



**DIAGNÓSTICO DE FALLAS MÚLTIPLES EN LOS SENSORES DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR EMPLEANDO OBSERVADORES POR MODOS DESLIZANTES BASADO EN EL ALGORITMO SUPER-TWISTING**

**MULTIPLE-SENSOR FAULT DIAGNOSIS IN A HEAT EXCHANGER USING SLIDING-MODE OBSERVERS BASED ON SUPER-TWISTING ALGORITHM**

J. García-Morales<sup>2</sup>, M. Adam-Medina<sup>1\*</sup>, R.F. Escobar<sup>1</sup>, C.M. Astorga-Zaragoza<sup>1</sup>, C.D. García-Beltrán<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>2</sup>Posgrado en Ingeniería Electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, México.

Recibido 29 de enero de 2014; Aceptado 30 de mayo de 2015

**Resumen**

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de diagnóstico de fallas basado en modelo para un intercambiador de calor de doble tubo. El sistema de diagnóstico permite estimar y aislar las fallas en uno de los sensores de temperatura de entrada y en dos de salida del intercambiador de calor. El principal logro que se presenta en este trabajo es la posibilidad de aislar dos fallas simultáneas en los sensores de temperatura en el intercambiador de calor. El sistema de diagnóstico de fallas se basa en observadores por modos deslizantes del tipo Super-Twisting. Los resultados experimentales demuestran el desempeño del esquema propuesto.

*Palabras clave:* observadores por modos deslizantes, diagnóstico de fallas, intercambiador de calor.

**Abstract**

This work presents a model-based fault diagnosis system for double pipe heat exchanger. The fault diagnosis system allows estimating and isolating the fault in one inlet and two outlet temperature sensors of the heat exchanger. The main goal presented in this work is the possibility of isolating two simultaneous failures in the temperature sensors. The fault diagnosis system was designed based on Super-Twisting Sliding-Mode Observer. Experimental results have shown the effectiveness of the proposed diagnosis system.

*Keywords:* sliding-mode observer, fault diagnosis, heat exchanger.

## 1 Introducción

Debido a los grandes avances tecnológicos en la industria de procesos, los sistemas de control son cada vez más sofisticados, aumentando con ello la complejidad en su manejo. Estos sistemas de control tienen una mayor dependencia de los sensores para su monitoreo. Sin embargo, los sensores son susceptibles a fallas, causando que las características de confiabilidad, disponibilidad y seguridad adquieran una mayor importancia, por eso estas características son importantes no solo en sistemas cuya seguridad es crítica, como en centrales nucleares o aeronaves,

sino en cualquier tipo de proceso automatizado (Canh *et al.*, 2009; Venkatasubramanian *et al.*, 2002).

La capacidad de detectar fallas en un intervalo de tiempo lo suficientemente corto, permite reducir la probabilidad de daños y averías en equipos, o lesiones al personal que opera y se encuentra cerca del proceso en cuestión. En Venkatasubramanian *et al.* (2002), se muestra un listado de las características que tiene que cumplir un sistema de diagnóstico de fallas, para identificar cierto conjunto de particularidades y así realizar un buen sistema de diagnóstico. En Agudelo y

\*Autor para la correspondencia. E-mail: adam@cenedet.edu.mx  
Tel. 362-7770, ext.: 2223.

col. (2013), se presenta una aplicación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas en un proceso químico con resultados satisfactorios. Por otro lado, Hamayun y col. (2013) emplean los observadores por modos deslizantes para proponer una estrategia de control tolerante a fallas.

Diversos autores han estudiado los esquemas de detección y diagnóstico de fallas con aplicación en procesos químicos y empleando el modelo del proceso. Por mencionar algunos, Tian y col. (2013) presentaron un sistema de detección y diagnóstico de fallas con aplicación en una columna de destilación. Téllez-Anguiano y col. (2010) presentaron un sistema de supervisión con diagnóstico de fallas aplicado a una columna de destilación. Laursen y col. (2008) presentaron un sistema de aislamiento de fallas empleando varios modelos no lineales. Debido a la complejidad que algunos procesos presentan, es difícil desarrollar un modelo no lineal que describa su dinámica, por lo que autores como Rahman y col. (2013) proponen esquemas de detección y diagnóstico de fallas basados en modelos difusos.

Los intercambiadores de calor se utilizan ampliamente en la industria, sin embargo, por lo general estos equipos se encuentran expuestos a la intemperie, lo que causa una aceleración en el deterioro de sus instrumentos de medición, lo que pone en riesgo la fiabilidad, disponibilidad y seguridad del proceso (Adam y col., 2013). Un enfoque utilizado para detectar fallas en los intercambiadores de calor se basa en la detección de cambios rápidos en el coeficiente de transferencia de calor en el sistema mediante la aplicación de algoritmos de mínimos cuadrados recursivos (Weyer y col. 2000). Sin embargo, este enfoque solo tiene el objetivo de detectar el ensuciamiento de los tubos del intercambiador de calor.

Otro método es el presentado en Adam y col. (2013) el cual se basa en la estimación de las variables del estado utilizando un observador por modos deslizantes de segundo orden, éste método es capaz de reconstruir la señal del sensor fallado sin necesidad de detener el proceso, cabe mencionar que no permite fallas simultáneas.

En Escobar y col. (2011) se presenta un esquema de detección y aislamiento de fallas utilizando observadores de alta ganancia aplicado a un intercambiador de calor, los autores usan el modelo no lineal del intercambiador de calor para el diseño de los observadores de alta ganancia, este algoritmo es capaz de reconstruir la señal del sensor fallado, pero sólo puede hacer frente a una falla a la vez restringiéndose

a que no ocurran fallas simultáneas.

En este trabajo se presenta un observador para sistemas no lineales, robusto ante perturbaciones, con amplitud y derivadas acotadas, que satisfacen las condiciones de acoplamiento. El observador se basa en el algoritmo Super-Twisting y el diferenciador exacto presentado en Levant, (1998), pero a diferencia del observador presentado en Davila y col. (2005), se garantiza convergencia a la perturbación en tiempo finito. Además, se puede aplicar a una clase más amplia de sistemas dinámicos.

La ventaja principal que se tiene sobre los trabajos presentados por (Adam y col. 2013; Escobar y col. 2011; Weyer y col. 2000), es que se detectan y aíslan las fallas simultáneas; el algoritmo mencionado es capaz de reconstruir a partir de cualquier sensor (entrada o salida), los sensores fallados garantizando de esta manera el funcionamiento aceptable del sistema bajo condiciones de falla.

Este esquema proporciona una supervisión fiable del proceso mediante la aplicación de un sensor de software. Por lo tanto, los ingenieros de procesos pueden continuar monitoreando el proceso hasta que se repare el o los sensores defectuosos.

La idea del enfoque del observador de estado es reconstruir un estado no medible. Se seleccionó este observador principalmente por su característica de robustez ante incertidumbre paramétrica (Hamayun y col. 2013; Li-Ying y col. 2013; Haskara 1996; Sreedhar y col. 1993), capaz de estimar los estados del sistema. Los observadores empleados en este trabajo están estrechamente relacionados con los observadores Super-Twisting utilizados en Rosas y col. (2011) y Davila y col. (2005).

