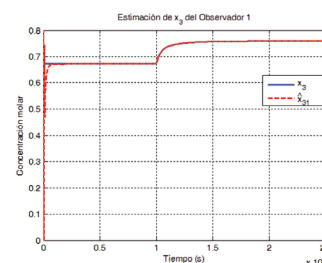


# Detección y diagnóstico de fallos en sensores de temperatura en una columna de destilación fraccionada

## Fault detection and diagnosis in temperature sensors of a fractional distillation column



Eduardo-Mael Sánchez-Coronado, Luis-Gerardo Vela-Valdés, Manuel Adam-Medina, Carlos-Alberto Torres-Cantero, Gerardo-Vicente Guerrero-Ramírez

CENIDET. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Interior Internado Palmira, s/n - 62490 Cuernavaca, Morelos (México).  
Tfno: +52 777 362 7770.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7990> | Recibido: 08/03/2016 • Aceptado: 22/06/2016

### ABSTRACT

- This article presents the design of a fault diagnosis and isolation system on sensors for temperature measuring on a fractional distillation column to prevent unstable operation. The diagnosis and fault isolation system is based on a state estimation model using state observers. The distillation column is modeled by a nonlinear mathematical model deduced from the material and component global balance for a binary mixture (alcohol-water), the model describes the behavior of the liquid molar concentration of the more volatile component of the mixture, also it allows to establish an operating point on the system which is used as a reference for a secure, stable and linearly predictable operation. The system includes the design of a set of reduced order observers which besides operating as virtual sensors are also used to generate residues, these are used to diagnose faults in the temperature sensors. The proposed fault diagnosis and isolation system for the distillation column performs residues generation and evaluation for fault detection, diagnosis and isolation to be performed in a short period of time.
- Keywords: Distillation columns, sensor fault, models, observers, fault diagnosis.

### RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallos en sensores de temperatura de una columna de destilación fraccionada para evitar su operación inestable. Este sistema está basado en modelo por estimación de estado utilizando observadores de estado. La columna de destilación es modelada a través de un modelo matemático no lineal deducido a partir del balance global de materia y de componente para una mezcla binaria (alcohol-agua); el modelo describe el comportamiento de la concentración molar líquida del componente más volátil de la mezcla, además permite establecer un punto de operación en el sistema el cual se utiliza como referencia para su operación segura, estable y linealmente predecible. El sistema incluye el diseño de un conjunto de observadores de orden reducido, los cuales, además de funcionar como sensores virtuales, se emplean para generar residuos: éstos son utilizados para diagnosticar fallos en los sensores de temperatura. El sistema de detección y diagnóstico de fallos propuesto para la columna de destilación realiza una generación y evaluación de residuos reducido para que

la detección, localización y diagnóstico de fallos sean realizados en un corto periodo de tiempo.

**Palabras clave:** Columnas de destilación, fallo en sensor, modelos, observadores, diagnóstico de fallos.

### 1. INTRODUCCIÓN

A causa de las consecuencias de eventos catastróficos en la industria química por la aparición de fallos en sensores (como los ocurridos en la explosión de la unidad de isomerización de la refinería BP en Texas, Estados Unidos en 2005 [1], o la fuga de amoníaco de la unidad de licuación de  $\text{CO}_2$  en la planta *GNP Grandpuits* en Grandpuits-Bailly-Carrois, Francia en 2009 [2], o por la explosión del reactor de formulación de Seveso en Bourgoin-Jallieu (Isère), Francia en 2011 [3]), se ha generado el interés por diseñar sistemas de diagnóstico de fallos para evitar repercusiones humanas, ambientales y económicas causadas por fallos en elementos primarios de medición de sistemas de producción químicos.

La destilación es actualmente una de las operaciones unitarias más usadas en la industria química para separar mezclas [4], el alcanzar y mantener un régimen de operación seguro y estable debe ser un requerimiento en toda columna de destilación operativa. Una forma de asegurar este régimen es a través del diseño de sistemas de diagnóstico de fallos los cuales detectan, localizan y diagnostican fallos en elementos que pueden ocasionar la operación inestable y peligrosa del sistema.

En procesos químicos existen variables cuyas magnitudes determinan la seguridad y eficiencia del proceso requiriendo que la instalación de sistemas de detección y diagnóstico de fallos en sensores sea imprescindible. En destilación la temperatura es considerada una variable crítica, a través de su medición se puede calcular la concentración molar de los componentes de la mezcla para verificar su correcta separación. Suele medirse indirectamente la concentración molar puesto que los analizadores de composición molar presentan retardos de medición, requieren alto grado de mantenimiento y son de elevado costo económico en adquisición e instalación [5].

El interés investigativo y aplicativo de sistemas de diagnóstico de fallos se puede evidenciar con diversos trabajos, por ejemplo, en [6] se pueden encontrar conceptos, definiciones, métodos y usos de sistemas de diagnóstico de fallos. De igual manera, en [7] se encuentra una recopilación y clasificación de técnicas de diagnóstico de fallos, igualmente, los resultados presentados en algunos

trabajos recientes ([8, 9]) confirman las ventajas de su utilización para la operación de plantas químicas.

Ahora bien, la situación tecnológica actual en sistemas de detección y diagnóstico de fallos está en su utilización para el diseño de diferentes sistemas del área de control, por ejemplo en [10] se utilizan conceptos de control robusto para el diagnóstico de fallos en sistemas LPV, en cuanto a control tolerante a fallos, en [11] se diseña un esquema de control tolerante a fallos pasivo en sensores de una pila de combustible bajo representación lineal por tramos; así mismo en la detección de fallos en actuadores de columnas para diseño de sistemas de control tolerantes a fallos activos [12].

Las técnicas de detección y diagnóstico de fallos basadas en modelos cuantitativos utilizan residuos como indicadores de fallos los cuales pueden ser generados por distintos métodos. Los residuos señalan la presencia de fallos a través de discrepancias entre el valor de la salida experimental del sistema y la salida estimada por un modelo matemático [13].

Los observadores usados como técnica de generación de residuos permiten detectar y diagnosticar fallos, así mismo estiman aquellas variables que no pueden ser medidas por inexistencia, ausencia o incapacidad (por avería) de los sensores. Igualmente presentan la ventaja sobre los sensores físicos que no necesitan calibración ni mantenimiento pudiendo operar indefinidamente, no obstante para su buen desempeño tienen la limitación no mejorable de requerir las salidas libres de fallos (y de entrada) provistas por los sensores; además de contar con un modelo matemático validado experimentalmente del sistema.

El objetivo principal de este artículo es mostrar el diseño y los resultados de un sistema de detección y diagnóstico de fallos en sensores de temperatura de una columna de destilación basado en modelo usando observadores; para ello se desarrollan técnicas de generación y evaluación de residuos para diagnóstico de fallos. Se pretende evitar la operación inestable del sistema provocado por una temperatura anormal no detectada, las consecuencias pueden ir desde desviaciones del producto destilado hasta eventos catastróficos provocados por choques térmicos.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el proceso de destilación así como su modelado y la obtención del modelo matemático del sistema, en la sección 3 se describe el diseño del sistema de detección y diagnóstico de fallos además del diseño de los observadores, la sección 4 presenta

los resultados obtenidos, finalmente las conclusiones alcanzadas aparecen en la sección 5.

2. COLUMNA DE DESTILACIÓN

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

Una columna binaria de destilación fraccionada posee  $n$  platos etiquetados por números ordenados progresivamente desde el domo (plato superior) hacia la base (plato inferior), además tiene un hervidor para proveer el calor a la mezcla y un condensador para enfriar los vapores que llegan al domo para producir el flujo del destilado, cabe señalar que estos dos elementos se consideran también como platos. El esquema del sistema utilizado es presentado a continuación por la Figura (1).

