

# Detección y aislamiento de fallas en el sistema térmico IFATIS

Salvador **Saucedo-Flores**<sup>1</sup>  
Efraín **Alcorta-García**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica,  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,  
Instituto Politécnico Nacional.  
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista,  
CP 07738, México, DF.  
MÉXICO.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Av. Universidad s/n, Ciudad Universitaria,  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, CP 66451.  
MÉXICO.

correo electrónico (email): [ingesauz@msn.com](mailto:ingesauz@msn.com)  
[ealcorta@ieee.org](mailto:ealcorta@ieee.org)

Recibido el 26 de noviembre de 2010; aceptado el 27 de mayo de 2011.

## 1. Resumen

Se resuelve el problema de detección y aislamiento de fallas para una planta piloto no lineal, orientada a desarrollar algoritmos de tolerancia a las fallas, auspiciada por la Unión Europea. Se retoma una forma novedosa de modelar las fallas de los sensores, de manera que cada falla física sea asociada a un conjunto adecuado de fallas matemáticas. Ello permite, mediante geometría diferencial, diseñar un FDI no lineal ligeramente extendido para tomar en cuenta la estructura del sistema. Se describen las técnicas del modelado, el diseño de los generadores de los residuales, la matriz de residuales y se termina con la simulación de sistema térmico de tres tanques del proyecto europeo IFATIS.

**Palabras clave:** detección y aislamiento de fallas (FDI), generador de residuales, control inteligente tolerante a fallas en sistemas integrados (IFATIS), sistemas hidráulicos, planta piloto.

## 2. Abstract (Detection and Isolation Problem in IFATIS Thermal System)

The fault detection and isolation problem is solved for a nonlinear pilot plant used on educational purposes in several

European countries. A novel technique to model the dynamics of the faults for the plant under study was used. That allows, by means of differential geometry, the design of a FDI taking into account the plant structure. Procedures for modeling and design of the residual generators are described, including the simulation for the three tank thermal/hydraulic system.

**Key words:** residual generator, fault detection and isolation (FDI), intelligent fault tolerant control in integrated systems (IFATIS), hydraulic systems, pilot plant.

## 3. Introducción

Al supervisar la correcta operación de plantas dinámicas, uno se interesa en la detección e identificación pronta de fallas en los componentes del hardware de control [1], [2]. La fase de detección consiste en la generación de señales de diagnóstico (residuales) disparados por una desviación de la planta desde el comportamiento esperado, con base en el procesamiento de los comandos de entrada y las mediciones de las salidas y, posiblemente, el uso del modelo dinámico. La fase de aislamiento consiste en la discriminación de la ocurrencia de una falla específica de un conjunto de fallas potenciales, lo cual se usa para la reconfiguración del sistema de control.

Cuando el modelo de la planta nominal (sin falla) está disponible, es natural modelar a la presencia de fallas como entradas adicionales que afectan la dinámica del sistema. Para plantas con dinámica lineal, varios métodos para modelar el sistema para FDI han sido propuestos en la literatura, *i. e.*, basándose en el filtro de Kalman, observadores de Luenberger, técnicas de paridad espacio o estimación de parámetros ([3]-[4]). Los ejemplos de aplicación incluyen sistemas de bombas centrífugas [1], sistemas de experimentación termo-hidráulica [5], fuga de válvulas en hornos de gas [6], turbinas industriales de gas [7] e intercambiadores de calor [8]. Para sistemas con dinámicas con no linealidades inherentes, el tratamiento usual es recurrir a aproximaciones lineales en el diseño FDI, lo que sin embargo, limita la validez del esquema a cierto punto de operación e introduce perturbaciones endógenas en la dinámica de los residuales.

Las dinámicas no lineales han sido directamente consideradas en métodos FDI basados en señales usando modelos ARMAX no lineales (*i. e.*, en [9] para una maquina de com-

bustión interna) o bien sistemas difusos (véase [10] para un sistema de tres tanques con modelado Takagi-Sugeno) o al explotar lo lineal de los parámetros del modelo (como en [4] y [11] para control adaptable de aeronaves). La detección robusta de fallas para sistemas generales no lineales ha sido considerada en [12]. Más recientemente, las técnicas FDI se han desarrollado de manera explícita para sistemas no lineales de la forma (véase [13] y [14])

$$\begin{aligned} \dot{x} &= g_0(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i + \sum_{k=1}^s \delta_k(x)f_k + \sum_{j=1}^d \eta_j(x)w_j \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (1)$$

