

Aislamiento de una fuga en tiempo real en una tubería plástica mediante un observador basado en modos deslizantes

J. Delgado-Aguíñaga* O. Begovich*

*CINVESTAV-IPN, Unidad Guadalajara, Av. Del Bosque 1145, C.P. 45019, Col. El Bajío, Zapopan, Jalisco, México
(Tel: 52 33 3777 3600 ext. 1075; e-mail: adelgado@gdl.cinvestav.mx; obegovi@gdl.cinvestav.mx).

Resumen: Este trabajo presenta la implementación en tiempo real de un algoritmo para localizar una fuga en una tubería plástica, transportando agua a presión. El algoritmo está basado en un observador de estado diseñado con un Diferenciador Exacto Robusto por Modos Deslizantes. Se tienen sensores de presión y gasto en los extremos de la tubería para el aislamiento de la fuga. Resultados en tiempo real son presentados para mostrar la eficiencia del algoritmo.

Palabras clave: diagnóstico de fallas, modos deslizantes, tiempo real, observadores, tuberías.

1. INTRODUCCION

En los últimos años el transporte de fluidos a través de tuberías ha tenido un importante desarrollo. Un problema que ha acarreado esta situación, es la pérdida de fluidos en las tuberías debido a fugas ocasionadas por deterioro de la misma y en algunos casos por la extracción ilegal de fluidos, principalmente combustibles. Por esta razón, el problema de detección y aislamiento de fugas en tuberías ha cobrado gran importancia en el ámbito de la investigación alrededor del mundo.

Actualmente, los principales enfoques para la detección y aislamiento de fugas son: Métodos Externos, Eiswirth et al. (2001), que son los que utilizan dispositivos y/o equipo de alta tecnología, incluso personal técnico especializado para detectar y aislar una fuga, y los Métodos Internos, que están constituidos por algoritmos basados en el modelo matemático que describe la dinámica de un fluido dentro de una tubería. Este último grupo concentra a Algoritmos Sensitivos a Fallas (ASF), por ejemplo Billman et al. (1987), Begovich et al. (2012), Pizano-Moreno et al. (2010), y por otro lado Algoritmos con Falla Modelada (AFM), por ejemplo Navarro et al. (2013, 2012, 2011), Pizano Moreno et al. (2012), y Verde et al. (2008, 2001). Sin embargo, la mayoría presentan resultados solo en simulación o ambientes controlados, donde no se puede tomar en cuenta todos los fenómenos que se presentan en situaciones reales.

En los últimos años, el enfoque de modos deslizantes ha sido ampliamente utilizado para problemas de control y observación, debido a sus características de convergencia en tiempo finito, robustez a incertidumbres e insensibilidad a perturbaciones externas acotadas, Utkin et al. (2009), De Carlo et al. (2011). Así mismo, uno de los trabajos más significativos bajo este enfoque, que aborda el problema de la detección y aislamiento de fugas, fue presentado por Navarro et al. (2012) cuya principal aportación es un Observador basado en un Diferenciador Exacto Robusto por Modos

Deslizantes (DERMD) propuesto por Levant (1998), y cuyos resultados en simulación muestran una precisa y rápida estimación de la localización e intensidad de la fuga.

En este trabajo, se implementa en tiempo real el algoritmo para aislar una fuga presentado en Navarro et al. (2012), en el prototipo de tuberías plásticas construido en el CINVESTAV-IPN Unidad Guadalajara, descrito en Begovich et al. (2012). Lo anterior se hace, ya que los estudios en simulación no pueden tomar en cuenta todos los fenómenos que se presentan en una tubería real como lo son: variaciones en las propiedades físicas del fluido (viscosidad, densidad, etc.) que dependen de la temperatura y que impactan directamente al factor de fricción. Así mismo, algunos fenómenos como turbulencias, ruidos eléctricos, vibraciones mecánicas, etc., que son introducidos por los accesorios (acoplamientos, codos, válvulas, etc.), sensores y bomba, respectivamente. Por lo tanto, puesto que la línea de investigación en Aislamiento y Detección de fugas es de importancia práctica, dicha investigación queda incompleta si los algoritmos diseñados no son evaluados en tiempo real.

Para la implementación en tiempo real, en este trabajo, primeramente se utiliza el modelo descrito en Navarro et al. (2012), donde los estados son: los gastos, las cabezas de presión, la posición de la fuga y un parámetro relacionado con la intensidad de la fuga. Después, el modelo no lineal resultante es utilizado para diseñar el observador basado en DREMD, que es empleado para aislar una fuga (mediante estimación directa de su localización).

El artículo continúa como sigue: La Sección 2 presenta el modelo hidráulico de la dinámica del agua, así como el modelo que se usará para el diseño del Aislador. La Sección 3 describe el esquema del observador basado en DREMD. La Sección 4 muestra los resultados obtenidos en tiempo real. Finalmente, en la Sección 5 se dan las conclusiones.