Las variables mostradas por la Figura (1) se describen a continuación en la Tabla (I).

| Variable   | Descripción                                                                                             | Unidad        |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| $L, V$     | Flujo molar líquido y de vapor en la sección de rectificación y agotamiento respectivamente             | $(mol/s)$     |
| $F$        | Flujo molar de alimentación líquido                                                                     | $(mol/s)$     |
| $D, B$     | Flujo de producto destilado y fondo respectivamente                                                     | $(mol/s)$     |
| $x_i, y_i$ | Fracción molar líquida y de vapor del plato $i$ del componente más volátil de la mezcla respectivamente | a-dimensional |
| $x_D, x_B$ | Fracción molar del flujo del producto de destilado y de fondo respectivamente                           | a-dimensional |
| $z_F$      | Concentración molar del flujo de alimentación líquido                                                   | a-dimensional |
| $M_D$      | Masa molar retenida del condensador                                                                     | $mol$         |
| $M_i$      | Masa molar retenida del plato $i$                                                                       | $mol$         |
| $M_B$      | Masa molar retenida del hervidor                                                                        | $mol$         |

Tabla I: Variables del proceso de destilación

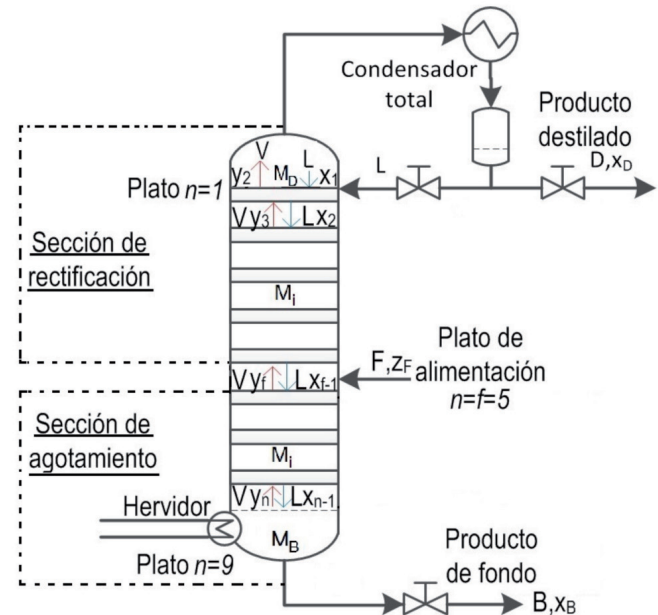


Fig. 1: Esquema de la columna de destilación fraccionada

Cuando se calienta la mezcla se produce el flujo molar de vapor ( $V$ ) el cual asciende atravesando los platos perforados hasta alcanzar el condensador, lo anterior provoca que cada plato tenga una concentración molar diferente del componente más volátil. Una parte del flujo molar líquido del condensador ( $L$ ) retorna a la columna como reflujo. Cuando el reflujo desciende por gravedad atravesando los platos provoca el aumento en la concentración molar líquida del componente menos volátil. Al plato de alimentación molar líquida se etiqueta como  $f$  y es el que divide las dos secciones de la columna.

2.2. MODELO MATEMÁTICO DE COLUMNAS BINARIAS DE DESTILACIÓN

El modelo matemático del sistema está compuesto por ecuaciones diferenciales formuladas por el balance global de materia y componente de cada plato [14], el balance se realiza considerando cuatro secciones de la columna compuestas por algunos platos, dichas secciones son: el condensador, un plato perforado genérico de cualquier sección de la columna (rectificación o agotamiento), el plato de alimentación molar líquida y el hervidor.

En la columna se realizan las siguientes suposiciones para obtener el modelo matemático: el condensador es total, el hervidor es un plato teórico, la columna es adiabática, la volatilidad relati-

va es diferente en cada plato puesto que la mezcla es no ideal, las fases en cada plato están en equilibrio termodinámico, la retención molar de los platos es constante, el proceso es isobárico y hay control de nivel perfecto en los acumuladores de los productos de destilado y fondo.

El resultado del balance global de materia y componente para una mezcla binaria en las cuatro secciones de la columna que establece el modelo matemático el cual calcula la concentración molar líquida del componente más volátil es [12]:

$$\begin{aligned} &\text{Condensador:} \\ &\frac{d(M_1 x_1)}{dt} = V(y_2 - x_1) \\ &\text{Plato genérico localizado en la sección de rectificación:} \\ &\frac{d(M_i x_i)}{dt} = V(y_{i+1} - y_i) + L(x_{i-1} - x_i), \text{con } i = 2, 3, \dots, f-1 \\ &\text{Plato de alimentación molar líquida:} \\ &\frac{d(M_f x_f)}{dt} = (V y_{f+1} - V y_f) + L(x_{f-1} - x_f) + F(z_f - x_f) \\ &\text{Plato genérico localizado en la sección de agotamiento:} \\ &\frac{d(M_n x_n)}{dt} = V(y_{i+1} - y_i) + (F + L)(x_{i-1} - x_i), \text{con } f+1, \dots, n-1 \\ &\text{Hervidor:} \\ &\frac{d(M_n x_n)}{dt} = V(x_n - y_n) + (F + L)(x_{n-1} - x_n) - B x_B \end{aligned} \quad (1)$$

Una forma de calcular la fracción molar de vapor del alcohol es definiendo la volatilidad relativa para cada plato de acuerdo al equilibrio termodinámico líquido-vapor, ésta se define por la ecuación (2) como:

$$\alpha = \frac{y_U / x_U}{y_S / x_S} = \frac{y / (1-y)}{x / (1-x)} \Rightarrow y_i = \frac{\alpha_i x_i}{1 + (\alpha_i - 1) x_i} \quad (2)$$

en donde  $U$  y  $S$  indican al componente más y menos volátil de la mezcla respectivamente. Así mismo, cuando la concentración molar líquida alcanza el estado estacionario (sin variaciones de temperatura significativas) se puede obtener la fracción molar de vapor del alcohol a través de la volatilidad relativa. La concentración molar líquida puede ser medida indirectamente por sensores de temperatura, su magnitud depende de la relación temperatura-composición establecida por las propiedades termodinámicas de la mezcla.

### 2.3. MODELO MATEMÁTICO DEL CASO DE ESTUDIO

El objeto de estudio abordado para el diseño del sistema de detección y diagnóstico de fallos en sensores es una columna de destilación binaria de 9 platos, su representación a través del modelo matemático deducido a partir del balance global de materia y componente establecido en la ecuación (1) considerando que:  $x(t) \in U \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estado que representa la concentración molar líquida del etanol, con 2 flujos molares de entrada  $u(t) = [L \ V]^T$ , 2 variables exógenas consideradas como perturbaciones de entrada  $w(t) = [F \ z_f]^T$  y 2 salidas  $h(x(t)) = [x_2 \ x_9]^T$  correspondientes a la concentración molar líquida del alcohol en la mezcla binaria en los platos 2 y 9 respectivamente puede ser descrita por el sistema no lineal de la ecuación (3) como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^2 g_i(x(t)) u_i(t) + \sum_{j=1}^2 d_j(x(t)) w_j(t) \\ y(t) &= h(x(t)) = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_9 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

y de forma explícita como:

$$\begin{aligned} g_1(x(t)) &= \begin{bmatrix} 0 \\ (x_1 - x_2) \\ \vdots \\ (x_{i-1} - x_i) \\ \vdots \\ (x_{f-1} - x_f) \\ \vdots \\ (x_{i-1} - x_i) \\ \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) \end{bmatrix}, g_2(x(t)) = \begin{bmatrix} (y_2 - x_1) \\ (y_3 - y_2) \\ \vdots \\ (y_{i+1} - y_i) \\ \vdots \\ (y_{f+1} - y_f) \\ \vdots \\ (y_{i+1} - y_i) \\ \vdots \\ (y_n - y_{n-1}) \end{bmatrix}, d_1(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -x_f \\ (x_f - x_{f+1}) \\ \vdots \\ (x_{i-1} - x_i) \\ \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) \end{bmatrix}, d_2(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \\ u(t) &= \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L / M_n \\ V / M_n \end{bmatrix}, w(t) = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F / M_n \\ F z_f / M_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

estableciéndose la ecuación (5) como:

$$y_n = \frac{\alpha_i x_i}{1 + (\alpha_i - 1) x_i} \quad (5)$$

La manera en que se ha deducido la ecuación (4) a partir de la ecuación (1) es a través de la agrupación de las variables:  $x_i$  en  $g_1(x(t))$  y  $d_1(x(t))$ ,  $y_i$  en  $g_2(x(t))$ ,  $M_n$ ,  $L$  y  $V$  en  $u(t)$  y  $M_n$ ,  $F$  y  $z_f$  en  $w(t)$  siendo que de la cantidad de platos del sistema es la extensión del modelo matemático.

