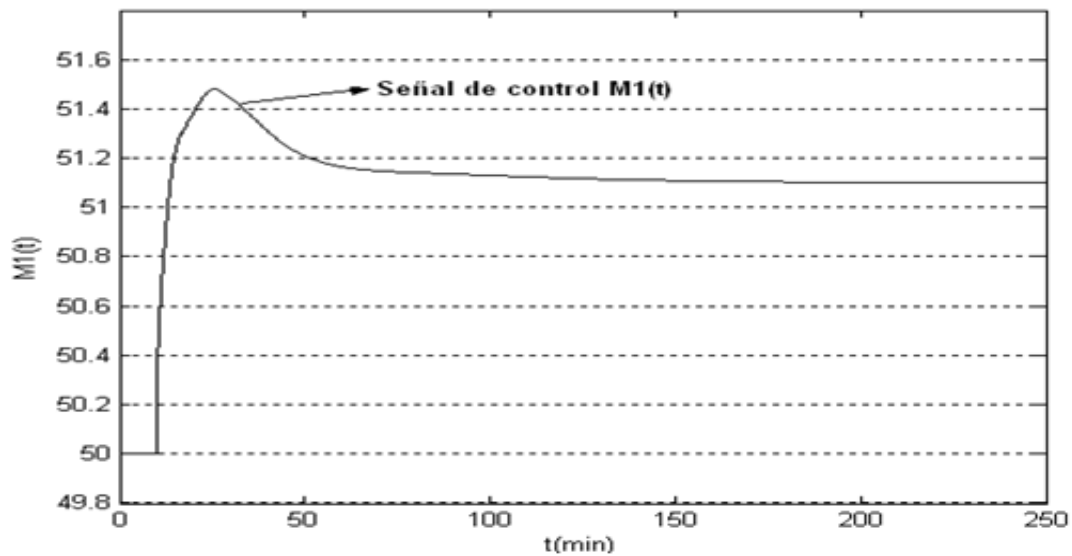
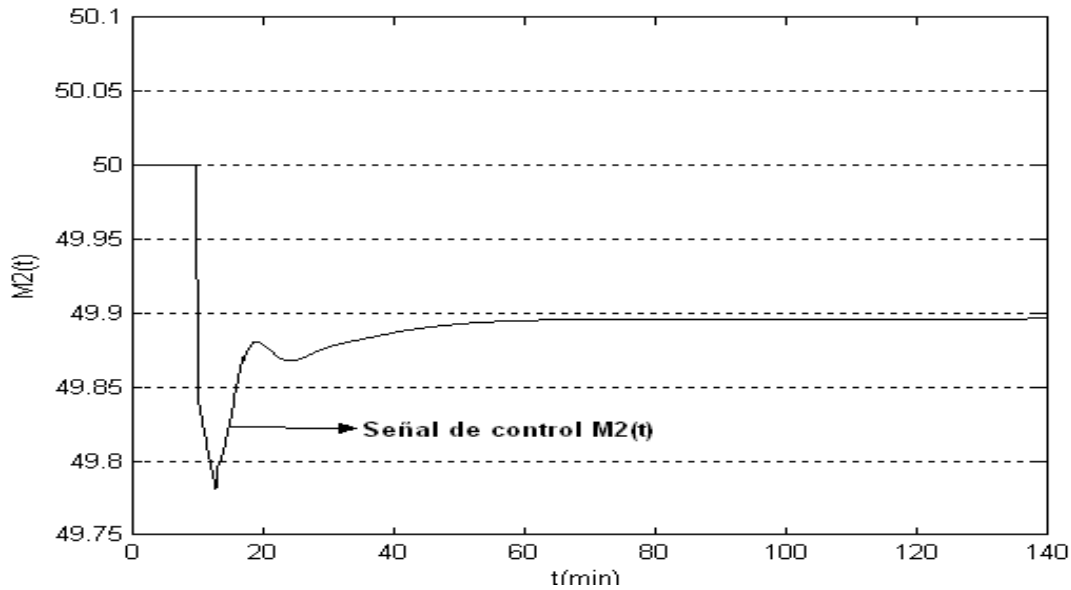


