

Sistema FDD para actuador de potencia calefactora basado en observadores difusos con modos deslizantes

Mario Heras Cervantes, Adriana del Carmen Téllez Anguiano**
Juan Anzures Marin, Elisa Espinosa Juárez*
Gilberto Francisco Orozco Hernández, María del Carmen García Ramírez**

* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, CP 58004 México (e-mail: mheras@dep.fie.umich.mx)

** TecNM / Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, CP 58120 México (e-mail: adrianat@itmorelia.edu.mx)

Abstract: A nivel industrial, existen diversos procesos que requieren de un sistema de diagnóstico de fallas para operar adecuadamente. En la industria química, la destilación es un proceso que puede beneficiarse con estos sistemas, particularmente la parte encargada del calentamiento necesario para establecer la dinámica del proceso, permitiendo la separación de las sustancias presentes en la mezcla a destilar. En este artículo se presenta un sistema de detección de fallas basado en un banco de dos observadores difusos con modos deslizantes que permite detectar tanto perturbaciones en el voltaje de alimentación para el actuador del sistema de calentamiento, como variaciones en la magnitud de la resistencia calefactora. El sistema desarrollado es validado mediante simulación utilizando datos experimentales.

Keywords: FDD, Observador difuso con modos deslizantes, Actuador

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad moderna ha incrementado su dependencia en sistemas y procesos tecnológicos en los últimos años, demandando el buen funcionamiento de estos sistemas. Esto hace a los procesos industriales cada día más complejos debido al número de componentes que los conforman y de funciones que implementan, incrementando su vulnerabilidad ante fallas, Sharma (2016).

En los últimos años, el diseño de sistemas de control ha tenido el objetivo de tolerar fallas y mantener las propiedades de estabilidad y desempeño deseado en procesos. Una detección de fallas confiable, oportuna y eficiente puede prevenir riesgos para el proceso y el usuario, haciendo indispensables las técnicas de control y detección de fallas en sistemas industriales, Daher (2018).

A nivel industrial, diversos procesos requieren de un sistema de diagnóstico de fallas para operar adecuadamente. En la industria química la destilación es uno de ellos, particularmente la parte encargada del calentamiento necesario para establecer la dinámica del proceso, permitiendo la separación de las sustancias de la mezcla a destilar, de ahí la necesidad de implementar técnicas de control y monitoreo constante para evitar fallas en el proceso que pongan en riesgo la seguridad de los operadores o la calidad del producto, Téllez-Anguiano et al. (2016).

En general, el actuador principal que regula la potencia calórica basada en resistencias eléctricas es un inversor de potencia. Algunos autores han realizado trabajos relacionados con Sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallas (FDD), como Baghli et al. (2018) que presenta un sis-

tema para un inversor para controladores eléctricos basado en análisis estadísticos de la corriente. En Raj et al. (2018) se presenta un Sistema FDD para un inversor multinivel asimétrico utilizando redes neuronales.

En este artículo se presenta un Sistema FDD, basado en observadores difusos con modos deslizantes, enfocado al actuador de potencia calórica de una columna de destilación con mezcla binaria. El sistema se valida empleando datos experimentales de un proceso real de destilación.

2. COLUMNA DE DESTILACIÓN

El equipo que realiza el proceso, es la columna de destilación. De modo general, una columna de destilación se forma por un condensador, un hervidor y el cuerpo (platos) de la columna (Fig. 1), Acharya et al. (2016).

El condensador provee el enfriamiento necesario para condensar el vapor que fluye a la parte superior de la columna, obteniendo líquido como producto destilado o como reflujo para enriquecer la mezcla. Los platos en el cuerpo de la columna operan como una unidad de intercambio dinámico para el equilibrio líquido-vapor del proceso. El hervidor provee la potencia calórica necesaria para evaporar la mezcla a destilar, siendo uno de los principales elementos para establecer la dinámica del proceso.

