



DETECCIÓN DE FALLAS EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR, UTILIZANDO OBSERVADORES POR MODOS DESLIZANTES DE SEGUNDO ORDEN

FAULT DETECTION IN A HEAT EXCHANGER USING SECOND ORDER SLIDING MODE OBSERVERS

M. Adam-Medina¹, R. F. Escobar^{1,2}, D. Juárez-Romero^{2*}, G. V. Guerrero-Ramírez² y B. López-Zapata³

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

²Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas-Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos.

³Universidad Politécnica de Chiapas, Calle Eduardo J. Selvas s/n, Col. Magisterial, C.P. 29082, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Recibido 9 de enero de 2013; Aceptado 19 de Mayo de 2013

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la implementación de un esquema de detección y localización de fallas en sensores de temperatura utilizando observadores por modos deslizantes de segundo orden. La implementación del sistema de diagnóstico de fallas se llevó a cabo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujos a contra corriente. Así mismo, se desarrolló un sistema de monitoreo que muestra la operación del proceso termodinámico donde se aplica la detección y localización de fallas.

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

Abstract

This paper presents the results of the implementation of a fault detection scheme in temperature sensors using second order sliding mode observers. The implementation of fault detection system was developed in a double pipe heat exchanger with counter-current flows. Also it was developed a monitoring system which shows the thermodynamic process operation, where detection and troubleshooting is applied.

Keywords: fault detection, second order sliding mode observers, heat exchanger.

1 Introducción

En la industria generalmente los intercambiadores de calor se encuentran expuestos al medio ambiente, lo cual afecta la vida útil de los sensores, ocasionando fallas parciales o totales. Por eso es importante asegurar la continua operación de los equipos cuando se presentan fallas en los sensores. En las últimas décadas, la detección y localización de fallas (FDI) ha sido estudiada extensivamente en Saif y col.(2012), Noura y col.(2009) y Venkatasubramanian y col.(2003). El propósito fundamental de un sistema

FDI es generar una alarma cuando ocurre una falla y de ser posible aislarla y estimar la magnitud de la falla e indicar el sensor o actuador con falla. La redundancia física es un enfoque costoso para FDI; mientras que las técnicas basadas en redundancia analítica usan el conocimiento de la dinámica del sistema para realizar la tarea del FDI. A este último método se le conoce como redundancia analítica basada en el modelo. Además, este enfoque no necesita instrumentación adicional, que eleva costos, requiere más espacio y eleva el consumo de energía.

*D. Juárez-Romero. E-mail: djuarezr7@gmail.com
Tel. +52 7777 329-79-84, Fax +52 7777 329-70-84

Uno de los enfoques más populares basados en el modelo son los observadores de estados. La idea básica de utilizar un observador para FDI consiste en la reconstrucción de las salidas del sistema mediante el observador y realizar una comparación con las salidas medidas del sistema para generar residuos y a partir de ahí decidir si existe o no una falla.

En la literatura están reportados algunos esquemas orientados al diagnóstico de fallas en sistemas de procesos basados en el modelo. Por ejemplo en Escobar y col. (2011) y Laursen y col. (2008) se presenta un método que se basa en la combinación de varios modelos no lineales para el aislamiento de las fallas, en Pierri (2004) se presenta un método que utiliza un observador adaptable con el cual detectan fallas solo en sensores, además, en Pierri y col. (2007) se presenta la comparación de un observador adaptable y una técnica de H1 para la detección de fallas, mostrando como conclusión un incremento en la robustez del observador. También se desarrollaron observadores por modos deslizantes para sistemas no lineales con incertidumbre como se muestra en Veluvolu y col. (2007). La aplicación de sistemas de diagnóstico de fallas en intercambiadores de calor ha sido abordada en trabajos como los de Persin y col., (2006) y Weyer y col., (2000). Por un lado en el trabajo presentado por Persin y col., (2005) se emplea un modelo lineal del intercambiador de calor para realizar el diagnóstico de fallas en los sensores del equipo. Una de las principales diferencias del trabajo presentado en Persin y col., (2005) y el propuesto en este trabajo es el modelo del intercambiador de calor. En este trabajo se considera un modelo no lineal en donde es modelada toda la dinámica del proceso y no solo en una sección. Por otro lado, en Weyer y col., (2000) la aplicación de sistema de diagnóstico de fallas está orientada a detectar fallas por mal funcionamiento del equipo. Es decir que el modelo FDI empleado solo puede identificar fallas en parámetros del proceso, y no en los sensores.

Las investigaciones de los Observadores por Modos Deslizantes (OMD) se extendieron también hacia el área de diagnóstico de fallas como la presentada en Yan y col. (2006) donde se propone un método de cálculo para la reconstrucción de la falla y se hace una comparación con otro observador.

