

## INDUSTRIAL

**CONTROL DIFUSO DE ESTRUCTURA VARIABLE PARA UN PROCESO DE EVAPORACIÓN DE CIRCULACIÓN FORZADA**

DIFFUSE VARIABLE STRUCTURE CONTROL FOR AN EVAPORATION PROCESS OF FORCED CIRCULATION

**Autores:****Requez, Juan<sup>1</sup>; Strefezza, Miguel<sup>2</sup>; Sánchez, Gustavo<sup>2</sup>; Granado, Ernesto<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado"<sup>2</sup>Departamento de procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar**Corresponding Author:** strefeza@usb.ve**RESUMEN**

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de Control de Estructura Variable (VSC) difuso elaborado para la concentración, presión y nivel de un sistema de evaporación de circulación forzada. El sistema de control diseñado contempla el funcionamiento simultáneo de tres VSC difusos sobre el modelo no lineal normalizado del proceso, y su desempeño es comparado con un control PI convencional para las mismas variables, mostrando mejoras considerables respecto a su desempeño dinámico. Se analiza el efecto del incremento del orden de funcionamiento del VSC, así como el efecto de los parámetros de diseño sobre la estabilidad del sistema controlado.

**ABSTRACT**

This paper shows the design of a diffuse Variable Structure Control (VSC) system developed for the concentration, pressure and leveling of a forced circulation evaporation system. The designed control system considers the simultaneous operation of three diffuse VSCs on the normalized nonlinear model of the process, and its performance is compared with a conventional PI control for the same variables, showing considerable improvements regarding its dynamic performance. The effect of the increase in the order of operation of the VSC is analyzed, as well as the effect of the design parameters on the stability of the controlled system.

**Palabras clave:** Control de Estructura Variable, Control Difuso, Control No Lineal, Control PI, Control de procesos de evaporación.

**Key words:** Variable Structure Control, Diffuse Control, Nonlinear Control, PI Control, Evaporation Control Process

## INTRODUCCIÓN

El control de estructura variable con modo de deslizamiento fue introducido por Utkin (1977) y Savanovic (2011), pero debido a sus dificultades para ser implementado no fue considerado en sus inicios. En la actualidad, los controladores de modo deslizante son utilizados en diferentes aplicaciones. Su principal atractivo son sus propiedades, ya que pueden ser aplicados en sistemas no lineales y de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Su propiedad más importante es que son robustos a variaciones de parámetros o a perturbaciones (Li *et al.*, 1997). Los controladores basados en lógica difusa presentan un comportamiento similar a los de estructura variable, además, estos pueden trabajar con problemas de imprecisión e incertidumbre.

El sistema de evaporación por circulación forzada es utilizado en centrales azucareras, industria papelera y producción de alúmina; ya que se desea evitar la evaporación del producto sobre la superficie de calentamiento para reducir los problemas de suciedad y, así, aumentar el período de uso de los equipos antes de realizar limpieza en los mismos. Este es un sistema no lineal y con una alta interacción entre sus variables controladas y manipuladas; por lo que implementar esquemas de control básico no permite obtener resultados satisfactorios. De esta manera, se presentan diferentes estrategias a implementar para obtener un buen control de este tipo de proceso. En este trabajo se plantea utilizar un control de estructura variable difuso. Las principales variables de control para un buen funcionamiento del proceso son: el nivel, la concentración y la presión de operación (Lanza, 2013).

Para implementar el controlador propuesto en este trabajo se utilizará el control de superficie variable.

El control de superficie variable es un tipo de control particularmente usado debido a su habilidad de manejar con sistemas no lineales (Li *et al.*, 1997). El problema del diseño consiste en seleccionar los parámetros de cada estructura y

definir la trayectoria de funcionamiento, llamada superficie deslizante  $S(t)$  que es lineal y estable. Se toma  $S(t)$ , de orden  $n-1$ , como una ecuación diferencial actuando en función del error

$$S(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (1)$$

Con  $n$  el orden del proceso,  $e(t)$  es el seguimiento del error entre el valor de referencia y el de la salida del proceso.  $\lambda$  es un parámetro de entonamiento y seleccionado por el diseñador. El problema de seguimiento al valor de referencia se reduce a mantener  $S(t)=0$  y, una vez alcanzado, mantener (2) para garantizar esto (Silva y Becerra, 2002).

