

Detección y diagnóstico de fallas en sensores aplicado a una columna de destilación mediante un observador adaptable

G. Ortiz Torres, R. F. Escobar, M. Adam Medina, E. M. Sánchez Coronado,
C. M. Astorga Zaragoza, V. H. Olivares Peregrino, A. C. Téllez Anguiano*

*Instituto Tecnológico de Morelia, Michoacán, México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - CENIDET
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, México
Teléfono: (52)-777-3627770,3 gortiztr@cenidet.edu.mx

Resumen—La aparición de fallas en una columna de destilación trae como consecuencia la desviación de las concentraciones requeridas en los productos destilados y en algunos casos pone en riesgo al operador humano cuando la falla aparece en el actuador de la planta como es el caso de la resistencia calefactora, por lo tanto, la detección y el diagnóstico de fallas en sensores es una herramienta que puede aumentar la seguridad durante la operación de la planta. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallas en sensores aplicado a una columna de destilación de doce platos mediante el uso de un observador no lineal adaptable, se utiliza un esquema de diagnóstico IFD (Instrument Fault Detection). La aportación principal del trabajo consiste en que el esquema de detección y diagnóstico de fallas determina el tamaño, instante de aparición y magnitud de la falla en los sensores de temperatura de la columna con el uso de un solo observador. El esquema utiliza datos experimentales de la planta y es puesto en marcha en un proceso real de destilación etanol-agua. © AMCA.

Palabras clave: Columna de destilación, sistemas no lineales, observadores, diagnóstico de fallas.

I. INTRODUCCIÓN

El sistema de monitoreo de temperaturas en las distintas etapas (platos) de la planta debe ser riguroso (Xianku y Yicheng, 2005), esto se debe a que las concentraciones molares de los componentes dependen directamente de la temperatura, una de las razones más importantes por las que se emplean numerosos sensores de temperatura es que en cada plato hay una distinta concentración molar, a falta de sensores para medirla en línea se mide a través de la temperatura.

Un desafío que se enfrenta para medir las variables en un proceso de destilación es que algunas variables no pueden ser medidas en línea como por ejemplo, la concentración molar líquida; para esto una alternativa consiste en la utilización de un sensor para medir una variable relacionada en conjunto, las señales de entrada, salida y un modelo matemático para estimar variables desconocidas en línea. El algoritmo anterior se le conoce como observador de estado y

puede ser usado también para detectar y diagnosticar fallas en sensores (Bastin y Dochain, 1990).

Existen diversos métodos para diagnosticar fallas (Iserman, 2006), uno de ellos es el que hace uso de observadores de estado y utiliza un conjunto de indicadores de la existencia de fallas denominados residuos. Dichos residuos se obtienen a partir de la entrada, la salida y un conjunto de relaciones analíticas construidas a partir del modelo matemático del sistema (Escobet *et al.*, 2008). Los esquemas de diagnóstico de fallas permiten determinar el tipo, el tamaño, la localización e instante de aparición de una falla en los sensores, actuadores o componentes de un sistema. La puesta en marcha de un sistema de detección y diagnóstico de fallas en sensores de temperatura permite el conocimiento de la operación de fallas de los mismos. En caso de una falla el sistema pone en aviso al operador de un mal funcionamiento en un sensor. Como una de las tareas del sistema de detección y diagnóstico de fallas es determinar la magnitud de la falla, se puede estimar la magnitud real de temperatura aunque el sensor presente avería y así evitar un paro de emergencia en la planta.

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallas en sensores aplicado a una columna de destilación de doce platos mediante el uso de un observador no lineal adaptable. La aportación principal del trabajo consiste en que el esquema de detección y diagnóstico de fallas determina el tamaño, instante de aparición y magnitud de la falla en los sensores de temperatura con el uso de un solo observador. El esquema utiliza datos experimentales de la planta y es puesto en marcha en un proceso real de destilación de la mezcla etanol-agua.