También existen trabajos realizados en OMD para procesos como el mostrado en Rolink y col. (2006) donde se presenta un esquema FDI para la estimación de las magnitudes en fallas de actuador. Otra metodología en el diseño de OMD es el planteamiento de observadores en modos deslizantes de segundo

orden por Brambilla y col. (2008), con los cuales las fallas pueden desacoplarse de mejor forma.

En este trabajo se propone emplear una estructura FDI para la detección y localización de fallas en los sensores de temperatura de salida de un intercambiador de calor. El FDI fue estructurado mediante el diseño de un banco de observadores en modos deslizantes no lineales de orden 2, los cuales están basados en el modelo del sistema. La razón principal de emplear este tipo de observadores es por su fácil implementación y su precisión en la estimación de variables de estado.

2 Modelo simplificado del intercambiador de calor

Un intercambiador de calor de tubos concéntricos está constituido por un tubo colocado dentro de otro de mayor diámetro. De acuerdo al arreglo de sus flujos, existen dos configuraciones comunes de intercambiadores de calor, flujos paralelos y flujos a contra corriente. En la configuración en flujos paralelos los fluidos de entrada fluyen en el mismo sentido; y en flujos a contracorriente los fluidos de entrada fluyen en sentidos opuestos.

La dinámica del intercambiador de calor en contracorriente puede obtenerse mediante un balance de energía entre la entrada y salida del sistema Ec.(1). Se considera a este proceso como un arreglo de celdas, las cuales representan tanques perfectamente agitados y conectados por una pared conductora de calor (Weyer y col., 2000).

$$\dot{T}_{co} = \frac{v_c}{V_c} (T_{ci} - T_{co}) + \frac{UA}{\rho_c c_{pc} V_c} (\Delta T_{ml}) \quad (1)$$

$$\dot{T}_{ho} = \frac{v_h}{V_h} (T_{hi} - T_{ho}) - \frac{UA}{\rho_h c_{ph} V_h} (\Delta T_{ml})$$

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 válido del modelo debido a que el error de estimación aumentará 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.

Tabla 1.- Nomenclatura

T	temperatura	$^{\circ}\text{C}$
A	área de transferencia de calor	m^2
c_p	calor específico	$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$
U	coeficiente de transferencia de calor	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
V	volumen del tubo	m^3
v	flujo volumétrico de agua	m^3/s
ρ	densidad del fluido	kg/m^3
subíndices		
c	frío	
h	caliente	
i	entrada	
o	salida	

En este trabajo se propone calcular el coeficiente global de transferencia de calor Ec. (3) a partir de la transferencia de calor entre los fluidos de forma empírica Ec. (2) donde

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

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

donde W_m en Ec. (2) es el flujo másico y ΔT_{ml} en Ec. (3) es la delta de temperatura media logarítmica.

Una consideración importante de las Ecs. (2)-(3), es que las propiedades físicas de los fluidos como la densidad y calor específico (ρ y C_p respectivamente) tienen poca variación. El intercambiador de calor empleado es de tubos lisos y solo se opera en una sola fase (líquida) en ambas secciones del intercambiador de calor (tubo y coraza), por lo que el cambio de presión entre la entrada y la salida es muy pequeño para las dimensiones del equipo específicas. Así mismo, el volumen se considera como constante, debido a esto las variaciones de los coeficientes en el intercambiador no son significativas.

Además de las consideraciones mencionadas, para la estimación con el modelo matemático Ec. (1) se requieren considerar las siguientes suposiciones:

- S1** El volumen del fluido en los tubos es constante.
- S2** El coeficiente de transferencia de calor se relaciona con las temperaturas de los fluidos.
- S3** Las propiedades físicas y químicas de los fluidos se mantienen constantes.
- S4** No existe transferencia de calor entre el tubo externo y el medio ambiente.

S5 No hay almacenamiento de energía calorífica en las paredes de los tubos.

S6 Las entradas del sistema son medibles.

S7 El agua de enfriamiento es tratada con cloro con la finalidad de evitar ensuciamiento.

A pesar de que el modelo mostrado en la Ec. (1) es un modelo simplificado, éste es funcional ya que representa las principales características del comportamiento del intercambiador de calor bajo las suposiciones mostradas.

3 Observadores en modos deslizantes

Un observador de estados es un algoritmo recursivo para estimar las variables de estado de un sistema real, bajo la premisa del conocimiento de entradas y salidas.

Los observadores por modos deslizantes, denominados también observadores deslizantes, son considerados algoritmos robustos ante incertidumbre paramétrica Sreedhar y col. (1993), capaces de estimar los estados del sistema. La evolución de su investigación, ha generado la obtención de diseños de observadores de primer orden Wang y col. (1997), así como de segundo orden Davila y col. (2005).