En este artículo el hervidor bajo estudio está formado por dos tanques para depósito de la mezcla, calentada mediante una resistencia calefactora (Fig. 2).

La Ley de Joule expresa la potencia calórica como:

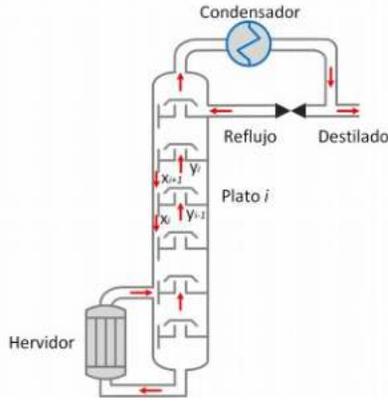


Fig. 1. Esquema general de columna de destilación

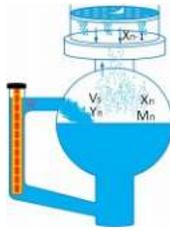


Fig. 2. Hervidor de la columna de destilación

La cantidad de calor que desarrolla una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la intensidad de la corriente y el tiempo que dura la corriente.

La resistencia calefactora convierte energía eléctrica en calor haciendo circular corriente en el conductor, por lo tanto la potencia calórica de un hervidor puede ser manipulada y modelada a partir de un actuador que permita controlar la potencia eléctrica disipada por la resistencia, Heras-Cervantes et al. (2016).

3. MODELO DIFUSO DE ACTUADOR

El esquema del actuador se muestra en la Fig. 3, el cual ajusta la potencia en la resistencia calefactora del hervidor regulando el voltaje con un convertidor CD-CD.

Los convertidores de CD-CD tienen la capacidad de regular el voltaje de salida a un valor deseado a partir de la conmutación de dispositivos electrónicos, generalmente diodos y transistores. Estos convertidores de electrónica de potencia tienen aplicaciones en sistemas de energía renovables, redes inteligentes (*smart grids*), sistemas de alimentación de equipo doméstico y de laboratorio, Arazi et al. (2018), Rojas et al. (2017).

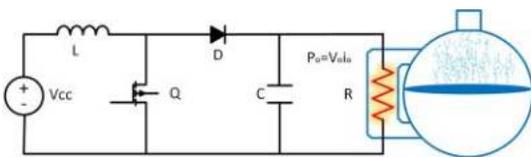


Fig. 3. Esquema de actuador de potencia calórica

Las variaciones en el voltaje de entrada y en la carga, así como las perturbaciones y el deterioro de los componentes que conforman a los convertidores de potencia, Tarakanath

et al. (2014), son factores que afectan directamente su rendimiento, confiabilidad y seguridad, de ahí la importancia de diseñar e implementar estrategias de control que faciliten la regulación del voltaje de salida, estimando o identificando parámetros fundamentales en su operación para mejorar dicha seguridad y fiabilidad en el sistema.

El modelo no lineal del convertidor CD-CD expresado en espacio de estados se define en (1) tomando como estados a la corriente en el inductor ($i_L = x_1$) y al voltaje en el capacitor ($v_C = x_2$).

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{R}{LC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_{cc} - x_2}{L} \\ \frac{x_1}{C} \end{pmatrix} d \quad (1)$$

donde C es la capacitancia, L la inductancia y R la carga. El ciclo de servicio d es la entrada de control del convertidor que regula el voltaje de salida, la cual toma valores entre 0 y 1. El ciclo de servicio d se define en (2):

$$d = \frac{v_C}{v_C - V_{cc}} \quad (2)$$

3.1 Modelo Takagi-Sugeno de convertidor Buck-Boost

Con base en el modelo no lineal del convertidor Buck-Boost presentado en (1) y tomando como variables difusas a los estados ($z_1 = v_C, z_2 = i_L$) que operan entre valores nominales máximos y mínimos ($v_{C_{max}}, v_{C_{min}}, i_{L_{max}}, i_{L_{min}}$) se propone un modelo difuso Takagi-Sugeno que interpola entre 4 submodelos lineales basado en las siguientes reglas:

Regla 1:

Si z_1 es $z_{1_{min}}$ y si z_2 es $z_{2_{min}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 d \quad (3)$$

Regla 2:

Si z_1 es $z_{1_{min}}$ y si z_2 es $z_{2_{max}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 d \quad (4)$$

Regla 3:

Si z_1 es $z_{1_{max}}$ y si z_2 es $z_{2_{min}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 d \quad (5)$$

Regla 4:

Si z_1 es $z_{1_{max}}$ y si z_2 es $z_{2_{max}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_4 x(t) + B_4 d \quad (6)$$

De acuerdo a las características del convertidor, los submodelos lineales se obtienen mediante el sector no lineal ($z = [max, min]$), donde:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{R}{LC} \end{pmatrix} = A_2 = A_3 = A_4 = A$$

$$B_1 = \left(\begin{array}{c} \frac{V_{in} + z_{1_{min}}}{\frac{L}{C}} \\ z_{2_{min}} \end{array} \right), B_2 = \left(\begin{array}{c} \frac{V_{in} + z_{1_{min}}}{\frac{L}{C}} \\ z_{2_{max}} \end{array} \right),$$

$$B_3 = \left(\begin{array}{c} \frac{V_{in} + z_{1_{max}}}{\frac{L}{C}} \\ z_{2_{min}} \end{array} \right), B_4 = \left(\begin{array}{c} \frac{V_{in} + z_{1_{max}}}{\frac{L}{C}} \\ z_{2_{max}} \end{array} \right)$$

$$C_1 = \left(\begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \right) = C_2 = C_3 = C_4 = C$$

Las funciones de membresía ($\mu(z)$) para los conjuntos difusos están determinadas por la ecuación (7) para el voltaje en el capacitor $v_C = z_1$:

$$\mu(z_1) = \begin{cases} \mu_{z_{1_{min}}} = \frac{z_{1_{max}} - z_1}{z_{1_{max}} - z_{1_{min}}} \\ \mu_{z_{1_{max}}} = 1 - \mu_{z_{1_{min}}} \end{cases} \quad (7)$$

y la ecuación (8) para la corriente en el inductor $i_L = z_2$:

$$\mu(z_2) = \begin{cases} \mu_{z_{2_{min}}} = \frac{z_{2_{max}} - z_2}{z_{2_{max}} - z_{2_{min}}} \\ \mu_{z_{2_{max}}} = 1 - \mu_{z_{2_{min}}} \end{cases} \quad (8)$$

Los pesos normalizados están dados por (9):

$$\begin{aligned} h_1(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{min}}} \mu_{z_{2_{min}}} \\ h_2(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{min}}} \mu_{z_{2_{max}}} \\ h_3(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{max}}} \mu_{z_{2_{min}}} \\ h_4(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{max}}} \mu_{z_{2_{max}}} \end{aligned} \quad (9)$$

el modelo difuso T-S para el convertidor CD-CD se expresa en (10), para $r = 4$.

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i \tilde{e} + \varphi_i(t)]$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i \hat{x}(t) \quad (10)$$

En la Fig. 4 se muestra el diagrama a bloques de modelo difuso T-S del convertidor Buck-Boost expresado en (10),

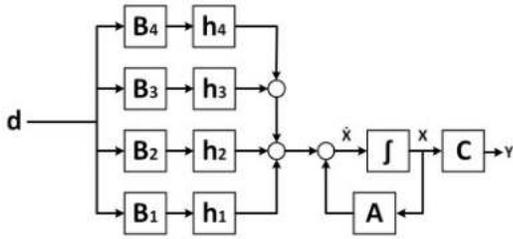


Fig. 4. Diagrama a bloques de modelo difuso Takagi-Sugeno para convertidor CD-CD

4. OBSERVADOR DIFUSO CON MODOS DESLIZANTES

El observador difuso con modos deslizantes presentado por Castillo-Toledo and Anzures-Marin (2005) se basa en los fundamentos del observador de Luenberger, Luenberger (1966), para sistemas lineales y del observador difuso de Tanaka en Tanaka et al. (1998).