II. COLUMNA DE DESTILACIÓN

En general una columna de destilación consta de N etapas, de las cuales $N - 2$ son platos y los dos restantes son un condensador y un hervidor. Los platos son numerados ascendientemente del condensador al hervidor ($p = 1, \dots, N$). Los platos están ordenados de la siguiente forma:

- Condensador (plato $p = 1$)

- Plato de alimentación (plato $p = f$)
- Hervidor (plato $p = N$)

Las secciones en una columna de destilación son:

- Sección de enriquecimiento (platos: $p = 2, \dots, f - 1$)
- Sección de empobrecimiento (platos: $p = f + 1, \dots, N - 1$)

En la Figura (1) se muestra el esquema general de una columna de destilación, donde V es el flujo de vapor que asciende, L es el flujo de líquido que desciende, F es el flujo de alimentación, z_F es la concentración de alimentación, B y x_B son el flujo del producto de fondo y su concentración molar respectivamente, D y x_D son el flujo del producto destilado y su concentración molar respectivamente.

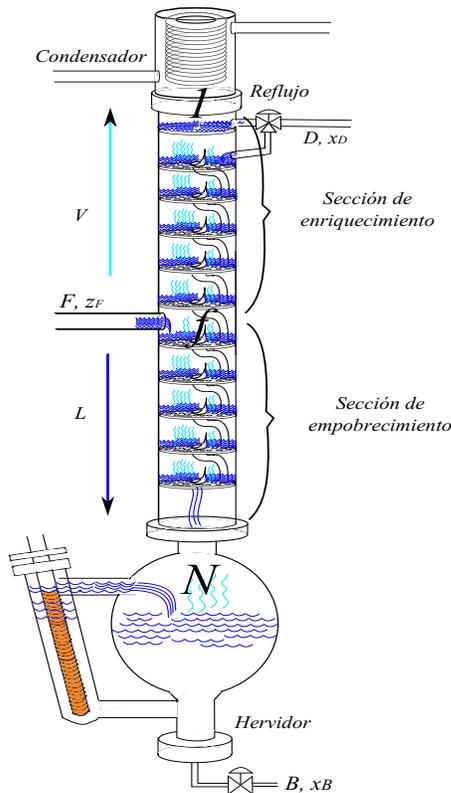


Figura 1. Esquema general de una columna de destilación

III. MODELO NO LINEAL DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN

Para llevar a cabo el modelo de una columna de destilación es necesario un conjunto de ecuaciones diferenciales construidas a partir del balance de materia y de componente para cada plato de la columna, así como de ecuaciones algebraicas para describir las propiedades físicas y termodinámicas. El conocimiento del comportamiento de las fases líquido y vapor de la mezcla son necesarias para predecir las propiedades termodinámicas, esto se realiza a través de métodos de predicción basados en datos experimentales y que dependen de las concentraciones de las mezclas, las temperaturas y la presión del sistema. Para el modelo

matemático desarrollado se establecen las siguientes suposiciones (Cingara *et al.*, 1990): Condensador total, la columna es adiabática, la fase líquida y vapor que abandonan el plato se encuentran en equilibrio termodinámico, la presión se considera constante, las propiedades del líquido se comportan como una mezcla no ideal, se desprecia la retención molar de vapor a lo largo del sistema, el hervidor se considera como un plato teórico y la retención volumétrica del líquido es constante.

III-A. Modelo termodinámico

Si un vapor y un líquido están en íntimo contacto por un largo periodo de tiempo se alcanza el equilibrio entre las dos fases, esto significa que no ocurre ningún flujo de calor, ni de masa entre dichas fases. Para mezclas no ideales, los sistemas químicos a baja presión utilizan la siguiente ecuación que representa la composición molar de vapor en función del componente ligero y es conocida como la ley de Raoult modificada:

$$y_p P_T = P_i^{sat} x_p \gamma_i \quad (1)$$

donde x_p y y_p representan la concentración molar líquida y de vapor en el plato p respectivamente, P_T es la presión total del proceso y P_i^{sat} es la presión de saturación de cada componente ($i = 1$ para el etanol e $i = 2$ para el agua); γ_i es el coeficiente de actividad, un factor de corrección altamente dependiente de la concentración. En este trabajo el coeficiente de actividad es calculado por el método de NRTL (Non Random Two Liquid) para una mezcla binaria cuya fórmula es:

$$\begin{cases} \ln \gamma_1 = x_2^2 \left[\tau_{21} \left(\frac{G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} \right)^2 + \frac{\tau_{12} G_{12}}{(x_2 + x_1 G_{12})^2} \right] \\ \ln \gamma_2 = x_1^2 \left[\tau_{12} \left(\frac{G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right)^2 + \frac{\tau_{21} G_{21}}{(x_1 + x_2 G_{21})^2} \right] \end{cases} \quad (2)$$

siendo:

$$\begin{cases} \tau_{12} = \frac{g_{12} - g_{22}}{RT} \\ \tau_{21} = \frac{g_{21} - g_{11}}{RT} \\ G_{ij} = \exp(-\alpha_{ij} \tau_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

donde G_{ij} representa el parámetro de energía característico de la interacción entre el componente i y j , α_{ij} es un parámetro de ajuste que representa el factor de no aleatoriedad en la mezcla, R es la constante de los gases, T es la temperatura absoluta y x_1, x_2 representan la concentración molar líquida del componente más volátil y menos volátil respectivamente. El valor de estas constantes para la mezcla en estudio se encuentran en (Perry, 1999).

La presión de vapor se calcula utilizando la ecuación de Antoine para cada uno de los componentes, esta presión está en función de la temperatura T (Perry, 1999):

$$\ln(P_i^{sat}) = A_i - \left(\frac{B_i}{T + C_i} \right) \quad (4)$$

donde A_i, B_i, C_i son los coeficientes de Antoine dados para cada componente de la mezcla.

III-B. Modelo matemático

En la columna de destilación fluyen tasas molares de líquido y vapor tanto internas como externas las cuales varían en cada estado. En la sección de enriquecimiento el flujo molar de vapor V_R y el flujo molar líquido L_R con respecto al componente más ligero se obtienen mediante:

$$\begin{cases} V_R = V_S + (1 - q_F)F, & i = 1, \dots, f \\ L_R = (1 - r_v)V_R, & i = 1, \dots, f - 1 \end{cases} \quad (5)$$

donde:

$$q_F = 1 + \frac{C_p(T_b - T_F)}{\lambda} \quad (6)$$

donde q_F describe la calidad de la alimentación. Para este trabajo se considera $q_F = 1$, es decir se supone que la alimentación está en el punto de rocío; r_v es una variable binaria que representa la posición de la válvula de reflujo *On-Off* de tres vías, C_p es el calor específico, T_b es la temperatura de ebullición, T_F es la temperatura de alimentación y λ es la entalpía de vaporización. F es el flujo molar de alimentación y se obtiene con:

$$F = F_v [\rho_1 w_1 + \rho_2 (1 - w_1)] \left(\frac{x_f}{MW_1} + \frac{1 - x_f}{MW_2} \right) \quad (7)$$

donde F_v es el flujo volumétrico de la alimentación, ρ_i es la densidad de cada componente ($i = 1$ para el componente más volátil e $i = 2$ para el componente menos volátil); MW_i es el pesos molecular de los componentes y w_1 es el porcentaje en peso del componente más volátil dado por:

$$w_1 = \frac{x_f \rho_1}{x_f \rho_1 + (1 - x_f) \rho_2} \quad (8)$$

La tasa de flujo del producto destilado D está dado por:

$$D = V_R r_v \quad (9)$$

donde r_v es una variable binaria que representa la apertura de la válvula de reflujo, si $r_v = 0$ significa que $D = 0$ y $r_v = 1$ se tendrá $D = V_R$.

En la sección de empobrecimiento, el flujo molar de vapor V_S y el flujo molar líquido L_S se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} V_S = \frac{Q_b}{\lambda_1 x_N + \lambda_2 (1 - x_N)}, & i = f + 1, \dots, N \\ L_S = L_R + q_F F, & i = f, \dots, N \end{cases} \quad (10)$$

donde Q_b es la potencia eléctrica calefactora en el hervidor.

Las composiciones del producto de fondo y el producto destilado son estimadas usando el modelo dinámico basado en los balances de materia y componente.

