

# Reconstrucción de Fugas con Datos Experimentales

M. Negrete y C. Verde  
Instituto de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Coyoacán DF 04510, México  
mnegretev@gmail.com  
verde@unam.mx

**Resumen**—En el presente documento se presenta una solución aproximada al problema de reconstrucción de fugas múltiples en tuberías usando un esquema basado en observadores por modos deslizantes. Puesto que para un sistema de dimensión finita en el que sólo se miden flujos y presiones en los extremos de la tubería, no se cumplen las condiciones para la reconstrucción de fallas por modos deslizantes, se utiliza otro observador cuya función es estimar las presiones en los puntos en que ocurren las fugas. Para mostrar la robustez del esquema propuesto ante cambios en el punto de operación después de la ocurrencia de las fugas, se presentan resultados en simulación utilizando los parámetros de la planta piloto instalada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Finalmente, se presentan resultados con datos reales tomados de la instalación piloto con un periodo de muestreo de 1 s, que muestran la efectividad del esquema ante la presencia de registros ruidosos.

## I. INTRODUCCIÓN

La confiabilidad y seguridad de los sistemas de distribución de fluidos es un problema importante y de gran preocupación en el ámbito mundial. Un monitoreo constante de un sistema de tuberías no siempre es posible dado que muchas veces éste se encuentra bajo tierra o en el mar. El objetivo de un sistema automático de supervisión de redes de distribución consiste en detectar tan rápido como sea posible la localización exacta y la magnitud de fugas con un mínimo de sensores. Existen diversas tecnologías para atacar este problema (Scott y Barrufet 2003), (Lee *et al.* 2005), (Ferrante y Brunone 2003), sin embargo, las soluciones propuestas no siempre son satisfactorias para los casos de fugas muy pequeñas o de múltiples fugas.

Para un modelo analítico en el que sólo se conocen presiones y flujos en los extremos de la tubería, se ha determinado que no es posible localizar múltiples fugas si el fluido se encuentra en estado estacionario (Billman y Isermann 1987), (Verde *et al.* 2007), por lo que se requiere de señales apropiadas para excitar al sistema (Colombo *et al.* 2009). En (Torres *et al.* 2009) se propone detectar tanto los flujos de fuga como las posiciones considerando los parámetros de las fugas como estados de un modelo ortogonal aumentado, sin embargo, también requiere de ciertas señales de excitación para asegurar la convergencia de los parámetros a valores reales, lo cual no siempre

es posible por el tipo de actuadores con que cuenta la instalación. Por lo anterior, la detección y localización de fugas múltiples en tuberías reales de líquidos y gases es aún un problema abierto.

Por otro lado, la detección e identificación de fallas (abreviado FDI) ha sido tradicionalmente resuelta empleando dos pasos (Chen y Patton 1999), (Korbicz *et al.* 2004), (Ding 2008). El primero de ellos consiste en el diseño de generadores de residuos, generalmente basados en observadores o ecuaciones de paridad, los cuales proporcionan información en tiempo real sobre diferencias en los comportamientos dinámicos entre las señales medidas de la planta y señales obtenidas de modelos analíticos. El segundo paso consiste en evaluar dichos residuos para identificar las fallas. En las últimas décadas, se ha atacado el problema de *FDI* desde un marco diferente mediante el uso de observadores de modos deslizantes (Edwards *et al.* 2000) (Edwards *et al.* 2010). La novedad del método consiste en la habilidad de los observadores de modos deslizantes de reconstruir señales no medibles mediante un ajuste y filtrado apropiados de la llamada *inyección de error de salida equivalente*. Esta propiedad fuerza la salida del observador a seguir perfectamente las mediciones aún en presencia de fallas, contrario a los generadores de residuos, los cuales son diseñados para ser sensibles a las fallas. Una condición para la reconstrucción de fallas con este método es que el grado relativo de la salida a las fallas debe ser uno, lo cual no se cumple para el problema de detección de fugas cuando sólo se conocen flujos y presiones en los extremos de la tubería.