### Obtención del modelo matemático lineal del caso de estudio

Cuando el sistema definido por la ecuación (3) alcanza el estado estable con ciertos valores de  $u(t)$ ,  $w(t)$  y  $x_i(t)$  se establece un punto de referencia o punto de operación.

Para obtener la respuesta dinámica lineal del sistema alrededor de un punto de operación a partir del modelo matemático no lineal se usa el método de linealización por expansión en series de Taylor (método Jacobiano), en dicho espacio de estados son utilizados los valores del estado estable estableciéndose por las variables:  $u_{ss}$ ,  $w_{ss}$  y  $x_{ss}$ . De esta manera la representación lineal del sistema mostrada por la ecuación (6) es:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (6)$$

en donde  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estado con  $n$  igual al número de platos del sistema,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  es el vector de entrada,  $w(t) \in \mathbb{R}^d$  es el vector de entradas exógenas y  $y(t) \in \mathbb{R}^p$  el vector de salida que en este caso es la concentración molar líquida del alcohol en los platos 2 y 9 ( $x_2$  y  $x_9$ ). Las matrices de la columna cuyas dimensiones son:  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$  y  $E \in \mathbb{R}^{n \times d}$  fueron obtenidas por el método Jacobiano utilizando una formulación detallada en el material suplementario, los valores numéricos de las matrices mencionadas anteriormente son:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{V}{M_i} & \frac{V}{M_i} K_{i+1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{L}{M_i} & -\frac{L}{M_i} - \left(\frac{V}{M_i}\right) K_i & \left(\frac{V}{M_i}\right) K_{i+1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{L}{M_f} - \left(\frac{V}{M_f}\right) K_f - \frac{F}{M_f} & \left(\frac{V}{M_f}\right) K_{f+1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{L+F+VK_9-V}{M_9} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{(x_{i-1} - x_i)}{M_i} & \frac{(y_{i+1} - y_i)}{M_i} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(x_{i-1} - x_{n-1})}{M_{n-1}} & \frac{(y_i - y_{n-1})}{M_{n-1}} \\ \frac{(x_{n-1} - x_9)}{M_9} & \frac{x_9 - y_n}{M_9} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(z_f - x_f)}{M_f} & \frac{F}{M_f} \\ \frac{(x_f - x_i)}{M_i} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(x_{n-1} - x_9)}{M_9} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

y recordando que  $y_i = \alpha_i x_i / I + (\alpha_i - 1)x_i$  se obtiene la ecuación (8) con:

$$K_i = \frac{\alpha_i}{[1 + (\alpha_i - 1)x_i]^2} \quad (8)$$

### 3. DIAGNÓSTICO DE FALLOS BASADO EN OBSERVADORES DE ESTADO

El sistema de diagnóstico a diseñarse debe detectar, localizar y diagnosticar fallos en sensores de temperatura usados como medidores de concentración molar líquida del alcohol, para realizar dichas tareas es necesario utilizar un diseño de diagnóstico de fallos basado en un esquema por banco de observadores.

#### 3.1. ESQUEMA DE OBSERVADOR DEDICADO PARA DIAGNÓSTICO DE FALLOS

En esencia un observador en un algoritmo que estima las variables de estado a partir de las mediciones de entrada y salida incluyendo en su diseño el modelo matemático del sistema, además un observador reduce asintóticamente a cero la diferencia entre el valor de la salida experimental y la salida estimada, esto se logra a través de un término de corrección llamado ganancia del observador ( $H$ ) que hace converger las variables estimadas hacia las señales experimentales. Una forma de seleccionar la ganancia del observador es por colocación de polos [15].

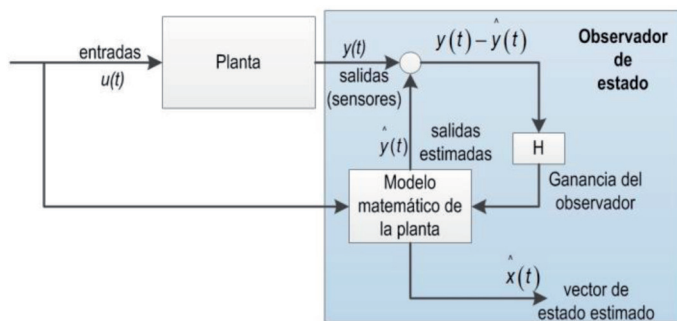


Fig. 2: Representación por bloques de un observador

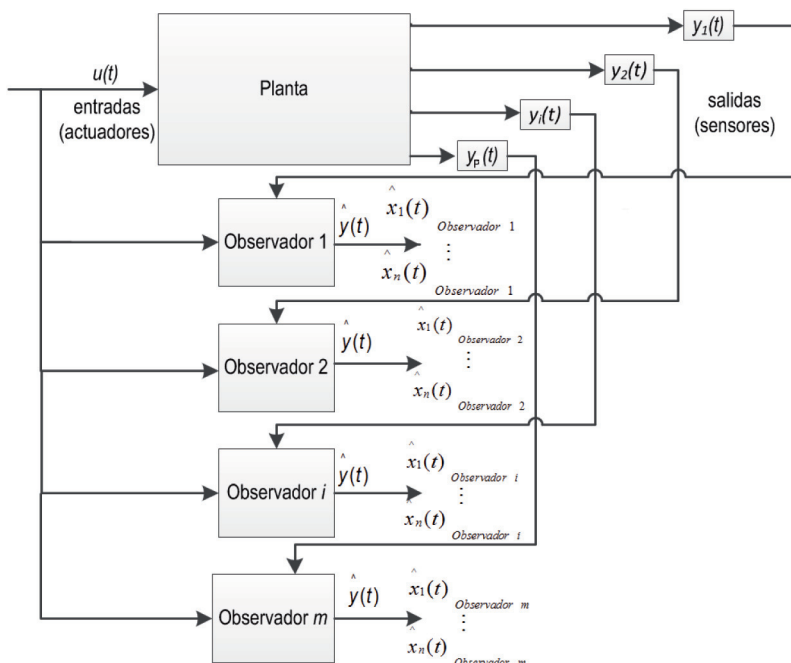


Fig. 3: Esquema DOS

Cuando el observador estima todas las variables de estado se conoce como observador de orden completo, contrariamente si estima solo algunas variables se le denomina de orden reducido [16]. La representación por bloques de un observador se presenta a continuación en la Figura (2).

La Figura (2) muestra que el observador requiere que la salida del sistema medida por los sensores esté libre de fallos para estimar las variables de estado, esto es una limitación del uso de un solo observador. Una alternativa que resuelve dicha limitación, y que además se puede utilizar para detectar, localizar y diagnosticar fallos, es un esquema por banco de observadores conocido como: esquema de observador dedicado o DOS (*Dedicated Observer Scheme*, por sus siglas en inglés) [17].