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se presenta un modelo simplificado del intercambiador de calor. En la sección 3, se presenta la metodología de observadores por modos deslizantes Super-Twisting y se presenta el diseño de los observadores tomando como base el modelo matemático del intercambiador de calor. Tanto los resultados experimentales y las simulaciones se discuten en la Sección 4. Por último, las conclusiones se presentan en la sección 5.

## 2 Modelo matemático del intercambiador de calor

El intercambiador de calor de doble tubo está formado por dos tubos circulares concéntricos con un líquido que fluye en el tubo interno (fluido caliente) y otro



Fig. 1. Intercambiador de calor.

fluido que fluye en la sección externa o en el espacio anular entre los tubos (fluido frío), para este trabajo se utilizó la maqueta RT100 que se encuentra en *cenidet* (Ver Fig. (1)). Este equipo se utiliza en configuración de flujo a contracorriente.

La dinámica del intercambiador de calor con flujos a contracorriente, se puede representar mediante un balance de energía entre los flujos del intercambiador de calor, esta dinámica tiene un comportamiento similar a un sistema de segundo orden (Bequette, 1998) siempre y cuando no exista cambio de fase en algún fluido.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{co}}{dt} &= \frac{F_c}{V_c} (T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{c_{pc}\rho_c V_c} (T_{ho} - T_{co}) \\ \frac{dT_{ho}}{dt} &= \frac{F_h}{V_h} (T_{hi} - T_{ho}) + \frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (T_{co} - T_{ho}) \end{aligned} \quad (1)$$

El modelo matemático toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se considera volumen constante del fluido en los tubos.
- El coeficiente de transferencia de calor depende de las temperaturas de los fluidos.
- Las propiedades físicas y químicas de los fluidos se mantienen constantes.
- No existe transferencia de calor entre el tubo externo y el medio ambiente.
- No hay almacenamiento de energía calorífica en las paredes de los tubos.
- Se considera que la temperatura se distribuye uniformemente en cada elemento.

- Las propiedades físicas del fluido  $\rho_c$ ,  $\rho_h$ ,  $C_{pc}$ ,  $C_{ph}$  son conocidas y consideradas constantes debido a que no existe cambio de fase en el fluido y su variación no tiene un impacto significativo en el modelo.

El rango de operación para el cual el modelo anterior es válido depende en gran medida del coeficiente global de transferencia de calor  $U$ . Al considerar este coeficiente como un valor constante, se reduce el rango de validez del modelo debido a que el error de estimación aumentaría conforme el sistema se aleja de dicho punto de operación. Por lo tanto, de acuerdo con el trabajo desarrollado por Hangos y col. (2004), se cubre un rango de operación mayor al considerar la variación del coeficiente de transferencia de calor.

Al considerar que los fluidos no experimentan ningún cambio de fase, es posible calcular el parámetro  $U$  (coeficiente de transferencia de calor) mediante las Ecs. (2)-(3).

$$Q = F_m C_p (\Delta T) \quad (2)$$

$$U = \frac{Q}{A(\Delta T_{ml})} \quad (3)$$

Donde:

$F_m$  es el flujo másico.

$Q$  es el calor.

$\Delta T_{ml}$  es la diferencia de temperatura media logarítmica.

$\Delta T$  es la diferencia de temperaturas.

$A$  es el área de transferencia de calor.

El modelo que se presenta en (1) representa el comportamiento dinámico de la transferencia de calor entre los fluidos del intercambiador de calor bajo las suposiciones mencionadas.

## 2.1 Observadores por modos deslizantes

La metodología por modos deslizantes inicialmente fue propuesta para esquemas de control, después se vio la factibilidad de diseñar observadores por modos deslizantes por sus características y propiedades, como insensibilidad a incertidumbres en el sistema, robustez ante errores de modelado, convergencia y la garantía de la estabilidad (Utkin, 1977) para esquemas de estimación de estado. Por las características previamente mencionadas acerca de los observadores por modos deslizantes (OMDs), se han propuesto para su aplicación en esquemas para la detección y aislamiento de fallas (por sus siglas en inglés FDI) lineales y no lineales (Edwards y Spurgeon, 1998). En este trabajo el observador por modos deslizantes

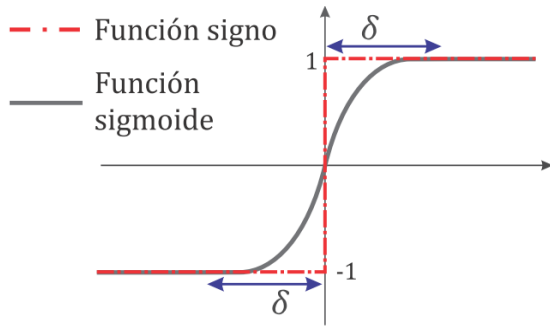


Fig. 2. Función de conmutación.

es empleado para estimar los estados no medidos del intercambiador de calor.

### 2.2 Función de conmutación

En aplicaciones prácticas se mostró que los modos deslizantes presentaron un comportamiento con oscilaciones de alta frecuencia denominado *chattering* (Perruquetti y col., 2002). Este fenómeno del *chattering* (oscilamiento) se presenta debido a que al modelar, no se consideran constantes de tiempo despreciadas en planta, sensores o actuadores. Afectando la precisión del control y la estimación de variables ocasionando posibles daños a la planta, por lo que surgieron algunos estudios con el fin de determinar su comportamiento y atenuarlo (Boiko y col., 2007; Boiko y col., 2004; Fridman 2001). Por otro lado, en Edwards y Spurgeon (1998) se presenta una función de conmutación suave denominada forma sigmoide, la cual presenta una forma de (ver Fig. 2). La cual es una aproximación suave de la función signo, representada en (4):

$$\text{sgn} = \frac{e}{|e| + \nu} \quad (4)$$

Donde  $e$  es el error de estimación y  $\nu$  es un escalar positivo, además, a medida que el valor de este parámetro es menor, la función en (4) es una aproximación muy cercana a la función signo, por lo que se mantiene el rendimiento ideal asegurando una respuesta suave y con ello la disminución del *chattering*.

### 2.3 Observador por modos deslizantes basado en el algoritmo Super-Twisting

De acuerdo con Levant, (1998) el algoritmo Super-Twisting (ST) tiene dos propiedades principales: exactitud y robustez. En ausencia de ruido y en

la clase de señales con la segunda derivada acotada el algoritmo Super-Twisting es exacto. La segunda propiedad es la robustez con respecto a la medición del ruido. En presencia de ruido de medición uniformemente acotado por  $\delta$ , su precisión puede ser proporcional a  $\sqrt{L\delta}$  donde  $L$  es la cota uniforme de la segunda derivada de la señal. Además se demostró también que este es el mejor orden de precisión para cualquier diferenciador de acuerdo con Levant, (1998).

En este caso de estudio el diseño del observador está basado en la técnica de modos deslizantes de alto orden presentado en Rosas y col. (2011) el cual presenta la siguiente estructura para un sistema completo.