3.1 Observadores en modos deslizantes de segundo orden:

Este tipo de observadores presentan la ventaja de que pueden ser empleados para la estimación de dinámicas lentas y rápidas, esto permite en gran medida representar la dinámica de la temperatura en cada corriente, en sistemas de control esto permite una estimación viable aún y con presencia de sobretiros cuando la variable controlada es muy rápida.

El diseño de un observador deslizante de segundo orden (SOSMO por su siglas en inglés Second Order Sliding Mode Observers), parte de la consideración de un sistema de la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(t, x_1, x_2, u) + \xi(t, x_1, x_2, u) \end{aligned} \quad (4)$$

donde $x_{(1,2)} \in \mathbb{R}^n$ son los estados del sistema, $u \in \mathbb{R}^m$ son las entradas del sistema, f un campo vectorial y ξ la incertidumbre del sistema. La forma del observador deslizante de segundo orden es:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + z_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f(x_1, \hat{x}_2, u, t) + z_2 \end{aligned} \quad (5)$$

siendo las variables de corrección

$$\begin{aligned} z_1 &= \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \lambda |x_1 - \hat{x}_1|^{1/2} \\ z_2 &= \operatorname{sgn}(x_1 - \hat{x}_1) \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

Definiendo $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$ y $e_2 = x_2 - \hat{x}_2$ se obtienen las ecuaciones del error como sigue

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 - \operatorname{sgn}(e_1) \lambda |e_1|^{1/2} \\ \dot{e}_2 &= F(x_1, \hat{x}_1, x_2, \hat{x}_2, u) - \operatorname{sgn}(e_1) \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

donde $F(x_1, \hat{x}_1, x_2, \hat{x}_2, u) = f(x_1, x_2, u) - f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u) + \xi(x_1, x_2, u)$. Siendo las variables de estado del sistema acotadas, se asegura la existencia de una constante f^+ , de manera que la desigualdad:

$$|F(t, x_1, \hat{x}_1, x_2, \hat{x}_2, u)| < f^+ \quad (8)$$

se cumple para cualquier valor posible de t, x_1, x_2, u .

Sean α y λ constantes que satisfagan las siguientes desigualdades

$$\begin{aligned} \alpha &> f^+ \\ \lambda &> \sqrt{\frac{2}{\alpha - f^+} \frac{(\alpha + f^+)(1 + p)}{(1 - p)}} \end{aligned} \quad (9)$$

donde p es una constante de sintonización, $0 < p < 1$ Davila y col. (2005).

Teorema 1 *Suponga que los parámetros del observador Ec. (6), son seleccionadas de acuerdo a las desigualdades mostradas en Ec. (9), y la condición Ec. (8) se cumple para el sistema Ec. (5). Entonces las variables estimadas por el observador, convergen en un tiempo finito a los estados del sistema Ec. (4) Davila y col. (2005).*

3.2 Características de la función de conmutación

Cuando la frecuencia de conmutación no es infinita, como sucede en cualquier implementación práctica, o en el caso de que existan dinámicas no modeladas, las conmutaciones generan oscilaciones de amplitud finita y alta frecuencia en las trayectorias al evolucionar sobre la variación del deslizamiento en Perruquetti y col. (2002) y Evangelista (2012) se mostró que los modos deslizantes presentan un comportamiento denominado *chattering*. Este fenómeno es el principal problema para poder implementar esquemas de estimación o control por modos deslizantes, por lo que surgieron algunos estudios con el fin de atenuar

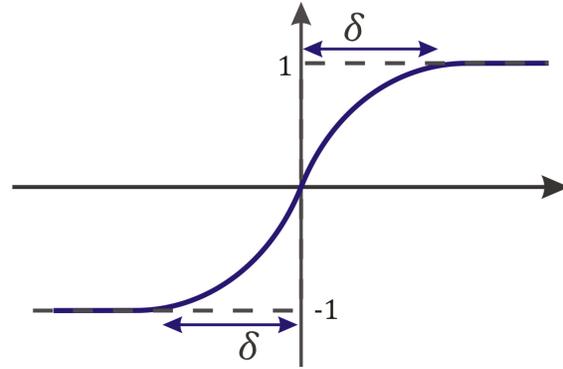


Fig. 1. Función de conmutación.

este comportamiento (Fridman, 2001; Bartolini y col., 2009; Boiko y col., 2007).

A pesar de que autores como Chen y col. (1999) han investigado distintas soluciones para la disminución del chattering, los autores presentan resultados mediante simulaciones. Alternativamente, en Edwards y col. (1998) se presenta una función de conmutación suave denominada sigmoide (ver Fig. 1) la cual es una aproximación suave de la función signo, gobernada por la siguiente ecuación:

$$\mathcal{V} = \frac{e}{|e| + \delta} \quad (10)$$

donde e para el caso de observadores, es el error de estimación y δ es un escalar positivo. Además, a medida que el valor de este parámetro es menor, la función de la Ec. 9 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 atenuación del chattering.