El esquema DOS utiliza todas las entradas y salidas del sistema, sin embargo se diseña un observador para cada salida y se estima todo el vector de salida, entonces hay  $m$  observadores asociados al número  $p$  de sensores. Cabe destacar que cualquier observador del banco puede ser usado como sensor virtual siempre y cuando la señal de salida de la que dependa esté libre de fallos. A continuación en la Figura (3) se muestra gráficamente el esquema DOS.

Para que el sistema detecte y diagnostique fallos es necesario realizar algunas comparaciones para identificar diferencias entre el valor de las variables estimadas de cada observador con algún otro elemento de referencia. El elemento de referencia puede ser un observador del esquema o un sensor libre de fallos.

Cuando ocurre una inadecuada medición de la salida por fallo en un sensor el observador relacionado a esa salida no puede realizar la estimación correctamente. Una ventaja del esquema DOS es que relaciona un fallo a un conjunto de discrepancias generadas en forma de señales utilizándolas como indicadores de fallo; de la cantidad, combinación o propiedades de dichas señales se pueden atribuir fallos específicos en los sensores. Las señales de discrepancia se denominan "residuos" definiéndolos por la ecuación (9) como:

$$r_{ij}(t) = x_i - \hat{x}_{ij} \quad (9)$$

en donde  $i$  y  $j$  indican el número de la variable y el número del observador del esquema DOS del que proviene la señal estimada respectivamente, además cuando no hay fallo el valor del residuo es aproximadamente 0. En este trabajo el cálculo de los residuos se realiza de manera puntual.

Las etapas posteriores a la detección son la localización y el diagnóstico, para ejecutarlas es necesario evaluar los residuos para determinar si dar o no aviso al operador de la presencia de fallos.

Para evaluar los residuos se utilizan umbrales para generar firmas de fallos (síntomas) que dependiendo de su valor y combinación se pueden localizar, diferenciar y descartar fallos. Los síntomas son señales que toman valores binarios dependiendo si el valor del residuo relacionado a él se encuentra o no dentro del valor del umbral. Los valores de los umbrales se establecen para descartar eventos que no sean fallos como malas calibraciones o ruidos de medición.

Los síntomas son evaluados por la relación:

$$s_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & |r_{ij}| > \lambda, \forall t \geq 0 \\ 0, & \text{en otro caso} \quad -\forall t \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

en donde  $S_{ij}(t)$  es el síntoma relacionado al residuo  $r_{ij}$  y  $\lambda$  es el valor del umbral. Una vez obtenidas las fir-



mas de fallos se establece la matriz de fallos, a través de ella se determina la capacidad de detección, localización y diagnóstico de fallos del sistema.

### Esquema DOS de la columna de destilación para diagnóstico de fallos

La columna bajo estudio tiene 6 sensores de temperatura localizados en los platos 1, 2, 3, 5, 8 y 9 etiquetados del 1 al 6 respectivamente. Los sensores son RTD's (*Resistance Temperature Detector*, por sus siglas en inglés) de platino "Pt-100" de sensibilidad  $+0.4\Omega/^{\circ}K$  a  $100\Omega$  y una precisión clase A:  $\pm 273^{\circ}K / 0.06\Omega$ . Puesto que el plato  $f$  se localiza en medio de la columna causando que el número de platos sea igual en ambas secciones; ante ello y bajo la teoría de diseño de columnas se considera entonces la buena sensibilidad de los RTD's siendo de poca repercusión la localización de los mismos [18].

De los 6 sensores el número 2 se encuentra libre de fallos al tener redundancia material, esto se logra usando sensores repetidos para medir  $x_2$  por lo que entonces es tomado como un sensor de referencia. En la Figura siguiente (4) se muestra la redundancia material del sensor 2.

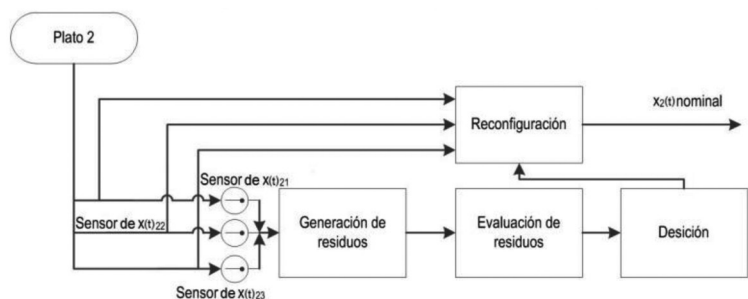


Fig. 4: Redundancia material del sensor 2

Los subíndices  $i$  y  $k$  de las variables  $x(t)_{ik}$  de la Figura (4) indican el número de la variable de estado medida y el número del sensor redundante etiquetado respectivamente.

En la investigación se diseñan 5 observadores para formar el banco de observadores del esquema DOS, éstos estiman la concentración molar del alcohol a través de las entradas del sistema y de la medición de temperatura en los platos del sistema.

Se propone que los observadores sean de orden reducido al descartar la estimación de las variables de salida de las que dependen puesto que los sensores pueden presentar fallo, con ello se evita realizar cálculos innecesarios de estimación. Así mismo el sensor 2 tampoco requiere de observador porque se encuentra libre de fallos al contar con redundancia material, ver Figura (4), esto reduce aún más el número de residuos y síntomas a evaluar

| Observador   | Entradas usadas   | Salidas utilizadas | Variables estimadas                                                                                   |
|--------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Observador 1 | $L, V, F$ y $z_F$ | $x_1$ y $x_2$      | $\hat{x}_{31}, \hat{x}_{41}, \hat{x}_{51}, \hat{x}_{61}, \hat{x}_{71}, \hat{x}_{81}$ y $\hat{x}_{91}$ |
| Observador 2 | $L, V, F$ y $z_F$ | $x_3$ y $x_2$      | $\hat{x}_{12}, \hat{x}_{42}, \hat{x}_{52}, \hat{x}_{62}, \hat{x}_{72}, \hat{x}_{82}$ y $\hat{x}_{92}$ |
| Observador 3 | $L, V, F$ y $z_F$ | $x_5$ y $x_2$      | $\hat{x}_{13}, \hat{x}_{33}, \hat{x}_{43}, \hat{x}_{63}, \hat{x}_{73}, \hat{x}_{83}$ y $\hat{x}_{93}$ |
| Observador 4 | $L, V, F$ y $z_F$ | $x_8$ y $x_2$      | $\hat{x}_{14}, \hat{x}_{34}, \hat{x}_{44}, \hat{x}_{54}, \hat{x}_{64}, \hat{x}_{74}$ y $\hat{x}_{94}$ |
| Observador 5 | $L, V, F$ y $z_F$ | $x_9$ y $x_2$      | $\hat{x}_{15}, \hat{x}_{35}, \hat{x}_{45}, \hat{x}_{55}, \hat{x}_{65}, \hat{x}_{75}$ y $\hat{x}_{85}$ |

Tabla II: Variables de los observadores de orden reducido

que consecuentemente la evaluación y decisión del sistema requieren de menor tiempo para ejecutarse.

En la Tabla II se presentan las propiedades de los observadores relacionados a los RTD's que pueden presentar fallos (1, 3, 5, 8 y 9).

Los subíndices  $i$  y  $j$  de las variables estimadas  $\hat{x}_{ij}$  de la Tabla anterior indican el número de la variable y el número del observador del que proviene la estimación respectivamente, por ejemplo la variable  $\hat{x}_{31}$  es la estimación de la concentración molar líquida del plato 3 proveniente del Observador 1.

### 3.2. DISEÑO DE LOS OBSERVADORES DE ORDEN REDUCIDO

A continuación se presenta el diseño resumido de los observadores de estado pertenecientes al esquema DOS los cuales estiman la concentración molar del componente más volátil de la mezcla, para mayor detalle del procedimiento de diseño y obtención de los mismos puede ser consultado el material suplementario.

