

Diagnóstico y aislamiento de fallas en sensores implementado en un bioreactor UASB mediante observadores de intervalo

J.P. Rodríguez Jarquin¹, M. Adam Medina¹, A. Martínez Sibaja²,
C.M. Astorga Zaragoza¹, E.M. Sánchez Coronado¹

¹Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor. 62490, México

josejarquin@cenidet.edu.mx

Teléfono: (52)-777-362-7770

²Instituto Tecnológico de Orizaba

Resumen— Diseñar un sistema de monitoreo y supervisión en sistemas biológicos tiene un alto grado de complejidad, debido a la naturaleza no lineal de los mismos, y la dificultad de obtener un modelo matemático que los represente. En este proyecto se presenta el desarrollo de un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas en sensores desarrollado para un bioreactor UASB, mediante el uso de observadores de intervalo, utilizando el esquema SIOS-IFD, como base para el diagnóstico, teniendo como aporte en este trabajo una modificación en la forma en que los residuos serán evaluados, se presentan resultados experimentales, ya que el sistema de diagnóstico se implementó en un proceso real. © AMCA.

Palabras clave: observadores, intervalo, monitoreo, diagnóstico, aislamiento, fallas.

I. INTRODUCCIÓN

La importancia sobre la obtención de energía limpia y renovable está creciendo, debido a los factores individuales en la subida de los precios de los combustibles fósiles y el calentamiento global. La obtención de biogás a partir de residuos orgánicos, ha sido considerada en los últimos años muy importante, porque además de producir una fuente de energía como el biogás, contribuye por igual en el tratamiento de aguas residuales (Raoa *et al.*, 2010). Existen diferentes métodos de obtención de biogás a partir de residuos orgánicos, una de las más utilizadas es la producción de este gas utilizando bioreactores anaeróbicos, el bioreactor anaeróbico de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) (vease figura 1), caso de estudio en este trabajo, es uno de los más utilizados, debido a que a diferencia de la mayoría de los de los bioreactores, en este, las aguas residuales recirculan constantemente, de modo que se aprovechen al máximo.

Dentro de los reactores biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales, los bioreactores anaerobios son los que presentan mayores incertidumbres, lo cual dificulta la operación y control de tales procesos, debido a la falta de sensores capaces de medir, en línea, muchas de las variables implícitas en el proceso (Batstone

y Keller, 2002). Los observadores de estado han sido una herramienta muy útil para la estimación de concentraciones de materia orgánica y cinéticas de crecimiento en reactores anaerobios, pero además, en años recientes se han empezado a utilizar también para la detección y aislamiento de fallas, la supervisión y el desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión del operador humano en este tipo de reactores.

Los sistemas de supervisión de procesos para operadores han evolucionado conforme aparecen nuevas técnicas de diagnóstico y aislamiento de fallas, esta rama ha sufrido un gran crecimiento en su desarrollo conforme ha aumentado la complejidad de los procesos industriales, lo cual ha provocado una constante evolución en los sistemas de diagnóstico y aislamiento de fallas, como se puede apreciar en (Patton y Hou, 1998; Zhang y Jiang, 2008; Xion y Saif, 2000; Zhang, 2000) entre otros trabajos.

Cabe destacar que los procesos biológicos, en la mayoría de los casos no son completamente observables, debido a su naturaleza no lineal, por lo que resulta más apropiado estimar algunas relaciones entre parámetros, en vez de estimarlos individualmente (Saberri y Stoorvoege, 2000). En la mayoría de las publicaciones acerca de observadores no lineales para diseño de sistemas diagnóstico y aislamiento de fallas, los residuos se basan en el error de estimación obtenido con el observador (Alcorta y Frank, 1997). El método propuesto en el artículo permite formalizar el diseño de los denominados observadores asintóticos, los cuales son capaces de estimar ciertas variables de estado no medidas para el proceso de digestión anaerobia a pesar de ciertas incertidumbres en las cinéticas del proceso. Cabe mencionar que los observadores asintóticos necesitan forzosamente toda la información de las variables de entrada del proceso, lo cual es prácticamente imposible bajo condiciones normales de operación en un reactor anaerobio. Para superar la problemática que implica el conocer todas las variables de entrada de un reactor anaerobio (Aceves y Aguilar, 2004), se desarrolló un observador por intervalos. La principal característica de los observadores por intervalos es que son

capaces de brindar estimaciones a intervalos garantizados de variables de estado no medidas en lugar de una estimación exacta de las mismas, si se proporciona un límite superior e inferior para cada una de las entradas del proceso. En este trabajo se abordará el diseño e implementación de un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas basado en observadores de intervalo, como un sistema de ayuda al operador humano, para el monitoreo de bioreactores tipo UASB.