*i.e.*, donde las dinámicas del estado:  $x \in R^n$  (así como las expresiones de la salida:  $y \in R^p$ ) son no lineales en, pero afines, en las entradas de control:  $u_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , en las entradas de falla,  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, s$  y en las perturbaciones:  $w_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, d$ . Aplicaciones en esta clase incluyen manipuladores de robots [13]-[14] y un horno industrial [15]. Los campos vectoriales  $g_0, g_1$  a  $g_d$  del sistema en (1) se asumen como perfectamente conocidos. Además, las entradas de falla y las perturbaciones aparecen solamente en las dinámicas del estado y no en la ecuación de salida. Empero, no se asume que se requiera la forma o los parámetros del comportamiento en el tiempo de la falla, en general. Como una consecuencia de ello, los métodos FDI basados en un modelo del proceso con falla de la forma (1) son útiles para tratar con averías de componentes de hardware (*i.e.*, actuadores o sensores) de cualquier tipo y comportamiento en tiempo, pero que no afecten la estructura de las dinámicas del sistema (*i.e.*, fallas de sistema son difíciles de tratar). Esto debe compararse con la manera en [12] y [4], que son capaces de detectar y aislar fallas de sistema con incertidumbre en el modelo, siempre que las mediciones del estado sean confiables, y que los cambios en la estructura de las dinámicas del sistema se puedan parametrizar mediante una clase de funciones de un conjunto finito de ciertas de ellas.

Para los sistemas no lineales en la forma (1), ciertas condiciones de geometría diferencial han sido dadas en [14], que son necesarias para la solución del problema FDI con fallas con posibilidad de ocurrencia simultánea. Tales condiciones, empero, se violan en muchas situaciones de interés práctico, notablemente cuando el número total de entradas de falla excede la dimensión del espacio del estado. En [19] se han propuesto varias maneras para relajar el problema FDI para el sistema (1), cuando no es solucionable en la formulación original de [14]. Una posibilidad es introducir la suposición adicional de la no ocurrencia simultánea de las fallas, lo que resulta en condiciones necesarias mucho más débiles para obtener detección y aislamiento.

Aquí se presenta, a través de un caso completo, los pasos relativos en el diseño no lineal del esquema de la detección y aislamiento para múltiples fallas no concurrentes en actuadores y fallas en sensores del estado. El proceso en consideración es un típico sistema termohidráulico, usado como banco de pruebas en la Unión Europea conocido como el proyecto IFATIS [17] y ya tomado como aplicación problema para otros métodos basados en aproximaciones lineales [18] o bilineales [19] de la dinámica del sistema. Ahora se tomará en cuenta como un modelo no lineal de un sistema tolerante a fallas [5].

Las fallas consideradas pueden afectar a todas los actuadores (bombas hidráulicas y resistores eléctricos) y a todos los sensores para medición de estado (transductores de nivel y termómetros) que se suponen disponibles para todas las variables de estado.

En una etapa preliminar de modelado se deriva, para la planta con fallas, ecuaciones dinámicas que tienen la estructura (1). Mientras que las fallas de los actuadores de cualquier tipo (pérdida de energía, deriva, saturación, etc.) pueden directamente modelarse en esta forma, ello no es tan inmediato para fallas que afectan a los sensores que definen al estado, debido a la dependencia no lineal del modelo del sistema en las variables de estado. Por tanto, se propone para tal clase de fallas una nueva manera de modelar, donde cada falla de un sensor físico es modelada por un conjunto adecuado de (siempre concurrentes) entradas de falla. Correspondientemente, se extiende a esta situación más general las condiciones necesarias (y dada la disponibilidad del estado completo, también suficientes) por no concurrencia FDI, las que son dadas en [16] para el caso estándar cuando cada falla física es modelada mediante sólo una entrada de falla. Basados en el cumplimiento de tales condiciones de naturaleza geométrica, se ilustra el diseño de generadores de residuales y de la lógica combinatoria que permite aislamiento perfecto de las fallas. El rendimiento de este esquema híbrido de FDI se demuestra con la simulación numérica, donde se toma en cuenta la presencia de entradas no modeladas y ruido de mediciones. Una alternativa moderna a este método viene dada en [20], la cual se basa en redundancia analítica no lineal.

#### 4. Sistema de calentamiento de tres tanques

El proceso usado como caso de estudio en este breve documento está compuesto de tres tanques cilíndricos. De acuerdo con el esquema de la Fig. 1, tanques 1 y 2 se usan para precalentar los fluidos suministrados por la bomba 1 y la bomba 2. La temperatura del fluido en estos tanques puede ser ajustada por medio de dos resistores eléctricos. El tercer