#### 3.2.1 Observador para el sistema completo

Considere el subsistema mostrado en (5)

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\lambda_i} &= x_{\lambda_{i+1}}, i = 1, \dots, m-1, \\ \dot{x}_{\lambda_m} &= f_{\lambda}(x) + g_{\lambda}(x)u_{\lambda} + w_{\lambda}(x), \\ y_{\lambda} &= x_{\lambda_1}, \end{aligned} \quad (5)$$

donde el subíndice  $\lambda = 1, \dots, k$  identifica a cada subsistema e  $i$  se refiere al estado analizado, el vector de estado es  $x_{\lambda} = [x_{\lambda_1}, x_{\lambda_2}, \dots, x_{\lambda_m}]^T \in \mathbb{R}^m$ ,  $y_{\lambda}$  es la salida del subsistema,  $f_{\lambda}(x)$  y  $g_{\lambda}(x)$  son funciones suaves,  $u_{\lambda} \in \mathbb{R}$  es la entrada de control y  $w_{\lambda}(x)$  es una perturbación que depende del estado del sistema desconocida pero acotada;

$$|w_{\lambda}(x)| \leq \delta_{\lambda}, |\dot{w}_{\lambda}(x)| \leq \delta'_{\lambda} \quad (6)$$

El diseño del observador para un sistema de mayor orden se pueda dividir en subsistemas como se propone en Rosas y col. (2011).

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}_{\lambda_1} &= z_1 + c_{1,1}|x_{\lambda_1} - \hat{x}_{\lambda_1}|^{1/2} \text{sgn}(x_{\lambda_1} - \hat{x}_{\lambda_1}), \\ \dot{z}_1 &= c_{2,1} \text{sgn}(x_{\lambda_1} - \hat{x}_{\lambda_1}), \\ \hat{y}_1 &= \hat{x}_{\lambda_1} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}_{\lambda_i} &= z_i + c_{1,i}|z_{i-1} - \hat{x}_{\lambda_i}|^{1/2} \text{sgn}(z_{i-1} - \hat{x}_{\lambda_i}), \\ \dot{z}_i &= c_{2,i} \text{sgn}(z_{i-1} - \hat{x}_{\lambda_i}), i = 2, \dots, m-1 \\ \hat{y}_i &= \hat{x}_{\lambda_i} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}_{\lambda_m} &= f_{\lambda}(\hat{x}) + g_{\lambda}(\hat{x})u_{\lambda} + z_m \\ &\quad + c_{1,m}|z_{m-1} - \hat{x}_{\lambda_m}|^{1/2} \text{sgn}(z_{m-1} - \hat{x}_{\lambda_m}), \\ \dot{z}_m &= c_{2,m} \text{sgn}(z_{m-1} - \hat{x}_{\lambda_m}), \\ \hat{y}_m &= \hat{x}_{\lambda_m} \end{aligned} \quad (9)$$

#### 2.4 Diseño del observador para estimar la temperatura de salida de la corriente de agua caliente ( $\hat{T}_{ho}$ ) del intercambiador de calor

El diseño del banco de observadores para el intercambiador de calor siguió la estructura mostrada anteriormente.

Partiendo del modelo matemático del intercambiador de calor presentado en (1), cuando se tiene a  $T_{co}$  (temperatura de salida agua fría) disponible y el error entre la temperatura medida y la estimada es  $e_{j,\lambda,i}$  donde  $j$ ,  $\lambda$  e  $i$  denotan el número de observador, el número del subsistema y el estado que se está analizando, de la misma manera estos subíndices son utilizados para las temperaturas estimadas. Por lo que, el error para el subsistema 1 se denota por  $e_{1,1,1} = T_{co} - \hat{T}_{co1,1,1}$ , se propone el observador mostrado en las ecs. (10)-(11).

$$\begin{aligned} \dot{\hat{T}}_{co1,1,1} &= \frac{F_c}{V_c} (T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{c_{pc}\rho_c V_c} (\hat{T}_{ho1,2,2} - T_{co}) \\ &\quad - \hat{T}_{ho1,2,2} + \left( z_1 + \left( c_{1,1} |e_{1,1}|^{1/2} \operatorname{sgn}(e_{1,1,1}) \right) \right) \\ \dot{z}_1 &= c_{2,1} \operatorname{sgn}(e_{1,1}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{T}}_{ho1,2,2} &= \frac{F_h}{V_h} (T_{hi} - \hat{T}_{ho1,2,2}) \\ &\quad + \left( z_2 + \left( c_{1,2} |z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}|^{1/2} \operatorname{sgn}(z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}) \right) \right) \\ \dot{z}_2 &= c_{2,2} \operatorname{sgn}(z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}) \end{aligned} \quad (11)$$

Como se puede observar en las ecs. (10)-(11) el diseño del observador uno se dividió en dos subsistemas considerando a  $\hat{T}_{co1,1,1}$  como subsistema uno, estado uno y  $\hat{T}_{ho1,2,2}$  como subsistema dos estados dos dependiente del primero.

#### 2.5 Diseño del Observador para estimar la temperatura de salida de la corriente de agua de enfriamiento ( $\hat{T}_{co}$ ) del intercambiador de calor

Considerando que ahora se tiene disponible la temperatura de salida de la corriente de agua caliente  $T_{ho}$  se propone el siguiente observador donde el error entre la temperatura medida y la estimada es  $e_{2,1,1} = T_{ho} - \hat{T}_{ho2,1,1}$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{T}}_{ho2,1,1} &= \frac{F_h}{V_h} (T_{hi} - T_{ho}) + \frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (\hat{T}_{co2,2,2} - T_{ho}) \\ &\quad - \left( \hat{T}_{co2,2,2} + \left( z_3 + \left( c_{1,1} |e_{2,1,1}|^{1/2} \operatorname{sgn}(e_{2,1,1}) \right) \right) \right) \\ \dot{z}_3 &= c_{2,1} \operatorname{sgn}(e_{2,1,1}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{T}}_{co2,2,2} &= \frac{F_c}{V_c} (T_{ci} - \hat{T}_{co2,2,2}) \\ &\quad + \left( z_4 + \left( c_{1,2} |z_3 - \hat{T}_{co2,2,2}|^{1/2} \operatorname{sgn}(z_3 - \hat{T}_{co2,2,2}) \right) \right) \\ \dot{z}_4 &= c_{2,2} \operatorname{sgn}(z_3 - \hat{T}_{co2,2,2}) \end{aligned} \quad (13)$$

Como se puede observar en las Ecs. (12)-(13) el diseño del observador sigue el mismo procedimiento que el mostrado anteriormente para el diseño del observador para estimar la temperatura de la corriente del agua caliente.

#### 2.6 Diseño del observador para estimar la temperatura de entrada de la corriente de agua caliente ( $\hat{T}_{hi}$ ) del intercambiador de calor

Partiendo del modelo matemático del intercambiador de calor presentado en (1), particularmente del estado dos, presentado en (14) el cual corresponde a la dinámica de la temperatura de salida de la corriente del agua caliente, considerada porque involucra la temperatura de la corriente entrada del agua caliente que es la temperatura de interés a estimar.

$$\dot{T}_{ho} = \frac{F_h}{V_h} (T_{hi} - T_{ho}) + \frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (T_{co} - T_{ho}) \quad (14)$$

Como se observa en (14) intervienen las temperaturas  $T_{co}$  y  $T_{ho}$ . Para poder llevar a cabo el diseño del observador, las temperaturas  $T_{co}$  y  $T_{ho}$ , son remplazadas en el momento que se detecte falla por la señal estimada correspondiente y de esta manera no se vea afectada la estimación de  $T_{hi}$  (temperatura de entrada de la corriente del agua caliente). Utilizando los esquemas de diagnóstico mostrados en la Fig. 3. El observador queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{T}}_{ho3,1,1} &= \frac{F_h}{V_h} (\hat{T}_{hi} - T_{ho,seleccionado}) \\ &\quad + \frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (T_{co,seleccionado} - T_{ho,seleccionado}) - \hat{T}_{hi} \\ &\quad + z_5 + c_{1,1} |T_{ho,seleccionado} - \hat{T}_{ho3,1,1}|^{1/2} \\ &\quad \operatorname{sgn}(T_{ho,seleccionado} - \hat{T}_{ho3,1,1}) \\ \dot{z}_5 &= c_{2,1} \operatorname{sgn}(e_{3,1,1}) \end{aligned} \quad (15)$$

Cabe hacer mención que las soluciones para cada observador diseñado se definen en el sentido de Filippov (1998).