Los hechos antes mencionados motivaron este trabajo en el que se propone un esquema para reconstruir dos fugas simultáneas de las cuales se conocen sus posiciones o por lo menos se tiene un estimado de las mismas. Dicho esquema consta de un observador de modos deslizantes, denotado *SMO*, y un estimador aproximado, denotado *AE*, cuya tarea es estimar las presiones en los puntos en que ocurren las fugas. Dado que las fugas tienen un efecto similar a un incremento en la fricción, la estabilidad de la interconexión del *AE* y el *SMO* se preserva durante la reconstrucción de las fugas.

Como trabajo futuro se tiene el diseño de un método con la posibilidad de estimar tanto las posiciones como la magnitud de los flujos de las fugas, en vez de asumir

posiciones fijas.

El presente documento está organizado como sigue: En la sección 2 se explica el modelo del sistema partiendo de un conjunto de EDPs con múltiples condiciones de frontera y considerando que sólo se conocen presiones y flujos en los extremos de la tubería. En la sección 3 se presentan las condiciones necesarias para la reconstrucción de fallas con observadores de modos deslizantes, de acuerdo con el método propuesto en (Edwards *et al.* 2000), y dado que dichas condiciones no se satisfacen para el modelo de la tubería, en la subsección 3.B se presenta un esquema para estimar en línea las presiones en los puntos en que ocurren las fallas, lo cual permite reconstruir dos fallas simultáneas con posiciones fijas mediante la integración de un observador de modos deslizantes y un estimador aproximado. En la sección 4 se describe la planta piloto cuyos parámetros se emplearon para las pruebas en simulación y con datos reales presentados en las secciones 5 y 6 respectivamente. Finalmente, las conclusiones se dan en la sección 7.

## II. MODELO DINÁMICO DE LA TUBERÍA CON FUGAS

A.

Considérese el modelo dinámico unidimensional dado por

$$\frac{\partial Q(z, t)}{\partial t} + gA \frac{\partial H(z, t)}{\partial z} + \mu Q(z, t) |Q(z, t)| = 0 \quad (1)$$

$$c^2 \frac{\partial Q(z, t)}{\partial z} + gA \frac{\partial H(z, t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

el cual se obtiene a partir de las ecuaciones de conservación de la masa y del momentum, asumiendo un fluido incompresible (Chaudry 1979), con  $H(z, t)$  la presión del fluido ( $m$ ),  $Q(z, t)$  el gasto ( $m^3/s$ ),  $z$  la coordenada de longitud ( $m$ ),  $t$  la coordenada temporal ( $s$ ),  $g$  la gravedad ( $m/s^2$ ),  $A$  el área de la sección transversal ( $m^2$ ),  $D$  el diámetro de la tubería ( $m$ ),  $c$  la velocidad del sonido en el fluido ( $m/s$ ) y  $\mu = \frac{f}{2DA}$  donde  $f$  es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional). Una fuga en un punto  $z_f$  con un gasto

$$Q|_{z_f} = \lambda \sqrt{H}|_{z_f} \quad (3)$$

y  $\lambda \geq 0$ , produce una discontinuidad en (1-2) dividiendo la tubería en dos secciones con condición de frontera

$$Q^b|_{z_f} = Q^a|_{z_f} + Q|_{z_f} \quad (4)$$

donde  $Q^b$  y  $Q^a$  denotan los gastos en las secciones antes y después de la fuga. Si se consideran  $n - 1$  fugas en una tubería de longitud  $L$ , el comportamiento del fluido queda descrito por  $n$  pares de ecuaciones con  $n - 1$  condiciones de frontera de la forma(4) y  $n$  secciones de longitud  $\Delta z = \frac{L}{n}$ . De acuerdo con el método reportado en (Verde *et al.* 2007), el modelo (1-2) se puede aproximar con  $n$  conjuntos de ecuaciones dinámicas no lineales acopladas dados por

$$\dot{Q}_i = a_1(H_i - H_{i+1}) - \mu Q_i |Q_i| \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\dot{H}_i = a_2(Q_{i-1} - Q_i - \lambda_{i-1} \sqrt{H_i}) \quad \forall i = 2, \dots, n \quad (6)$$