4 Aplicación al intercambiador de calor

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 contra flujos, la cual se encuentra localizada en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Para el diseño de los observadores de modos deslizantes se realizan las siguientes consideraciones. De acuerdo a la suposición $S3$, A , V_c y V_h , son conocidas y constantes. Las propiedades físicas del fluido ρ_c, ρ_h, C_{pc} y C_{ph} son conocidas y constantes.

- a) El flujo de agua de enfriamiento v_c y la temperatura de entrada del fluido caliente T_{hi}

son medibles y son las entradas del sistema u_1 y u_2 respectivamente.

- b) Las temperaturas de salida del intercambiador de calor T_{co} y T_{ho} son medidas, pero solo T_{ho} es la salida (y_1) utilizada para el diseño del observador.
- c) La temperatura de entrada agua de enfriamiento T_{ci} y el flujo de agua caliente v_h son medibles y se consideran constantes.

De acuerdo a las suposiciones y consideraciones anteriores, el observador por modos deslizantes de segundo orden se obtiene como se describe a continuación.

Para la adaptación del modelo matemático del intercambiador de calor a la forma del observador de segundo orden de la Ec. (4), las salidas seleccionadas para formar los estados $x_{2(1)}$ y $x_{2(2)}$ fueron las temperaturas de salida T_{co} y T_{ho} ; mientras que el error fue evaluado integrando cada estado tanto para el sistema real, así como para los observadores formando con ello los estados $x_{1(1)}$ y $x_{1(2)}$. De lo anterior, definiendo $\hat{x}_{2(1)} = \hat{T}_{co}$ y $\hat{x}_{2(2)} = \hat{T}_{ho}$, los observadores deslizante de segundo orden tienen la siguiente forma

$$\begin{aligned} \hat{x}_{1(1)} &= \hat{x}_{2(1)} + z_{1(1)} \\ \hat{x}_{2(1)} &= \frac{v_c}{V_c} \left(T_{ci} - \hat{T}_{co} \right) + \frac{UA}{\rho_c c_{pc} V_c} \Delta T_I + z_{2(1)} \\ \hat{x}_{1(2)} &= \hat{x}_{2(2)} + z_{1(2)} \\ \hat{x}_{2(2)} &= \frac{v_h}{V_h} \left(T_{hi} - \hat{T}_{ho} \right) - \frac{UA}{\rho_h c_{ph} V_h} \Delta T_I + z_{2(2)} \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} z_1 &= \lambda |x_1 - \hat{x}_1|^{1/2} \mathcal{V} \\ z_2 &= \alpha \mathcal{V} \end{aligned}$$

el símbolo $\hat{\cdot}$ define al estado estimado, es decir: \hat{x} es la estimación de x . La función de conmutación \mathcal{V} es

$$\mathcal{V} = \begin{cases} \frac{e_y}{|e_y| + \delta} & \text{si } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

con $y = [T_{co} \ T_{ho}]^T$, $\hat{y} = [\hat{T}_{co} \ \hat{T}_{ho}]^T$, $e_y = y - \hat{y}$.

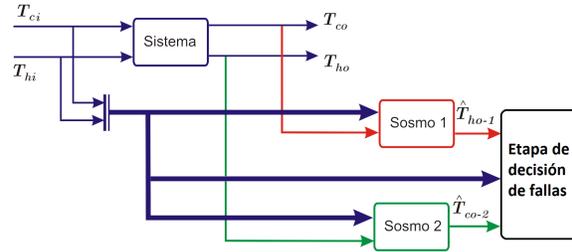


Fig. 2. Esquema de diagnóstico de fallas

5 Resultados experimentales

5.1 Esquema de diagnóstico de fallas

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la implementación del sistema de detección y localización de fallas en un intercambiador de calor. El esquema utilizado para el diagnóstico de fallas se muestra en la Fig. 2.

Es importante mencionar que el cálculo del coeficiente de transferencia de calor es realizado en línea para las condiciones de operación del proceso mediante el empleo de la Ec. (3) con la finalidad de tener mayor precisión en la estimación de las temperaturas de salida del intercambiador de calor (\hat{T}_{co} y \hat{T}_{ho}). Al reducir el error de estimación de las temperaturas y con el empleo del banco de observadores es posible detectar y localizar la falla de los sensores mediante la evaluación del residuo, es decir, que una vez que el valor de la temperatura medida por el sensor supere un umbral de temperatura establecido por el diseñador será indicativo de que el sensor ha fallado.

Las fallas en equipo por ensuciamiento se pueden observar en la degradación del coeficiente de transferencia de calor, ésta es una falla degradante, que usualmente tiene una velocidad menor de progreso. Las fallas en sensores por ruido se pueden evaluar a partir de la incertidumbre del instrumento.

5.2 Implementación del esquema de diagnóstico de fallas con falla en el flujo de agua fría

La primera prueba se realizó haciendo variar la entrada de flujo de agua fría v_c , como se muestra en la Fig.