$$\frac{d}{dt} S(t) = 0 \quad (2)$$

La superficie de deslizamiento de primer orden puede ser descrita como (3) y puede calcularse la entrada de control como (4)

$$S = K_d \lambda \cdot e + k_d \cdot \frac{d}{dt} e \quad (3)$$

$$u = u_e + K_u \text{sat}(S) \quad (4)$$

Un sistema de control difuso VSC aproxima este comportamiento a través de la selección adecuada de los conjuntos difusos y las reglas de inferencia como se describen en Li *et al.* (1997).

## Procedimiento Experimental

El modelo del evaporador de circulación forzada presentado en Newell y Lee (1989) y en Barreto y Requez (2012).

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

por enfriamiento, utilizando agua como refrigerante.

El modelo matemático del evaporador de circulación forzada de tubos verticales descrito por Newell y Lee (1989), 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 (5) a (16).

$$\rho A \frac{dL2}{dt} = F1 - F4 - F2 \quad (5)$$

$$\frac{MdX2}{dt} = F1X1 - F2X2 \quad (6)$$

$$C \frac{dP2}{dt} = F4 - F5 \quad (7)$$

$$T2 = 0.5616P2 + 0.3126X2 + 48.43 \quad (8)$$

$$T3 = 0.507P2 + 55 \quad (9)$$

$$F4 = \frac{Q100 - F1 C_p (T2 - T1)}{\lambda} \quad (10)$$

$$T100 = 0.1538 P100 + 90 \quad (11)$$

$$Q100 = UA1 (T100 - T2) \quad (12)$$

$$UA1 = 0.16(F1 + F3) \quad (13)$$

$$F100 = \frac{Q100}{\lambda_s} \quad (14)$$

$$T201 = T200 + \frac{Q200}{F200 C_p} \quad (15)$$

$$F5 = \frac{Q200}{\lambda} \quad (16)$$

El sistema descrito (Newell y Lee, 1989) posee ocho entradas y tres salidas. El apareamiento adecuado para las variables se presenta en la Tabla 1.

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 (Requez, 2013), estos parámetros se presentan en la Tabla 2.

## MÉTODO

Se plantea el esquema de control de superficie variable para las tres variables controladas de la Tabla 1. Cada controlador es diseñado según los pasos que se describen a continuación:

Paso 1. Describir los conjuntos difusos del error y el cambio del error para cada variable controlada.

Paso 2. Describir el conjunto de reglas que describen el conjunto difuso de cada controlador de superficie variable a través del uso de un sistema de inferencia difuso de Takagi-Sugeno.

Paso 3. Implementar el sistema de control de superficie variable usando una estructura de primer orden, de segundo orden y tercer orden jerárquico.

Paso 4. Variar los parámetros  $K_u$ ,  $K_d$  y  $\lambda$ , y observar su impacto sobre la estabilidad y velocidad de respuesta del sistema de control de superficie variable.

## RESULTADOS

Inicialmente, para el diseño de los controladores de estructura variable (VSC) de nivel (L2), concentración (X2) y presión (P2) se plantean cinco conjuntos difusos para el error y cinco conjuntos difusos para el cambio del error, etiquetados como Muy Negativo (MN), Negativo (N), Cero (C), Positivo (P) y Muy Positivo (MP). El conjunto de reglas del controlador se muestra en la Tabla 3.

El siguiente paso en el diseño del controlador es la selección de la superficie de respuesta que este presenta, donde la inclinación del plano y de la curva depende del valor de  $\lambda$ . Así, la superficie para L2 se observa en la Fig. 1.

Los parámetros de ajuste del controlador de estructura variable de L2 fueron elegidos como se muestra en la Tabla 4.

Para el parámetro X2, la superficie de respuesta del controlador se observa en la Figura 2. La inclinación del plano y de la curva de esta, depende del valor de  $\lambda$  que se selecciona en la Tabla 5, donde se presentan los parámetros de ajuste del controlador de estructura variable de X2.

Finalmente, para el parámetro P2, la superficie de respuesta del controlador se muestra en la Figura 3. Los parámetros de ajuste del controlador VSC se presentan en la Tabla 6.

