

OBSERVADOR DE SALIDA DE TIEMPO DISCRETO PARA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN ELEMENTOS SENSORES

Emanuel Bernardi^{(1)*}; Eduardo J. Adam⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad Tecnológica Nacional. Av. de la Universidad 501, San Francisco, Córdoba

⁽²⁾ Universidad Nacional del Litoral. Santiago del Estero 2854, Santa Fe, Santa Fe

*ebernardi@sanfrancisco.utn.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sistemas de control han evolucionado, desde simples estructuras de realimentación mecánicas hasta la concepción de estrategias avanzadas, cuya implementación sobre dispositivos electrónicos permite significativas mejoras en la operación de sistemas complejos y/o altamente inestables, optimizando costos y esfuerzos de control.

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, 1998).

En base a lo previamente expuesto, el presente trabajo presenta el diseño de un conjunto de *Observadores de Salida con Entrada Desconocida* (LPV-UIOO) para el desarrollo de un esquema FDD de tiempo discreto, capaz de detectar, aislar y diagnosticar el funcionamiento defectuoso de elementos sensores 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 DE SALIDA

Primeramente, se considera la representación discreta de un sistema no lineal a través de un modelo LPV que contempla el ingreso entradas desconocidas y fallas a la salida. Esto es,

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k))(A_i x(k) + B_i u(k) + F_i d(k) + \Delta x_i)$$

$$y(k) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k))(C_i x(k) + D_i u(k) + H_i f_y(k) + \Delta y_i)$$

donde $x(k) \in R^n$, $u(k) \in R^m$, $d(k) \in R^q$, $y(k) \in R^p$ y $f_y(k) \in R^o$ son el vector de estados, entradas, entradas desconocidas, salidas y fallas a la salida, respectivamente.

Además, A_i , B_i , C_i , D_i , F_i y H_i son matrices constantes de dimensiones apropiadas. En general, para los sistemas estrictamente propios, las matrices D_i son nulas, además, matrices C_i , para el alcance de este estudio, están conformadas por matrices identidades de dimensiones apropiadas $I_{p \times n}$, como consecuencia, la salida $y(k)$ se reduce a una simple combinación ponderada de las fallas a la salida y las variables de estado.

$$y(k) = Cx(k) + Hf_y(k). \quad (1)$$

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

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

Entonces, considerando que la matriz H se compone de una fila específica de la matriz C , correspondiente a la salida no monitoreada (sensor bajo análisis), y seleccionando una matriz de transformación T_2 , tal que $J = T_2 C$, donde $J \in R^{p-o}$ solo contiene las filas de C correspondientes con las salidas monitoreadas (demás sensores). Entonces, en base al desarrollo de un observador de entrada desconocida para sistemas lineales (Darouach et al., 1994), la ecuación de salida del sistema (1), es transformada en,

$$\tilde{y}(k) = Jx(k).$$

Entonces, con el propósito de estimar las variables de estado $x(k)$, se formula un observador de entrada desconocida como,

$$z(k+1) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k))(N_i z(k) + G_i u(k) + L_i \tilde{y}(k) + \Delta z_i)$$

$$\hat{x}(k) = z(k) - E\tilde{y}(k)$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k)$$

donde $z(k) \in R^n$, y las matrices $N_i \in R^{n \times n}$, $G_i \in R^{n \times p}$, $L_i \in R^{n \times p}$ y $E \in R^{n \times p}$ son las ganancias del observador a ser determinadas.

Para ello, definiendo el error de estimación de estados

$$e(k) = \hat{x}(k) - x(k)$$

$$= z(k) - T_1 x(k)$$

siendo $T_1 = (I + EJ)$, entonces la dinámica del error de estimación es

$$e(k+1) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k))(N_i e(k) + (N_i T_1 + L_i J - T_1 A_i)x(k)$$

$$+ (G_i - T_1 B_i)u(k) - T_1 F_i f_u(k) + \Delta z_i - T_1 \Delta x_i)$$

Consecuentemente, si se cumplen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} T_1 F_i &= 0, & G_i - T_1 B_i &= 0 \\ N_i T_1 + L_i J - T_1 A_i &= 0, & \Delta z_i - T_1 \Delta x_i &= 0 \end{aligned}$$

la dinámica del error de estimación resulta

$$e(k+1) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(k)) N_i e(k)$$

de esta forma, si N_i es cuadráticamente Schur, $e(k+1) \rightarrow 0$ asintóticamente.

Teorema 1. Si existen las matrices $S, W_i, \forall i \in Z_{1:M}$ y una matriz simétrica definida positiva $X > 0$ tal que,

$$\begin{bmatrix} 2\alpha X & A_i^T X + A_i^T J^T S^T - J^T W_i^T \\ [X A_i + S J A_i - W_i] & 2\alpha X \end{bmatrix} < 0 \quad (2)$$

sujeto a la restricción de desacople de la entrada desconocida

$$(X + S J) F_i = 0$$

entonces, el observador es un LPV-UIOO. Esto es, $e(k)$ converge asintóticamente a cero desde 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 Boyd (1994).