La estructura del observador difuso con modos deslizantes para sistemas Takagi-Sugeno definida en Bergsten et al.

(2002) Castillo-Toledo and Anzures-Marin (2005), se expresa en (11)

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i \tilde{e} + \varphi_i(t)]$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i \hat{x}(t) \quad (11)$$

El error de estimación del observador difuso con modos deslizantes es determinado por la expresión,

$$\tilde{e}(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (12)$$

y $\varphi_i(t)$ es el vector discontinuo de modos deslizantes para el subsistema i , tomando como superficie deslizante al error de estimación y se expresa en (13):

$$\varphi(t)_i = \text{sign}(\tilde{e}' P) \quad (13)$$

La estabilidad del sistema difuso expresado en (11) se obtiene utilizando funciones de Lyapunov tipo cuadráticas de la forma (14);

$$V(x(t)) = x^T P x(t) \quad (14)$$

se garantiza la estabilidad asintótica, si existe una matriz P positiva definida ($P > 0$) tal que, cumpla la ecuación de Lyapunov expresada en (15).

$$A_i^T P + P A_i < 0 \quad (15)$$

para cada subsistema con $i = 1, 2, \dots, r$.

Las desigualdades matriciales lineales (LMI) resultantes que garantizan la estabilidad del observador difuso en todos los subsistemas y la combinación de ellos se obtienen con base en lo establecido por Tanaka et al. (1998) y se expresan en (16):

$$\begin{aligned} P &> 0 \\ N_i &> 0 \\ A_i^T P - C_i^T N_i^T + P A_i - N_i C_i &< 0 \\ A_i^T P - C_j^T N_i^T + P A_i - N_i C_j + P A_j^T \dots & \\ -C_i^T N_j^T + P A_j - N_j C_i &< 0 \\ i &< j \end{aligned} \quad (16)$$

Las ganancias del observador se definen por la solución del sistema de LMI's definida en (17)

$$K_i = P_i^{-1} N_i \quad (17)$$

4.1 Observador difuso con modos deslizantes para actuador

De acuerdo al modelo difuso Takagi-Sugeno para el convertidor Buck-Boost del hervidor definido en (10), la expresión del observador difuso para dicho convertidor se define en (18).

$$\dot{x}(t) = A x(t) + \left(\sum_{i=1}^4 h_i(z_1, z_2) B_i \right) d$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(z_1, z_2) C_i x(t) \quad (18)$$

la matriz de salidas C queda definida en (19), donde las salidas del sistema son v_C e i_L .

$$C = \left(\begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \right) \quad (19)$$

El error de estimación del observador se define por la diferencia de los estados del modelo no lineal del conver-

tidor (\dot{x}) y los estados estimados del observador difuso con modos deslizantes (\hat{x}) expresado en (20).

$$\tilde{e}_{\phi_a} = \dot{x} - \hat{\dot{x}} \quad (20)$$

El esquema a bloques del observador aplicado al convertidor Buck-Boost se muestra en Fig. 5, donde las variables difusas (z_1, z_2) son los estados del sistema (x_1, x_2), las ganancias del observador difuso y modos deslizantes se definen como K_f y K_ϕ .