II. DISEÑO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y AISLAMIENTO DE FALLAS

El diagnóstico de fallas puede realizarse utilizando ecuaciones de paridad, observadores, o bien, estimación de parámetros. Una gran ventaja de los esquemas de diagnóstico basados en observadores es que son esquemas bastante robustos, en comparación con los otros métodos. Un observador es un modelo capaz de generar una aproximación del vector de estados. Los observadores que reconstruyen todo el vector de estados se llaman observadores de orden completo, mientras que los observadores que solo reconstruyen una parte del vector de estados se llaman observadores de orden reducido (Zhang y Jiang, 2008). Generalmente en estos esquemas los observadores requieren conocer el valor de todas las entradas para llevar cabo la estimación, lo cual en el caso de los bioreactores es bastante complicado, ya que no existen sensores en línea para la mayoría de sus variables, en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de diagnóstico que no necesita de ninguna entrada, solo requiere conocer el intervalo máximo y mínimo de valores que estas pueden tomar, este esquema simplificado, conocido como **SIOS-IFD** (Martinez *et al.*, 2011), presentado en un trabajo anterior por los autores, permite diagnosticar y aislar fallas únicas y subitas en un sensor, por lo cual solo es necesaria la medición de una de las variables de salida (vease figura 2), en este trabajo se realiza una modificación en como los residuos serán evaluados respecto al esquema propuesto primeramente.

Se tomo como base para llevar a cabo el observador de intervalo el modelo ADM1, desarrollado por la IWA (Asociación internacional del agua) (Batstone y Keller, 2002), el cual fué simplificado para representar el comportamiento de un reactor anaerobio UASB, presentado , en la figura 1.

Modelo ADM1

$$\dot{x}_1 = Y_1 K_{m1} \frac{s_1}{K_{s1} + s_1} I_{pH} x_1 - aD(t)x_1 - K_d x_1 \quad (1)$$

$$\dot{s}_1 = D(t)(s_1^i - s_1) - K_{m1} \frac{s_1}{K_{s1} + s_1} I_{pH} x_1$$

$$\dot{Q}_{CH4} = (1 - Y_1) Y_{CH4} K_{m1} \frac{s_1}{K_{s1} + s_1} - Q_{CH4}$$

$$\text{con: } I_{pH} = \frac{1 + 2 * 10^{0,5(pH_{LL} - pH_{UL})}}{1 + 10^{(pH - pH_{UL})} + 10^{(pH_{LL} - pH)}} \quad (2)$$

donde: x_1 es la concentración de biomasa anaerobia. s_1 es la concentración de materia orgánica o demanda

química de oxígeno (DQO). Q_{CH4} es el flujo de salida de biogás metano. $D(t)$ es la tasa de dilución, a es la constante de dilución asociada a la carga orgánica, K_{m1} es la velocidad específica de crecimiento, K_d es la velocidad de decaimiento de la masa anaerobia y K_{s1} es la constante de semi-saturación para la biomasa anaerobia. Y_1 es el coeficiente de rendimiento para la degradación de DQO, Y_{CH4} es el coeficiente de producción de gas metano respecto a la DQO. s_1^i es la concentración de DQO en el afluente, s_1 es la concentración de DQO en el efluente. I_{pH} representa la inhibición por pH, donde pH_{LL} y pH_{UL} son los límites inferior y superior de pH, respectivamente. Los valores de los parámetros del modelo se muestran en la Tabla I.

Una vez tomando como referencia este modelo, se prosigue a diseñar el observador de intervalo, para lo cual como primera condición debe existir un observador hipotético de entradas conocidas, el cual servirá como observador base. Por lo cual primeramente se diseño un observador asintótico que se desarrolla de la siguiente forma:

El modelo no lineal (1) puede expresarse como un vector de estado:

$$\dot{x}(t) = [\dot{x}_1 \quad \dot{Q}_{CH4} \quad \dot{s}_1]^T = Cf(x(t), t) + A(t) + b(t) \quad (3)$$

expresando (3) en espacio de estados:

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_{11}(t) & \vdots & A_{12}(t) \\ \dots & \vdots & \dots \\ A_{21}(t) & \vdots & A_{22}(t) \end{bmatrix}$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} -(aD(t) + K_d) & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & -1 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & -D(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$b(t) = [b_1^T(t) \quad \vdots \quad b_2^T(t)] = D(t) [0 \quad 0 \quad \vdots \quad s_1^i(t)]^T$$

$$C(t) = [C_1^T \quad \vdots \quad C_2^T] = [Y_1 \quad (1 - Y_1) Y_{CH4} \quad \vdots \quad -1]^T$$

$$f(x(t), t) = \left[\frac{s_1}{K_{s1} + s_1} I_{pH} x_1 \right]$$

donde: $A(t) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es la matriz de estados de la dinámica del proceso, $b(t) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es la matriz de entrada, $C(t) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es la matriz de salida y $f(t)$ es el componente no lineal.

El observador asintótico se diseña bajo la suposición de que todas las entradas son conocidas, y además m estados medidos en línea.

Expresando (4) como vectores de estado, y considerando en una variable v_1 , las variables a estimar (x_1 y Q_{CH4}) y en una siguiente variable v_2 el estado medido en línea (s_1) obtenemos (Alcaraz *et al.*, 2004):

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= C_1 f(x(t), t) + A_{11}(t)v_1(t) + A_{12}(t)v_2 + b_1(t) \\ \dot{x}_2(t) &= C_2 f(x(t), t) + A_{21}(t)v_1(t) + A_{22}(t)v_2 + b_2(t)\end{aligned}\quad (5)$$

Se asume que tanto la tasa de dilución $D(t)$, así como el afluente s_1^i son conocidos, se procede a diseñar el observador asintótico determinando un vector de estimación de estado $w(t)$ obtenemos:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{w}} &= W(t)\hat{w}(t) + g(t)v_2 + Nb(t) \\ \hat{w}(0) &= N_1\hat{v}_1(0) + N_2\hat{v}_2(0) \\ \hat{x}_1 &= N_1^{-1}(\hat{w}(t) - N_2v_2(t))\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{w}(t)$$

con:

$$\begin{aligned}W(t) &= (N_1A_{11}(t) + N_2A_{21}(t))N_1^{-1} \\ g(t) &= N_1A_{12}(t) + N_2A_{22}(t) - W(t)N_2\end{aligned}\quad (7)$$

donde $v_1=[x_1 \quad Q_{CH4}] \Re = 2$ y $v_2=[s_1] \Re = 1$, donde N es una matriz de transformación lineal definida de la siguiente manera:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & \vdots & N_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \vdots & Y_1 \\ 0 & 1 & \vdots & (1 - Y_1)Y_{CH4} \end{bmatrix}\quad (8)$$

Para el cálculo de N , se eligió de forma arbitraria una matriz identidad N_1 , y $N_2 = [-N_1C_1C_2^\dagger]$, donde C_2^\dagger es la pseudo inversa generalizada de C_2 .

Sustituyendo N_1 y N_2 en $W(t)$ en (7) obtenemos:

$$W(t) = \begin{bmatrix} -(aD(t) + K_d) & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}\quad (9)$$

Considerando $W(t) = W_e$ para probar que el observador es asintóticamente estable, se calculan W_e^+ y W_e^- mediante los valores mínimo de $D(t) = 0,01$ y máximo de $D(t) = 1$ respectivamente, obteniéndose:

$$\begin{aligned}W_e^+ &= \begin{bmatrix} -0,025 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \\ W_e^- &= \begin{bmatrix} -0,52 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (10)$$

Dado que $W_{eij}^- \geq 0 \forall i \neq j$ y que W_e^+ y W_e^- son estables por Hurwitz (Anagnost y Desoer, 1991), se dice que el observador es asintóticamente estable.

Tomando como base el observador asintótico anterior se diseña el observador de intervalo, donde se delimitan primeramente los límites de $b(t)$, el limite superior $b^+(t)$ y limite inferior $b^-(t)$, con lo que se desarrolla el observador de la forma siguiente:

Para el limite superior:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{w}}^+ &= W(t)\hat{w}^+(t) + g(t)v_2 + M\beta^+(t) \\ \hat{w}(0)^+ &= N_1\hat{v}_1^+(0) + N_2\hat{v}_2(0) \\ \hat{x}_1^+ &= N_1^{-1}(\hat{w}^+(t) - N_2v_2(t)) \\ \begin{bmatrix} y_1(t)^+ \\ y_2(t)^+ \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{w}^+(t)\end{aligned}\quad (11)$$