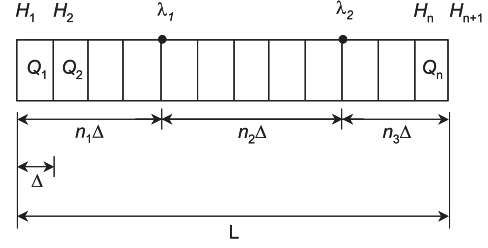


Figura 1. Definición de variables con secciones no uniformes para 2 fugas

con  $H_1$  y  $H_{n+1}$  como entradas del sistema y constantes

$$a_1 = \frac{gA}{\Delta z}, \quad a_2 = \frac{b^2}{\Delta z g A}.$$

En la figura 1 se describen las variables de este modelo. Si las fugas no están uniformemente distribuidas, el tamaño de las secciones  $\Delta z$  ya no sería una constante en (5-6) y  $a_1$  y  $a_2$  dependerían de la distancia entre las fugas  $\lambda_i$  y  $\lambda_{i+1}$ .

En el presente trabajo se considera que se conocen las posiciones de las dos fugas o por lo menos, la sección donde ocurren, para poder calcular los parámetros  $a_1$  y  $a_2$ .

Para el caso de una sola fuga, el comportamiento del fluido se puede modelar con sólo dos conjuntos de ecuaciones diferenciales parciales con una condición de frontera en el punto de ocurrencia de la fuga C. Si el fluido se encuentra en estado de equilibrio, las derivadas parciales son cero y, eliminando las variables desconocidas en ambos conjuntos, se obtiene una expresión analítica para la posición exacta de la fuga dada por

$$z_f = \frac{a_1(H_1^\infty - H_{n+1}^\infty)}{\mu((Q_1^\infty)^2 - (Q_n^\infty)^2)} - \frac{L(Q_n^\infty)^2}{((Q_1^\infty)^2 - (Q_n^\infty)^2)} \quad \forall Q_1^\infty \neq Q_n^\infty \quad (7)$$

donde el superíndice  $\infty$  denota que las variables están en estado de equilibrio. Para el caso de dos fugas,  $z_f$  se puede interpretar como una frontera entre las secciones donde se encuentran las dos fugas.

Aunque esta expresión no puede ser utilizada en un caso real dada la existencia de ruido en las mediciones y que el fluido no siempre está en estado permanente, puede ser utilizada como una aproximación de la posición de la fuga para luego aplicar métodos más complejos de reconstrucción como el que se propone en el presente artículo.

Considerando dos fugas,  $n - 1 = 2$ ,  $n_1 = n_2 = n_3 = 1$  y los parámetros de la planta piloto reportados en (Verde *et al.* 2007) con mediciones de flujo y presión en los extremos de la tubería, el punto de inicio para el esquema propuesto es el modelo para 3 secciones y 2 fugas dado por

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dl + g(x) \quad (8)$$

$$y = Cx \quad (9)$$

con

$$x = \begin{bmatrix} Q_1 \\ H_2 \\ Q_2 \\ H_3 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & -a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -a_1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -a_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -a_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad l = \begin{bmatrix} \lambda_1 \sqrt{x_2} \\ \lambda_2 \sqrt{x_4} \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} -\mu x_1 |x_1| \\ 0 \\ -\mu x_3 |x_3| \\ 0 \\ -\mu x_5 |x_5| \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### III. RECONSTRUCCIÓN DE FUGAS MÚLTIPLES CON UN ESQUEMA BASADO EN MODOS DESLIZANTES

#### A. Reconstrucción de fallas mediante un observador por modos deslizantes

Considere el sistema lineal con señales de falla  $f$  descrito por

$$\dot{x} = Ax + Bu + Df \quad (10)$$

$$y(t) = Cx \quad (11)$$

donde  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{n \times q}$  con  $q \leq p < n$  y las matrices  $C$  y  $D$  son de rango completo. En (Edwards *et al.* 2000) se muestra que si se cumplen las condiciones

C1.  $\text{rank}(CD) = q$

C2. Los ceros invariantes de  $(A, D, C)$  están en  $\mathbb{C}_-$  entonces, existe un cambio de coordenadas  $x \rightarrow Tx$  que permite escribir las ecuaciones (10-11) en la forma

$$\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u \quad (12)$$

$$\dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u + D_2f \quad (13)$$

$$y = x_2 \quad (14)$$

donde  $x_1 \in \mathbb{R}^{(n-p)}$  no depende de las fallas,  $x_2 \in \mathbb{R}^p$  y la matriz  $A_{11}$  tiene valores propios estables.