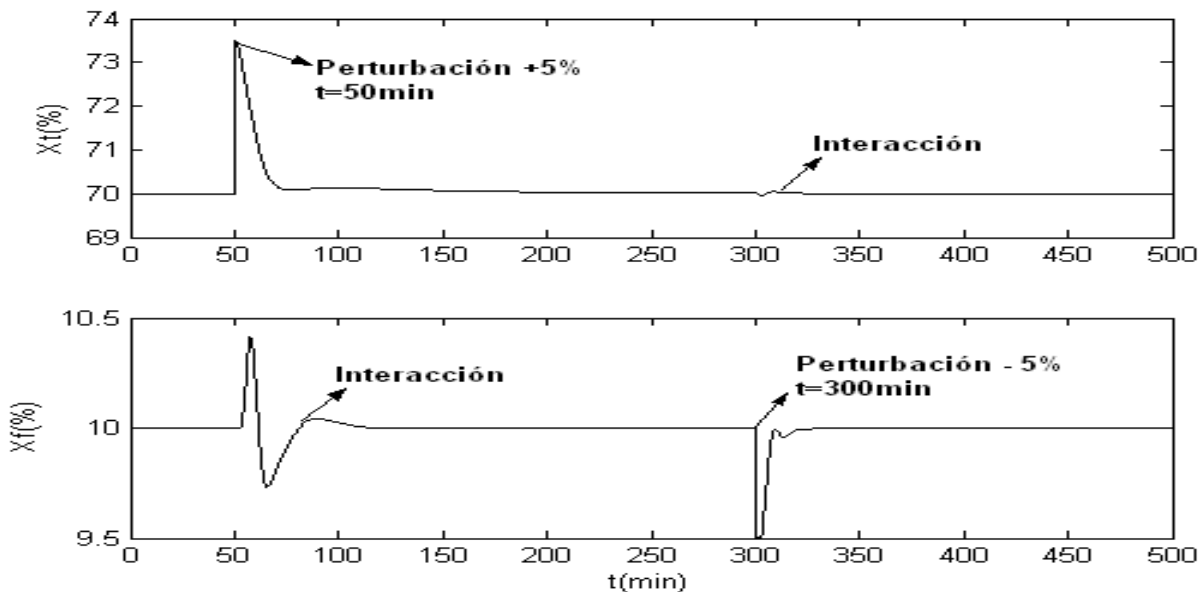


Figura 9. Esfuerzo de la señal de control, $M_2(t)$, para cambio de referencia de X_F , en $t = 10$ min



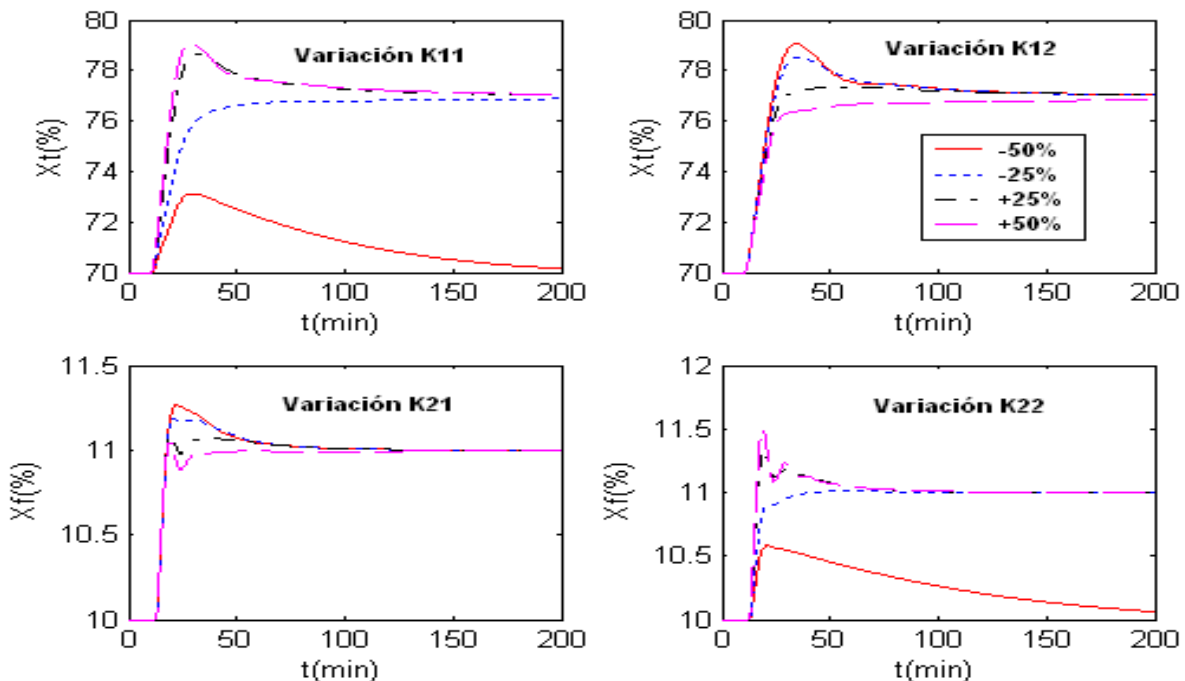
La salida del sistema a lazo cerrado ante perturbaciones del tipo escalón se muestra en el Figura 14. El efecto de la interacción se rechaza rápidamente producto del desacoplamiento por alimentación adelantada. Para la salida X_T se tiene un índice de eficiencia (IAE) 45,62 y para la salida X_F un IAE de 8,67.