##### 3.3.1 Análisis de convergencia del observador

Para analizar la convergencia de los observadores se utiliza el procedimiento presentado por Rosas y

col. (2011), en el cual se presenta un observador discontinuo que estima, al mismo tiempo, el estado de la planta y las perturbaciones en una clase de sistemas no lineales de fase mínima garantizando la identificación del sistema y las perturbaciones en tiempo finito. Este análisis se implementó para cada uno de los observadores diseñados.

En el presente trabajo sólo se presenta el desarrollo del análisis de convergencia del observador para un observador señalando que el procedimiento es

similar para los otros dos observadores. El análisis de convergencia consiste en definir la variable de error entre el estado de la planta y el observador  $e_{j,\lambda,i}$  donde  $j$ ,  $\lambda$  e  $i$  denotan el número de observador, el número del subsistema y el estado que se está analizando, de la misma manera estos subíndices son utilizados para las temperaturas estimadas. Por lo que, el error para el subsistema 1 se denota por  $e_{1,1,1} = T_{co} - \hat{T}_{co1,1,1}$ , cuya dinámica se representa como se muestra en (16).

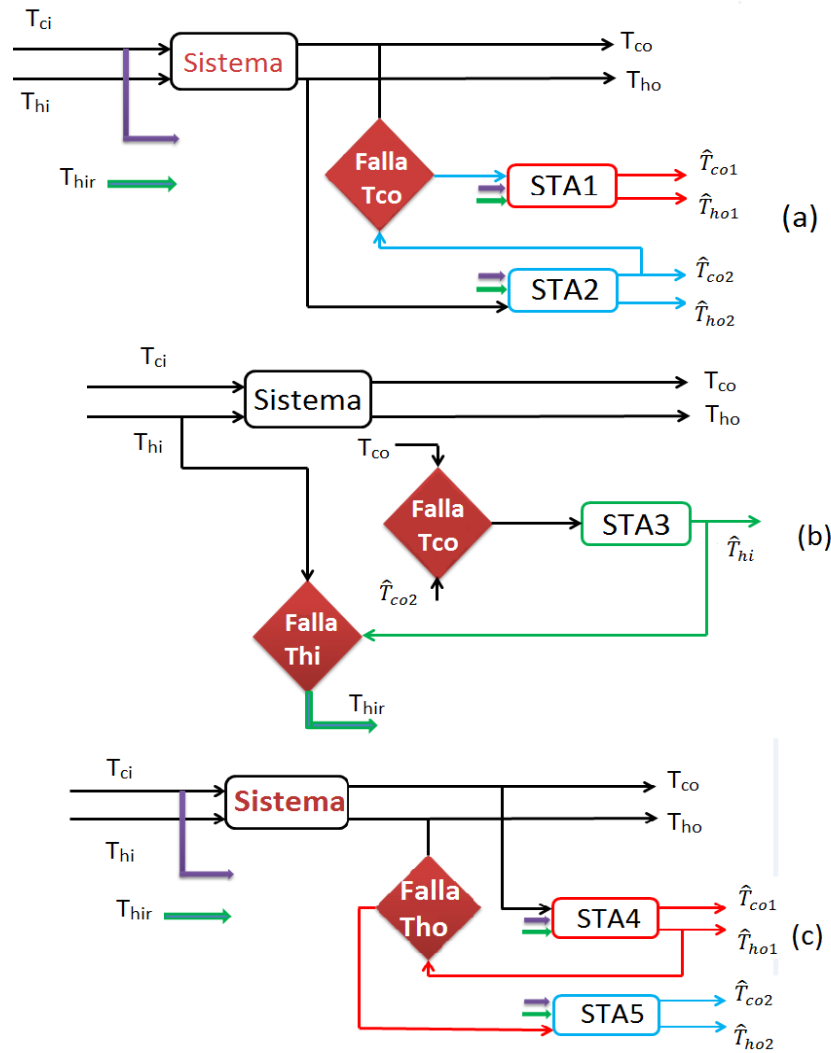


Fig. 3. Esquemas de diagnóstico. a) Esquema para detección de fallas en el sensor de salida de agua fría. b) Esquema para detección de fallas en el sensor de entrada de agua caliente. c) Esquema para detección de fallas en el sensor de salida de agua caliente.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{1,1,1} = & \left( \frac{F_c}{V_c} (T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{\rho_c C_{pc} V_c} (T_{ho} - T_{co}) \right) - \\ & \left( \frac{F_c}{V_c} (T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{\rho_c C_{pc} V_c} (\hat{T}_{ho1,2,2} - T_{co}) \right) \\ & + \left( \hat{T}_{ho1,2,2} - z_1 - c_{1,1} |e_{1,1,1}|^{1/2} \text{sgn}(e_{1,1,1}) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Simplificando  $\dot{e}_{1,1,1}$  se obtiene (17)

$$\begin{aligned} \dot{e}_{1,1,1} = & \hat{T}_{ho1,2,2} - z_1 - c_{1,1} |e_{1,1,1}|^{1/2} \text{sgn}(e_{1,1,1}) \\ \dot{z}_1 = & c_{2,1} \text{sgn}(e_{1,1,1}) \end{aligned} \quad (17)$$

Con el fin de dejar explícita la convergencia del error se realizó el siguiente cambio de variables, donde  $R_{1,1,1} = e_{1,1,1}$ ,  $R_{1,2,2} = \hat{T}_{ho1,2,2} - z_1$ , las cuales representan la convergencia al origen de las variables a estimar y los subíndices indican el observador, el subsistema y el estado en análisis respectivamente, los subíndices de las  $c_{1,1}$  y  $c_{2,1}$  indican el número de constante y el subsistema al que pertenecen respectivamente; sustituyendo dichas variables en (17) se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{R}_{1,1,1} = & R_{1,2,2} - c_{1,1} |e_{1,1,1}|^{1/2} \text{sgn}(e_{1,1,1}) \\ \dot{R}_{1,2,2} = & \hat{T}_{ho1,2,2} - c_{2,1} \text{sgn}(e_{1,1,1}) \end{aligned} \quad (18)$$

Sabiendo que  $\hat{T}_{ho1,2,2}$  es una función suave, desconocida, pero acotada  $|\hat{T}_{ho1,2,2} - \delta'|$  entonces se puede aplicar el Teorema 1 propuesto en Dávila y col. (2005) para proponer las constantes  $c_{1,1}$ ,  $c_{2,1}$  y  $p$  donde  $0 < p < 1$  que satisfacen las desigualdades de las ecs. (19)-(20), esto aplica para el cálculo de todas las constantes de cada observador diseñado.