Además, el sistema dinámico

$$\dot{\hat{x}}_1 = A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u - A_{12}e_y \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u \\ &\quad - (A_{22} - A_{22}^s)e_y + \nu \end{aligned} \quad (16)$$

$$\hat{y} = \hat{x}_2 \quad (17)$$

con  $e_y = \hat{y} - y$ , la matriz de diseño  $A_{22}^s$  estable y la función

$$\nu = -\rho \|D_2\| \frac{P_2 e_y}{\|P_2 e_y\| + \delta}, \quad \|f(t)\| < \rho$$

con  $P_2 \in \mathbb{R}^{p \times p}$  una matriz de Lyapunov para  $A_{22}^s$  y  $\delta$  suficientemente pequeña para aproximar una acción discontinua, es un observador para el sistema (10-11) (Edwards *et*

*al.* 2000) y las señales de falla  $f$  pueden ser reconstruídas con

$$f(t) \approx -\rho \|D_2\| (D_2^T D_2)^{-1} D_2^T \frac{P_2 e_y}{\|P_2 e_y\| + \delta} \quad (18)$$

Por otro lado, para el modelo de la tubería (8-9) existe una transformación  $T_s$  tal que el sistema puede ser escrito en la forma

$$\dot{x}_{s1} = A_{11}x_{s1} + A_{12}x_{s2} + B_1u + \gamma_1(x_s) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{s2} &= A_{21}x_{s1} + A_{22}x_{s2} + B_2u + \gamma_2(x_s) \\ &\quad + D_2l \end{aligned} \quad (20)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_{s2} = C_2 x_{s2} \quad (21)$$

donde las dos fallas no afectan directamente los estados  $x_{s1}$ , la matriz  $A_{11}$  tiene valores propios estables,  $\gamma(x_s) = [\gamma_1(x_s) \quad \gamma_2(x_s)]^T = T_s g(x)$ , y la matriz  $D_2$  es igual a  $D$  eliminando el primer renglón. Esto significa que  $T_s$  puede ser elegida de modo que las fallas  $l$  y las señales conocidas estén ambas en  $x_{s2}$ . Este sistema es estable aún en presencia de las fugas  $l$  y tiene la misma estructura que (12-13) para el caso no lineal. Sin embargo, dado que no se miden todos los estados de  $x_2$ , se tiene que  $C_2 D_2 = 0$  y la condición C1 no se satisface. Esto significa que las fugas no se pueden reconstruir con un observador por modos deslizantes de acuerdo con (Edwards *et al.* 2000).

Para satisfacer C1, los estados  $x_{s3}$  y  $x_{s4}$  deben ser conocidos. Esto equivale a medir las presiones  $H_2$  y  $H_3$  en los puntos en que ocurren las fugas, lo cual es propuesto en (Colombo *et al.* 2009) para determinar las posiciones de las fugas. Se propone estimar estas variables en lugar de medirlas, de modo que la condición C1 para poder usar el observador por modos deslizantes se satisfacen.

Existen varios procedimientos para estimar  $H_2$  y  $H_3$  asumiendo flujos  $Q_1$  y  $Q_3$ :

- Diferenciación numérica de las salidas  $Q_1$  y  $Q_3$  y evaluándolas en (5) para  $i = 1, 3$ ;
- Diferenciación mediante un filtro de  $Q_1$  y  $Q_3$  y evaluándolas en (5) para  $i = 1, 3$ ;
- Uso de un estimador aproximado de  $H_2$  y  $H_3$  considerando la dinámica dada por (5-6).

En este artículo se eligió la última opción y la forma en que ésta se interconecta con el observador por modos deslizantes se describe en la siguiente subsección.

#### B. Esquema Basado en Modos Deslizantes con un Estimador Aproximado

El esquema de realimentación propuesto se compone del observador por modos deslizantes descrito en la sección III-A interconectado con un estimador, como se muestra en la figura 2.