Para el limite inferior:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{w}}^- &= W(t)\hat{w}^-(t) + g(t)v_2 + M\beta^-(t) \\ \hat{w}(0)^- &= N_1\hat{v}_1^-(0) + N_2\hat{v}_2(0) \\ \hat{x}_1^- &= N_1^{-1}(\hat{w}^-(t) - N_2v_2(t)) \\ \begin{bmatrix} y_1(t)^- \\ y_2(t)^- \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{w}^-(t)\end{aligned}\quad (12)$$

donde:

$$M = \begin{bmatrix} N_1 & \vdots & N_2 & \vdots & |N_{2,ij}| \end{bmatrix}\quad (13)$$

y

$$\beta^+(t) = \begin{bmatrix} b_1^+(t) & \vdots & \frac{1}{2}(b_2^+(t) + b_2^-(t)) & \vdots & \frac{1}{2}(b_2^+(t) - b_2^-(t)) \end{bmatrix}^T\quad (14)$$

$$\beta^-(t) = \begin{bmatrix} b_1^-(t) & \vdots & -\frac{1}{2}(b_2^+(t) + b_2^-(t)) & \vdots & -\frac{1}{2}(b_2^+(t) - b_2^-(t)) \end{bmatrix}^T$$

los errores de estimación asociados a (11) y (12) se definen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\tilde{e}^+(t) &= \hat{v}_1^+ - v_1 \\ \tilde{e}^-(t) &= \hat{v}_1^- - v_1\end{aligned}\quad (15)$$

por tanto, la dinámica del error se representa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{e}}^+ &= W_e\tilde{e}^+(t) + N_1^{-1}N(b^+(t) - b(t)) \\ \dot{\tilde{e}}^- &= W_e\tilde{e}^-(t) + N_1^{-1}N(b^-(t) - b(t))\end{aligned}\quad (16)$$

La convergencia del observador de intervalo se define por el principio de cooperatividad segun Lema 1, (Smith *et al.*, 1995).

Lema 1: Sea $\dot{\omega} = f(\omega, t)$. Se dice que este sistema es cooperativo si $\frac{\partial f_h(\omega, t)}{\partial \omega_d} \geq 0 \forall h \neq d$. Esto implica que si $\omega(0) \geq 0$ entonces $\omega(t) \geq 0 \forall t \geq 0$.

Ya que la matriz W_e es estable, y sí la dinámica $N_1^{-1}N(b^+(t) - b(t))$ es positiva o 0, entonces se puede decir que $\tilde{e}^+(t) \geq 0 \forall t \geq 0$, y por tanto $\hat{v}_1^-(t) \leq v_1(t) \leq \hat{v}_1^+(t) \forall t \geq 0$, demostrando esto, que aunque se desconozcan las condiciones iniciales de las variables estimadas, sus límites pueden ser garantizados. En la siguiente sección 3 se muestran los resultados de la implementación del esquema de observación en un proceso anaerobio real.

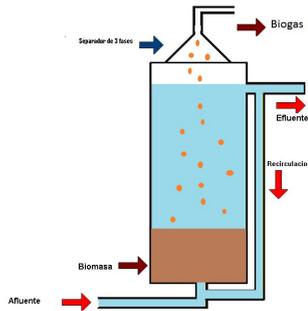


Figura 1. Reactor anaerobio UASB

TABLA I
TABLA DE PARÁMETROS

Parámetro	Valor y unidades
K_{ml}	5.1 g COD / g COD d
K_{sl}	0.5 g COD / L
K_d	0.02 1 / d
Y_1	0.1 g COD / g COD
Y_{CH_4}	0.35 L CH ₄ / g COD
a	0.5 (adimensional)

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas se implementó en un digestor anaerobio tipo UASB, el cual se alimentó con desechos residuales provenientes de un zoco, cuya carga orgánica s_1^i oscila entre los valores máximos y mínimos de 4 a 2.5 gDQO/L, la tasa de dilución $D(t)$ tiene parámetros máximos y mínimos de 1 a 0.01 d⁻¹. Se utilizó como máxima medida la concentración de carga orgánica en el efluente s_1 , con la cual fue posible estimar las variables de concentración de biomasa anaerobia x_1 , y el flujo de salida de gas metano Q_{CH_4} . En la figura 3 se muestra la convergencia asintótica del observador para la variable x_1 (línea verde), la línea azul representa al observador superior, la roja al observador inferior, estas convergen de acuerdo a los límites superior e inferior que fueron dispuestos, presentándose de igual manera en la figura 4 la convergencia en intervalos para la variable Q_{CH_4} .