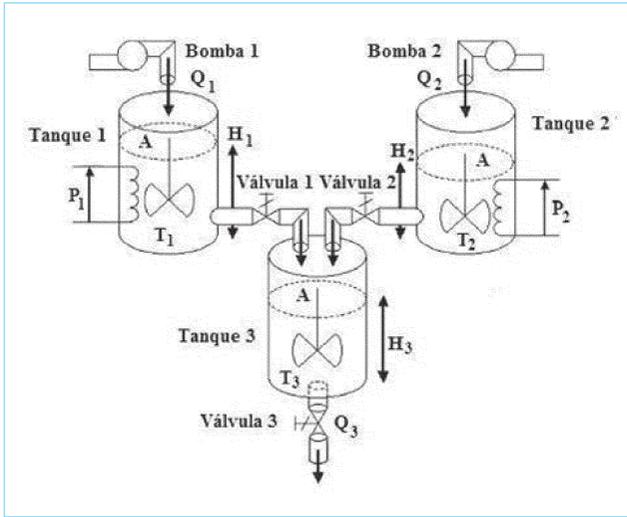


Fig. 1. Diagrama esquemático del sistema de calentamiento de tres tanques.

tanque permite la mezcla de los flujos que vienen desde los dos tanques de precalentamiento. Mediciones del nivel y la temperatura están disponibles para los tres tanques. El objetivo del control es el regular el nivel del fluido y su temperatura en el tanque 3. Al escribir las ecuaciones del balance de la masa y energía para cada uno de los tres tanques resulta en un modelo no lineal, afín en sus entradas, de la forma:

$$\dot{x} = g_0(x) + \sum_1^4 g_i(x)y_i \quad (2)$$

En ausencia de fallas en los sensores, la salida del sistema coincide plenamente con el vector de estado  $x = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ T_1 \ T_2 \ T_3]^T$ , con  $H_i$  el nivel del fluido y  $T_i$  respectivamente, la temperatura en el tanque  $i$ . En (2) se da el vector  $u = [Q_1 \ Q_2 \ P_1 \ P_2]^T$  realmente aplicado en la entrada: (el cual puede ser diferente de la entrada comandada en caso de falla), con  $Q_i$  y  $P_i$  la tasa de flujo y, respectivamente, la energía calorífica suministrada al tanque  $i$ . La expresión de los campos vectoriales viene dada por:

$$g_0 = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -\alpha_1 \sqrt{x_1} \\ -\alpha_2 \sqrt{x_2} \\ \alpha_1 \sqrt{x_1} + \alpha_2 \sqrt{x_2} - \alpha_3 \sqrt{x_3} \\ 0 \\ 0 \\ -\alpha_1 \sqrt{x_1} (x_6 - x_4) / x_3 - \alpha_2 \sqrt{x_2} (x_6 - x_5) / x_3 \end{bmatrix}$$

$$g_1 = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{(x_4 - T_{1i})}{x_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad g_2 = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{(x_5 - T_{2i})}{x_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$g_3 = \frac{1}{Apc} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{x_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad g_4 = \frac{1}{Apc} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{x_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

En las expresiones dadas,  $A$  es la sección de los tanques,  $c$  es el calor específico del fluido,  $\rho$  es su densidad, y  $T_{1i}$  y  $T_{2i}$ , las temperaturas del fluido a las entradas de los tanques 1, 2, y  $\alpha_i$  el recíproco del (constante) estrangulamiento de la válvula de salida  $i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Notar que los campos vectoriales del sistema  $g_i$ ,  $i = 0, \dots, 4$  son suaves en la región de interés en el estado-espacio.

## 5. Modelado de fallas

Se supone que el sistema puede verse afectado por fallas de los actuadores que suministran los comandos de entrada  $u_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , y de los sensores que brindan medidas de las variables de estado  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ . Por tanto, el número total de fallas posibles afectando al sistema es:  $s = 10$ . Ya que este número es mayor que la dimensión del estado espacio, las condiciones necesarias para el FDI dado en [14] para fallas posiblemente concurrentes son obviamente (y estructuralmente) violadas. En consecuencia, siguiendo el método en [16] se relaja el problema FDI al suponer que a lo más una falla puede afectar al sistema en cualquier tiempo (no concurrencia de fallas).

### A. Fallas de actuadores

Al ser el modelo (2) afín en las entradas de control, las fallas de los actuadores pueden simplemente ser modeladas mediante un vector de entradas con fallas  $f_u$  definido como:

$$f_u = u - u_c \quad (3)$$

donde  $u_c$  es la entrada del comando de control. Reemplazando la expresión (3) en la dinámica del estado del sistema (2) se obtiene:

$$\dot{x} = g_0(x) + \sum_{i=1}^4 g_i(x)u_{ci} + \sum_{i=1}^4 \delta_{ui}(x)f_{ui} \quad (4)$$

Con  $\delta_{ui}(x) = g_i(x)$ . La ecuación (4) incluye los efectos de las fallas de los actuadores y todavía es afín en las entradas (control y fallas), por tanto, permite la aplicación directa de las técnicas no lineales del FDI en [12] y [16].