De acuerdo a las simplificaciones dadas, las entalpías del proceso son consideradas constantes, por lo tanto, el balance de energía no es tomado en cuenta para el desarrollo del modelo. Un conjunto de ecuaciones diferenciales pueden ser obtenidas a partir del balance por componente en cada plato (Skogestad, 1997).

$$\begin{cases} \frac{d(M_1 x_1)}{dt} = V_R (y_2 - x_1) \\ \frac{d(M_p x_p)}{dt} = V_R (y_{p+1} - y_p) + L_R (x_{p-1} - x_p), \\ \quad \text{con } p = 2, \dots, f - 1 \\ \frac{d(M_f x_f)}{dt} = V_R (y_{f+1} - y_f) + L_R (x_{f-1} - x_f) \\ \quad + F (z_F - x_f) \\ \frac{d(M_p x_p)}{dt} = (F + L_R) (x_{p-1} - x_p) + V_R (y_{p+1} - y_p) \\ \quad \text{con } p = f + 1, \dots, N - 1 \\ \frac{d(M_N x_N)}{dt} = (F + L_R) (x_{N-1} - x_N) + V_R (x_N - y_N) \end{cases} \quad (11)$$

donde M_p es la masa retenida en cada uno de los platos, F y z_F es el flujo molar líquido de alimentación y la fracción molar del componente ligero en la alimentación respectivamente.

IV. DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS

IV-A. Diseño del observador adaptable

En términos generales, un observador es un sistema dinámico que proporciona la estimación asintótica de los estados actuales a partir del conocimiento de sus entradas y salidas del sistema. Un observador adaptable es un algoritmo recursivo utilizado para estimar los estados de un sistema con parámetros desconocidos y/o para estimar los estados y los parámetros desconocidos. En (Besancon, 2000), el autor propone un observador adaptable que permite la estimación asintótica de los estados a pesar de parámetros desconocidos:

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = \alpha(y(t), z(t), u(t)) + \beta(y(t), z(t), u(t))\theta(t) \\ \dot{z}(t) = \gamma(y(t), z(t), u(t)) \end{cases} \quad (12)$$

donde $y(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salida del sistema (estados medibles), $z(t) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de estados no medibles, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector medible de entradas acotadas y $\theta(t) \in \mathbb{R}^r$ es el vector de parámetros desconocidos. $\alpha(y(t), z(t), u(t))$ y $\beta(y(t), z(t), u(t))$ son dos funciones globalmente Lipschitz con respecto a $z(t)$. En nuestro caso se considera que todos los estados son medibles, siendo $\theta(t)$ el parámetro ha estimar, es decir, $z(t) = 0$ para todos los estados, por lo tanto el observador adaptable queda como:

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}(t) = \alpha(y(t), u(t)) + \beta(y(t), u(t))\hat{\theta}(t) \\ \quad - k_y (\hat{y}(t) - y(t)) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) = -k_\theta \beta^T(y(t), u(t)) (\hat{y}(t) - y(t))^T \end{cases} \quad (13)$$

de tal forma que para toda $\hat{y}(0)$, $y(0)$ y $u(t)$ medible acotada el error de estimación $\|\hat{y}(t) - y(t)\|$ tiende a cero asintóticamente cuando el tiempo t tiende a infinito. Si $\beta^T(y, u, t)$ es una excitación persistente y uniformemente continua, entonces $\|\hat{\theta}(t) - \theta(t)\|$ tiende a cero cuando el tiempo t tiende a infinito. Las constantes k_y y k_θ son las ganancias del observador, generalmente son positivas y pueden tener diferentes valores; es recomendable que $k_y < k_\theta$, este tipo de observador se ha aplicado en sistemas no lineales como se presenta en (Astorga *et al.*, 2007). En este trabajo las variables que se miden son las temperaturas en los platos 1, 2, 4, 6, 7, 9, 11 y 12. Utilizando la curva de equilibrio líquido-vapor para la mezcla etanol y agua se obtienen las concentraciones (el estado). El observador adaptable permite estimar estos estados y a su vez estimar las temperaturas en los platos para así realizar la tarea de diagnóstico y detección de fallas en los sensores de temperatura.