$$c_{1,1} > \sqrt{\frac{2}{c_{1,2} + \delta'}} \frac{(c_{1,1} + \delta')(1+p)}{(1-p)} \quad (19)$$

$$c_{2,1} > \delta' \quad (20)$$

Suponiendo que las desigualdades de las ecs. (19)-(20) se cumplen entonces se garantiza que las trayectorias del sistema de (10) convergen al origen en tiempo finito. Esto implica que  $T_{co} = \hat{T}_{co1,1,1}$  y  $z_1 = T_{ho}$ , por lo tanto  $T_{ho}$  es identificada en tiempo finito. En la siguiente etapa se puede considerar que se cuenta con la variable  $T_{ho}$  de esta forma (11) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{ho1,2,2} = & \frac{F_h}{V_h} (T_{hi} - \hat{T}_{ho1,2,2}) + z_2 \\ & + \left( c_{1,2} |z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}|^{1/2} \text{sgn}(e_{1,2,2}) \right) \\ \dot{z}_2 = & c_{2,2} \text{sgn}(e_{1,2,2}) \end{aligned} \quad (21)$$

Se define el error entre la variable  $z_1$  identificada en tiempo finito y la temperatura estimada  $\hat{T}_{ho1,2,2}$  como

$e_{1,1,2} = z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}$  cuya dinámica está dada como se muestra en (22).

$$\begin{aligned} \dot{e}_{1,1,2} = & \frac{F_h}{V_h} (T_{hi} - T_{ho}) + \frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (T_{co} - T_{ho}) \\ & - \left( \frac{F_h}{V_h} (T_{hi} - \hat{T}_{ho1,2,2}) + z_2 + c_{1,2} |z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}|^{1/2} \text{sgn}(e_{1,1,2}) \right) \\ \dot{z}_2 = & c_{2,2} \text{sgn}(e_{1,1,2}) \end{aligned} \quad (22)$$

Simplificando (22), se obtiene. (23).

$$\begin{aligned} \dot{e}_{1,1,2} = & \frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (T_{co} - T_{ho}) \\ & - \left( z_2 + \left( c_{1,2} |z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}|^{1/2} \text{sgn}(e_{1,1,2}) \right) \right) \\ \dot{z}_2 = & c_{2,2} \text{sgn}(e_{1,1,2}) \end{aligned} \quad (23)$$

Nótese que en (23) la expresión a estimar es  $\frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (T_{co} - T_{ho}) = g(x_1, x_2)$ . Realizando un cambio de variables  $R_{1,1,2} = e_{1,1,2}$  y  $R_{1,2} = g(x_1, x_2) - z_2$  se obtiene (24).

$$\begin{aligned} \dot{R}_{1,1,2} = & R_{1,2} - c_{1,2} |z_1 - \hat{T}_{ho1,2,2}|^{1/2} \text{sgn}(e_{1,1,2}) \\ \dot{R}_{1,2} = & \dot{g}(x_1, x_2) - c_{2,2} \text{sgn}(e_{1,1,2}) \end{aligned} \quad (24)$$

Claramente se pone en evidencia que es posible obtener cualquier estado del sistema, si se divide al sistema en subsistemas adecuadamente, en (24) se puede observar que la función considerada como desconocida es identificada en tiempo finito, al igual que la variable del estado  $T_{ho}$ . Cabe aclarar que en el segundo subsistema se estima el valor de  $z_2$ , el cual corresponde a la expresión  $\frac{UA}{c_{ph}\rho_h V_h} (T_{co} - T_{ho})$  que involucra al coeficiente de transferencia de calor. Esta expresión no tiene relevancia para el esquema de diagnóstico pero si es necesario para que el observador cumpla con la estructura deseada y puedan estimarse en tiempo finito los estados deseados.

### 3 Resultados experimentales

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la implementación de un sistema de diagnóstico de fallas basado en el modelo para un intercambiador de calor, en el cual se implementó un banco de observadores por modos deslizantes Super-Twisting logrando estimar fallas múltiples y simultáneas. Este sistema puede hacer frentes a dos fallas simultáneas únicamente con dos combinaciones posibles (“ $T_{hi}$  con  $T_{co}$ ” o “ $T_{hi}$  con  $T_{ho}$ ”). De otra forma sólo puede hacer frente a fallas *individuales* en tres sensores diferentes ( $T_{hi}, T_{ho}, T_{co}$ ). Donde,  $T_{hi}$  representa la temperatura del sensor de la corriente del agua caliente a la entrada,  $T_{co}$  representa la temperatura del sensor de la corriente de agua de enfriamiento a la salida y  $T_{ho}$  representa la

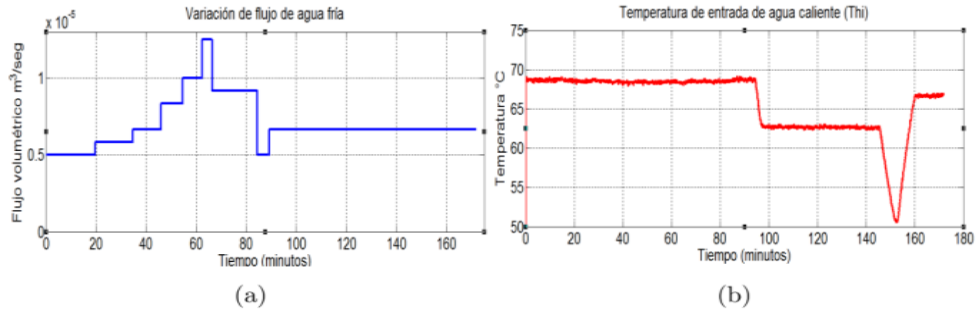


Fig. 4. Entradas del sistema. (a) Flujo de entrada de agua fría. (b) Comportamiento de la temperatura de entrada  $T_{hi}$ .

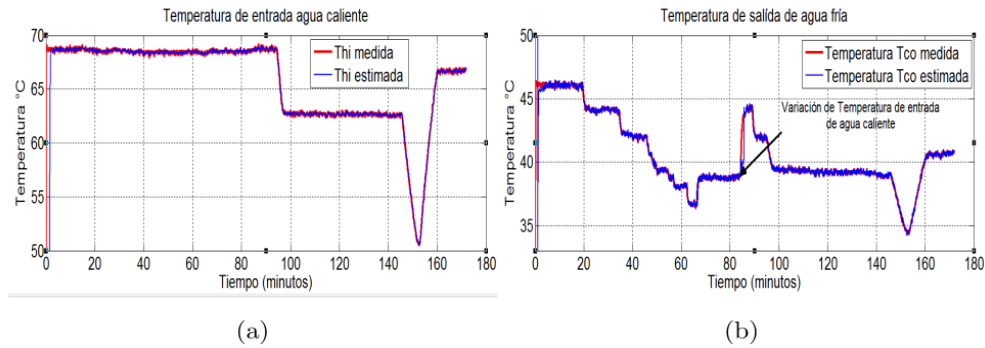


Fig. 5. Prueba experimental. (a) Comparación del desempeño de los observadores diseñados para  $T_{hi}$ . (b) Comparación del desempeño de los observadores diseñados para  $T_{co}$ .

temperatura del sensor de la corriente de agua caliente a la salida.

Los esquemas utilizados para el diagnóstico de fallas se muestran en la Fig. (3).

### 3.1 Esquema de diagnóstico de fallas

La planta piloto RCT100 utilizada en este trabajo de investigación es un modelo a escala de un intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos a contra corriente ubicada en *Cenidet*.