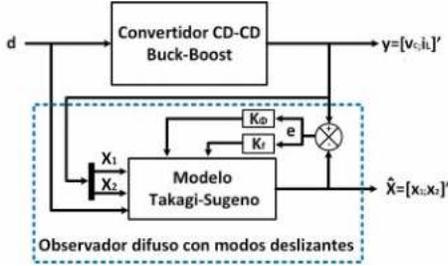


Fig. 5. Observador difuso con modos deslizantes para convertidor CD-CD

De acuerdo a las características del modelo difuso del convertidor (10), donde las matrices de estados $A_1, A_2, A_3, A_4 = A$ son idénticas, el sistema de LMI's para garantizar la estabilidad del observador difuso con modos deslizantes para el convertidor Buck-Boost se define en (21).

$$P_{\phi_a} \phi > 0 \quad (21)$$

$$A'P_{\phi_a} - C'N'_{\phi_a} + P_{\phi_a}A - N_{\phi_a}C < 0$$

dada la solución para P_{ϕ_a} , la ganancia K_ϕ para el observador es determinada por (22)

$$K_\phi = P_{\phi_a}^{-1}N_{\phi_a} \quad (22)$$

5. SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y DETECCIÓN DE FALLAS

La Fig. 6 muestra el sistema FDD para el convertidor Buck-Boost que regula la potencia eléctrica en una resistencia calefactora mediante el ciclo de trabajo (d).

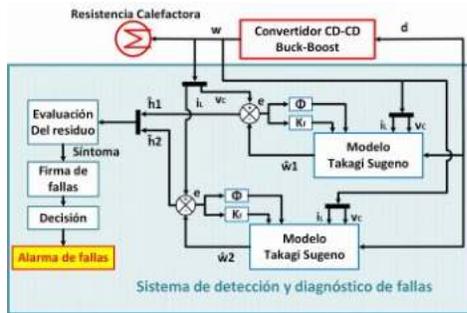


Fig. 6. Esquema del sistema FDD para el convertidor Buck-Boost

El sistema FDD se basa en dos observadores difusos con modos deslizantes, que tienen entradas de referencia distintas para la etapa de corrección del observador, lo cual permite detectar y diagnosticar el tipo de falla en el convertidor. Las entradas de referencia son la corriente en el inductor (i_L) y el voltaje en el capacitor (v_C).

La generación de residuos se determina por la expresión (23).

$$\hat{h}_i = w - \hat{w}_i \quad (23)$$

donde w son los estados del sistema y \hat{w}_i son los estados estimados de cada observador, con $i = 1, 2$.

En el caso ideal, un residuo es igual a cero cuando no ocurre una falla ($\hat{h}_i = 0$) y diferente a 0 cuando existe una falla ($\hat{h}_i \neq 0$), por lo tanto la evaluación del residuo consiste en determinar únicamente cuando el residuo es igual a cero o no, Torres et al. (2016). Debido a las no linealidades de los sistemas físicos y a los errores de estimación que se pudieran tener con el observador, es necesario implementar otra técnica de evaluación de residuos.

En Bask (2005) se propone comparar un umbral con una señal de evaluación, que es una función del residuo. La señal de evaluación $\Gamma(t)$ se elige de tal manera que ponga en manifiesto la contribución de las fallas por el error de estimación. El umbral $\Phi(t)$ se determina, tal que:

$$\begin{cases} \Gamma(t) \leq \Phi(t) & \forall t \geq 0 \Rightarrow \text{Libre de falla} \\ \Gamma(t) > \Phi(t) & \forall t \geq 0 \Rightarrow \text{Falla (alarma)} \end{cases} \quad (24)$$

Los umbrales para el caso de estudio se obtienen a partir de simulaciones y de los puntos de operación del convertidor CD-CD. Para el observador con referencia de i_L los umbrales son $\Phi_{iL1} = [-0.1, 0.09]$ y $\Phi_{vC1} = [-0.5, 0.5]$ para el observador con referencia de v_C los umbrales son $\Phi_{iL2} = [-1, 1]$ y $\Phi_{vC2} = [-5, 10]$. La evaluación de residuos para obtener los síntomas para diagnosticar y detectar el tipo de falla en el convertidor se realiza con la firma de fallas presentada en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de fallas de sistema FDD

Falla	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
\hat{h}_{iL1}	-1	1	1	-1	1	0	1
\hat{h}_{iL2}	-1	1	1	-1	-1	1	1
\hat{h}_{vC1}	1	-1	1	-1	1	-1	1
\hat{h}_{vC2}	1	-1	0	0	1	-1	-1

donde las fallas que detecta el sistema FDD son:

F1: Decremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}).