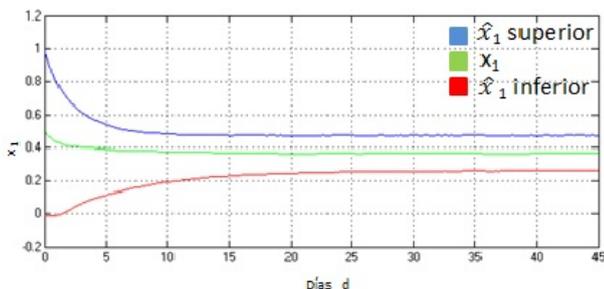


Figura 3. Estimación de la concentración de biomasa anaerobia x_1

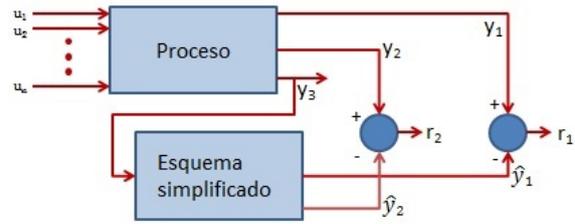


Figura 2. Esquema simplificado de diagnóstico SIOS-IFD

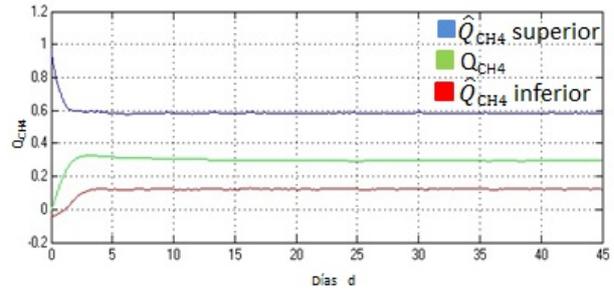


Figura 4. Estimación del flujo de salida de gas metano Q_{CH_4}

El esquema simplificado es capaz de diagnosticar fallas únicas, súbitas y permanentes en los sensores s_1 , x_1 , y Q_{CH_4} , a partir de los residuos generados r_1 y r_2 , dado que siempre existirá una diferencia entre la medición real y el intervalo propuesto, a diferencia del trabajo presentado en (Martínez *et al.*, 2011), se propone que el residuo se genere a partir de la derivada de esta diferencia, si la diferencia es constante, el resultado será 0, caso contrario la derivada tomará un valor, el cual será posteriormente evaluado, por tanto:

$$r_1 = \frac{d(y_1 - \hat{y}_1)}{dt}$$

$$r_2 = \frac{d(y_2 - \hat{y}_2)}{dt} \quad (17)$$

Los residuos generados son evaluados por el esquema de diagnóstico diseñado, mediante el uso de un umbral, cuyos valores fueron establecidos, basándose en las máximas y mínimas condiciones de operación permisibles en el bioreactor UASB, en las cuales el biogás que se produce, mantiene las concentraciones adecuadas de metano y dióxido de carbono, de acuerdo a mediciones que se llevaron a cabo mediante el uso de un cromatógrafo de gases; finalmente siendo los resultados de la evaluación presentados en un display, como se presenta en la figura 5.

En la Tabla II se presenta la matriz de diagnóstico estructurada para fallas únicas en los sensores s_1 , x_1 y Q_{CH_4} , la cual se obtuvo por medio del esquema de evaluación de residuos desarrollado, en el cual se encuentran concentradas las firmas que identifican a cada falla, permitiendo su aislamiento.

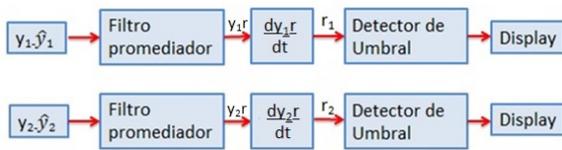


Figura 5. Esquema de evaluación de residuos diseñado

TABLA II
MATRIZ DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Residuo	Falla $s_1 +5\%$	Falla $s_1 -5\%$	Falla $x_1 +5\%$
r_1	1	-1	1
r_2	1	-1	0
Residuo	Falla $x_1 -5\%$	Falla $Q_{CH_4} -5\%$	Falla $Q_{CH_4} +5\%$
r_1	-1	0	0
r_2	0	1	-1

Se llevaron a cabo 3 experimentos, en los cuales se provocaron fallas en los sensores x_1 , s_1 y Q_{CH_4} en los días de operación 50, 55, y 60 respectivamente, los resultados de dichos experimentos se presentan en la figura 6, donde se puede notar que en los días en los que las fallas se provocaron, los residuos superarán el umbral establecido, con lo cual se generaron estados, que mediante la matriz de diagnóstico de fallas de la Tabla II, se pudo diagnosticar y aislar la falla según el caso, por lo que se considera eficiente el desempeño del sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas diseñado.