IV-B. Aplicación a una columna de destilación

Sin considerar la alimentación en el modelo no lineal (11), se llega a la siguiente representación:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{-V_R x_1 + P_2^{sat} \left(\frac{V_R x_2 \gamma_2}{P_T} \right)}{M_1} \\ \dot{x}_p = \frac{L_R(x_{p-1} - x_p) + P_{p+1}^{sat} \left(\frac{V_R x_{p+1} \gamma_{p+1}}{P_T} \right)}{M_p} \\ \quad - \frac{P_p^{sat} \left(\frac{V_R x_p \gamma_p}{P_T} \right)}{M_p}, \text{ con } p = 2, \dots, N-1 \\ \dot{x}_N = \frac{L_R(x_{N-1} - x_N) + V_R x_N + P_N^{sat} \left(\frac{V_R x_N \gamma_N}{P_T} \right)}{M_N} \end{cases} \quad (14)$$

que tiene la misma forma que el sistema (12), sin tener estados no medibles $z(t)$. Ahora, se construye el observador adaptable de la forma (13) para el sistema (14):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \frac{-V_R x_1 + \hat{P}_2^{sat} \left(\frac{V_R x_2 \gamma_2}{P_T} \right)}{M_1} - k_y(\hat{x}_1 - x_1) \\ \dot{\hat{x}}_p = \frac{L_R(x_{p-1} - x_p) + P_{p+1}^{sat} \left(\frac{V_R x_{p+1} \gamma_{p+1}}{P_T} \right)}{M_p} \\ \quad - \frac{\hat{P}_p^{sat} \left(\frac{V_R x_p \gamma_p}{P_T} \right)}{M_p} - k_y(\hat{x}_p - x_p), \\ \quad \text{con } p = 2, \dots, N-1 \\ \dot{\hat{x}}_N = \frac{L_R(x_{N-1} - x_N) + V_R x_N - \hat{P}_N^{sat} \left(\frac{V_R x_N \gamma_N}{P_T} \right)}{M_N} \\ \quad - k_y(\hat{x}_N - x_N) \end{cases} \quad (15)$$

Para el plato N , $\alpha(y(t), u(t))$ y $\beta(y(t), u(t))$ son $L_R(x_{N-1} - x_N)$ y $\left(\frac{V_R x_N \gamma_N}{P_T} \right)$ respectivamente. Al tener la concentración molar líquida y de vapor acotada de 0 a 1 y las entradas acotadas por los actuadores se puede verificar el cumplimiento de las funciones globalmente Lipschitz. El parámetro estimado es la presión de vapor. Por inspección en (15) se deduce que no existe presión de vapor en el plato 1 (condensador) debido a que en las suposiciones del modelo se considera que el condensador es total, de tal forma que bajo estas suposiciones y con este observador adaptable no es posible estimar la temperatura

en ese plato, entonces el observador estima las presiones de vapor de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \dot{\hat{P}}_p^{sat} = k_\theta \left(\frac{V_R x_p \gamma_p}{P_T} \right) (\hat{x}_p - x_p) M_p, \\ \quad \text{con } p = 2, \dots, N-1 \\ \dot{\hat{P}}_N^{sat} = k_\theta \left(\frac{V_R x_N \gamma_N}{P_T} \right) (\hat{x}_N - x_N) M_N \end{cases} \quad (16)$$

Con la presión de vapor estimada y empleando la ecuación de Antoine (4) se obtiene la temperatura estimada \hat{T} para cada plato del 2 al plato N , por lo tanto los residuos serán:

$$r_i = |T_i - \hat{T}_i|, \text{ con } i = 2, \dots, N \quad (17)$$

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar el sistema de diagnóstico y detección de fallas en sensores (Figura 2) se emplean datos experimentales obtenidos de una planta piloto de destilación, localizada en el Laboratorio de Control de Procesos del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México.

La columna de destilación cuenta con doce platos, las mediciones de temperatura son realizadas por ocho sensores RTD's Pt-100 localizados en los platos 1, 2, 4, 6, 7, 9, 11 y 12. Los factores que pueden ocasionar fallas en este tipo de sensores son: por corrosión, por uso prolongado (desgaste), mala instalación, errores de calibración, corto circuito en conexiones, bajo voltaje, errores en la comunicación, entre otros. Los RTD's Pt-100 usados tienen una sensibilidad de $+0,4/^\circ\text{C}$ a 100Ω y una precisión de $\pm 0,15^\circ\text{C} / \pm 0,06\Omega$.