Considere que el sistema lineal de la ecuación (6) representa la columna bajo estudio alrededor de un punto de operación. Si el sistema tiene  $p$  salidas medibles, entonces los  $m$  observadores de orden reducido requieren estimar únicamente las  $n - p$  salidas considerándose no necesario estimar las salidas de las cuales dependen, ni tampoco aquellas salidas en donde el sensor tenga redundancia material. Consecuentemente el sistema puede ser dividido a través del vector de estado  $x(t)$  en  $x_a(t) \in \mathbb{R}^p$  y  $x_b(t) \in \mathbb{R}^{(n-p)}$  representando a las variables que no se necesitan estimar y aquellas que el observador requiere estimar respectivamente, quedando según las Ecuaciones (11) y (12) como:

$$\dot{x}_a(t) = A_{aa}x_a(t) + A_{ab}x_b(t) + B_a u(t) + E_a w(t) \quad (11)$$

$$\dot{x}_b(t) = A_{ba}x_a(t) + A_{bb}x_b(t) + B_b u(t) + E_b w(t) \quad (12)$$

con:  $A_{aa} \in \mathbb{R}^{p \times p}$ ,  $A_{ab} \in \mathbb{R}^{p \times (n-p)}$ ,  $A_{ba} \in \mathbb{R}^{(n-p) \times p}$ ,  $A_{bb} \in \mathbb{R}^{(n-p) \times (n-p)}$ ,  $B_a \in \mathbb{R}^{p \times p}$ ,  $B_b \in \mathbb{R}^{(n-p) \times p}$ ,  $E_a \in \mathbb{R}^{p \times p}$ , y  $E_b \in \mathbb{R}^{(n-p) \times p}$ , de tal manera que el observador debe ser de orden  $o = n - p$ .

Ahora bien, la Ecuación (12) representa la dinámica de la parte no medible, por lo tanto se obtiene un sistema dinámico no medible con su salida formado por las Ecuaciones (11) y (12) quedando según la Ecuación (13) como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_b(t) &= A_{ba}x_a(t) + A_{bb}x_b(t) + B_b u(t) + E_b w(t) \\ y(t) &= A_{ab}x_b(t) \end{aligned} \quad (13)$$

Siendo así, un observador para el sistema de la ecuación (13) queda definido por la ecuación (14) como:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_b(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + Ew(t) + H(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

en donde reemplazando los términos de la Ecuación (13) en la Ecuación (14) se establece el observador propuesto en la presente investigación por la Ecuación (15) la cual lo define como:

$$\dot{\tilde{x}}_b(t) = (A_{bb} - HA_{bb})\tilde{x}_b(t) + [(A_{ba} - HA_{ba})H + (A_{ba} - HA_{ba})]y(t) + (B_b - HB_b)u(t) + (E_b - HE_b)w(t) \quad (15)$$

en donde definiendo el error de observación por la Ecuación (16) estableciéndose como:

$$e(t) = x_b(t) - (\tilde{x}_b(t) + Hy(t)) \quad (16)$$

y que por desarrollo algebraico queda definido por la Ecuación (17) como:

e˙(t)=(A<sub>bb</sub>−HA<sub>ab</sub>)e(t) (17)

con la posibilidad de seleccionar los autovalores del término (A<sub>bb</sub>−HA<sub>ab</sub>) e (t)de la ecuación (17) para que el error converja a cero asintóticamente [19].

4. RESULTADOS

El presente trabajo aborda la destilación de la mezcla binaria etanol-agua a través de una columna de 9 platos para realizar el diagnóstico de fallos en sensores de temperatura, los RTD's se utilizan para medir la concentración molar del alcohol.

El comportamiento dinámico del sistema se obtiene a partir del modelo matemático de la ecuación (3). En la Tabla (III) se muestran los parámetros del sistema.

Para verificar el comportamiento dinámico del sistema se asignan los valores de entrada: u=[0.4602 1.3259]<sup>T</sup> y w=[1.4815 0.5]<sup>T</sup>; las condiciones iniciales de los estados son: x<sub>i</sub>(0)=0 con {i=1, 2,...,9}. A continuación en la Figura (5) se presenta la respuesta dinámica de la concentración molar líquida del alcohol.

La Figura 5 presenta la dinámica de la concentración molar de etanol cuyo valor es mayor en los platos superiores puesto que el

flujo de vapor se enriquece progresivamente. El tiempo requerido del sistema para evaporar parcialmente la mezcla para alcanzar el estado estable está determinado por la masa molar del hervidor que en este caso es:

M<sub>B</sub> = 20x10<sup>3</sup> mol.

Además se aprecia en la Figura (5) que en t=1.5x10<sup>5</sup>s se alcanza el estado estable cuyos valores son: u<sub>ss</sub>=[0.4602 1.3259]<sup>T</sup>, w<sub>ss</sub>=[1.815 10.5]<sup>T</sup>, y x<sub>ss</sub>=[0.908 0.768 0.672 0.578 0.514 0.5 0.458 0.331 0.127]<sup>T</sup>. Los valores de u<sub>ss</sub>, w<sub>ss</sub> y x<sub>ss</sub> descritos se utilizan como el punto de operación del sistema para obtener su respuesta lineal.

Por la relación composición-temperatura de la mezcla las temperaturas correspondientes a la composición de los platos 1 al 9 (x<sub>s</sub>) son: 346.24° K, 347.08° K, 347.63° K, 348.26° K, 348.75° K, 348.85° K, 349.19° K, 350.26° K, y 354.12° K. Las temperaturas son obtenidas del diagrama Temperatura/Composición el cual determina que el punto azeotrópico es: x=y=0.911 a 347.19° K. El diagrama se puede consultar en el material suplementario.

Igualmente, en la misma Figura (5) se presenta la respuesta dinámica lineal del sistema establecida por las matrices de la Ecuación (7) utilizando el punto de operación obtenido, se aprecia que la representación lineal es capaz de representar al sistema no lineal alrededor del punto de operación y es utilizable para diseñar los observadores establecidos por la Ecuación (15).