En este esquema, el observador por modos deslizantes estima las señales de fuga  $l_1$  y  $l_2$  asumiendo que se conocen  $H_2$  y  $H_3$ , mientras que el estimador aproximado toma las señales de fuga estimadas  $\hat{l}_1$  y  $\hat{l}_2$  como entradas conocidas y estima las presiones en los puntos de fuga  $H_2$  y  $H_3$ .

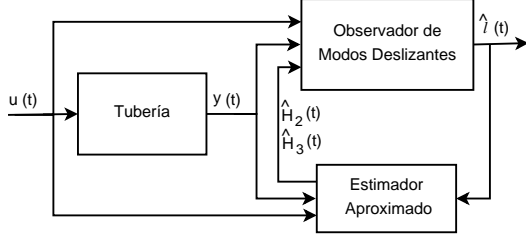


Figura 2. Diagrama de bloques del esquema propuesto para la reconstrucción de dos fugas

1) *Observador Funcional*: Dado que el sistema (8-9) es observable, para estimar  $H_2$  y  $H_3$  se puede utilizar un observador funcional para sistemas no lineales como estimador aproximado.

De acuerdo con (O'Reilly 1983), para un sistema lineal de la forma

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (22)$$

$$y = Cx \quad (23)$$

el sistema

$$\dot{z} = Fz + Gu + Ly \quad (24)$$

$$\hat{w} = Rz(t) + Vy \quad (25)$$

donde  $w = \Gamma x$  y el conjunto de matrices  $(F, G, L, R, V, T_f, \Gamma)$  es seleccionado tal que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{w} - \Gamma x) = 0 \quad (26)$$

es un observador para el sistema (22-23) si

C3.  $F$  es una matriz Hurwitz

C4.  $T_f A - FT_f = LC$

C5.  $G = T_f B$

C6.  $\Gamma = RT_f + VC$

Para el caso particular del sistema no lineal dado por (8-9), se puede diseñar un observador funcional

$$\dot{z} = Fz + Gu + T_f D \hat{l} + Ly + T_f g(\hat{x}_f) \quad (27)$$

$$\hat{w} = Rz(t) + Vy \quad (28)$$

donde las fugas estimadas  $\hat{l}$  son tomadas como entradas conocidas y el conjunto de matrices  $(F, G, L, R, V, T_f, \Gamma)$  se selecciona de modo que las condiciones C3 – C6 se satisfagan y la parte lineal de (27) domine con respecto al término no lineal. Esto equivale a usar una filosofía de observador de alta ganancia (Rajamani 1998).

Dado que sólo es necesario estimar  $H_2$  y  $H_3$ , para el modelo de la tubería sin ruido se eligieron  $z \in \mathbb{R}^3$ ,  $R = I^{3 \times 3}$ ,  $V = 0$  de modo que

$$\hat{x}_f = \begin{bmatrix} C \\ \Gamma \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y \\ \hat{w} \end{bmatrix}$$

por lo que,  $\hat{x}_{f2}$  y  $\hat{x}_{f4}$  son estimadores de  $H_2$  y  $H_3$ .

2) *Filtro de Kalman Extendido*: Para mejorar la estimación de  $H_2$  y  $H_3$  con respecto al ruido de las señales medidas se puede implementar un Filtro de Kalman, *EKF*, el cual debe ser diseñado considerando

$$\dot{\hat{x}}_k = A\hat{x}_k + Bu + g(\hat{x}_k) + D\hat{l} - K(t)e_{ky} \quad (29)$$

$$\hat{y}_k = C\hat{x}_k \quad (30)$$

donde el error está dado por  $e_{ky} = \hat{y}_k - y$ , las fallas estimadas  $\hat{l}$  son entradas conocidas y la ganancia  $K(t)$  se determina mediante la correcta elección de las matrices de covarianza de acuerdo con el ruido del sistema (Reif *et al.* 1998).

### C. Parámetros de diseño del esquema

Para el diseño del esquema completo, se proponen dos pasos:

- 1) Diseñar el estimador aproximado tomando las fallas estimadas como entradas conocidas y seleccionando las matrices de acuerdo con (27-28) para el observador funcional o, (29-30) para el *EKF* respectivamente.
- 2) Considerando  $H_2 = \hat{H}_2$  y  $H_3 = \hat{H}_3$ , las ecuaciones (19-20) y la salida aumentada dada por

$$y_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x_{s2} = C_a x_{s2}$$

diseñar un *SMO*, lo cual es posible dado que  $\text{rank}(C_a D_2) = 2$  y por lo tanto, la condición C1 se satisface.