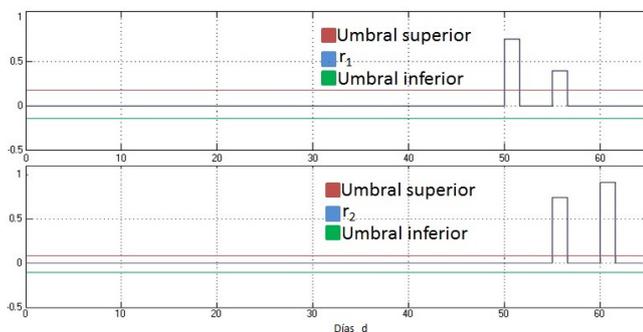


Figura 6. Diagnóstico de residuos

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los resultados experimentales, de un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas en sensores basado en observadores de intervalo, el cual no requiere la medición de entrada alguna, solo se requiere tener conocimiento del intervalo de valores que pueden alcanzar dichas entradas. se presentaron resultados en los cuales el sistema fué capaz de detectar y aislar fallas, evaluando los residuos que se generaron. El esquema presentado únicamente permite la localización de falla en un sólo sensor, para lo cual requiere la medición en línea de solo una salida, mediante un esquema simplificado de diagnóstico, como aporte se llevo a cabo una modificación en como los residuos son evaluados, utilizando la

la derivada de la diferencia entre las variables medidas y estimadas, para obtener los residuos a ser evaluados, lo que permite el uso de ambos observadores inferior y superior, siendo uno seleccionado por el operador para llevar a cabo la generación de residuos, lo cual permitirá al sistema diagnosticar y aislar de fallas en sensores.

REFERENCIAS

- Aceves, C.A. y C.A. Aguilar (2004). Kinetic and yield parameters estimation in an anaerobic digestion process using successive quadratic programming (sqp).. *Proc. of 10th IWA World Congress on Anaerobic Digestion* **3**, 1329–1334.
- Alcaraz, V., V. Harmand y J. Rapaport (2004). Robust interval-based siso regulation in anaerobic digestion. *proc. of 10th iwa world congress on anaerobic digestion (ad10)*. *Proc. of 10th IWA World Congress on Anaerobic Digestion (AD10)* **1**, 337–342.
- Alcorta, E. y P. Frank (1997). Deterministic nonlinear observer based approaches to fault diagnosis: A survey. *Control Eng. Practice* **5**, 663–670.
- Anagnost, J. y C. Desoer (1991). An elementary proof of the routh-hurwitz stability criterion. *Circuits, systems and signal processing* **10**, 101–114.
- Batstone, J. y I. Keller (2002). The iwa anaerobic model no. 1 (adm1). *Revista de la International Water Association* **45**, 65–73.
- Martinez, A., C.M. Astorga, A. Alvarado, R. Posada, J. Rguez-Jarquín y M. Adam (2011). Simplified interval observer scheme: A new approach for fault diagnosis in instruments. *Sensors* **11**, 612–622.
- Patton, R. y M. Hou (1998). Fault observability and fault reconstruction for dynamic systems. *Proc. IFAC On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries* **1**, 59–64.
- Raoa, P. Venkateswara, Saroj S. Barala, Ranjan Deya y Srikanth Mutnuri (2010). Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in india. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**, 2086–2094.
- Saberi, A. y A. Stoorvoege (2000). Fundamental problems in fault detection and identification. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. **10**, 1209–1236.
- Smith, H., J. Lardon y O. Bernard (1995). Monotone dynamical systems. an introduction to the theory of competitive and cooperative systems. *AMS Mathematical Surveys and Monographs* **41**, 339–345.
- Xion, Y. y M. Saif (2000). Robust fault detection and isolation via a diagnostic observer. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **10**, 1175–1192.
- Zhang, Q. (2000). A new residual generation and evaluation method for detection and isolation of faults in nonlinear systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* **7**, 759–773.
- Zhang, Y. y J. Jiang (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control* **32**, 229–252.