Usando la definición de los controladores VSC difusos mostrados, se implementaron los tres controladores difusos que operan simultáneamente sobre el modelo no lineal multivariable, como se muestra en la Figura 4.

El controlador de estructura variable puede ser de tres órdenes diferentes: de primer, de segundo y de tercer orden. Sin embargo, las tres estructuras no se combinan, es decir, todos los controladores implementados son, a la vez, del mismo orden.

**Tabla 1. Apareamiento sugerido de las variables el proceso**

Variable manipulada	Variable Controlada
F2	L2
F200	P2
P100	X2

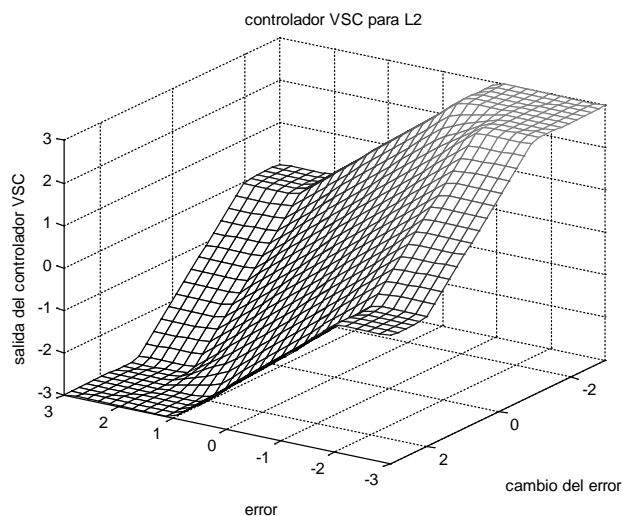
**Tabla 2. Parámetros de controladores PI convencionales para el proceso**

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

(Requez, 2013)

**Tabla 3. Reglas de inferencia para controlador de superficie variable L2, X2 y P2**

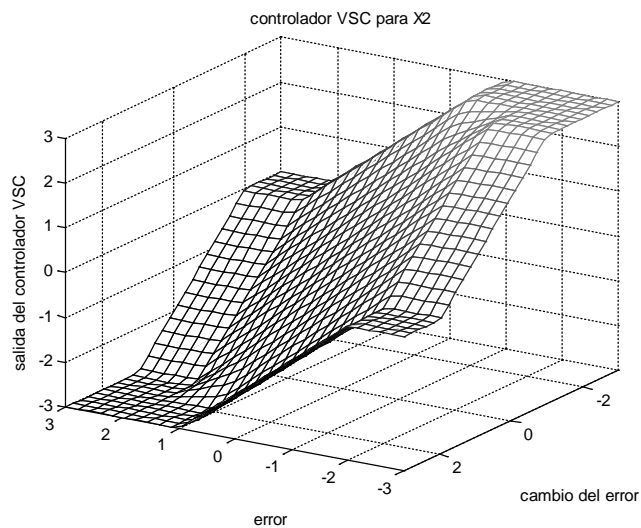
$\Delta e e$	MN	N	C	P	MP
MP	0	-1	-2	-3	-3
P	1	0	-1	-2	-3
C	2	1	0	-1	-2
N	3	2	1	0	-1
MN	3	3	2	1	0