Para el caso de un observador funcional, el error de estimación de la salida está dado por

$$e_{sy} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{s2} - y_1 \\ \hat{x}_{s3} - \hat{x}_{f2} \\ \hat{x}_{s4} - \hat{x}_{f4} \\ \hat{x}_{s5} - y_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

y para el *EKF*, está dado por

$$e_{sy} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{s2} - y_1 \\ \hat{x}_{s3} - \hat{x}_{k2} \\ \hat{x}_{s4} - \hat{x}_{k4} \\ \hat{x}_{s5} - y_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

La constante  $\rho$  se debe seleccionar de modo que se induzca el modo deslizante y se asegure la convergencia de los errores (31) y (32).

## IV. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

En la figura 3 se muestra la planta piloto instalada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM la cual consta de una tubería de hierro galvanizado de 0.105 m de diámetro y 132.56 m de longitud (Carrera y Verde 2001) con un coeficiente de fricción de 0.0222; está compuesta por un

tanque de almacenamiento de  $7.4 \text{ m}^3$  aproximadamente, una bomba hidráulica de  $50 \text{ CP}$ , válvulas de compuerta para regular el flujo, una tubería en una configuración de espiral doble que en su final desemboca en el tanque de almacenamiento y en los carretes intercambiables donde se fijan los instrumentos de medición de presión y flujo.



Figura 3. Vista lateral del ducto piloto en forma espiral

## V. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

El esquema de reconstrucción de fugas propuesto se probó en simulación con los parámetros de la planta descrita en la sección anterior. Dado que en (Verde *et al.* 2007) se reporta que para la planta piloto 12 secciones son suficientes para una buena descripción del fluido, se utilizó una discretización de 12 secciones con dos fugas caracterizadas por tamaños de orificio  $\lambda_1 = 0.0007$  y  $\lambda_2 = 0.00035$  con tiempos de ocurrencia de  $40 \text{ (s)}$  y  $90 \text{ (s)}$  respectivamente. Ambas fallas con posiciones fijas en  $45 \text{ m}$  y  $90 \text{ m}$ . Por lo anterior, los parámetros del modelo resultante son  $a_1 = 0.0077$  y  $a_2 = 1.7570 \times 10^6$ .

Para probar el desempeño del esquema de *SMO* en presencia de ruido, se agregó una señal normalmente distribuida a las salidas medidas. En las figuras 4 y 5 se muestran los resultados de reconstrucción con un Filtro de Kalman Extendido como estimador aproximado.

Para probar la robustez con respecto a cambios en el punto de operación, se modificó la magnitud de las presiones de entrada del ducto para producir dicho cambio. En las figuras 6 y 7 se muestran las señales reconstruidas. Se puede observar un incremento en la magnitud de las señales de falla a los  $140 \text{ (s)}$  causado por el aumento de la presión en el cambio de punto de operación.

## VI. RESULTADOS CON DATOS EXPERIMENTALES

El esquema propuesto se probó con datos experimentales tomados de la planta descrita en la sección 4 con un periodo de muestreo de  $1 \text{ s}$ . Se realizó una interpolación con el fin de poder usar el esquema de reconstrucción con un modelo en tiempo continuo. Por otro lado, para lograr que las señales medidas tuviesen un ruido con media cercana a cero, primero se tomaron muestras de los flujos sin fugas. Con dichas muestras se obtuvo una caracterización que

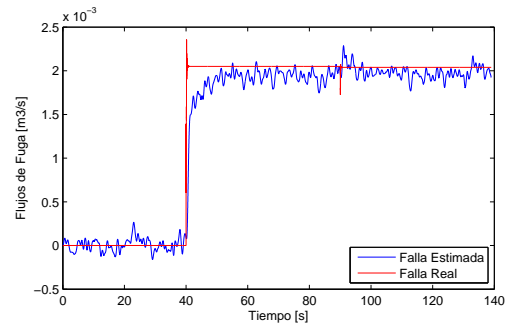


Figura 4. Estimación de la fuga  $l_1$  con un modelo simulado de 12 secciones y ruido en las salidas