## B. Fallas de sensores

Al enfocarse en el modelado de fallas de sensores que dan mediciones de las variables de estado. El modo más natural de tomar en cuenta la posible ocurrencia de tales fallas sería definiendo la falla en la medición  $k$ ,  $k = 1, \dots, n$ , como:

$$F_{x_k} = x_k - y_k \quad (5)$$

*i. e.* como la diferencia entre valor real y valor medido de la  $k$ -ésima variable de estado. Sin embargo, este modelado conduce ya sea a la aparición de entrada de fallas en las ecuaciones de salida ( $y = x - F_x$ ) o a un modelo que no es lineal en las entradas de fallas de sensores (cuando el estado se reemplaza por la expresión  $y + F_k$  en (2)).

Se propone entonces un procedimiento diferente para modelar esta clase de fallas, el cual dé como resultado la estructura deseada (1) para las ecuaciones del sistema. Como se mostró en [3], esto se obtiene al introducir un conjunto adecuado  $\vartheta_k \geq 1$  de entradas de falla  $F_{x_k}$ ,  $k = 1, \dots, \vartheta_k$ , en vez de las cantidades naturales para falla  $F_{x_k}$  de (5). Esto implica que la correspondencia uno a uno de (5) entre un evento físico (la falla de un transductor) y la representación matemática (entrada de falla del sensor) se pierde. Por tal razón, en el resto del documento a menudo se necesita distinguir entre la falla física del sensor, denotada por simplicidad mediante  $F_{x_k}$  como en (5), y las correspondientes entradas de fallas matemáticas.

Siempre que ocurra una falla física de un sensor (*i. e.*, cuando  $x_k \neq y_k$ ), todas sus entradas de falla asociadas llegarán a ser genéricamente no cero, aunque con comportamientos completamente diferentes en el tiempo y, en general, con una interpretación física directa más bien intuitiva. De acuerdo con este modelado, para detectar y aislar una simple falla física del sensor de estado  $k$ , será suficiente el reconocer la ocurrencia de cualesquiera (una o más) de las entradas de falla matemáticas. Esto es con el afán de aislar un conjunto dado de fallas de las otras, como se establece en [16]. Para la falla genérica  $k$  de sensor, se propone el procedimiento de modelado siguiente:

1) Buscar en el modelo del sistema todas las expresiones  $\Phi_{ki}(x, u)$  diferentes (en general, no lineales), implicando

$x_k$  y de modo que el modelo sea afín en  $\Phi_{ki}(x, u)$ . Para la variable  $x_1$ , por ejemplo, es:

$$\Phi_{1,1} = \frac{\alpha_1}{A} \sqrt{x_1}$$

$$\Phi_{1,2} = \left[ -\frac{x_4 - T_{1i}}{A} + \frac{u_3}{A\rho c} \right] \frac{1}{x_3}$$

2) Por cada expresión  $\Phi_{ki}(x, u)$  hallada en el paso 1, definir la entrada de falla  $f_{x_k,i} = \Phi_{ki}(x, u) - [\Phi_{ki}(x, u)/x_k] = y_k$ , *i. e.* el error inducido en la computación de  $\Phi_{ki}(x, u)$  por el uso del valor medido  $y_k$  en lugar del valor real  $x_k$ , y computar el correspondiente campo vectorial de la falla  $\delta_{x_k,i}(x)$ . Se denotará el número de fallas introducidas de esta manera por  $\vartheta_k - 1$ .

Notar que  $f_{x_k,i}$  es, por definición, sólo afectado por una falla del sensor  $k$  del estado (lo que es consistente con la suposición de no concurrencia), y es cero siempre que  $F_{x_k} = 0$ , *i. e.* cuando  $x_k = y_k$ . Como un resultado de este paso del modelado, toda ocurrencia de la expresión  $\Phi_{ki}(x, u)$  en el modelo del sistema se puede reemplazar mediante  $\Phi_{ki}(x, u)/x_k = y_k + f_{x_k,i}$ , y el modelo es ciertamente afín en la entrada de falla  $f_{x_k,i}$ . Notar que el lado derecho de (2) sólo depende ahora de la variable  $y_k$  y no de  $x_k$ .

3) Definir la posterior entrada de falla  $f_{x_k,\vartheta_k} = \dot{x}_k - \dot{y}_k$ . La introducción de esta entrada adicional en el modelo permite escribir también el lado izquierdo de la ecuación  $k$  del sistema en términos de la nueva variable  $y_k$  (con dinámica:  $\dot{y}_k = \dot{x}_k + f_{x_k,i}$ ). El campo vectorial de falla asociado a este  $f_{x_k,\vartheta_k}$  es  $\delta_{x_k,\vartheta_k} = -I_k$ , por tanto, ( $I_k$  es la columna  $k$  de la matriz identidad  $n \times n$ ).