**Figura 1.** Superficie de respuesta del controlador de estructura variable para L2

**Tabla 4.** Parámetros del controlador VSC para L2

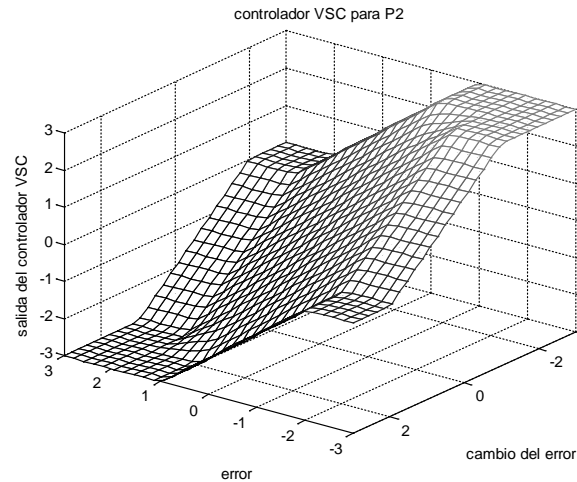
$K_u$	1
$K_d$	1
$\lambda$	5



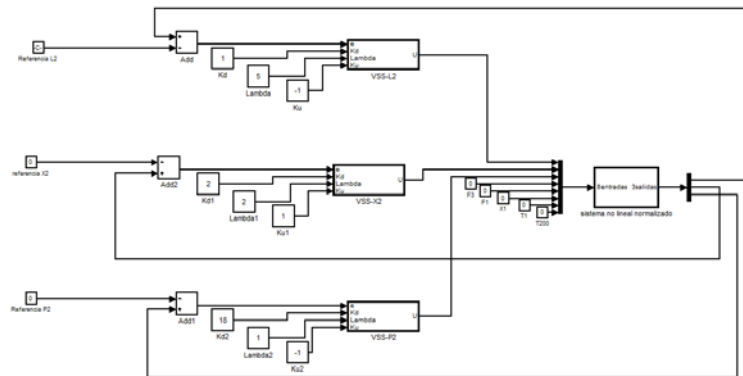
**Figura 2.** Superficie de respuesta del controlador de estructura variable para X2

**Tabla 5.** Parámetros del controlador VSC para X2

$K_u$	1
$K_d$	2
$\lambda$	2



**Figura 3.** Superficie de respuesta del controlador de estructura variable para P2



**Figura 4.** Diagrama del proceso no lineal multivariable con tres controladores.

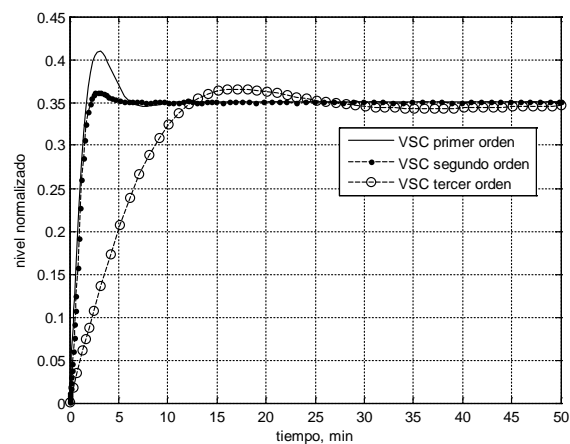
**Tabla 6. Parámetros del controlador VSC para P2**

$K_u$	1
$K_d$	1
$\lambda$	18

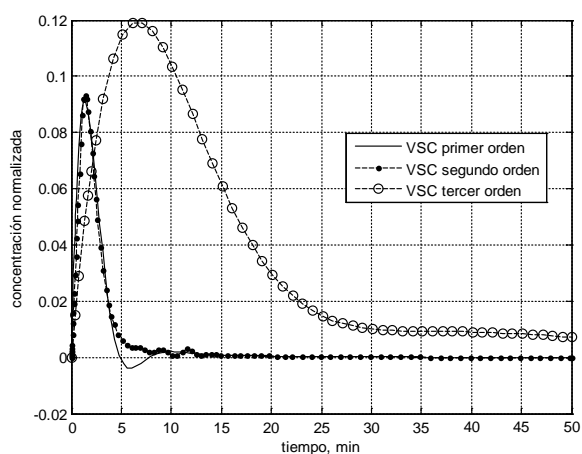
#### A. Implementación del controlador de estructura variable de diferentes órdenes jerárquicos

La utilización de los controladores de distinto orden sobre el sistema conlleva algunas diferencias respecto a su estabilidad y velocidad de respuesta, como se puede observar en las Figuras 5, 6 y 7. En general, el sistema de control de tercer orden es menos estable, y requiere mayor tiempo de