F2: Incremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}).

F3: Decremento en la magnitud de la carga nominal (R).

F4: Incremento en la magnitud de la carga nominal (R).

F5: Decremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}) y decremento en la magnitud de la carga nominal (R).

F6: Incremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}) e incremento en la magnitud de la carga nominal (R).

F7: Incremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}) y decremento en la magnitud de la carga nominal (R).

6. RESULTADOS

La validación del sistema FDD se realiza mediante simulación, empleando datos experimentales, para un convertidor Buck-Boost que regula el voltaje a una resistencia calefactora de 350 watts para el hervidor de 2 litros para una

columna de destilación. Las características de operación y parámetros de diseño del convertidor Buck-Boost se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del convertidor

Parámetro	Magnitud
Voltaje de la fuente (V_{cc})	180 V
Voltaje de salida (V_{out})	-220 V
Inductor (L)	5 μH
Capacitor (C)	78 μF
Carga (R)	70.3 Ω
Frecuencia (f)	20 kHz
Ciclo de servicio (u)	0.56

Perturbación en voltaje de alimentación del actuador: Para la validación del sistema FDD se realizan perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{cc} del actuador de forma secuencial de acuerdo a la Tabla 3.

Tabla 3. Secuencia de fallas abruptas en V_{cc}

Falla	Tiempo
Decremento al 83.3 % del voltaje nominal (150 V)	0.075 s
Incremento al 100 % del voltaje nominal (180 V)	0.15 s
Incremento al 116.6 % del voltaje nominal (210 V)	0.225 s
Decremento al 100 % del voltaje nominal (180 V)	0.3 s

La Fig. 7 muestra la dinámica de los observadores ante las fallas presentadas en la Tabla 3, donde se muestra la convergencia de ambos observadores entre 0 ms y 0.075 s debido a la ausencia de fallas. Además el observador con la medición de v_C como referencia tiene un error absoluto de estimación máximo del 22.72 % generando los residuos de la Fig. 8. Los síntomas que se obtienen por la evaluación de los residuos con los umbrales se muestran en la Fig. 9 permitiendo detectar y determinar la falla en el actuador a partir de la firma de fallas de la Tabla 1

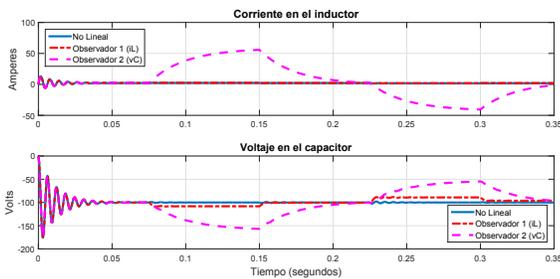


Fig. 7. Dinámica de los observadores y modelo no lineal con perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{cc} .

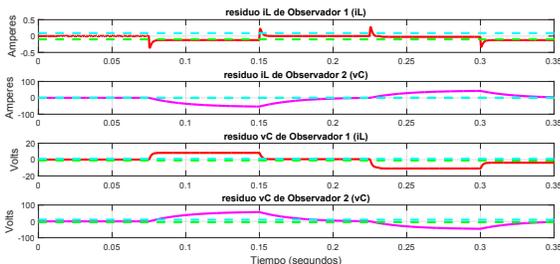


Fig. 8. Residuos generados por observadores por perturbaciones en voltaje de alimentación V_{cc} .