Figura 14. Respuesta del sistema a lazo cerrado de la columna de destilación ante perturbaciones en las variables controladas, X_T y X_F



La Figura 15 muestra la robustez del sistema de control ante errores de modelaje en K_{ij} , para cambios del punto de operación en el producto de tope y fondo. Se observa como errores de modelaje en K_{11} y K_{22} degradan el desempeño del sistema de control multivariable hasta el caso de no mantener el punto de operación para el X_T y X_F , respectivamente.

Figura 15. Robustez del sistema de control ante variaciones de K_{ij} , para cambios del punto de operación



La Figura 16 muestra la robustez del controlador para errores de modelaje en T_{ij} , ante cambios del punto de operación. En este caso, el sistema de control logra compensar el efecto de los errores de modelaje en dicho parámetro, manteniendo el punto de operación en todos los casos. Es importante señalar que variaciones en t_{oij} producen cambios poco significativos en el desempeño del sistema de control multivariable.

En la Tabla 2 se resaltan las mayores variaciones del IAE de acuerdo a los errores de modelaje en los parámetros del modelo multivariable POMTM, para la salida X_T . Por su parte, la Tabla 3 muestra las variaciones de IAE para los errores de modelaje del modelo POMTM, para la salida X_F . En ambos casos, se resalta cómo errores de modelaje en las ganancias estáticas y constantes de tiempo del sistema multivariable afectan el desempeño de la estrategia de control, siendo las variaciones del parámetro de tiempo muerto el que afecta en menor proporción el rendimiento, en función del IAE.



Figura 16. Robustez del sistema de control ante variaciones de T_{ij} , para cambios del punto de operación

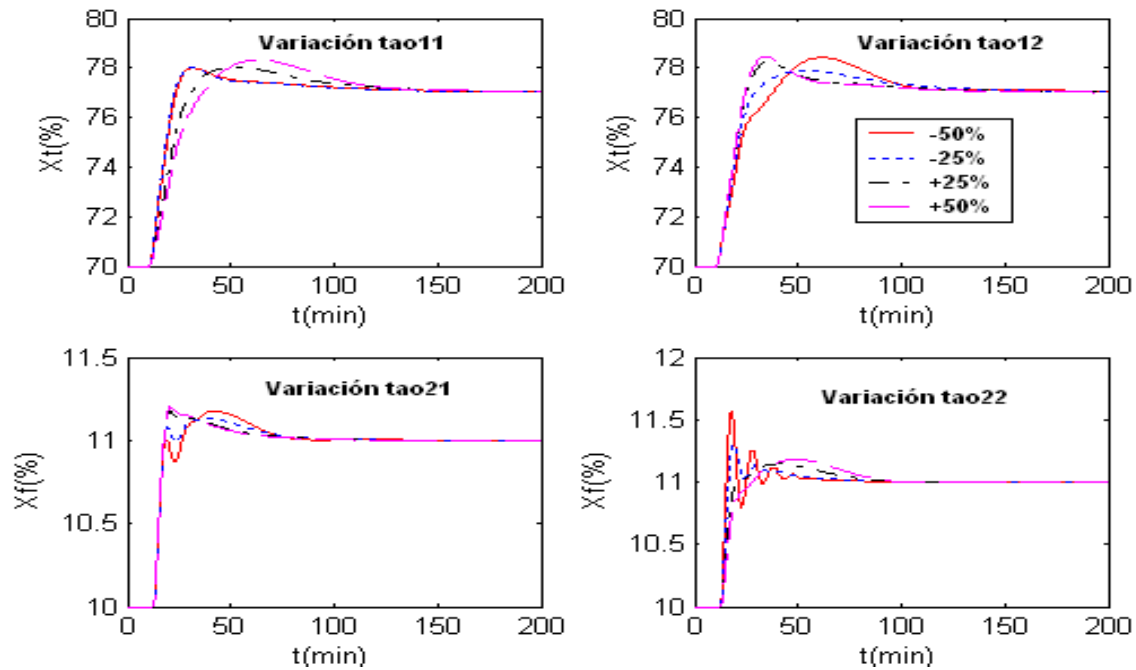


Tabla 2. Desempeño del controlador multivariable para errores de modelaje en el modelo POMTM (X_T)