3, mientras que la temperatura de agua caliente de entrada T_{hi} permaneció en un valor constante de 43°C .

El flujo volumétrico de entrada de agua caliente $v_h = 1.66 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y la temperatura de agua fría de entrada $T_{ci} = 26^\circ\text{C}$, se mantuvieron constantes opara efectos de esta prueba (ver Tabla 2). Siendo las condiciones iniciales de los observadores: $\hat{T}_{co}^{(0)} = 36^\circ\text{C}$ y $\hat{T}_{ho}^{(0)} = 40^\circ\text{C}$.

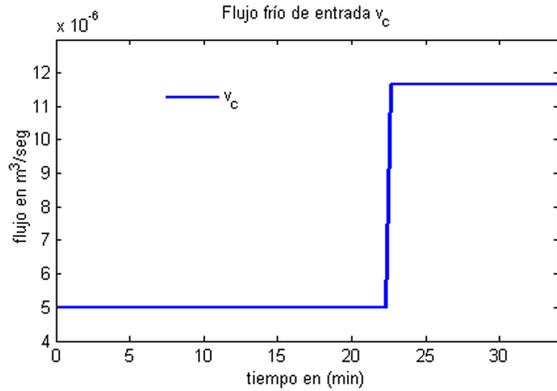


Fig. 3. Entrada de flujo frío.

Tabla 2. Valores de las variables sin cambio

Constantes	Valores
V_c	$134.99 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
V_h	$15.512 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
c_{pc}	$4174 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
c_{ph}	$4191 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
ρ_c	988.8 kg/m^3
ρ_h	973.7 kg/m^3
A_1	0.0154 m^2
A_2	0.0124 m^2

Los datos experimentales obtenidos durante el desarrollo de la prueba son mostrados en la Fig. 4 tanto para el flujo de agua de enfriamiento T_{co} como el flujo de agua caliente T_{ho} . En la Fig. 4 se muestra en (L1) las mediciones del proceso sin falla, y en (L2) las señales con fallas aditivas (las cuales son implementadas mediante la suma de un valor constante a la señal del sensor), estas fallas son activadas desde la interfaz gráfica (vea sección Interfaz gráfica) del usuario en tiempos diferentes para cada sensor. En (L3) y (L4) se muestran las estimaciones producidas por los observadores de segundo orden.

También se observa que al ocurrir una falla en cualquier sensor de salida, las estimaciones no

son afectadas y siguen el perfil de las medidas de temperatura de salida del sistema. Las fallas fueron introducidas en puntos de operación estable y en diferentes momentos de tiempo.

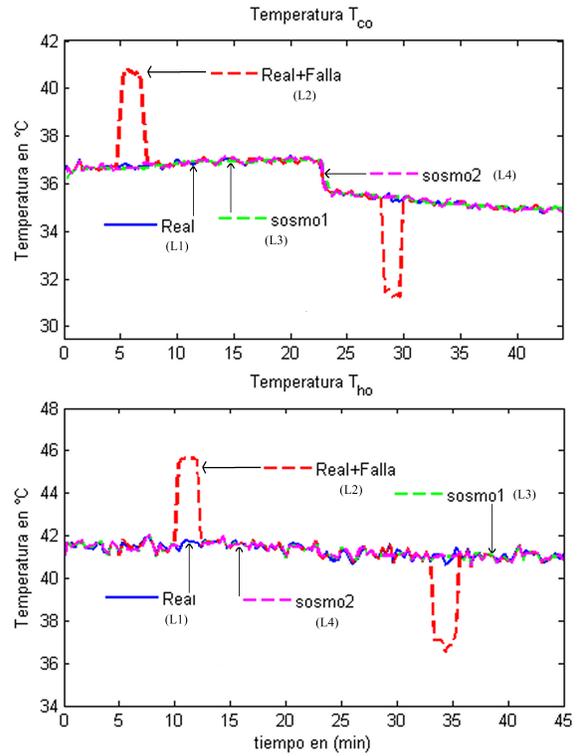


Fig. 4. Salidas estimadas T_{co} y T_{ho} .

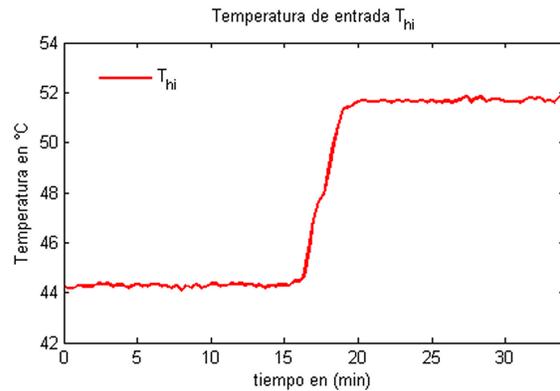


Fig. 5. Temperatura de entrada T_{hi} .