Para el diseño de los observadores por modos deslizantes Super-Twisting se realizan las siguientes consideraciones:

Las variables medibles del sistema  $F_h, F_c, T_{ci}, T_{hi}, T_{ho}$ , son flujo de entrada de agua caliente, flujo de entrada de agua fría, temperaturas de entrada y salida de las corrientes de agua fría y las corrientes de agua caliente respectivamente.

La temperatura de la corriente de entrada de agua de enfriamiento  $T_{ci}$  y el flujo de entrada de agua caliente  $F_h$  se consideran constantes.

El flujo de agua de enfriamiento  $F_c$  y la

temperatura de la corriente de entrada  $T_{hi}$  son variables manipulables del sistema y son utilizadas como entradas del sistema  $u_1, u_2$  respectivamente.

Es importante mencionar que el cálculo del coeficiente de transferencia de calor se calcula en línea para las condiciones de operación del proceso mediante el empleo de las Ecs. (2)-(3).

### 3.2 Resultados de la prueba experimental para verificar el funcionamiento de los observadores

Para comprobar la funcionalidad del observador se realizó una prueba variando el flujo de entrada de agua fría y la temperatura de entrada de agua caliente, con esto se verificó la funcionalidad del observador. Las condiciones bajo las cuales se realizó esta prueba fueron las siguientes:

La temperatura de entrada de agua caliente  $T_{hi}$  se varió de 50 °C a 68 °C, como se muestra en la Fig. (4a). En la Fig. (4b), se muestra el comportamiento de entrada de flujo de agua fría.



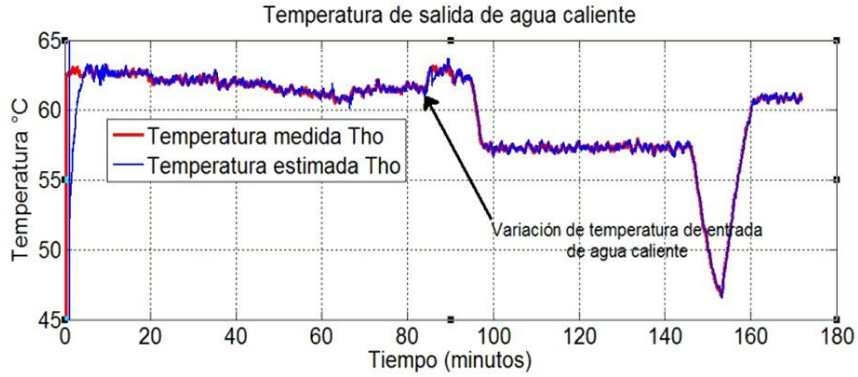


Fig. 6. Comparación del desempeño del observador diseñado para  $\hat{T}_{ho}$  estimada vs.  $T_{ho}$  medido.

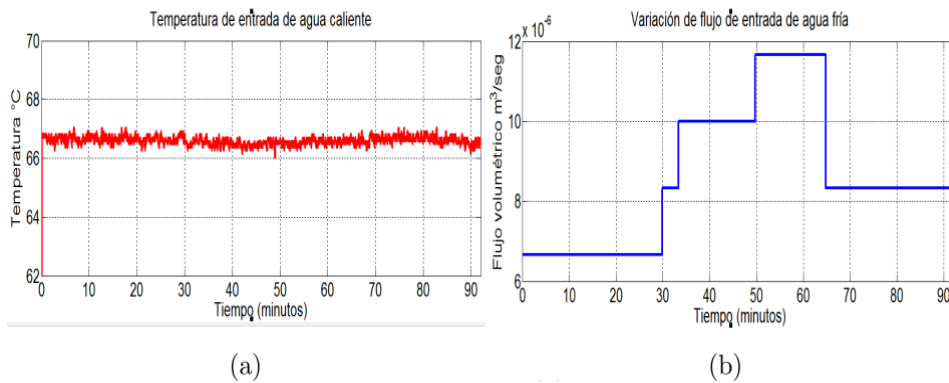


Fig. 7. Entradas del sistema. (a) Comportamiento de la temperatura de entrada  $T_{hi}$ . (b) Comportamiento del flujo de entrada de agua fría.

Los parámetros que no experimentaron cambios durante esta prueba, fueron el flujo volumétrico de entrada de agua caliente  $F_h = 1.66 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  y la temperatura de entrada de agua fría  $T_{ci} = 22^\circ\text{C}$ . Las condiciones iniciales de los observadores fueron para el agua fría  $T_{co}^{(0)} = 0^\circ\text{C}$ , para el agua caliente  $T_{ho}^{(0)} = 0^\circ\text{C}$  y  $T_{hi}^{(0)} = 0^\circ\text{C}$ .

En las Figs. (5)-(6), se muestra que los observadores estiman de forma correcta las temperaturas de entrada y salida de agua caliente  $T_{hi}$ ,  $T_{ho}$  respectivamente y la temperatura de salida de agua fría  $T_{co}$ .

Una vez que se ha comprobado que los observadores estiman correctamente la temperatura de entrada del agua caliente  $T_{hi}$  y las temperaturas de salida de agua fría  $T_{co}$  y de agua caliente  $T_{ho}$ , se procede a implementar el esquema de diagnóstico de fallas presentado en la Fig. (3).

Para desarrollar la prueba del sistema de diagnóstico de fallas, las condiciones empleadas

fueron las siguientes: la temperatura de entrada de agua caliente  $T_{hi}$  se muestra en la Fig. (7a), en la Fig. (7b), se muestra el comportamiento de entrada de flujo de agua fría. Los parámetros que no experimentaron cambios durante esta prueba, fueron el flujo volumétrico de entrada de agua caliente  $F_h = 1.66 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  y la temperatura de entrada de agua fría  $T_{ci} = 22^\circ\text{C}$ . Las condiciones iniciales de los observadores para el agua fría  $T_{co}^{(0)} = 0^\circ\text{C}$ , para el agua caliente  $T_{ho}^{(0)} = 0^\circ\text{C}$  y  $T_{hi}^{(0)} = 0^\circ\text{C}$ .

Las gráficas de las Figs. (8)-(9) muestran los resultados obtenidos al realizar las pruebas en línea del sistema de diagnóstico de fallas en el intercambiador de calor. En estas imágenes se grafican los datos de salida de las temperaturas  $T_{co}$ ,  $T_{ho}$  y la temperatura de entrada de agua caliente  $T_{hi}$ , además de los datos de las señales reales con fallas aditivas agregadas mediante software en tiempos diferentes. De igual manera se grafican las estimaciones realizadas por cada uno de los observadores. Las gráficas del error de estimación entre las señales estimadas con respecto a los datos

reales, para cada una de las salidas se muestran en las Figs. (10)-(11) durante esta prueba el error de estimación está por debajo de los 0.5 °C.

Como se observa en las Figs. (12)-(13) los errores

de estimación están por debajo de los 0.5 °C aún en presencia de fallas, esto indica que los observadores tienen un desempeño aceptable.