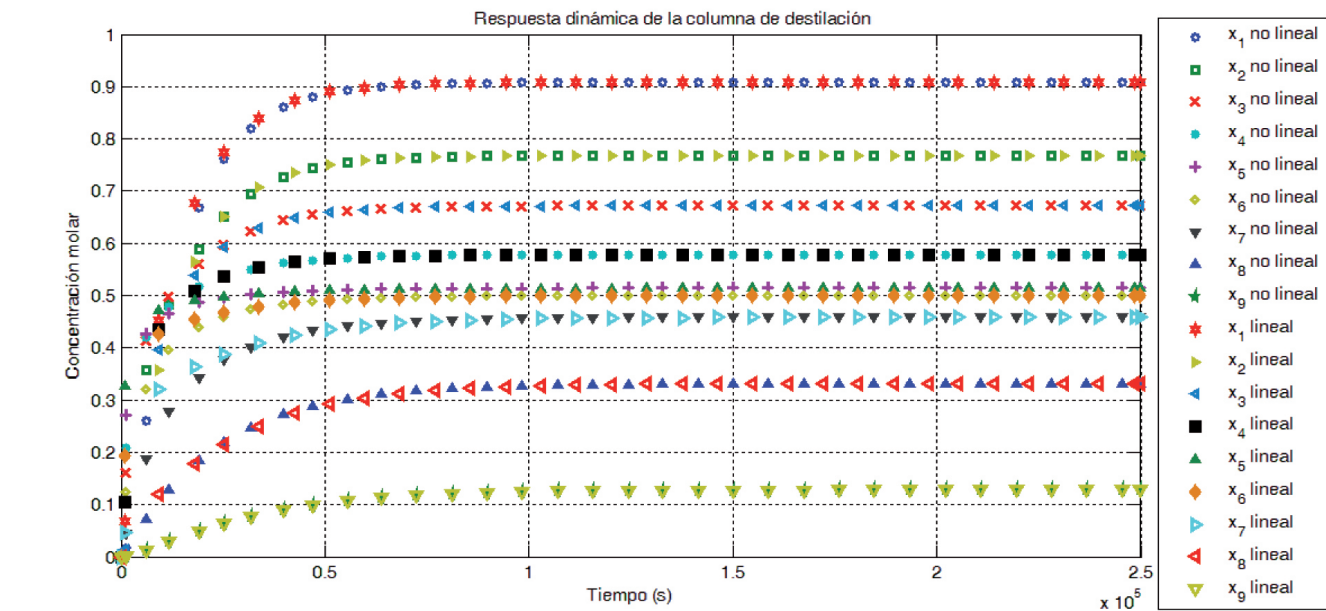


Fig. 5: Comportamiento dinámico de la concentración molar líquida del etanol

| Variable                                  | Descripción                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| n=9                                       | Número de platos                                   |
| f=5                                       | Número del plato de alimentación molar líquida     |
| M <sub>D</sub> =10x10 <sup>3</sup> mol    | Masa molar retenida del condensador (n=1)          |
| M <sub>I</sub> =1x10 <sup>3</sup> mol     | Masa retenida en platos genéricos                  |
| M <sub>B</sub> =20x10 <sup>3</sup> mol    | Masa molar retenida del hervidor (n=9)             |
| α <sub>2</sub> =2.98 α <sub>3</sub> =2.98 | Volatilidad relativa del plato i (α <sub>i</sub> ) |
| α <sub>4</sub> =3.47 α <sub>5</sub> =3.63 |                                                    |
| α <sub>6</sub> =3.77 α <sub>7</sub> =3.91 |                                                    |
| α <sub>8</sub> =4.59 α <sub>9</sub> =6.26 |                                                    |

Tabla III: Parámetros de la columna de destilación

Finalmente, el error relativo máximo entre ambas representaciones dinámicas en todos los platos a partir de t=1.5x10<sup>5</sup>s es: er(con i=1,2...9)=[0.09% 0.22% 0.75% 0.25% 2% 3.6% 7.7% 10.6% 2.6%]x10<sup>-2</sup>.

Los siguientes resultados corresponden a los observadores los cuales se muestran a través del Observador 1, se presenta la estimación de x<sub>3</sub> y x<sub>8</sub> correspondientes a las concentraciones molares en los platos 3 y 8 en los cuales hay RTD's.

Para demostrar la convergencia del Observador 1 se establecen las condiciones iniciales: x̂<sub>x1i</sub>(0)=0.1 con i=1, 2...9. La ganancia del Observador 1 se obtiene por colocación de polos, por lo tanto los valores propuestos de los polos son: P<sub>i</sub>[-0.026 -0.0035 -0.0063i -0.0035+0.0063i -0.0008 -0.0044 -0.011-0.0011i -0.011+0.0011i]. Los polos de los observadores restantes pueden

ser consultados en el material suplementario del presente trabajo.

En las siguientes Figuras ((6) y (7)) se presentan los resultados del Observador 1.

Las Figuras anteriores presentan la estimación de  $x_3$  y  $x_8$  así como sus errores de observación ( $x_i - \hat{x}_{i1}$ ), además se demuestra la convergencia del observador con respecto al modelo no lineal apreciándose que en  $t=0.2 \times 10^5$  s el error tiene un valor cercano a cero. A pesar de que en  $t=1 \times 10^5$  s ocurren cambios en los valores de las variables medidas el observador mantiene la convergencia sin alterar el error de observación.

Los valores máximos absolutos de error de observación del Observador 1 obtenidos son:  $x_3 - \hat{x}_{31} = 7.92 \times 10^{-6}$ ,  $x_5 - \hat{x}_{51} = 5.24 \times 10^{-6}$ ,  $x_8 - \hat{x}_{81} = 6.44 \times 10^{-5}$  y  $x_9 - \hat{x}_{91} = 4.8 \times 10^{-5}$ . Los valores máximos absolutos de error de observación de los observadores restantes se presentan en el material suplementario del presente trabajo.

Cabe destacar que el Observador 1 estima las variables  $x_{41}$ ,  $x_{61}$ , y  $x_{71}$  en donde no hay sensor puesto que el sistema es operado en un régimen alrededor del punto de referencia, en caso de operar fuera del punto de operación el sistema solo tiene la capacidad de diagnosticar fallos debido a que dicho régimen es utilizado por