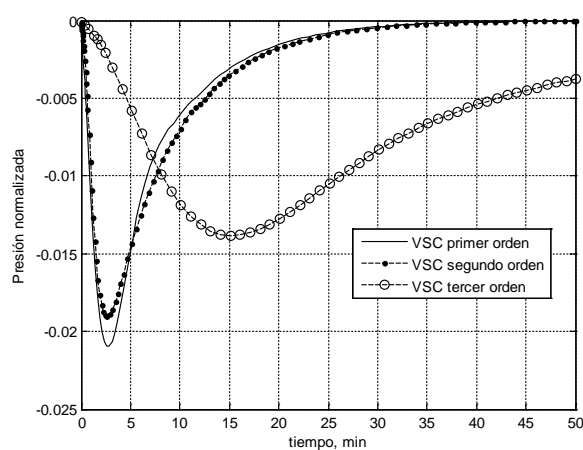
cálculo en el simulador. Los sistemas VSC de primer y segundo orden presentan respuestas similares, aunque el sistema de segundo orden presenta menor sobrepico y estabilización más rápida para todas las variables consideradas. Esto es de esperarse porque el procedimiento descrito para el diseño del controlador VSC debe hacerse de un orden menor al del orden del sistema, que es de tercer orden no lineal.



**Figura 5.** Comparación de la respuesta del nivel L2 para controladores jerárquicos de diferente orden



**Figura 6.** Comparación de la respuesta de la concentración X2 para controladores jerárquicos de diferente orden

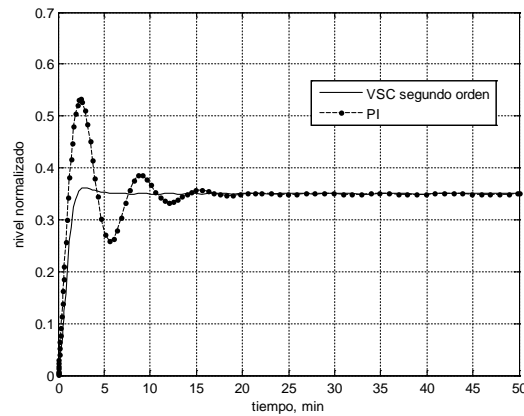


**Figura 7.** Comparación de la respuesta de la presión P2 para controladores jerárquicos de diferente orden.

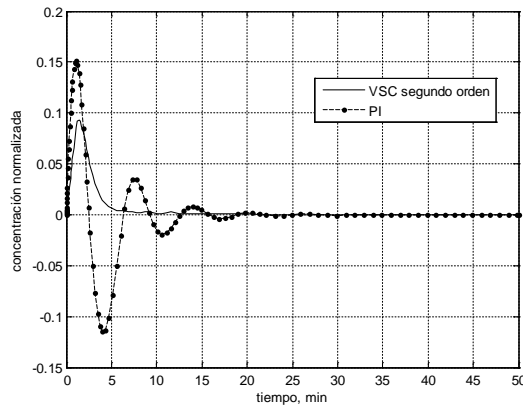
### B. Comparación del sistema de estructura jerárquico VSC con un sistema de control PID convencional.

Se elige el sistema VSC de segundo orden para el resto de las pruebas a realizarse, ya que presentó un comportamiento dinámico más estable y rápido que el de primer orden. Se presenta a continuación la comparación de la

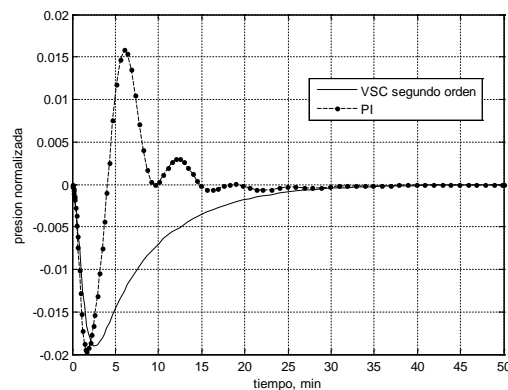
respuesta de este sistema contra un sistema de control PI como el descrito en la Tabla 2. Las respuestas del proceso controlado se comparan en las Figuras 8, 9 y 10. Obsérvese que la respuesta del controlador de superficie variable es más rápido y produce una respuesta transitoria menos oscilatoria para cada variable, lo que es deseable para este proceso no lineal.



