

## ESQUEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN OBSERVADORES DE TIEMPO DISCRETO

Emanuel Bernardi<sup>\*(1)</sup>, Eduardo Adam<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco, Av. de la Universidad 501, San Francisco, Córdoba.

<sup>(2)</sup> Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química, Santiago del Estero 2854, Santa Fe, Santa Fe.

\*E-mail: bernardiemmanuel@gmail.com

### INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas de control están presentes en casi todos los aspectos de nuestras vidas, su implementación va desde las formas más sencillas en elementos del hogar, hasta las aplicaciones más complejas en aviónica, industrias químicas, petroquímicas y nucleares (Gertler, 1998).

El diseño de un controlador convencional, ante un evento como el mal funcionamiento de un actuador, sensor u otro componente del sistema, puede resultar en un rendimiento insatisfactorio, o incluso llevar al sistema a la inestabilidad. Para superar estas debilidades, resulta necesario el desarrollo de sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallas (FDD) capaces de inferir, en una fase temprana de su desarrollo, la ocurrencia de una falla e indicar la razón que la causó, conociendo en detalle las anomalías del sistema. Los sistemas FDD, usualmente, llevan a cabo tres tareas principales: detección de fallas, aislamiento de fallas y estimación de fallas (Gertler, 1988, 1998; Isermann, 2006).

En base a lo previamente expuesto, el presente artículo presenta el diseño de un conjunto de observadores de orden reducido para el desarrollo de un esquema FDD de tiempo discreto, capaz de detectar, aislar y diagnosticar el funcionamiento defectuoso de actuadores en sistemas no lineales, que aceptan representación Lineal de Parámetros Variables (LPV), para luego evaluar su comportamiento y capacidades sobre un proceso típico de la industria de procesos químicos.

### DISEÑO DEL OBSERVADOR

Primeramente se considera la representación discreta de un sistema no lineal a través de un modelo LPV que contempla el ingreso de una entrada desconocida. Esto es,

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) \{A_i x(k) + B_i u(k) + F_i f_u(k) + \Delta x_i\} \\ y(k) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) \{C_i x(k) + D_i u(k) + \Delta y_i\} \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(k) \in \mathbb{R}^m$ ,  $f_u(k) \in \mathbb{R}^q$  e  $y(k) \in \mathbb{R}^p$  son el vector de estados, entradas conocidas, entradas desconocidas, y salidas, respectivamente. Además,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$  y  $F_i$  son matrices constantes de dimensiones

apropiadas. En general, para los sistemas físicos, las matrices  $D_i$  son nulas y, además, para el alcance de este trabajo, las matrices  $C_i = \mathbb{I}_{p \times n}$ . Por último, las matrices  $F_i$  se componen de una columna específica de  $B_i$ , correspondiente al actuador a diagnosticar.

Por otro lado, las funciones de pertenencia  $\mu_i(\cdot)$  dependientes de un parámetro variable  $\zeta(k)$ , vinculado a entradas o salidas, satisfacen:

$$\mu_i(\zeta(k)) \geq 0; \quad \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) = 1.$$

Entonces, partiendo del desarrollo de observadores de orden reducido para sistemas lineales con entradas desconocidas (Hou y Muller, 1992), o para sistemas LPV en tiempo continuo (Bernardi y Adam, 2018), resulta factible seleccionar un conjunto de matrices no singulares  $T_i \in \mathbb{R}^n$ ,  $U_{i1} \in \mathbb{R}^{q \times n}$  que transformen al sistema de la Ec. 1 en,

$$\begin{aligned} \bar{x}_1(k+1) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) \{ \bar{A}_{i1} \bar{x}_1(k) + E_{i1} y(k) + \bar{B}_{i1} u(k) + \bar{\Delta} x_i \} \\ y(k) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) \{ \bar{C}_{i1} x(k) \} \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $\bar{C}_{i1} = C N_i$ ,  $\bar{A}_{i1} = \bar{A}_{i11} - \bar{A}_{i12} U_{i1} \bar{C}_{i1}$  y  $E_{i1} = \bar{A}_{i12} U_{i1}$ .