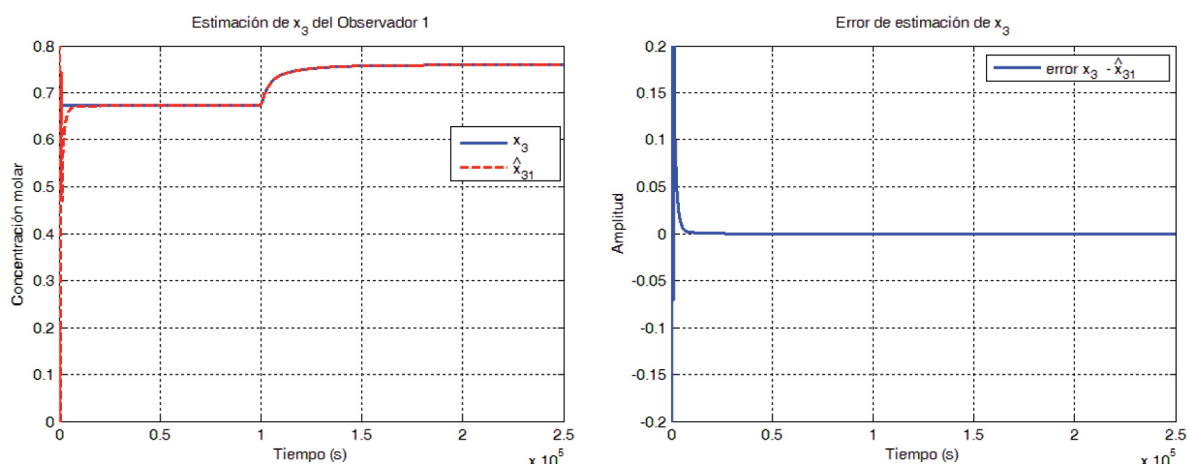


Fig. 6: Estimación y error de observación de  $x_3$

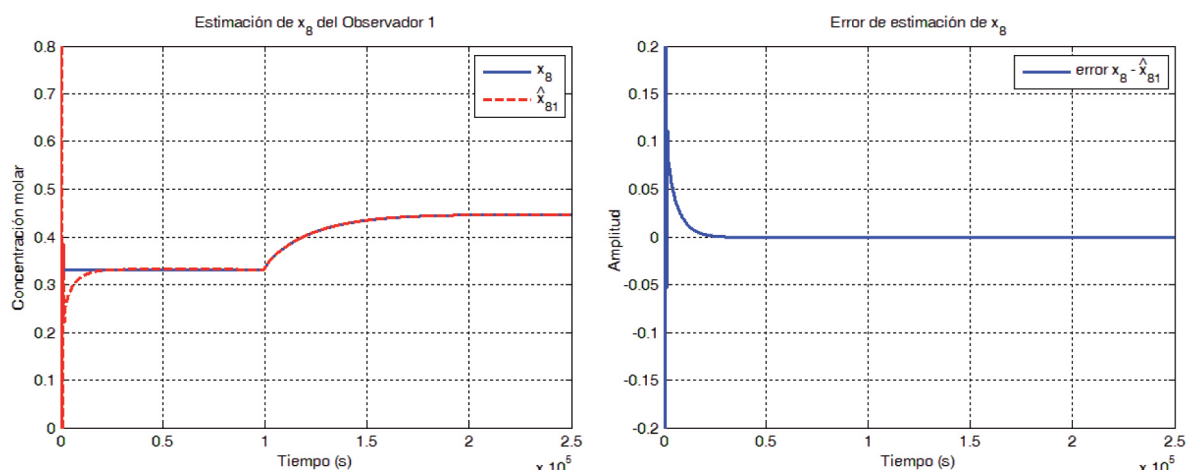


Fig. 7: Estimación y error de observación de  $x_8$

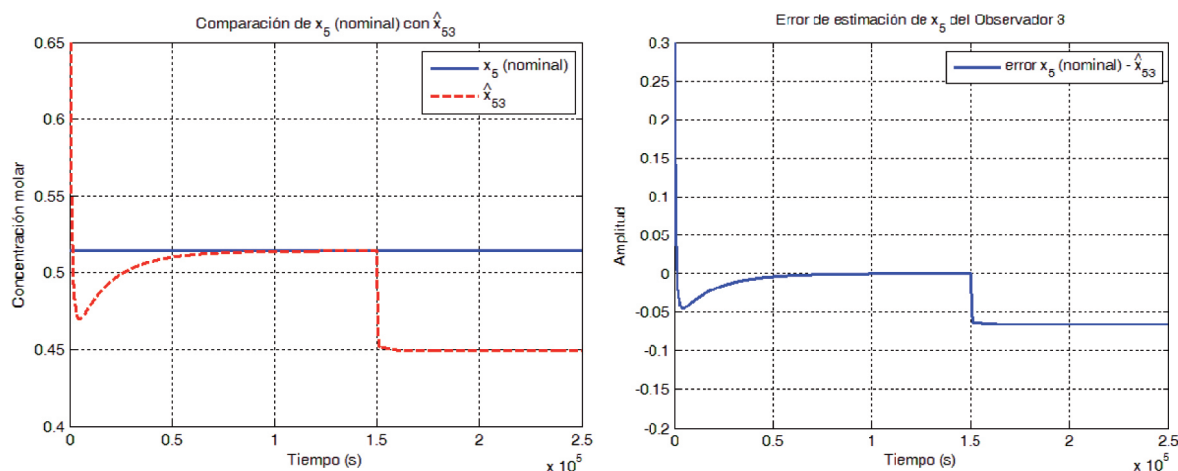


Fig. 8: Estimación y error de observación de  $x_5$  del Observador 3 con fallo en el sensor 4

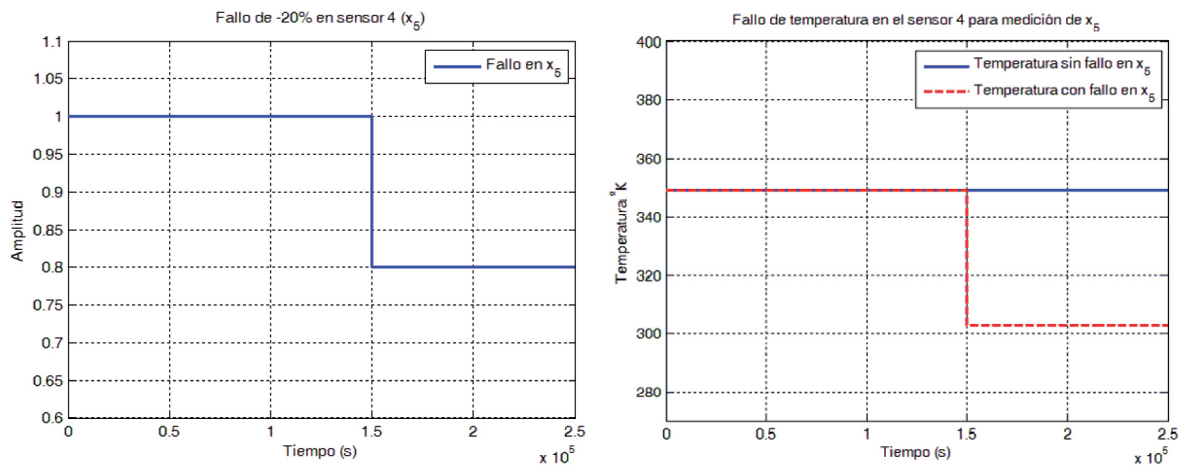


Fig. 9: Fallo del sensor 4

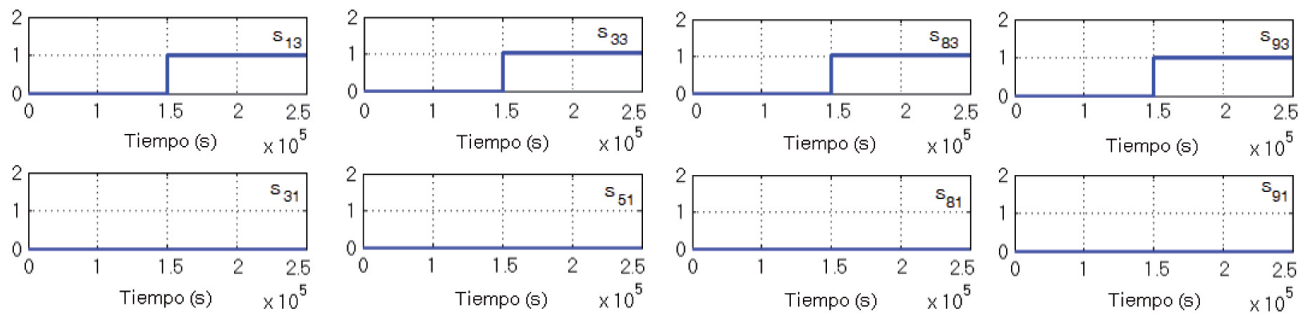


Fig. 10: Síntomas relacionados al Observador 3 (fila superior) y al Observador 1 (fila inferior)

los observadores; esto puede ser solucionado con observadores no lineales en donde aun operando fuera del punto de operación funcionan también como sensores virtuales (estimadores de estado), no obstante para el caso particular abordado la columna siempre se opera alrededor de un solo punto de operación cuya validación se ha mostrado previamente.

A continuación, los siguientes resultados corresponden al sistema de detección y diagnóstico de fallos en caso de la aparición de fallos en los sensores de temperatura.

Las Figuras (8), (9) y (10) muestran un caso particular de fallo que permite comprobar la respuesta del sistema de detección y diagnóstico de fallos. Para ello, aparece un fallo aditivo en el sensor 4 encargado de medir la concentración molar líquida del alcohol en el plato 5 ( $x_5$ ) relacionado al Observador 3 (ver Tabla (II)) en el instante  $t=1.5 \times 10^5$ s. El sensor presenta una degradación del -20% ( $x_{5(\text{medida por el sensor 4})} \times 0.8$ ) durante la medición obteniéndose:

La Figura (8) muestra que ante la aparición del fallo el Observador 3 ya no es capaz de estimar correctamente  $x_5$  (ni las demás variables de estado) debido a que depende de la medición nominal de la misma, esto causa que los síntomas relacionados al

Observador 3 mostrados en la Figura (10) indiquen anomalía en  $t=1.5 \times 10^5$ s, sin embargo los síntomas relacionados al Observador 1 no presentan cambio alguno, con ello se interpreta que el Observador 1 estima las variables correctamente aún en presencia del fallo.

Las matrices de residuos y de fallos del sistema se presentan a continuación en las Tablas (IV) y (V) respectivamente.