**Figura 8.** Comparación de la respuesta del nivel L2 para controlador VSC difuso y PI



**Figura 9.** Comparación de la respuesta de la concentración X2 para controlador VSC difuso y PI



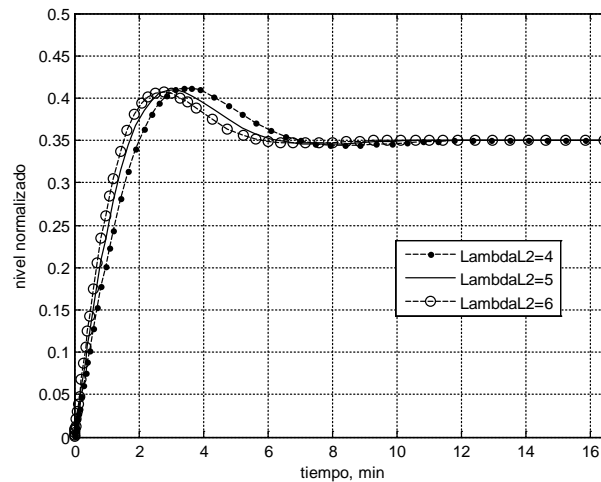
**Figura 10.** Comparación de la respuesta de la presión P2 para controlador VSC difuso y PI



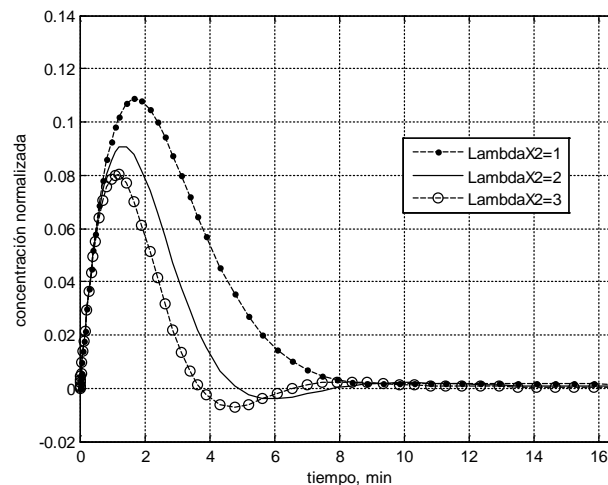
### C. Efecto del cambio de $\lambda$ sobre el sistema de control de superficie variable difuso.

Para el cambio del parámetro  $\lambda$  sobre los tres controladores VSC propuestos, se observa que un incremento de este parámetro produce una respuesta transitoria más rápida, aunque parece afectar la estabilidad del sistema generando

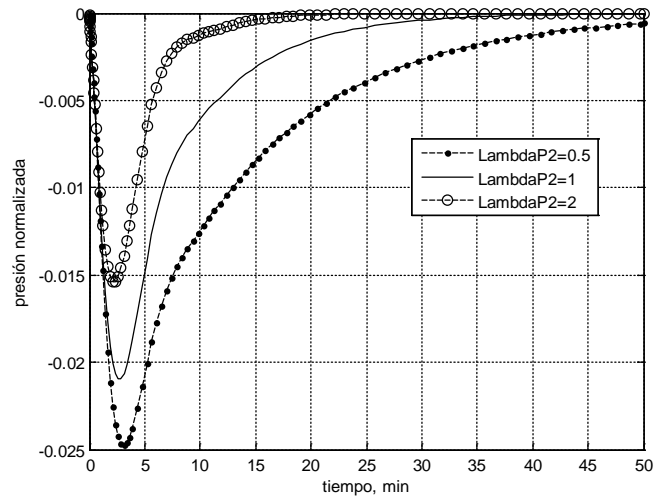
mayor oscilación alrededor del valor de estado estacionario. Esto puede observarse en las Figuras 11, 12 y 13. Un incremento de  $\lambda$  hace que la curva de respuesta de  $S$  mostrada en el diseño de los controladores tenga un cambio más vertical, lo que produce una mayor oscilación al desviarse el error del valor cero.