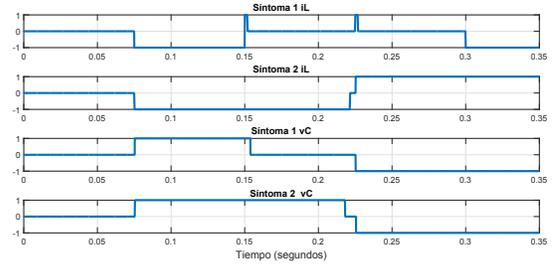


Fig. 9. Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{cc} .

Variaciones de carga: La resistencia calefactora del hervidor puede variar en su valor nominal debido al material de fabricación además del deterioro por el uso y envejecimiento, por lo que se realizan casos de estudio en el sistema FDD para validar su desempeño ante estas variaciones en carga nominal (70.3 Ω). La Tabla 4 presenta la secuencia de las variaciones en tiempo de la carga nominal del hervidor.

Tabla 4. Secuencia de fallas en carga

Falla	Tiempo
Decremento al 71.1 % de la carga nominal (50 Ω)	0.075 s
Incremento al 100 % la carga nominal (70.3 Ω)	0.15 s
Incremento al 114.2 % de la carga nominal (80 Ω)	0.225 s
Decremento al 100 % de la carga nominal (70.3 Ω)	0.3 s

En la Fig. 10 se muestra la dinámica de los observadores del sistema FDD ante las variaciones secuenciales de la magnitud de la resistencia calefactora (R), donde se muestra que el observador con entrada de referencia i_L presenta un error absoluto máximo de estimación del 7.72 % debido a la sensibilidad de la estimación de la corriente i_L del observador. Además, los residuos generados por los observadores se muestran en la Fig. 11, que al evaluarlos respecto a la firma de fallas de la Tabla 4 resultan los síntomas de la Fig.12.

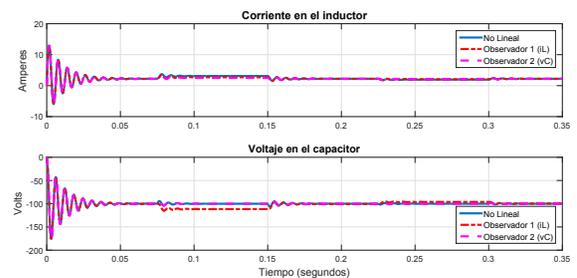


Fig. 10. Dinámica de los observadores y modelo no lineal con perturbaciones en la carga (R).

Es posible observar que la robustez en la estimación de los estados empleados para la generación de residuos y síntomas empleados para determinar las fallas permite obtener una detección de la totalidad de las fallas determinadas en el sistema FDD.

7. CONCLUSIONES

En una columna de destilación, uno de los actuadores más importantes es el encargado de regular la potencia

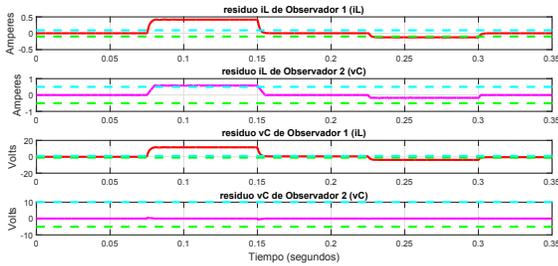


Fig. 11. Residuos generados por observadores por perturbaciones en la carga (R).

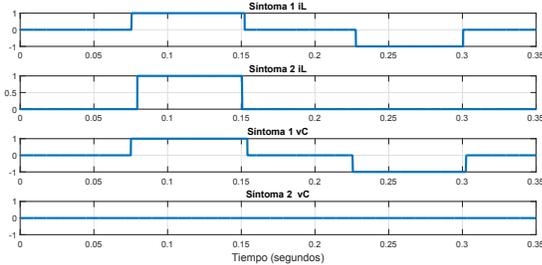


Fig. 12. Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones en el voltaje de alimentación (R).

calórica del proceso, por lo que en este trabajo se presenta un sistema FDD para un actuador basado en un convertidor CD-CD que permite detectar adecuadamente fallas (perturbaciones) en el voltaje de entrada al convertidor y variaciones en la resistencia calefactora, mediante la selección adecuada de umbrales de detección.