La mezcla usada es etanol-agua, la cual es azeotrópica (no ideal). Se utilizan 2000 ml de etanol y 2000 ml de agua en el depósito del hervidor; se considera que la presión total del proceso es de 662.4 mmHg. Las especificaciones de cada componente de la mezcla etanol-agua se muestra en la Tabla I.

TABLA I
ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA

Parámetros	Etanol	Agua
Densidad $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	0.789	1
Peso molecular $MW(\text{g})$	46.069	18.01528
Temp. de Ebullición $T_b(^\circ\text{C})$	78.400	100
Entalpía de vaporización $\lambda(\text{kJ}/\text{mol})$	38.560	40.650
Calor específico $C_p(\text{kJ}/\text{mol}^\circ\text{C})$	0.1124	0.0754

La temperatura medida por los sensores en los platos 1, 2, 4, 6, 7, 9, 11 y 12 se utiliza para estimar las respectivas concentraciones mediante la curva de equilibrio líquido-vapor, estas son llamadas concentraciones experimentales. Se han realizado validaciones en línea y fuera de línea del modelo de la columna de destilación del CENIDET (11), usando las mismas especificaciones que aparecen en (Aguilera *et al.*, 2010).

TABLA II
ENTRADAS DEL PROCESO

Entrada	Señal	Tiempo de inicio
Qb	Escalón 0-1000 watts	0 min
R	Total	0 min
R	Pulso ($t_{on} = 6$ seg, $t_{off} = 12$ seg)	36.8 min
R	Total	66.6 min

El tiempo total del experimento es de de 101 minutos, una vez que se alcanzó el estado estable. Las entradas del proceso se muestran en la Tabla II.

Las ganancias para el observador adaptable que se utilizaron son: $k_y = 19$ y $k_\theta = 25 \times 10^6$. El observador estima las concentraciones del componente ligero (etanol) y las temperaturas para cada plato a partir de las entradas Qb y R . Luego se realiza una comparación entre las temperaturas reales y las estimadas, para obtener así los residuos (Figura 2).

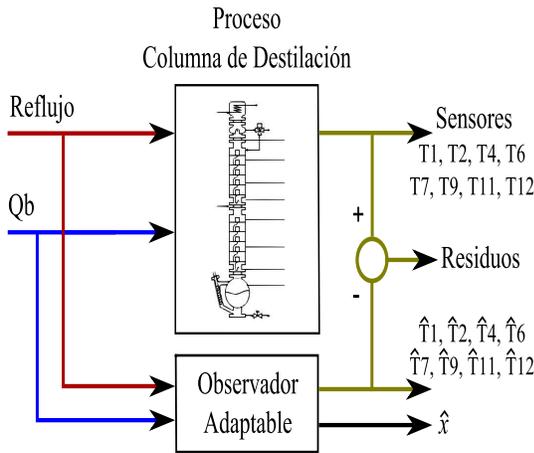


Figura 2. Esquema de FDD en sensores para la columna de destilación

En la Figura 3 se muestran la entrada de Reflujo R y la comparación entre las concentraciones estimadas por el observador adaptable y la obtenida usando las temperaturas experimentales para los platos 1, 7 y 12 respectivamente. Se puede apreciar una adecuada convergencia del observador.

Posteriormente, para validar la estimación de la temperatura por el observador adaptable (Figura 4) se realiza una comparación entre las temperaturas medidas por los sensores sin falla en el plato de alimentación (plato 7), plato 9 y el hervidor (plato 12) contra las temperaturas estimadas por el observador. En esta Figura 4 puede apreciarse una rápida convergencia de las temperaturas estimadas al valor de las temperaturas medidas por los sensores sin fallas. Inicialmente se tiene que el valor de la temperatura estimada es diferente a la de los sensores, esto ocurre por el valor inicial de los estados estimados y de la presión de vapor.

Con la finalidad de comprobar el buen funcionamiento del sistema de detección y diagnóstico de fallas en sensores se inducen fallas en los sensores 7, 9 y 12 que se describen en la Tabla III.