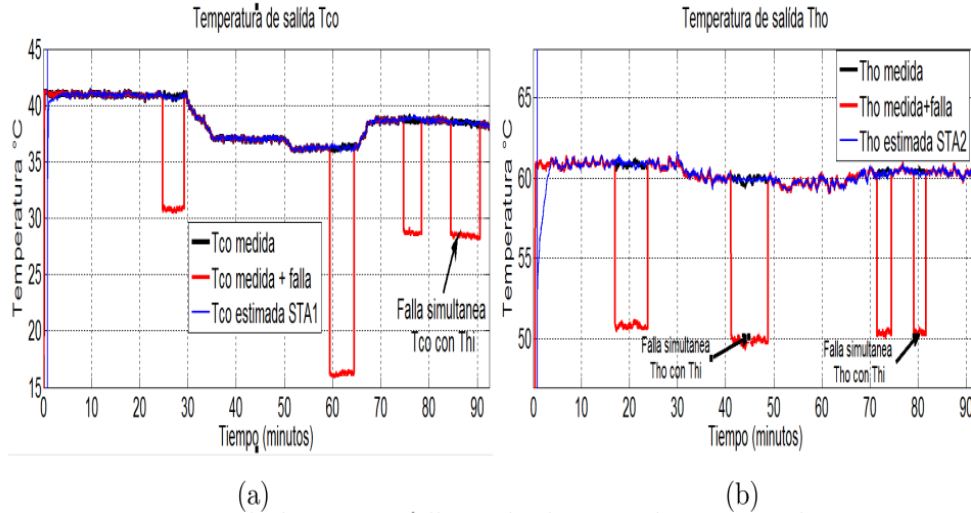


Fig. 8. (a) Desempeño del esquema de diagnóstico para fallas múltiples y simultáneas diseñado para  $T_{co}$ . (b) Desempeño del esquema de diagnóstico para fallas múltiples y simultáneas diseñado para  $T_{ho}$ .

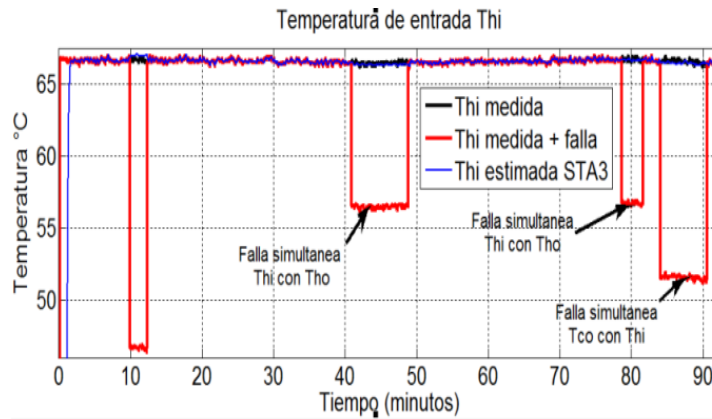


Fig. 9. Desempeño del esquema de diagnóstico para fallas múltiples y simultáneas diseñado para  $T_{hi}$ .

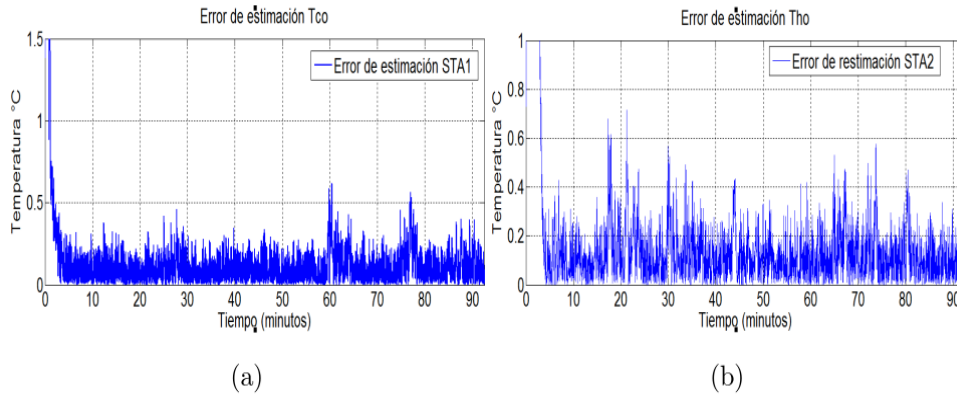


Fig. 10. Errores de estimación Super-Twisting. (a) Errores de estimación  $T_{co}$ . (b) Errores de estimación  $T_{ho}$ .

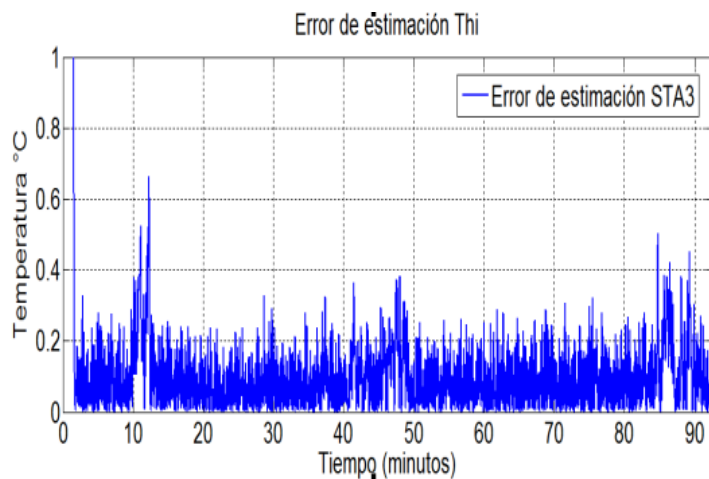
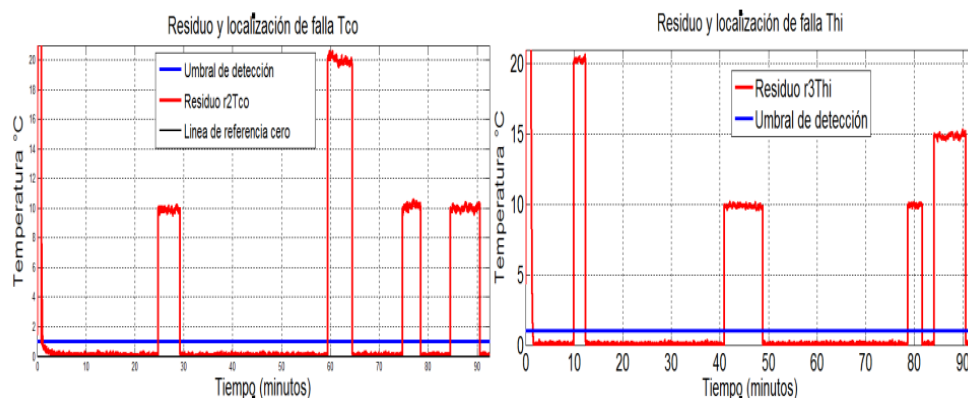


Fig. 11. Error de estimación Super-Twisting  $T_{hi}$ .



(a)

(b)

Fig. 12. Umbral de detección Super-Twisting. (a) Detección y localización de falla  $T_{co}$ . (b) Detección y localización de falla  $T_{hi}$ .



Fig. 13. Umbral de detección y localización de fallas  $T_{ho}$ .

En esta sección se ha mostrado que el esquema de diagnóstico de fallas basado en el algoritmo Super-Twisting es capaz de detectar, localizar y aislar fallas simultáneas en el instante de aparición de la falla. Sin embargo, la señal reconstruida muestra una degradación poco significativa con respecto a la temperatura real del sistema, debido a que se encuentra por debajo de 0.5 °C.