**Figura 11.** Comparación de la respuesta del nivel L2 para cambios de  $\lambda$ .



**Figura 12.** Comparación de la respuesta de la concentración X2 para cambios de  $\lambda$ .

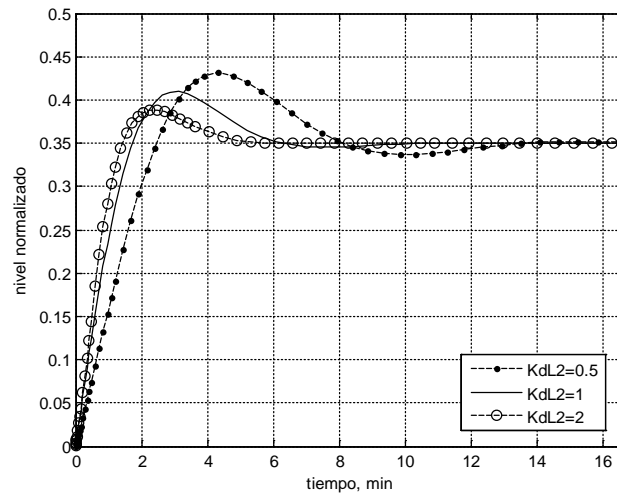


**Figura 13.** Comparación de la respuesta de la presión P2 para cambios de  $\lambda$ .

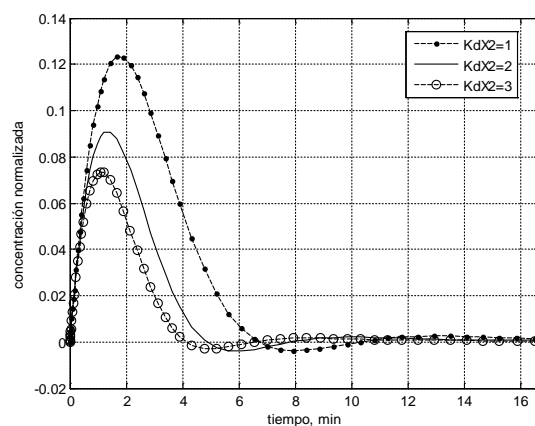
#### D. Efectos del cambio de $K_d$ sobre el sistema de control de superficie variable difuso.

Para el cambio del parámetro  $K_d$  sobre el sistema de control VSC, se observa que una disminución de  $K_d$  produce un incremento de la

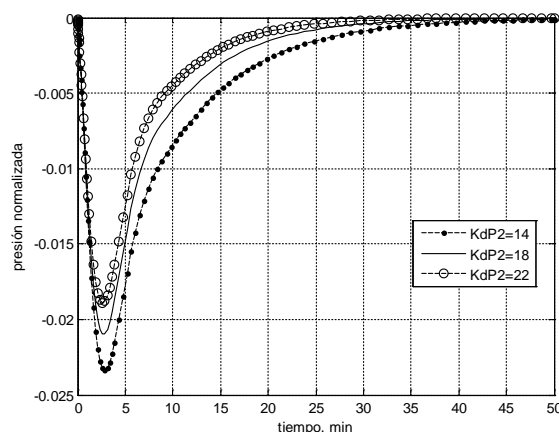
inestabilidad del sistema, lo que significa un tiempo de estabilización más alto y un mayor sobrepaso máximo de la variable de control. Esto puede observarse en las Figuras 14, 15 y 16.



**Figura 14.** Comparación de la respuesta del nivel L2 para cambios de  $K_d$ .



**Figura 15.** Comparación de la respuesta de la concentración X2 para cambios de Kd.

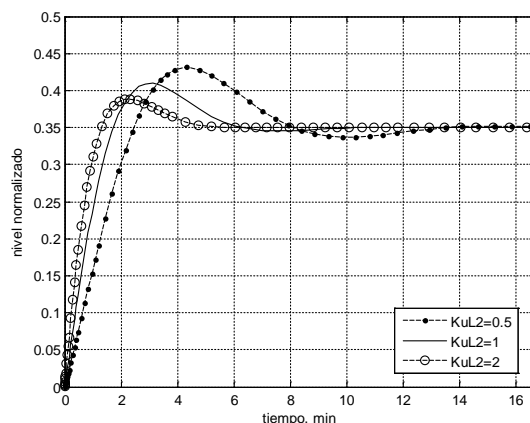


**Figura 16.** Comparación de la respuesta de la presión P2 para cambios de Kd.

### E. Efectos del cambio de $K_u$ sobre el sistema de control de superficie variable difuso

El sistema de control se hace más estable con un incremento de  $K_u$ , un tiempo de subida menor y

un tiempo de estabilización menor. Esto puede observarse en las Figuras 17, 18 y 19. Es decir, la estabilidad del sistema de control se beneficia del incremento de  $K_u$ .