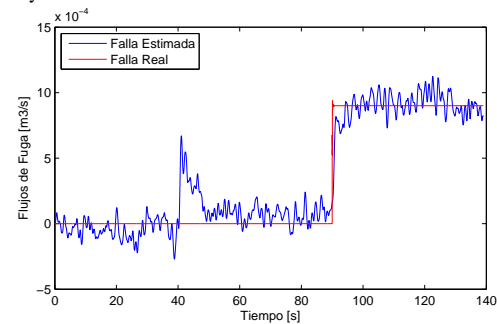


Figura 5. Estimación de la fuga  $l_2$  con un modelo simulado de 12 secciones y ruido en las salidas

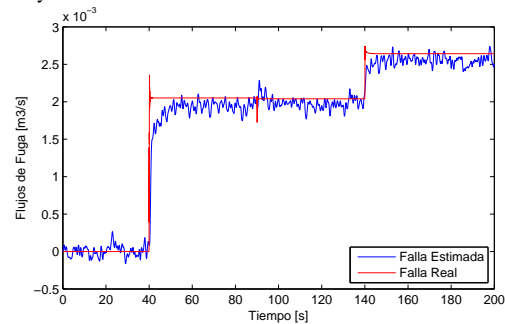


Figura 6. Reconstrucción de la fuga  $l_1$  con un simulador de 12 secciones, ruido en las salidas y un cambio en las presiones

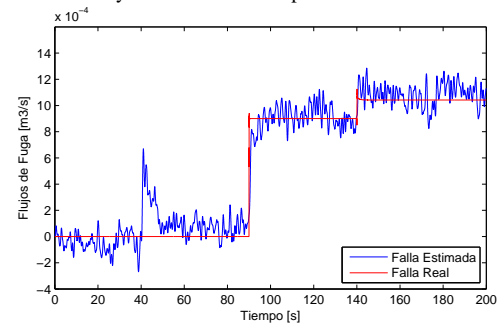


Figura 7. Reconstrucción de la fuga  $l_2$  con un simulador de 12 secciones, ruido en las salidas y un cambio en las presiones

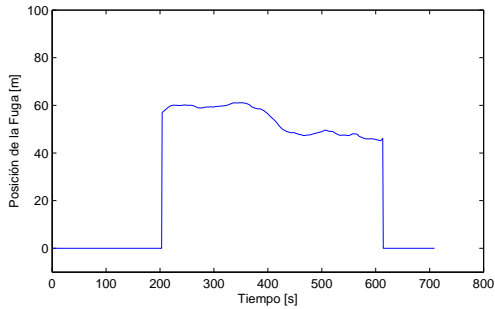


Figura 8. Posición estimada de la fuga  $l_1$  de acuerdo con (7)

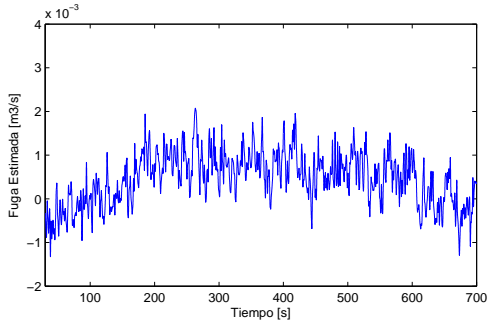


Figura 9. Reconstrucción de la fuga  $l_1$  con datos experimentales y posición estimada de acuerdo con (7)