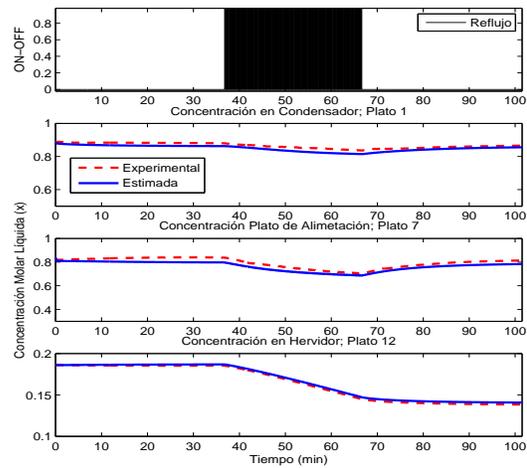


Figura 3. Concentración de etanol experimental y estimada

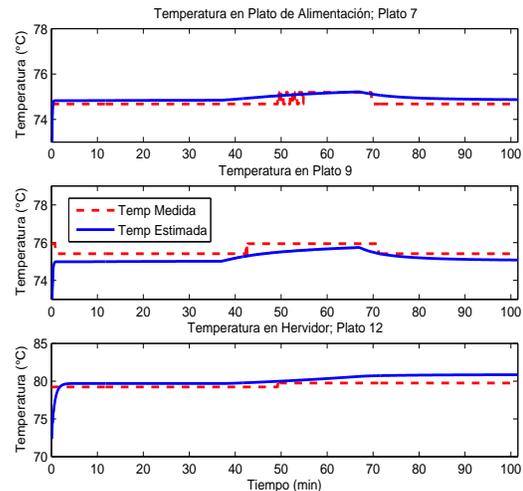


Figura 4. Temperatura medida sin falla y estimada

En la Figura 5 se muestran las temperaturas medidas con fallas en los platos 7, 9 y 12. En el plato 7 ocurre una falla de $+6$ °C en el minuto 10, el observador adaptable estima correctamente la temperatura aun a pesar de fallas en los sensores, esto debido a que el observador depende únicamente de las entradas del sistema; luego el sensor regresa a su valor sin falla en el minuto 20. Lo mismo ocurre para los platos 9 y 12.

Puesto que el observador no depende de las temperaturas medidas por los sensores de la columna de destilación, el observador se encuentra libre de fallas en sensores, es decir, cuando ocurre una falla en algún sensor, el observador estima las temperaturas sin falla y se comparan con las temperaturas medidas con falla para así obtener los residuos.

En la Figura 6 se presentan los residuos generados a causa de las fallas físicas en los sensores 7, 9 y 12 utilizando la

TABLA III
DESCRIPCIÓN DE LAS FALLAS

Sensor con falla	Valor	Tiempo inicial	Tiempo finalidad
7	+6 °C	10 min	20 min
9	+3 °C	80 min	85 min
12	-6 °C	30 min	40 min

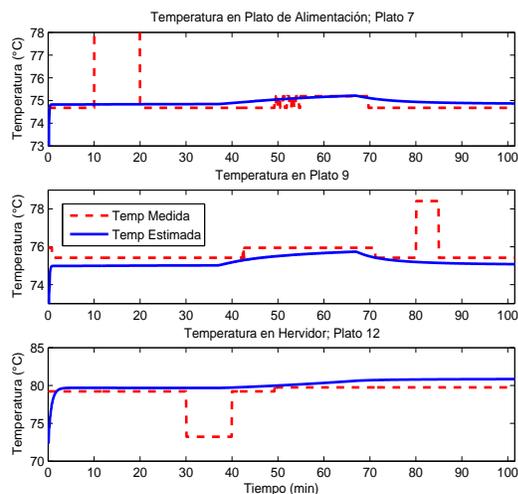


Figura 5. Temperatura medida con falla y estimada en platos 7, 9 y 12

ecuación (17), los residuos tienen esa numeración ya que dependen de los sensores con los que cuenta la columna de destilación. Los umbrales son definidos de acuerdo con el trabajo de (Hobson *et al.*, 2003) donde se propone que para procesos químicos, rangos moderados para desviaciones de temperatura son de 2°C (sin falla), rangos entre 2°C y 5°C se debe a una descalibración y mayores de 5°C será un mal funcionamiento en sensor (falla); con lo anterior y mediante los residuos (Figura 6), se puede establecer que el sensor 7 y 12 tienen falla y el sensor 9 está descalibrado.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos del diseño de un sistema de diagnóstico y detección de fallas en sensores de temperatura aplicado a un proceso de destilación etanol-agua mediante un observador adaptable. El observador adaptable demostró que es capaz de estimar las temperaturas y concentraciones de manera cercana a las mediciones de los sensores de temperatura en un tiempo de convergencia corto.