4) Si, para dos índices  $i, j$ , se puede escribir  $\delta_{x_k,i} = \beta(x)\delta_{x_k,j}$  para alguna función real  $\beta(x)$ , hacer entonces  $f_{x_k,i} = f_{x_k,j} + \beta(x)f_{x_k,i}$  y eliminar  $f_{x_k,i}$  (el campo vectorial  $\delta_{x_k,i}$  permanece igual). Con un ligero abuso de notación, se usa el símbolo  $\vartheta_k$  para indicar el número final de la entrada  $k$  de falla matemática correspondiente a la falla del sensor  $k$  del estado.

Como resultado de este procedimiento general de modelado, en el caso bajo estudio a considerar, se introducen las siguientes entradas de falla:

• Por falla en el sensor 1 ( $\vartheta_1 = 3$ )

$$f_{x_1,1} = \frac{\alpha_1}{A} (\sqrt{x_1} - \sqrt{y_1})$$

$$f_{x_1,2} = \left[ -\frac{x_4 - T_{1i}}{A} u_1 + \frac{u_3}{A\rho c} \right] \left[ \frac{1}{x_1} - \frac{1}{y_1} \right]$$

$$f_{x_1,3} = \dot{x}_1 - \dot{y}_1$$

- Por falla en el sensor 2 ( $\vartheta_2 = 3$ )

$$f_{x_2,1} = \frac{\alpha_2}{A} (\sqrt{x_2} - \sqrt{y_2})$$

$$f_{x_2,2} = \left[ -\frac{x_5 - T_{2i}}{A} u_2 + \frac{u_4}{\rho c} \right] \left[ \frac{1}{x_2} - \frac{1}{y_2} \right]$$

$$f_{x_2,3} = \dot{x}_2 - \dot{y}_2$$

- Por falla en el sensor 3 ( $\vartheta_3 = 2$ )

$$f_{x_3,1} = \frac{\alpha_3}{A} (\sqrt{x_3} - \sqrt{y_3}) - (\dot{x}_3 - \dot{y}_3)$$

$$f_{x_3,2} = \left[ -\alpha_1 \frac{x_6 - x_4}{A} \sqrt{x_1} - \alpha_2 \frac{x_6 - x_5}{A} \sqrt{x_2} \right] \left[ \frac{1}{x_3} - \frac{1}{y_3} \right]$$

- Por falla en el sensor 4 ( $\vartheta_4 = 2$ )

$$f_{x_4,1} = \frac{u_1}{Ax_1} (x_4 - y_4) - (\dot{x}_4 - \dot{y}_4)$$

$$f_{x_4,2} = -\frac{\alpha_1}{Ax_3} \sqrt{x_1} (x_4 - y_4)$$

- Por falla en el sensor 5 ( $\vartheta_5 = 2$ )

$$f_{x_5,1} = \frac{u_2}{Ax_2} (x_5 - y_5) - (\dot{x}_5 - \dot{y}_5)$$

$$f_{x_5,2} = -\frac{\alpha_2}{Ax_3} \sqrt{x_2} (x_5 - y_5)$$

- Por falla en el sensor 6 ( $\vartheta_6 = 1$ )

$$f_{x_6,1} = -\frac{\alpha_1 \sqrt{x_1} + \alpha_2 \sqrt{x_2}}{Ax_3} (x_6 - y_6) - (\dot{x}_6 - \dot{y}_6)$$

Ahora que las salidas  $y_1, \dots, y_6$  se toman en cuenta como las nuevas variables de estado para la dinámica del sistema, la estructura general de (1) se ha recuperado. El modelo definitivo, incluyendo el efecto de todas las fallas (no simultaneas) es entonces:

$$\dot{y} = g_0(y) + \sum_{l=1}^4 g_l(y) u_{c,l} + \sum_{i=1}^4 \delta_{u,i} f_{u_i} + \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^{\vartheta_k} \delta_{x_{k,j}} f_j \quad (6)$$

donde se omite la fórmula trivial de la salida. La ecuación (6), que modela el sistema con fallas, se expresa en términos de los comandos de control disponibles  $u_c$  y las salidas medidas  $y$ , y es afín en todos los controles y todas las fallas, como

se pedía. En otras palabras, toda discrepancia entre sistema sin falla y sistema con falla se contempla dentro del modelo desarrollado con las entradas de fallas dado por (6), el cual se puede compactar aún más:

$$\dot{y} = g_0(y) + \sum_{l=1}^4 g_l(y) u_{c,l} + \sum_{k=1}^S \sum_{j=1}^{h_k} \delta_{k,j} f_{x_{k,j}} \quad (7)$$

Con  $m = 4$ ,  $s = 10$ , etc. Notar que los ruidos de entrada y de mediciones no están incluidos en (7), ni se emplean para el diseño del FDI. Se intuye que dicho ruido no se puede distinguir de las fallas de los actuadores ni de las fallas de los sensores. Por ello, se emplean zonas de umbral para definir si cierta falla se ha disparado al generar los residuales de la siguiente sección.