| Parámetros POMTM | IAE (%) | | | | |
|------------------|---------|-------|-----|-------|-------|
| | -50 | -25 | 0 | +25 | +50 |
| K_{11} | 967 | 7,33 | 0,0 | 7,75 | 15,9 |
| K_{12} | 17,8 | 10,7 | 0,0 | -23,2 | 2,24 |
| K_{21} | -0,83 | -0,22 | 0,0 | 0,38 | 0,51 |
| K_{22} | -0,63 | -0,18 | 0,0 | 0,31 | 95,81 |
| T_{11} | -15,8 | -19,8 | 0,0 | 21,8 | 49,1 |
| T_{12} | 32,3 | 7,43 | 0,0 | -3,80 | -5,48 |
| T_{21} | 0,21 | 0,10 | 0,0 | 0,22 | 0,25 |
| T_{22} | 0,22 | 0,07 | 0,0 | 0,19 | 0,23 |
| t_{011} | -5,77 | -2,99 | 0,0 | 3,05 | 5,02 |
| t_{012} | 6,18 | 3,37 | 0,0 | 3,35 | 5,01 |
| t_{021} | 0,91 | 0,43 | 0,0 | 0,31 | 0,34 |
| t_{022} | 0,15 | 0,04 | 0,0 | 0,09 | 0,22 |



Tabla 3. Desempeño del controlador multivariable para errores de modelaje en el modelo POMTM (X_F)

| Parámetros POMTM | IAE (%) | | | | |
|------------------|---------|-------|-----|-------|-------|
| | -50 | -25 | 0 | +25 | +50 |
| K_{11} | -0,95 | -0,95 | 0,0 | 0,00 | 0,00 |
| K_{12} | 0,00 | +0,95 | 0,0 | -0,95 | 0,00 |
| K_{21} | 18,9 | 11,4 | 0,0 | -19,1 | -31,4 |
| K_{22} | 139,4 | 132 | 0,0 | 10,5 | 15,2 |
| T_{11} | -0,19 | -0,38 | 0,0 | -0,66 | -0,28 |
| T_{12} | -0,38 | -0,38 | 0,0 | -0,28 | -0,19 |
| T_{21} | 10,5 | -0,38 | 0,0 | -0,57 | -0,38 |
| T_{22} | -9,41 | -10,2 | 0,0 | 11,2 | 35,9 |
| t_{011} | -0,09 | -0,09 | 0,0 | 0,00 | 0,09 |
| t_{012} | -0,19 | -0,09 | 0,0 | 0,00 | 0,19 |
| t_{021} | -2,61 | -1,42 | 0,0 | 1,28 | 2,38 |
| t_{022} | -4,8 | -2,7 | 0,0 | 3,6 | 4,1 |

CONCLUSIONES

En este trabajo, se logró el ajuste de los parámetros del controlador multivariable propuesto basándose en un modelo desacoplado del sistema aproximando el tiempo muerto por serie de Taylor de primer orden, determinando los parámetros del controlador para establecer el tiempo de establecimiento de acuerdo al criterio del 2% y un sobrepaso requerido.

Se estableció un criterio de selección del parámetro K_{Dj} de la parte discontinua del controlador basándose en la convergencia de los estados del sistema hacia el punto de error de seguimiento cero. Con ello, se comprobó que para el caso de estudio, el valor inicial de dicho parámetro no es suficiente para lograr el alcance de la superficie deslizante. El ajuste del parámetro δ_j se hizo mediante la ecuación de ajuste propuesta por [4], ya que con este valor se logró una supresión del *chattering* al momento de analizar la trayectoria de los estados del sistema hacia la superficie deslizante.