**Figura 17.** Comparación de la respuesta del nivel L2 para cambios de  $K_u$ .

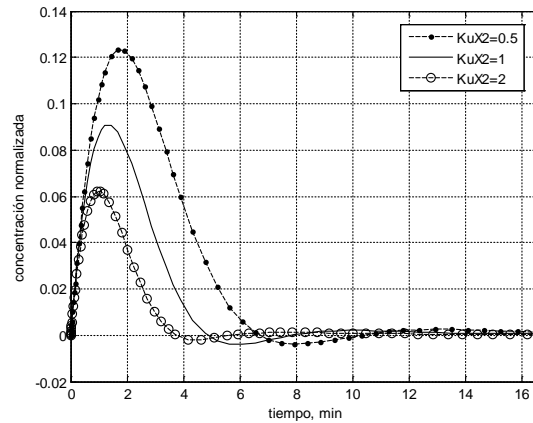


Figura 18. Comparación de la respuesta de la concentración X2 para cambios de Ku.

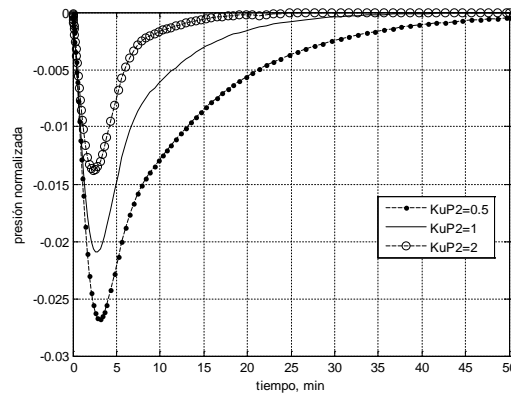


Figura 19. Comparación de la respuesta de la presión P2 para cambios de Ku.

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que se puede integrar la teoría de control difuso y la de superficie variable. Esto permite modificar variables en la estructura del VSC para poder obtener mejor respuesta del sistema como se observa en los resultados. De igual forma esta estructura resulta ser mejor que un control PI convencional.

## CONCLUSIONES

El sistema de control VSC depende de la elección de los parámetros de control  $\lambda$ , Ku y Kd. En particular, incrementos de  $\lambda$  elevan la velocidad de respuesta disminuyendo la estabilidad del sistema, haciendo más vertical la

superficie de deslizamiento del sistema de control.

El incremento de Ku y Kd mejora la estabilidad del sistema de control, haciéndolo más rápido y más estable.

El sistema de control VSC difuso jerárquico de segundo orden muestra ser más eficiente y mejor que el sistema de control PID convencional. El sistema de control de superficie variable difuso, descrito en esta investigación, permite establecer una estrategia de control no lineal sobre un sistema multivariable de evaporación. En particular, el sistema VSC recomendado por la experimentación sobre el sistema es uno de segundo orden jerárquico.

## REFERENCIAS

- Barreto, E. y Requez, J. P. (2012). 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.
- Lanza, G. (2013). Control multivariable para un evaporador de circulación forzada mediante realimentación del vector de estado. Trabajo de ascenso, Universidad de Carabobo.
- Li, H., Gatland, H. B., Green A. W. (1998). Fuzzy Variable Structure Control. IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 27, nº 2, pp. 306-312.
- Silva, M. y Becerra, L. (2002). Estrategias de control para resolver el problema del tiempo muerto en un intercambiador de calor. UNEXPO, Barquisimeto.
- Newell, R. y Lee, P. (1989). Applied Process Control, Melbourne: Prentice Hall.
- Requez, J. (2013). Controladores PID difusos para un proceso de evaporación de circulación forzada. Caracas.
- Sabanovic, A. (2011). Variable Structure Systems With Sliding Modes in Motion Control—A Survey. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 7, nº 2, 212-223.
- Utkin, V. (1977). Variable structure system with sliding modes. IEEE Trans. Automat. Control, vol. AC-22.