Remarca: El Teorema 1 muestra que el problema de diseño del LPV-UIOO se resuelve a través de la Desigualdad Lineal Matricial (LMI) (2).

Adicionalmente, las matrices de ganancia del observador resultan:

$$\begin{aligned} N_i &= (1 + X^{-1} S J) A_i - X^{-1} W_i J, & G_i &= (1 + X^{-1} S J) B_i \\ L_i &= X^{-1} W_i - N_i E, & \Delta z_i &= T \Delta x_i \end{aligned}$$

Detección y Diagnóstico de fallas:

De acuerdo con los esquemas preexistentes se construyó un banco de observadores generalizados que detectan y diagnostican fallas en elementos sensores, en base al análisis de sus residuos. Debido a las restricciones de longitud de este documento no se proveen mayores detalles, pero lectores interesados pueden consultar literatura afín (Blanke, 2016; Pico y Adam, 2017).

EJEMPLO ILUSTRATIVO

Considere el modelo de proceso de un Reactor Continuo de Tanque Agitado (CSTR), presentado en Adam (2018) y bosquejado en la Fig. 1. Se ha desarrollado un banco de LPV-UIOO y se ha simulado su comportamiento, con el objetivo de detectar, aislar y estimar el ingreso de fallas en sus elementos de medición.

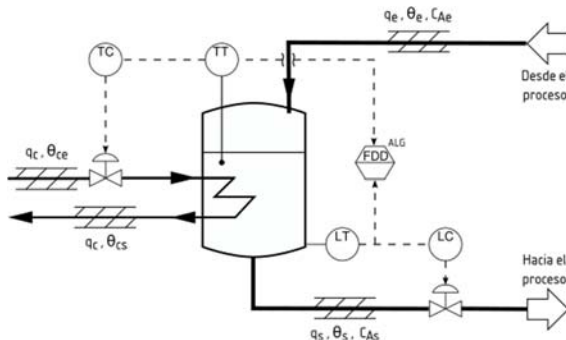


Fig. 1. Diagrama del proceso CSTR.

La Fig. 2 exhibe los resultados de la simulación. En ella, se observa la convergencia y capacidades de seguimiento del observador ante cambios de consigna. Seguidamente, entre los $t = 80$ min y los $t = 150$ min se introduce en el sensor de volumen una falla de comportamiento exponencial (error de calibración) de hasta el 1,5 % de V_{max} . A continuación, con el objetivo de visualizar el comportamiento del módulo FDD en distintos puntos de operación, se aplicó un cambio lineal de consigna. Por último, una falla de comportamiento exponencial (acumulación de sarro) de hasta el 1 % de T_{max} ocurre en el sensor de temperatura entre los $t = 300$ min y los $t = 380$ min.

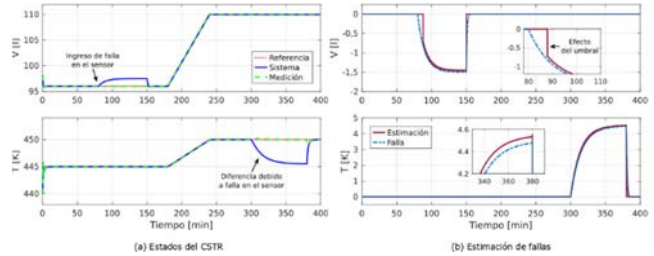


Fig. 2. Detección y diagnóstico de fallas en el CSTR.

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

CONCLUSIONES

Se presentó el diseño de un esquema de FDD basado en el uso de un banco de observadores de salida 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 basan 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-UIOO, de tiempo discreto, a partir de herramientas de diseño comúnmente utilizadas en sistemas lineales.

REFERENCIAS

Gertler, J. J., *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. 1a ed. CRC Press, (1998).
 Darouach, M.; Zasadzinski, M. y Xu, S. J., "Full-order observers for linear systems with unknown inputs". En: IEEE Transactions on Automatic Control. 39.3 (1994), págs. 606-609. ISSN: 0018-9286.
 Boyd, S. P., *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Vol. 15. Society for Industrial y Applied Mathematics, 1994, ISBN:089871334X.
 Blanke M., *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. 3ed. Springer-Verlag, 2016. ISBN: 978-3-662-47942-1.
 Picó, M. F. y Adam, E. J., "Fault Diagnosis and Tolerant Control Using Observer Banks Applied to Continuous Stirred Tank Reactor". En: *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* (2017).
 Eduardo J. Adam. *Instrumentación y Control de Procesos. Notas de Clase*. 3ed. Santa Fe: Ediciones UNL, (2018).