Finalmente, se comprobó que para el caso de estudio, el rendimiento del sistema de control se ve afectado ante errores de modelaje en las ganancias estáticas y constantes de tiempo, siendo el parámetro de tiempo muerto el que cambia el rendimiento con menos sensibilidad tomando como referencia el índice de eficiencia IAE. Sin embargo, dicho efecto se compensa con el comportamiento de las señales de control, presentando cambios suaves que alargan la vida útil de los elementos finales de control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] McAvoy T. (1979). Steady-state Decoupling of Distillation Columns. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 18, No. 3 (Pp. 269-273).
- [2] Kuo B. (1996). *Sistemas de Control Automático*. México. Séptima Edición, Prentice Hall.
- [3] Albertos P. and Salas A. (2004). *Multivariable Control Systems: An Engineering Approach*. Springer.
- [4] Camacho O. (1996). *A New Approach to Design and Tune Sliding Mode Controller for Chemicals Processes*. Doctoral Dissertation, University of South Florida, United States.
- [5] Marlin T. (1995). *Process Control*. McGraw Hill.
- [6] Smith C. and Corripio A. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control*. Second Edition, Limusa.
- [7] Utkin V. (1977). Variable Structure Systems with Sliding Modes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 22, No. 2 (Pp. 212-222).
- [8] Perruqueti W. and Pierre J. (2002). *Sliding Mode Control in Engineering*. Marcel Dekker Inc.
- [9] Camacho O. and Smith C. (1997). Application of Sliding Mode Control to Nonlinear Chemical Processes with Variable Deadtime. 2nd Congress of Colombian Association of Automatics, Bucaramanga, Colombia.
- [10] Slotine J. and Li W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.
- [11] Camacho O., García W. and Rojas R. (1997). A New approach of Sliding Mode Control to No-minimum Phase Systems with Dead Time. Conference CONTROL 97, Sidney, Australia.
- [12] Zinober A. (1994). *Variable Structure and Liapunov Control*. Springer- Verlag.
- [13] Orellana R. (2012). *Nueva Estrategia de Control por Modo Deslizante para Sistemas Multivariables*. Tesis de Maestría, Automatización e Instrumentación, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- [14] Shyam K. Asif C., Ramesh K. and Bandyopadhyay B. (2015). Multivariable Continuous Integral Sliding Mode Control. 2015 International Workshop on IEEE Recent Advances in Sliding Modes (RASM), Istanbul, Turkey.
- [15] Ogata K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Tercera Edición, Prentice Hall.

BIOGRAFIA DE LOS AUTORES

Rafael Orellana

Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), San Cristóbal, Venezuela, en 2007. M.Sc. en Automatización e Instrumentación en la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela, en 2012. Proyectista de Circuitos Integrados Digitales y Programa de Formación CI-Brasil, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, en 2014. Actualmente, profesor e investigador de la Escuela de Ingeniería Eléctrica en la ULA. Profesor de postgrado en Automatización e Instrumentación, en el área de modelado e identificación de sistemas. Sus principales líneas de investigación están asociadas al control no lineal, sistemas multivariables, instrumentación electrónica y diseño y síntesis de circuitos digitales usando FPGA (Field Programmable Gate Array).

María Coronel

Es Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), San Cristóbal, Venezuela, en 2007. M.Sc. en Automatización e Instrumentación, en la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela en 2013. Proyectista de Circuitos Integrados Digitales y Programa de Formación CI-Brasil, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, en 2014. Actualmente, profesora e investigadora de la Escuela de Ingeniería Eléctrica en la ULA. ES profesora de postgrado en Automatización e Instrumentación, en el área de instrumentación industrial y modelado e identificación de sistemas. Sus principales líneas de investigación están orientada al control robusto, automatización, instrumentación industrial y diseño de circuitos integrados de señales mixtas analógicas-digitales.

Rubén Rojas

Se licenció en Ingeniería de Sistemas en la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela, en 1986. Obtuvo los grados de M.Sc. en 1994 y de Ph.D. en 1997, en la Universidad de Iowa, Estados Unidos. Asimismo, obtuvo el Postdoctorado en 2010, en el Rensselaer Polytechnic Institute en Troy, New York, Estados Unidos, en el área de Ingeniería Biomédica. Fue responsable del proyecto de Telemedicina Experimental en Mérida, Venezuela (1997-2005), financiado por FONACIT, así como de proyecto Clasificación de Señales Electrocardiográficas (2000-2002), financiado por CDCHT-ULA. Fue Jefe del Departamento de Circuitos y Medidas, Coordinador del Grupo de Ingeniería Biomédica (GIBULA) y del Postgrado en Ingeniería Biomédica, todo ellos en la ULA. Fue beneficiario de la Beca Fulbright para investigadores, que auspicia la Embajada de los Estados Unidos de América (2009-2010). Es profesor jubilado de la ULA. Sus líneas de investigación están dirigidas a sistemas de control industrial y fisiológico, control robusto e instrumentación biomédica.

Oriana Pérez

Ingeniero en Electrónica de la Universidad Rafael Beloso Chacín (URBE), Maracaibo, Venezuela, en 2008. M.Sc. en Automatización e Instrumentación de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, en 2015. Supervisora de sistemas SCADA de la empresa multiservicios Gerenpro, Puerto Ordaz, Bolívar, Venezuela, durante 2013-2015. Actualmente, profesora e investigadora en al ULA,



en el área de sistemas de control y fundamentos de las mediciones. Sus líneas de investigación están asociadas al control robusto, control de sistemas fisiológicos, instrumentación industrial y automatización de procesos.