En este punto, si el par  $(\bar{A}_{i1}, \bar{C}_{i1})$  es observable, siguiendo con el procedimiento convencional de un observador de Luenberger, es posible diseñar un observador para el sistema (2) como,

$$\Phi(k+1) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) \{ K_i \Phi(k) + \bar{B}_{i1} u(k) + L_i^* y(k) + \bar{\Delta} x_i \} \quad (3)$$

con  $\Phi(k) \in \mathbb{R}^{n-q}$ ,  $L_i^* = L_i + E_{i1}$  y  $K_i = \bar{A}_{i1} - L_i \bar{C}_{i1}$ . Siendo  $L_i \in \mathbb{R}^{(n-q) \times (p-q)}$  la ganancia del observador a diseñar mediante Desigualdades Lineales Matriciales (LMI).

*Teorema 1:* si existe una matriz simétrica  $X > 0$  y  $W_i$ , tal que las siguientes condiciones se cumplan  $\forall i \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ :

$$\begin{aligned} 2\alpha X & \quad \bar{A}_{i1}^T X - \bar{C}_{i1}^T W_i^T \\ X \bar{A}_{i1} - W_i \bar{C}_{i1} & \quad 2\alpha X \end{aligned} < 0. \quad (4)$$

Así el observador de la Ec. 3 es un Observador de orden Reducido Libre de Entrada Desconocida para Sistemas Lineales de Parámetros Variables (LPV-RUIO), de tiempo discreto. Esto es,  $e(k)$  tiende a cero asintóticamente para cualquier estado inicial  $e(0)$ .

*Demostración:* la demostración del Teorema 1 escapa a los alcances de este artículo, pero el lector puede

consultar las herramientas provistas en Bernardi y Adam (2018) o en Boyd et al. (1994). ■

*Remarca 1:* el Teorema 1 muestra que el problema de diseño del LPV-RUIO, de la Ec. 3, se resuelve a través de la LMI de la Ec. 4.

De esta forma, a partir de la Ec. 3 se tiene que  $\Phi(k) \rightarrow \hat{x}_1(k)$  a medida que  $k \rightarrow \infty$ . Por lo tanto,

$$\hat{x}(k) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) T_i \begin{bmatrix} \Phi(k) \\ U_{i1} y(k) - U_{i1} \tilde{C}_{i1} \Phi(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

con  $\hat{x}(k) \rightarrow x(k)$ , conforme  $k \rightarrow \infty$ .

#### A. Detección de fallas

De acuerdo a los esquemas preexistentes (Isermann, 2006; Picó y Adam, 2017), se construyó un banco de observadores que, en base al análisis de sus residuos, permite detectar la presencia de fallas en actuadores.

#### B. Estimación de fallas

En base a la Ec. 2, y dado que  $\hat{x}(k) \rightarrow \bar{x}(k)$  cuando  $k \rightarrow \infty$ , es posible estimar la falla  $f_u(k-1)$ , como

$$\hat{f}_u(k-1) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) \{ U_{i1} y(k) - G_1 y(k-1) - G_2 \Phi(k) - G_3 \Phi(k-1) - \tilde{B}_{i2} u(k-1) + \tilde{\Delta} x_{i2} \} \quad (5)$$

donde  $G_1 = \tilde{A}_{i22} U_{i1}$ ,  $G_2 = U_{i1} \tilde{C}_{i1}$  y  $G_3 = \tilde{A}_{i21} - \tilde{A}_{i22} U_{i1} \tilde{C}_{i1}$ .

### EJEMPLO ILUSTRATIVO

Considere el modelo de proceso de un intercambiador de calor (HE), presentado en Adam [pp. 67-72] (2018) y bosquejado en la Fig. 1. Se ha desarrollado un banco de LPV-RUIO y se ha simulado su comportamiento, con el objetivo de detectar, aislar y estimar el ingreso de fallas en los caudales manipulados.