Las Tabla IV muestra que ante el fallo en  $x_5$  los residuos del Observador 3 ( $r_{13}$ ,  $r_{33}$ ,  $r_{83}$  y  $r_{93}$ ) salen del valor del umbral establecido ( $\pm 5\%$  de los valores de error de observación), consecuentemente los síntomas relacionados al Observador 3 y que involucran

| Sensores     | $X_1$                          | $X_3$                          | $X_5$                          | $X_8$                          | $X_9$                         |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Observador 1 | $\approx 0$                    | $r_{31} = 7.92 \times 10^{-6}$ | $r_{51} = 5.24 \times 10^{-6}$ | $r_{81} = 6.44 \times 10^{-5}$ | $r_{91} = 4.8 \times 10^{-5}$ |
| Observador 2 | $r_{12} = 5.63 \times 10^{-6}$ | $\approx 0$                    | $r_{52} = 5.24 \times 10^{-6}$ | $r_{82} = 6.44 \times 10^{-5}$ | $r_{92} = 4.8 \times 10^{-5}$ |
| Observador 3 | $r_{13} = -0.1924$             | $r_{33} = -0.0594$             | $\approx 0$                    | $r_{83} = 0.2649$              | $r_{93} = 0.1223$             |
| Observador 4 | $r_{14} = 5.63 \times 10^{-6}$ | $r_{34} = 7.92 \times 10^{-6}$ | $r_{54} = 5.24 \times 10^{-6}$ | $\approx 0$                    | $r_{94} = 4.8 \times 10^{-5}$ |
| Observador 5 | $r_{15} = 5.63 \times 10^{-6}$ | $r_{35} = 7.92 \times 10^{-6}$ | $r_{55} = 5.24 \times 10^{-6}$ | $r_{85} = 6.44 \times 10^{-5}$ | $\approx 0$                   |

Tabla IV: Matriz de residuos

| Sensores     | $X_1$ | $X_3$ | $X_5$ | $X_8$ | $X_9$ |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Observador 1 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Observador 2 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Observador 3 | 1     | 1     | 0     | 1     | 1     |
| Observador 4 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| Observador 5 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |

Tabla V: Matriz de fallos

al sensor 4 forman una fila de unos en la Tabla V, de esta manera es interpretado que cuando hay una fila de unos se sabe que existe un fallo y cual sensor está averiado dependiendo en donde se encuentre la fila de unos.

Los resultados obtenidos establecen que el sistema de detección y diagnóstico de fallos puede manejar hasta 4 fallos simultánea-



mente, esto es porque el fallo de un sensor en particular afecta únicamente a los síntomas del observador del banco el cual haya sido diseñado para depender de una determinada salida, esto se puede verificar por la diferencia en la comparación del valor de la estimación del observador y el sensor libre de fallos ( $x_2$ ). Cabe destacar que los fallos pueden ser identificados por el sistema instantes después que el error de observación de los observadores alcancen sus respectivos valores.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se mostraron los resultados del diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallos basado en modelo utilizando un esquema de observador DOS, éste se aplica en los sensores de temperatura utilizándolos como medidores de concentración molar en una columna binaria de destilación fraccionada de 9 platos. El modelo matemático lineal del sistema alrededor del punto de operación demuestra ser una aproximación válida del comportamiento no lineal del sistema al obtenerse un error máximo relativo del  $10.6 \times 10^{-20}\%$ . El uso de la representación lineal para el diseño de los observadores del esquema DOS ha mostrado ser una estimación realista obteniéndose un error de observación menor a  $8.25 \times 10^{-5}$ .

La matriz de fallos del sistema de detección y diagnóstico de fallos diseñado cuya dimensión reducida es de  $5 \times 5$  muestra que es posible detectar, localizar y diagnosticar fallos hasta en 4 sensores. Por otra parte, se ha asegurado la operación segura y estable del sistema aún con la aparición de fallos en los sensores de temperatura evitando poner en riesgo al operador, al sistema o al medio ambiente. Finalmente, cabe destacar que los resultados pueden ser aplicables en otras plantas de destilación una vez ajustando los parámetros expuestos por el presente trabajo. Como trabajo futuro se propone que el sistema sea utilizado para el diseño de un sistema de control tolerante a fallos en los sensores de la columna de destilación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. "Investigation Report: Refinery Explosion and Fire". Texas (United States). 2005. p 341
- [2] French Ministry for sustainable development – DGPR/SRT/BARPI. "Sensor malfunction". France. 2013. p 6
- [3] French Ministry for sustainable development – DGPR/SRT/BARPI – Chemical Industry Union. "Explosion of a formulation reactor at a chemical plant". 2012. p 6
- [4] Minh LQ, Long NVD, Duong PLT, et al. "Design of an extractive distillation column for the environmentally benign separation of zirconium and hafnium tetrachloride for nuclear power reactor applications". *Energies*. September 2015. Vol. 8-9. p.10354–10369. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en80910354>
- [5] Rani A, Singh V, Gupta JRP. "Development of soft sensor for neural network based control of distillation column". *ISA Transactions*. May 2013. Vol. 52-3. p.438–449. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2012.12.009>
- [6] Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. 1st edition. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 475p. ISBN: 978-3-540-30368-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-30368-8>
- [7] Zhang Y, Jiang J. "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems". *Annual Reviews in Control*. December 2008. Vol. 32-2. p.229–252. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.03.008>
- [8] Subramanian S, Ghouse F, Natarajan P. "Fault diagnosis of batch reactor using machine learning". *Modelling and Simulation in Engineering*. 2014. 14p. DOI:10.1155/2014/426402
- [9] Rehman A, Qayyum A, Taskeen M, et al. "Design of robust fault detection scheme for penicillin fermentation process". In: 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 2015, Paris (France) 2–4 September. 2015. Vol. 48-21. p.589–594. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.590>

- [10] López F, Ponsart J, Theilliol D, et al. "Robust  $H_2/H_\infty$  fault detection observer design for descriptor-LPV systems with unmeasurable gain scheduling functions". *International Journal of Control*. June 2015. Vol 88-11. p 2380–2391. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207179.2015.1044261>
- [11] Rodríguez J, Adam M, Cervantes I, et al. "Design of a fault tolerant passive control system in sensors for a fuel cell modeling by piecewise linear model". *DYNA*. March 2016. Vol 91-2. p 223–232. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7647>
- [12] Ortiz G, Escobar R, Adam M, et al. "Control tolerante a fallas activo en sensores y actuadores: Aplicación a una columna de destilación". *RIAI*. Enero 2016. Vol 13-1. p 67–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.05.006>
- [13] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, et al. "A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods". *Computers & Chemical Engineering*. March 2003. Vol. 27-3. p.293–311. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00160-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00160-6)
- [14] Cingara A, Jovanovic M. "Analytical first-order dynamic model of binary distillation column". *Chemical Engineering Science*. 1990. Vol. 45-12. p.3585–3592. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(90\)87161-K](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(90)87161-K)
- [15] Broulès H, Marinescu B. *Linear time-varying systems. Algebraic-analytic approach*. 1st edition. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 603p. ISBN: 978-3-642-19726-0. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-19727-7>
- [16] Radisavljevic V. "Linear observers design and implementation". In: *American Society of Engineering Education (ASEE Zone 1), Bridgeport Connecticut (United States) 3–5 April*. IEEE. 2014. p.1–6. ISBN: 978-1-4799-5232-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ASEEZone1.2014.6820636>
- [17] Isermann R. "Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications". *Annual Reviews in Control*. 2005. Vol. 29-1. p.71–85. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.12.002>
- [18] Urrea R, Castellanos E, Alvarez J, et al. "Distillate cascade composition using a two-temperature measurement secondary component". *I&EC Research*. August 2006. Vol 45-20. p 6828–6841. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie060421a>
- [19] Ogata K. *Modern control engineering*. 3th edition. USA: Prentice-Hall, 1997. 603p. ISBN: 0-13-227307-1

## AGRADECIMIENTOS

Los autores del artículo agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al Tecnológico Nacional de México (TECNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) con la cual hizo posible realizar la investigación.

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

[http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/\\_adic/7990-1.pdf](http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7990-1.pdf)