El sistema de detección de fallas se conforma por un banco de observadores difusos con modos deslizantes, los cuales, como se observa en los resultados, permiten obtener una estimación precisa de las variable de estados empleadas para la obtención de residuos.

Los resultados obtenidos en simulación permiten validar la adecuada detección de las fallas mencionadas, ya que se detecta el total de las fallas especificadas por el sistema FDD, permitiendo al usuario tomar las medidas preventivas y/o correctivas correspondientes.

REFERENCIAS

Pratima Acharya, Geetanjali Dumpa, and Tarun Kumar Dan. Modelling and control of distillation column. In *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (IC-CPEIC)*, pages 123–128. IEEE, 2016.

Mouncif Arazi, Alireza Payman, Mamadou Bailo Camara, and Brayima Dakyo. Study of different topologies of dc-dc resonant converters for renewable energy applications. In *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, pages 1–6. IEEE, 2018.

Mehdi Baghli, Claude Delpha, Demba Diallo, and Abdelahmid Hallouche. Three-level inverter fault detection and diagnosis using current-based statistical analysis. In *2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*, pages 686–691. IEEE, 2018.

Michael Bask. *Dynamic threshold generators for robust fault detection*. PhD thesis, Luleå tekniska universitet, 2005.

Pontus Bergsten, Rainer Palm, and Dimiter Driankov. Observers for takagi-sugeno fuzzy systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 32(1):114–121, 2002. ISSN 1083-4419.

B. Castillo-Toledo and J. Anzures-Marin. Model-based fault diagnosis using sliding mode observers to takagi-sugeno fuzzy model. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005*, pages 652–657. IEEE, 2005.

Alaa Daher. *Default diagnosis and prognosis for a preventive and predictive maintenance. Application to a distillation column*. PhD thesis, Normandie Université, 2018.

Mario Heras-Cervantes, Juan Anzures-Marin, Adriana del Carmen Téllez-Anguiano, Ma. Carmen García-Ramírez, and Javier Correa-Gómez. Modelling a heating-power actuator for a distillation column boiler. In *2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pages 1–6. IEEE, 2016.

David Luenberger. Observers for multivariable systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(2):190–197, 1966. ISSN 0018-9286.

Nithin Raj, G Jagadanand, and Saly George. Fault detection and diagnosis in asymmetric multilevel inverter using artificial neural network. *International Journal of Electronics*, 105(4):559–571, 2018.

Christian A. Rojas, Samir Kouro, Marcelo A. Perez, and Javier Echeverria. Dc-dc mmc for hvdc grid interface of utility-scale photovoltaic conversion systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1):352–362, 2017. ISSN 0278-0046.

KLS Sharma. *Overview of industrial process automation*. Elsevier, 2016.

Kazuo Tanaka, Takayuki Ikeda, and Hua O. Wang. Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and lmi-based designs. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 6(2):250–265, 1998. ISSN 1063-6706.

K. Tarakanath, Sachin Patwardhan, and Vivek Agarwal. Internal model control of dc-dc boost converter exhibiting non-minimum phase behavior. pages 1–7. IEEE, 2014.

AC Téllez-Anguiano, CM Astorga-Zaragoza, RF Escobar, E Alcorta-García, and D Juárez-Romero. Sistema de detección y aislamiento de fallas basado en un observador continuo-discreto para columnas de destilación empleando una mezcla binaria. *Revista mexicana de ingeniería química*, 15(1):275–290, 2016.

G Ortiz Torres, RF Escobar, M Adam Medina, CM Astorga Zaragoza, and GV Guerrero Ramírez. Control tolerante a fallas activo en sensores y actuadores: Aplicación a una columna de destilación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 13(1):67–79, 2016.