## Conclusiones

En este trabajo se mostró, mediante pruebas experimentales, que es posible la implementación de un sistema de detección y localización de fallas simultáneas utilizando los observadores por modos deslizantes Super-Twisting.

De acuerdo con los resultados mostrados los umbrales utilizados para la detección de fallas aún se pueden ajustar a valores menores de 1 °C, siendo esto posible, gracias a que el promedio de la amplitud de los errores de estimación están por debajo de los 0.5 °C, sin embargo al reducir los umbrales de detección se corre el riesgo de que el sistema mande señales de falsas alarmas de fallas, esto implica que se tiene que encontrar un compromiso entre la detección oportuna de falla, contra la precisión del sistema. Además, el valor de los umbrales de falla, también dependerá del porcentaje de error permitido en el sistema y del proceso en que se trabaje.

Es importante enfatizar que el resultado más sobresaliente del esquema de diagnóstico de fallas que se presentó en este trabajo, es que el observador se diseñó de tal manera que es capaz de reconstruir dos distintas señales a partir de dos temperaturas medidas, con lo cual se presenta la ventaja de poder tener dos sensores fallados simultáneamente que miden diferentes variables y que aun así el sistema siga funcionando.

## Nomenclatura

$A$	área de transferencia de calor, $m^2$
$C_{pc}$	calor específico del agua fría, $J/kg^{\circ}C$
$C_{ph}$	calor específico del agua caliente, $J/kg^{\circ}C$
$T_{ci}, T_{hi}$	temperatura de entrada del fluido frío y caliente respectivamente, $^{\circ}C$
$T_{co}, T_{ho}$	temperatura de salida del fluido frío y caliente respectivamente, $^{\circ}C$
$U$	coeficiente de transferencia de calor, $J/(s\ m^2^{\circ}C)$
$F_c$	flujo volumétrico de fluido frío (agua), $m^3/s$

$F_h$	flujo volumétrico de fluido caliente (agua), $m^3/s$
$V_c$	volumen total del tubo del fluido frío, $m^3$
$V_h$	volumen total del tubo del fluido caliente, $m^3$
$C$	como subíndice denota agua fría
$H$	como subíndice denota agua caliente
<i>Símbolos griegos</i>	
$\Delta T$	diferencia de temperaturas
$\rho$	densidad de flujo
$\nu$	parámetro de sintonización de la función de conmutación del observador deslizante

## Referencias

- Adam, M., Escobar, R. F., D. Juárez, D., Guerrero, G. V. y López, B. (2013). Detección de fallas en un intercambiador de calor, utilizando observadores por modos deslizantes de segundo orden. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12, 327-336.
- Agudelo, C., Morant, A. F., Quiles, C. E., M. E. G., (2013). Integration of techniques for early fault detection and diagnosis for improving process safety: Application to a fluid catalytic cracking refinery process. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 26, 660-665.
- Bequette, B. (1998). *Process Dynamics Modeling, Analysis, and Simulation*. Springer, 471-478.
- Boiko, I. y Fridman, L. (2004). Universal chattering test for the second order sliding modes algorithms. *Proceedings of the 8th Workshop of Variable Structure Systems*.
- Boiko, I., Fridman L., Pisano A. y Usai E. (2007). Analysis of chattering in systems with second-order sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic Control* 52, 2085-2102.
- Canh, L., Kwok, T., Carl, S. b., Romano, P. y Gorge, J. (2009). Fault Diagnosis and Failure Prognosis for Engineering Systems: A Global Perspective. *5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering Bangalore, India, August 22 -25, 2009*
- Dávila, J., Fridman, L. y Levant, A. (2005). Second-Order Sliding-Mode Observer for Mechanical Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 50, 1785-1789.

- Edwards, C. y Spurgeon, S. (1998). *Sliding Mode Control theory and applications*. Taylor and Francis.
- Escobar, R. F., Astorga-Zaragoza, C. M., Téllez-Anguiano, A. C., Juárez-Romero, D., Hernández, J. A., y Guerrero-Ramírez, G. V. (2011). (2011). Sensor fault detection and isolation via high-gain observers: Application to a double-pipe heat exchanger. *ISA Transaction* 50, 480-486
- Fazlur-Rahman, MHR. y Devanathan, R. (1994). Modelling and dynamic feedback linearisation of a heat exchanger model. In: *Proceedings of the third IEEE conference on control applications*, 1801-6.
- Filippov, A. F., y Arscott, F. M. (1988). *Differential equations with discontinuous righthand sides: control systems* (Vol. 18). Springer Science & Business Media.
- Fridman L. (2001). An averaging approach to chattering. *IEEE Transactions on Automatic Control* 46, 1260-1265.
- Hamayun, M.T., Edwards, C. y Alwi, H. (2013). A fault tolerant control allocation scheme with output integral sliding modes. *Automatica* 49, 1830-1837.
- Hangos, K., Bokor, J. y Szederkenyi G. (2004). *Analysis and Control of Nonlinear Process Systems*. Springer, 55-60.
- Haskara, I. (1996). Sliding mode controllers and observers. Tesis de maestría. The Ohio State University, Columbus, Ohio. EU.
- Laursen, M., Blanke, M., Dustegor, D., (2008). Fault diagnosis of a water for injection system using enhanced structural isolation. *International Journal Applied Mathematics and Computation* 18, 593-603.
- Levant, A. (1998). Robust exact differentiation via sliding mode technique. *Automatica* 34, 379-384.
- Li-Ying H., Guang-Hong Y. (2013). Robust fault tolerant control based on sliding mode method for uncertain linear systems with quantization. *ISA Transactions* 52, 600-610.
- Perruquetti, W. y Barbot J. P. (2002). Sliding Mode Control in Engineering. Marcel Dekker. 440-437.
- Rahman, R. Z., Yusof, R., Ismail, F. S., (2013). Model-based fault detection and diagnosis optimization for process control rig. *9th Asian Control Conference (ASCC)*, 1-6.
- Rosas, P., Rosas, D. y Álvarez. J. (2011). *Observación y Estimación en Tiempo Finito de una Clase de Sistemas no Lineales de Fase Mínima*. Universidad Autónoma de Baja California Mexicali, B.C. México.
- Sreedhar, R., Benito, F. y Glen, Y.M. (1993). Robust fault detection in nonlinear systems using sliding mode observers. *Second IEEE Conference on Control Applications*.
- Téllez-Anguiano, A. C., Astorga-Zaragoza, C. M., Targui, B., Aguilera-González, A., J., R.-R., Adam-Medina, M., (2010). Experimental validation of a high-gain observer for composition estimation in an ethanol-water distillation column. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 4, 942-952.
- Tian, W., Sun, S. L., Guo, Q. J., (2013). Fault detection and diagnosis for distillation column using two-tier model. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 91, 1671-1685.
- Utkin, V. I. (1977). Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transaction on Automatic Control* 22, 212-222.
- Varga, EI., Hangos, KM. y Szigeti, F. (1995). Controllability and observability of heat exchanger networks in the time-varying parameter case. *Control Engineering Practice* 3, 1409-1419.
- Venkatasubramanian, V., Raghunathan, R., Kewen, Y. y Surya, K. (2002). A review of process fault detection and diagnosis part I: Quantitative model based methods. *Computers and Chemical Engineering* 27, 293-311.
- Weyer, E., G., Szederkényi, y Hangos, K. (2000). Grey box fault detection of heat exchangers. *Control Engineering Practice* 8, 121-13.