## 6. Diseño de los generadores de residuales

Al suponer que todo el estado es medido, el diseño de residuales para el modelo (7) requiere que para todo par  $(i,k)$  se defina una función adecuada de desacople de salida  $z = \phi(y)$  cuya dinámica esté afectada por al menos una de las entradas de falla asociadas con  $F_i$  y no asociada con ninguna de las entradas de falla asociadas con  $F_k$ .

Luego, se puede diseñar un observador estándar no lineal con una dinámica lineal del error [7]. En particular, la dinámica del estado  $\varepsilon$  de este generador/observador es una copia del modelo nominal (sin fallas) de la dinámica de más un término de corrección  $K(z - \varepsilon)$  que hace que el error de observación/residual  $r = z - \varepsilon$  tienda asintóticamente a cero cuando no hay fallas.

En [5] se dan las condiciones teóricas para poder diseñar los generadores de residuales que presenten estabilidad y que tiendan asintóticamente a cero cuando exista ausencia de fallas. Entre dichas condiciones está la no simultaneidad de fallas. Otra condición importante es que para todo par de fallas  $F_i, F_k$  se pueda definir un sistema dinámico que se vea afectado por una de ellas y que no sea afectado por la otra. La tabla 1 detalla los seis generadores de residuales que conforman el FDI para este caso de sistema no lineal. Es conveniente, además, formar la matriz de residuales cuyos elementos binarios relacionan a cada falla física con cada residual, como muestra la tabla 2.

En este caso dicha matriz es de  $10 \times 6$ , para diez fallas y seis residuales.

Notar que en la tabla 2 ningún par de fallas físicas excita al mismo conjunto de residuales, lo que permite aislar a cada una de las fallas.

**Tabla 1.** En [5] se propone el siguiente conjunto de generadores para el caso en consideración.

**GENERADOR DE RESIDUALES GR<sub>1</sub>** ( $z_1 = y_1$ )

$$\dot{\epsilon}_1 = -\frac{\alpha_1}{A} \sqrt{y_1} + \frac{1}{A} u_{c1} + K_1(z_1 - \epsilon_1)$$

$$r_1 = K_1(z_1 - \epsilon_1)$$

**GENERADOR DE RESIDUALES GR<sub>2</sub>** ( $z_2 = y_2$ )

$$\dot{\epsilon}_2 = -\frac{\alpha_2}{A} \sqrt{y_2} + \frac{1}{A} u_{c2} + K_2(z_2 - \epsilon_2)$$

$$r_2 = K_2(z_2 - \epsilon_2)$$

**GENERADOR DE RESIDUALES GR<sub>3</sub>** ( $z_3 = y_1(y_4 - T_{2i})$ )

$$\dot{\epsilon}_3 = -\frac{\alpha_1}{A} (y_4 - T_{1i}) \sqrt{y_1} + \frac{1}{A\rho c} u_{c3} + K_3(z_3 - \epsilon_3)$$

$$r_3 = K_3(z_3 - \epsilon_3)$$

**GENERADOR DE RESIDUALES GR<sub>4</sub>** ( $z_4 = y_2(y_5 - T_{2i})$ )

$$\dot{\epsilon}_4 = -\frac{\alpha_2}{A} (y_5 - T_{2i}) \sqrt{y_2} + \frac{1}{A\rho c} u_{c4} + K_4(z_4 - \epsilon_4)$$

$$r_4 = K_4(z_4 - \epsilon_4)$$

**GENERADOR DE RESIDUALES GR<sub>5</sub>** ( $z_5 = y_3$ )

$$\dot{\epsilon}_5 = -\frac{\alpha_1}{A} \sqrt{y_1} + \frac{\alpha_2}{A} \sqrt{y_2} - \frac{\alpha_3}{A} \sqrt{y_3} + K_5(z_5 - \epsilon_5)$$

$$r_5 = K_5(z_5 - \epsilon_5)$$

**GENERADOR DE RESIDUALES GR<sub>6</sub>** ( $z_6 = y_3 y_6$ )

$$\dot{\epsilon}_6 = -\frac{\alpha_1}{A} y_4 \sqrt{y_1} + \frac{\alpha_2}{A} y_5 \sqrt{y_2} - \frac{\alpha_3}{A} y_6 \sqrt{y_3} + K_6(z_6 - \epsilon_6)$$

$$r_6 = K_6(z_6 - \epsilon_6)$$

## 7. Simulación numérica

Para verificar que el FDI propuesto trabaje bien sobre el modelo de la planta termo-hidráulica bajo escrutinio, se hizo una simulación con los siguientes datos numéricos:

**Tabla 2.** Matriz de residuales y lógica de aislamiento de fallas.

Residual Falla física	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$
$F_1 = f_{u1}$	1	0	0	0	0	0
$F_2 = f_{u2}$	0	1	0	0	0	0
$F_3 = f_{u3}$	0	0	1	0	0	0
$F_4 = f_{u4}$	0	0	0	1	0	0
$F_5 = f_{x1}$	1	0	1	0	1	1
$F_6 = f_{x2}$	0	1	0	1	1	1
$F_7 = f_{x3}$	0	0	0	0	1	1
$F_8 = f_{x4}$	0	0	1	0	0	1
$F_9 = f_{x5}$	0	0	0	1	0	1
$F_{10} = f_{x6}$	0	0	0	0	0	1

$$\alpha_1 = 0.0067 \text{ (dm)}^{5/2}/\text{s} \quad \alpha_2 = 0.0096 \text{ (dm)}^{5/2}/\text{s}$$

$$\alpha_3 = 0.0212 \text{ (dm)}^{5/2}/\text{s} \quad A = 1.54 \text{ (dm)}^2$$

$$c = 4.18\text{e}3 \text{ J/kg} \quad \rho = 1.0 \text{ kg/L}$$

$$T_{1i} = 15.0 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{2i} = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{2o} = 22.0 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{3o} = 19.78 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{1o} = 17.0 \text{ }^\circ\text{C} \quad H_{1o} = 4.0 \text{ dm}$$

$$H_{2o} = 3.0 \text{ dm} \quad H_{3o} = 2.0 \text{ dm}$$

$$Q_{1o} = 1.333 \times 10^{-2} \text{ L/s} \quad Q_{2o} = 1.667 \times 10^{-2} \text{ L/s}$$

$$P_{1o} = 111.467 \text{ watts} \quad P_{2o} = 139.333 \text{ watts}$$

Los residuales sólo se usan para indicar la existencia de fallas y no para compensar las fallas, es decir, fuera de línea. De los residuales de la figura 3 se puede constatar que, de acuerdo con la tabla 2, cada residual se ve afectado por al menos una falla física. Las fallas de los actuadores excitan uno, y sólo uno, de los residuales  $r_1, \dots, r_4$ . Las fallas de los sensores excitan, en cambio, más de un residual. Las ganancias  $K_i$  de la tabla 1 para cada generador de residual son:

$$[0.05 \ 0.05 \ 0.03 \ 0.03 \ 0.05 \ 0.05]$$

para  $i = 1, \dots, 6$  y se fijaron por prueba y error. La teoría de las desigualdades entre matrices, LMI, puede servir para el cálculo óptimo de tales ganancias, según sea el nivel de ruido imperante.

## 8. Conclusiones

Se presentó un estudio parcial para el diseño de un FDI no lineal, usando el modelo térmico IFATIS para fallas no simultáneas en actuadores y en transductores.

Se revisó el método propuesto para modelar fallas derivado de la teoría de la geometría diferencial, de modo de obtener

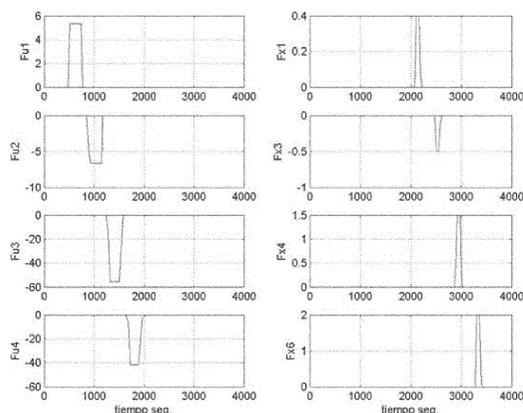


Fig. 2. Fallas de actuadores y de sensores.

fórmulas para las ecuaciones del estado que sean afines en las entradas y ecuaciones de salida que sean independientes de dichas entradas.

Los generadores de residuales conforman una batería de sistemas dinámicos no lineales con la estructura de observadores no lineales que se asemejan a los observadores tradicionales [21].

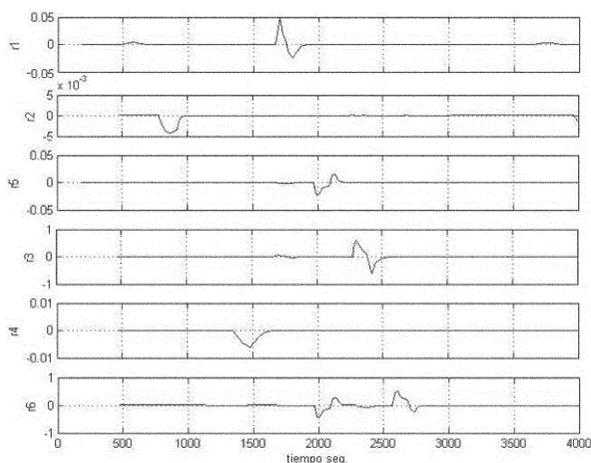


Fig. 3. Evolución de residuales en el tiempo.