5.3 Implementación del esquema de diagnóstico de fallas con falla en el flujo de agua caliente

La segunda prueba se realizó haciendo variar la temperatura de agua caliente de entrada T_{hi} como se muestra en la Fig. 5 y manteniendo la entrada de flujo frío v_c constante a $6.7 \times 10^{-6} m^3/s$.

El flujo de entrada de agua caliente $v_h = 2 \times 10^{-5} m^3/s$ y la temperatura de agua fría de entrada $T_{ci} = 29^\circ C$ se mantuvieron constantes para efectos de esta prueba. Los valores iniciales de los observadores de segundo orden para esta prueba fueron de $\hat{T}_{co}^{(0)} = 38^\circ C$ y $\hat{T}_{ho} = 45^\circ C$.

Los datos experimentales obtenidos durante el desarrollo de la prueba son mostrados en la Fig. 6 tanto para el flujo de agua de enfriamiento T_{co} como el flujo de agua caliente T_{ho} . En la Fig. 6 se muestra en (L1), las señales sin fallas y en (L2) las señales con fallas aditivas (las cuales son implementadas mediante la suma de un valor constante a la señal del sensor). En (L3) y (L4) se muestran las estimaciones producidas por los observadores de segundo orden.

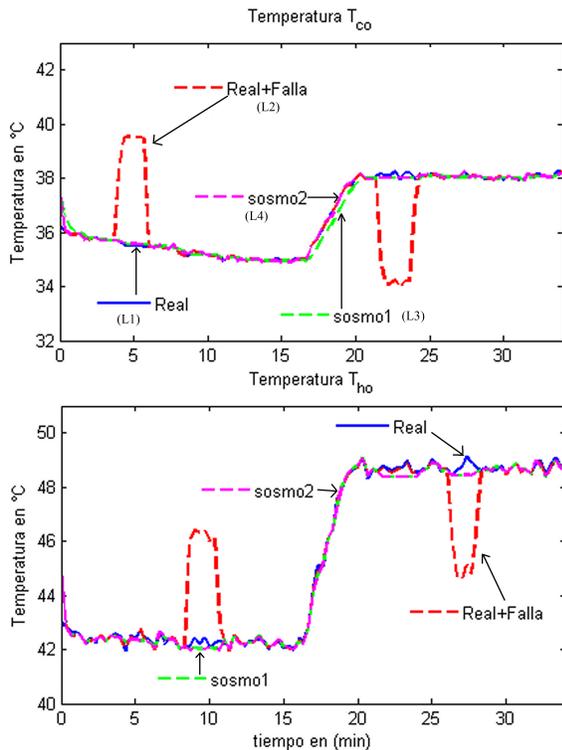


Fig. 6. Salidas estimadas T_{co} y T_{ho} .

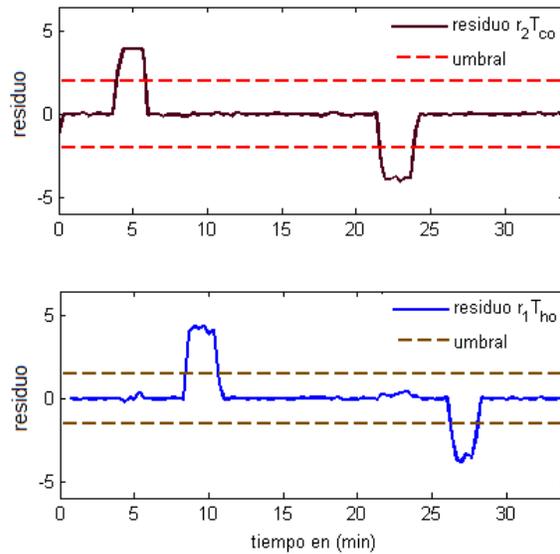


Fig. 7. Señales de error y umbrales de fallas.

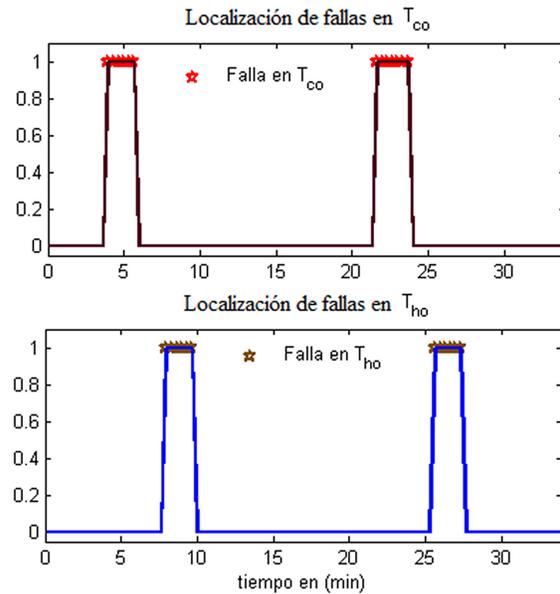


Fig. 8. Detección y localización de fallas

En las imágenes de la Fig. 6 puede verse que a pesar de la aparición de las fallas, los observadores siguen estimando la señal de manera correcta. Sin embargo, en las imágenes mencionadas, no es posible distinguir el error de estimación de los observadores. En la Fig. 7 se muestran los residuos y los umbrales propuestos para la detección de fallas en el sistema.