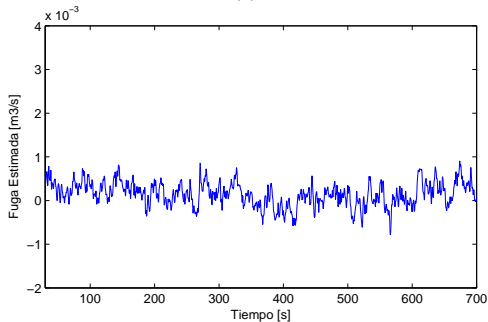


Figura 10. Reconstrucción de la fuga  $l_2$  con datos experimentales y posición arbitraria de la segunda fuga

posteriormente se utilizó para ajustar las señales medidas y así obtener una mejor reconstrucción. Dado que el esquema propuesto supone que se conoce o se tiene una estimación de las posiciones de las fallas, los experimentos se realizaron con sólo una fuga con el fin de utilizar la ecuación (7) para obtener un estimado de la posición y luego aplicar el esquema de *SMO* para realizar la reconstrucción. La posición de la fuga  $l_1$  se fijó según lo estimado por (7) mientras que  $l_2$  se fijó arbitrariamente dado que la magnitud de esta segunda fuga es cero.

En la figura 8 se muestra la posición estimada de  $l_1$  de acuerdo con (7), se observa que el valor no resulta constante debido al ruido en las mediciones. La reconstrucción de la primera fuga  $l_1$  se muestra en la figura 9; se observa que aumenta su magnitud entre los segundos 200 y 600 aproximadamente, mismos en los que la posición estimada  $z_{eq}$  es diferente de cero. El valor de la fuga  $l_2$  permanece

alrededor de cero como se aprecia en la figura 10.

## VII. CONCLUSIONES

Se propuso la integración de un observador de modos deslizantes con un estimador aproximado para la reconstrucción de dos fugas simultáneas en una tubería en la que sólo se conocen presiones y flujos en los extremos asumiendo que se conoce o se tiene una aproximación de las posiciones. El esquema propuesto es capaz de realizar la reconstrucción aun cuando el sistema opera en estado de equilibrio y cuando existen cambios en el punto de operación. Los resultados en simulación y con datos experimentales de una instalación piloto muestran la potencialidad y efectividad del esquema propuesto para reconstruir fugas en ductos.

## REFERENCIAS

- Billman, L. y R. Isermann (1987). Leak detection methods for pipelines. *Automatica* **23**(3), 381–385.
- Carrera, R. y C. Verde (2001). Localizador automático de fugas en un ducto. *Ingeniería Hidráulica en México* **XVI**, 139–151.
- Chaudry, Hanif M. (1979). *Applied hydraulic transients*. Von Nostrand Reinhold Co. New York, USA.
- Chen, J. y R. J. Patton (1999). *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers. Boston, USA.
- Colombo, Andrew F., Pedro Lee y Bryan W. Karney (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-Environmental Research* (2), 212–227.
- Ding, S. X. (2008). *Model-based fault diagnosis techniques*. Springer.
- Edwards, Ch., S. K. Spurgeon y R. J. Patton (2000). Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica* **36**, 541–553.
- Edwards, Christopher, Halim Alwi y Chee Pin Tan (2010). Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control. En: *Conference on Control and Fault Tolerant Systems Nice, France, October 6-8*.
- Ferrante, Marco y Bruno Brunone (2003). Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests: 1. harmonic analysis. *Advances in Water resources* **26**, 95–105.
- Korbicz, J., J. Kościelny, Z. Kowalczyk y W. Cholewa (2004). *Fault diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications*. Springer-Verlag.
- Lee, Pedro, John Vitkovsky, Martin Lambert, Angus Simpson y James Liggett (2005). Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study. *Journal of Sound and Vibration* **284**, 1051–1075.
- O'Reilly, John (1983). *Observers for Linear Systems*. Academic Press. Londres.
- Rajamani, Rajesh (1998). Observers for lipschitz nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* **43**(3), 397–401.
- Reif, Konrad, Frank Sonnenmann y Rolf Unbehauen (1998). An ekf-based nonlinear observer with a prescribed degree of stability. *Automatica* **34**(9), 1119–1198.
- Scott, Stuart y Maria Barrufet (2003). Worldwide assessment of industry leak detection capabilities for single and multiphase pipelines. Internal Report 18133. Department of Petroleum Eng, Texas A&M University.
- Torres, L., G. Besançon y D. Georges (2009). Multi-leak estimator for pipelines based on an orthogonal collocation model. En: *48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China*.
- Verde, C., N. Visairo y S. Gentil (2007). Two leaks isolation in a pipeline by transient response. *Applied Water Resources*, **30**, 1711–1721.