## 9. Referencias

- [1] C. S. Kallsoe, V. Cocquempot, R. Izadi-Zamanabadi, "Model based fault detection in a centrifugal pump application", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 14, núm. 2, marzo 2006, pp. 204-215.
- [2] F. Caccavale y L. Villani, Eds., "Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronics Systems", in *STAR*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003, vol. 1.
- [3] E. Alcorta García y P. M. Frank, "Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: a survey," *Control Engineering Practice*, vol. 5, núm. 5, pp. 663-670, 1997.
- [4] R. N. Riggins, y W. B. Ribbens, "Designed inputs for detection and isolation of failures in the state transition matrices of dynamic systems" *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 5, núm. 2, marzo 1997, pp. 149-162.
- [5] R. Mattone y A. de Luca, "Nonlinear Fault Detection and Isolation in a Three-Tank", *Heating System Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 14, núm. 6, noviembre 2006 pp. 1158-1166.
- [6] Jong-Yeob Shin y C. M. Belcastro, "Performance analysis on fault tolerant control system" *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 14, núm. 5, septiembre 2006, pp. 920-925.
- [7] S. Simani, C. Fantuzzi y S. Beghelli, "Diagnosis techniques for sensor faults of industrial processes," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 8, núm. 5, pp. 848-855, septiembre 2000.
- [8] Y. Peng, A. Yousouf, P. Arte, y M. Kinnaert, "A complete procedure for residual generation and evaluation with application to a heat exchanger," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 5, núm. 6, pp. 542-555, noviembre 1997.
- [9] E. Laukonen, K. Passino, V. Krishnaswami, G-C. Luh, y G. Rizzoni, "Fault detection and isolation for an experimental internal combustion engine via fuzzy identification," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 3, núm. 3, pp. 347-355, junio 1995.
- [10] E. Alcorta-García y S. Saucedo-Flores, "Fault detection and isolation based on Takagi-Sugeno modeling" *Intelligent Control. 2003 IEEE International Symposium on*, pp. 673-678.
- [11] D. Ye y G. H. Yang, "Adaptive Fault-Tolerant Tracking Control Against Actuator Faults With Application to Flight Control", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 14, núm. 6, noviembre 2006, pp. 1088-1096.
- [12] C. De Persis y A. Isidori, "A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. 46, núm. 6, pp. 853-865, junio 2001.
- [13] W. Dixon, I. Walker, D. Dawson, y J. Hartranft, "Fault detection for robot manipulators with parametric

- uncertainty: A prediction-error-based approach," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 16, núm. 6, pp. 689-699, diciembre 2000.
- [14] A. De Luca y R. Mattone, "Actuator fault detection and isolation using generalized momenta," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 2003, pp. 634-639.
- [15] D.-L. Yu, "Diagnosing simulated faults for an industrial furnace based on bilinear model," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 8, núm. 3, pp. 435-442, junio 2000.
- [16] R. Mattone y A. De Luca, "Relaxed fault detection and isolation: An application to a nonlinear case study," *Automatica*, vol. 42, núm. 1, pp. 109-116, 2006.
- [17] D. Sauter, F. Hamelin, y S. Lèger, *Heating system benchmark for fault detection and isolation and fault tolerant control IFATIS*, University of Nancy, Nancy, France, Rep. IFAN012R01, 2003.
- [18] S. Lèger, F. Hamelin, y D. Sauter, "Fault detection and isolation in dynamic systems using principal component analysis-application to an heating system benchmark," *5th IFAC Symp. Fault Detection, Supervision Safety Tech. Process.*, Washington, DC, 2003.
- [19] L. El Bahir y M. Kinnaert, "Fault detection and isolation for a three tank system based on a bilinear model of the supervised process," in *Proc. UKACC Int. Conf. Contr.*, 1998, pp. 1486-1491.
- [20] M. L. Leuschen, I. D. Walker y Cavallaro, J.R.; "Fault residual generation via nonlinear analytical redundancy" *Control Systems Technology, IEEE Trans.* vol. 13, núm. 3, mayo 2005, pp. 452-458.
- [21] E. Alcorta y P. M. Frank, 1999 "A Novel Design of Structured Observer-Based Residuals for FDI", *Proceedings of the American Control Conference San Diego, California*, junio 1999, pp. 1341-1345

# Periódica Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias

<http://www.dgbiblio.unam.mx/>

[http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local\\_base=PER01](http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local_base=PER01)