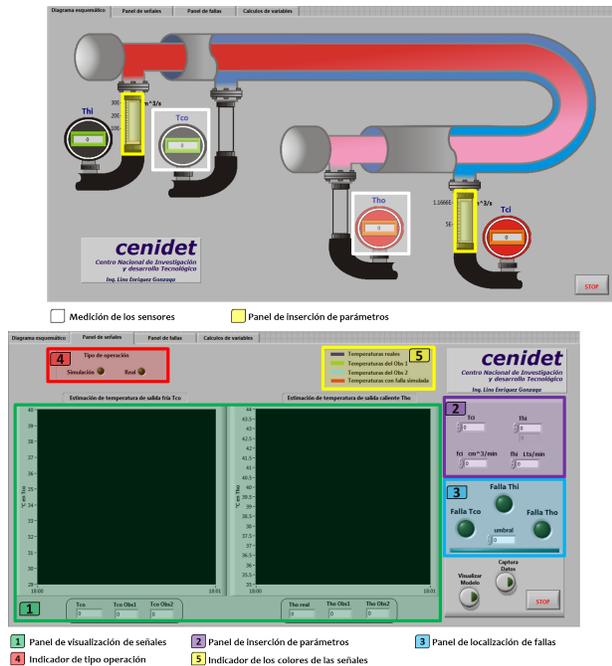


Fig. 9. Interfaz de usuario diseñada para la detección y localización de fallas.

Los umbrales de detección de fallas son escogidos de acuerdo al criterio del diseñador del sistema, en este trabajo se consideró un umbral entre los valores de $-ke_m < em < ke_m$, donde e_m es el error de medición $k = 10$. Es decir que el umbral escogido en el diseño del sistema FDI en este trabajo es ± 10 veces el valor del error de medición. Este umbral permite saber cuándo existe una falla y en que sensor está ubicada la falla.

La detección y localización de las fallas en los sensores de salida fueron realizadas mediante comparaciones entre los residuos y los umbrales propuestos, los cuales se mostraron en la Fig. 7.

Los resultados de la detección y localización mediante comparaciones son mostrados en la Fig. 8.

Dado que el algoritmo FDI emplea un banco de observadores es posible detectar fallas en cualquiera de los dos sensores (T_{co} y T_{ho}), señalando que el sistema no es capaz de continuar monitoreando si existen fallas simultáneas en ambos sensores, cuando existen fallas en más de un sensor ya sea simultáneamente o con retardo entre el tiempo de falla, el modelo y el sistema FDI se indeterminarán al ocurrir la segunda falla. Así mismo, la Ec.3 se indeterminará.

5.4 Interfaz gráfica

Con la finalidad de que el sistema fuera fácilmente monitoreado se desarrolló una interfaz gráfica. En la cual es posible realizar la tarea de supervisión. Esta interfaz fue creada con la finalidad de ayudar a un operador para detectar anomalías en el sistema, y de surgir alguna, las fallas que se presenten.

El panel mostrado en el inciso (a) de la Fig. 9 es el panel principal, ya que presenta una imagen esquemática del intercambiador de calor, en la que se representan los sensores con los que este cuenta, como son los sensores de temperatura y los indicadores de flujo. El inciso (b) de la Fig. 9 es el panel donde se pueden apreciar las señales medidas en el sistema, así como la estimación realizada por los observadores de segundo orden. Además, en este panel se introducen los valores de las variables que no son medidas directamente en el sistema; sin embargo son mostradas por los indicadores con los que cuenta el intercambiador. Otra característica importante de la interfaz, es que puede desplegar la alarma e indicarle al operador la presencia de una falla, independientemente del panel en el que el operador este monitoreando el sistema.