El sistema de diagnóstico y detección de fallas ha mostrado tener la capacidad de aislar la falla, de tal forma que pudieran ocurrir fallas simultáneas en todos los sensores y bien se podría determinar si la desviación de las mediciones que muestran los sensores se deben a descalibración o mal funcionamiento, esto permite realizar el mantenimiento o la reposición de los mismos sin detener completamente el proceso de destilación. La puesta en marcha de este sistema evita posibles desviaciones en la concentración molar de

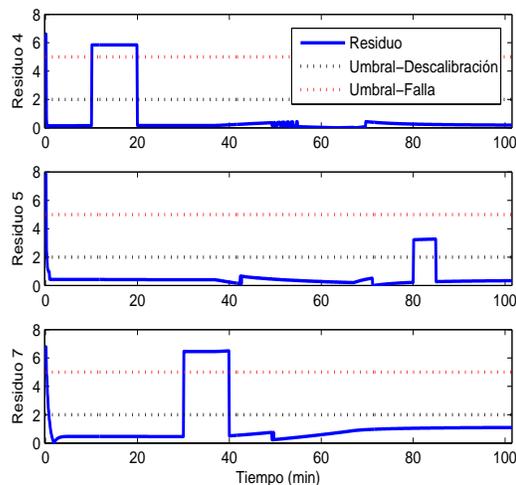


Figura 6. Residuos generados

los productos obtenidos del proceso de destilación por mal funcionamiento en los sensores.

El esquema de diagnóstico y detección de fallas se realiza con datos experimentales y dado que el observador no depende de las temperaturas medidas, éste se encuentra libre de fallas en sensores, no obstante, si existiera una falla en algún actuador el observador no será válido, es por ello que como trabajo futuro se diseñará un esquema de diagnóstico y detección de fallas en los actuadores de la columna de destilación (Resistencia calefactora Q_b y Reflujo R).

REFERENCIAS

- Aguilera, A., M. Adam, C. Astorga, C. García, G. López y C. Morales (2010). Formulación de un modelo singular para columnas de destilación: Estrategia para simplificación de modelos no lineales. En: *Congreso Anual de la asociación de México de Control Automático*.
- Astorga, C., A. Zavala, V. Alvarado, E. Méndez y J. Reyes (2007). Performance monitoring of heat exchanger via adaptive observers. *Measurement* **40**, 392–405.
- Bastin, G. y D. Dochain (1990). *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*. Elsevier.
- Besancon, G. (2000). Remarks on nonlinear adaptive observer design. *Systems & Control Letters* **41**, 271–280.
- Cingara, A., M. Jovanovic y M. Mitrovic (1990). Analytical first-order dynamic model of a binary distillation column. *Chemical Engineering & Science* **45**, 3585–3592.
- Escobet, T., D. Ferordi, V. Puig, J. Quevedo, J. Riera y M. Serra (2008). Diagnóstico de fallos en sistemas de generación de energía basado en pilas de combustible. En: *III Congreso nacional de pilas de combustible*.
- Hobson, R., A. Clausi, Oh. Thomas y A. Guiseppi-Elie (2003). Temperature correction to chemoresistive sensors in an e-nose-ann system. *Sensors Journal, IEEE* **3**(4), 484–489.
- Iserman, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*. número 2. Springer.
- Perry, R. (1999). *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. McGraw-Hill.
- Skogestad, S. (1997). Dynamics and control of distillation columns, a tutorial introduction. *Transactions Institution of Chemical Engineers* **75 (Part A)**, 539–562.
- Xianku, Z. y J. Yicheng (2005). Control of a multivariable high purity distillation column based on closed-loop gain shaping algorithm. *International Journal of Information Technology* **11**, 116–123.