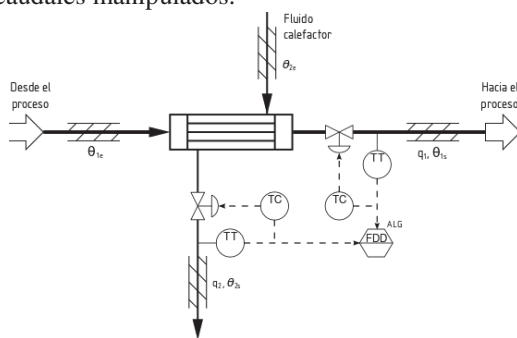
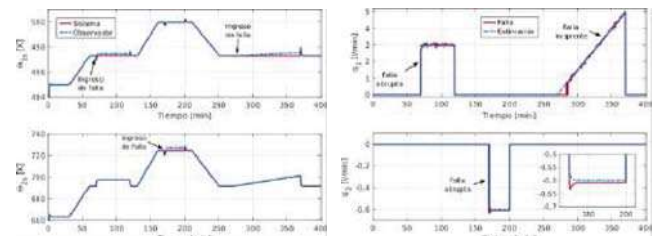


Fig. 1. Diagrama del proceso intercambiador de calor.

La Fig. 1 exhibe los resultados de la simulación. En ella, primeramente se observa la convergencia y capacidades de seguimiento del observador ante cambios de consigna. Seguidamente, entre los 70 min y los 120 min se introduce en la válvula  $q_1$  una falla abrupta del 3 % del caudal  $q_{1m\acute{a}x}$ . A continuación, con el objetivo de visualizar el comportamiento del módulo FDD en distintos puntos de operación, se aplicó un cambio lineal de consigna. Después, una falla abrupta del 5 % del caudal  $q_{2m\acute{a}x}$ , ocurre en la válvula  $q_2$  entre los 170 min y los 200 min. Por

último, se aplica un nuevo cambio de consigna lineal, seguido por el ingreso de una incipiente degradación en la válvula  $q_2$  con ganancia de hasta el 5 % del caudal  $q_{2m\acute{a}x}$ .

Las salidas del banco de observadores propuesto y del sistema no lineal se bosquejan en la Fig. 2a. En cambio, la Fig. 2b presenta la estimación de las fallas ocurridas, generada por los observadores.



(a) Estados del HE. (b) Estimación de fallas.  
Fig. 2. Detección y diagnóstico de fallas en el HE.

### CONCLUSIONES

Se presentó el diseño de un esquema de FDD, basado en el uso de un banco de observadores de orden reducido aplicados a un sistema no lineal que admite representación LPV con entrada desconocida, en tiempo discreto. Los observadores propuestos y sus condiciones de estabilidad se establecen en la resolución de un problema LMI.

Es importante tener en cuenta que la principal propuesta de este trabajo es el diseño de un LPV-RUIO, de tiempo discreto, a partir de herramientas de diseño comúnmente utilizadas en sistemas lineales.

### REFERENCIAS

Gertler, Janos J. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. CRC Press (1998).

Gertler, Janos J. "Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants". *IEEE Control Systems Magazine*, **8,6**, (1988).

Hou, M. and Muller, P. C. "Design of Observers for Linear Systems with Unknown Inputs". *IEEE Transactions on Automatic Control*, **37,6**, 871-875 (1992).

Bernardi, E. and Adam, E. J. "Reduced Order Observer Applied to a Linear Parameter Varying System with Unknown Input". *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*. (2018).

Boyd, S. P. et al. "Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory". *Society for Industrial and Applied Mathematics*. (1994).

Isermann, R. *Fault-Diagnosis Systems: an Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. (2006).

Picó, M. F. and Adam, E. J. "Fault Diagnosis and Tolerant Control Using Observer Banks Applied to Continuous Stirred Tank Reactor". *Advances in Science Technology and Engineering Systems*, **2,3**, 171-181 (2017).

Adam, E. J. *Instrumentación y Control de Procesos. Notas de Clase*. Ediciones UNL, (2018).