Conclusiones

La contribución de este trabajo radica en la implementación de un sistema FDI para detectar fallas en sensores con aplicación en intercambiadores de calor, ya que este tipo de procesos es ampliamente utilizado en la industria (química, petroquímica, alimentaria, etc.). En este trabajo se ha mostrado mediante el desarrollo de pruebas experimentales que es posible la implementación de un sistema de detección y localización de fallas en sensores, utilizando los observadores por modos deslizantes de segundo orden en un sistema cuyo modelo no es obtenido mediante la segunda derivada, como comúnmente se propone en la teoría de modos deslizantes de segundo orden. Sin embargo, los observadores y el esquema de detección de fallas mantienen su correcto funcionamiento, como se mostró en las pruebas experimentales. Además se pueden ajustar los valores de los umbrales de fallas en el sistema de detección y localización de acuerdo a las necesidades del proceso. La detección y localización de las fallas en el sistema pueden ser sintonizadas ajustando el valor de los umbrales de falla. Debido a que estos observadores de estado están diseñados

para detectar fallas en sensores únicamente, es posible detectar fallas aditivas mediante este método. En el modelo no se consideran perturbaciones causadas por mal funcionamiento del equipo esto limita al sistema FDI a detectar fallas en señales de sensores y no en equipo (como pudiera ser el ensuciamiento).

La interfaz gráfica diseñada en este trabajo puede clasificarse como una estación de diagnóstico y monitoreo, debido a que ayuda al operador a evaluar el estado del sistema para poder identificar la presencia de fallas de acuerdo a la señal de alarma que se obtenga en dicha interfaz.

Referencias

- Bartolini G., Punta E. (2009). Reduced-Order Observer and Chattering Reduction for Sliding Mode Control of Nonlinear Systems. *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009*, 8411-8416. Shanghai, P.R. China.
- 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.
- Brambilla D., Capisani L. M., Ferrara A., Pisu P. (2008). Second order sliding mode observers for fault detection of robot manipulators. En: *47th IEEE Conference on Decision and Control*, 2949-2954.
- Chen J., Patton R. (1999). Robust Model Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Kluwer Academic Publishers, 375-378.
- Davila J., Fridman L., Levant A., (2005). Second order sliding mode observer for mechanical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 50, 1785-1789.
- Edwards C., Spurgeon S. K., (1998). Sliding Mode Control: Theory and Applications. *Taylor and Francis* 7.
- Escobar R. F., Astorga-Zaragoza C. M., Téllez-Anguiano A. C., Juárez-Romero D., Hernández J. A., Guerrero-Ramírez G. V. (2011). Sensor fault detection and isolation via high-gain observers: Application to a double-pipe heat exchanger. *Isa Transactions* 50, 480-486.
- Evangelista C. A. (2012). Control de sistemas no lineales por modos deslizantes de segundo orden. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de La Plata.
- Fridman L. (2001). An averaging approach to chattering. *IEEE Transactions on Automatic Control* 46, 1260-1265.
- Hangos K., Bokor J., Szederkenyi G. (2004). Analysis and Control of Nonlinear Process Systems. Springer, 55-60
- Laursen M., Blanke M., Dustegor D. (2008). Fault diagnosis of a water for injection system using enhanced structural isolation. *International Journal Appl. Math. Comput.* 18, 593-603.
- Noura H., Theilliol D., Ponsart J., Chamssedine A. (2009). Fault-Tolerant Control Systems: Design and Practical Applications. Springer Dordrecht Heidelberg.
- Perruquetti W., Barbot J. P. (2002). Sliding Mode Control in Engineering. Marcel Dekker, 440-437.
- Pierri F. (2004). Modeling, control and fault diagnosis for chemical batch reactors. Tesis de Doctorado, Universidad de Basilicata, Italia.
- Persin S., Tovornik B. (2005). Real-time implementation of fault diagnosis to a heat exchanger. *Control Engineering Practice, Elsevier* 13, 1061-1069.
- Pierri F., Paviglianiti G. (2007). Observer-based actuator fault detection for chemical batch reactors: a comparison between nonlinear adaptive and h1-based approaches. En: *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 1-6.
- Rolink M., Boukhobza T., Sauter D. (2006). Sliding mode observer for fault actuators estimation and its application to the three tanks benchmark. En: *Workshop on Advanced Control and Diagnosis*, Nancy, France.
- Saif M., Ebrahimi B., Vali M. (2012). A second order sliding mode strategy for fault detection and fault-tolerant control of a MEMS optical switch. *Mechatronics, Elsevier* 22, 696-705.

- Sreedhar R., Fernandez B., Masada G. Y. (1993). Robust fault detection in nonlinear systems using sliding mode observers. En: *Second IEEE Conference on Control Applications*, 715-721.
- Veluvolu K., Soh Y., Cao W. (2007). Robust observer with sliding mode estimation for nonlinear uncertain systems. *IET Control Theory and Applications* 1, 1533-1540.
- Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kauri N. 2003, A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering* 27, 293-311.
- Wang G. B., Peng S. S., Huang H. P. (1997). A sliding observer for nonlinear process control. *Chemical Engineering Science* 52, 787-805.
- Weyer E., Szederkenyi, G., Hangos K. (2000). Grey box fault detection of heat exchangers. *Elsevier Science* 8, 121-291 13.
- Yan X.G., Edwards C. (2006). Nonlinear fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer. En: *45th IEEE Conference on Decision and Control*, 5573-5578.