2. MODELO MATEMÁTICO

Esta sección presenta las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento de un fluido en una tubería, el modelo del factor de fricción así como el modelo de la fuga. Por último un modelo en espacio de estados no lineal, de dimensión finita es obtenido por medio de una discretización espacial.

2.1 Ecuaciones del Modelo

Las ecuaciones que describen la respuesta transitoria de un fluido que circula a través de una tubería son conocidas en la literatura como las Ecuaciones del Golpe de Ariete, Wylie et al. (1993). Dichas ecuaciones son un par de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) que se obtienen mediante balances de masa y energía. El modelo dinámico no lineal se deduce, bajo las siguientes suposiciones: se considera una tubería recta sin pendiente donde el fluido es ligeramente compresible, la pared del ducto es ligeramente deformable, los cambios convectivos en la velocidad son despreciables y el área de la sección transversal de la tubería, el diámetro y la densidad del fluido son constantes, la temperatura se considera constante. Entonces las EDP que rigen el estado transitorio de un fluido, pueden ser escritas como, Roberson et al. (1998):

Ecuación de momento:

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

Ecuación de continuidad:

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

donde Q es el gasto volumétrico [m^3/s], H es la cabeza de presión en [m], z es la coordenada en distancia [m], t es la coordenada en tiempo [s], g es la aceleración de la gravedad [m/s^2], A es la sección transversal de la tubería [m^2], b es la velocidad de onda de presión en el fluido [m/s], $\mu = f/2DA$, D es el diámetro interno [m] y f es el factor de fricción [adimensional].

2.2 Velocidad de Onda de Presión

La velocidad de onda de presión puede ser calculada como, Roberson et al. (1998), $b = \sqrt{(K/\rho) / (1 + KD/\sigma E)}$, donde σ es el espesor de la pared del tubo [m], E es el módulo de elasticidad del material del tubo [Pa], ρ es la densidad del agua [kg/m^3] y K es el módulo de elasticidad del agua [Pa].

2.3 Modelo de la Fricción

En el presente trabajo, el factor de fricción f es calculado usando la ecuación de Swamee-Jain, presentada en Swamee et al. (1976).

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

donde ε es la rugosidad de la tubería en [m] Re es el número de Reynolds [adimensional], dado por $Re = QD/\nu A$, donde ν es la viscosidad cinemática del agua en [m^2/s], la cual puede ser calculada como: $\nu = Ce^{a/T}$, donde C y a son constantes empíricas que requieren datos de viscosidad a dos temperaturas para su evaluación, T es la temperatura del agua en grados Kelvin, Crowe et al. (1998).

2.4 Modelo de la fuga

El gasto que pasa a través de un orificio (fuga) en una tubería puede ser modelado como: $Q_f = C_d A_f \sqrt{2g} \sqrt{H_f}$, donde C_d es el coeficiente de descarga, A_f es el área del orificio. Ahora definiendo $\lambda = C_d A_f \sqrt{2g}$, Q_f puede ser expresado como:

$$Q_f = \lambda \sqrt{H_f} \quad (4)$$

donde Q_f es el gasto que pasa a través de la fuga, H_f es la cabeza de presión en el punto de la fuga, Crowe et al. (1998).

2.5 Discretización espacial de las EDP

Para obtener una representación en espacio de estados del modelo (1) y (2), estas EDP son discretizadas con respecto a la variable espacial z , como en Chaudhry (1987) y Verde (2001), usando las siguientes relaciones:

$$\frac{\partial H}{\partial z} \approx \frac{H_{j+1} - H_j}{z_j}, \quad \frac{\partial Q}{\partial z} \approx \frac{Q_j - Q_{j-1}}{z_j} \quad (5)$$

considerando solo 2 secciones, entonces ($j=1,2$). La representación gráfica de la discretización se muestra en la Fig. 1.

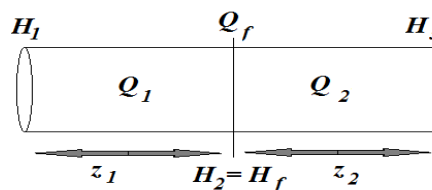


Fig. 1. Discretización de la tubería que induce una fuga Q_f .

Finalmente aplicando la discretización espacial mediante (5) a las EDP (1) y (2) junto con el cálculo del factor de fricción de Swamee-Jain usando (3) y el modelo de la fuga (4) e incorporando los estados adicionales: posición de la fuga z_1 y el parámetro λ de la fuga, ver Besançon (2007), se obtiene la siguiente representación en espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{Q}_1 \\ \dot{H}_2 \\ \dot{Q}_2 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-gA}{z_1}(H_2 - u_1) - \mu Q_1 |Q_1| \\ \frac{-b^2}{gAz_1}(Q_2 - Q_1 + \lambda\sqrt{H_2}) \\ \frac{-gA}{L - z_1}(u_2 - H_2) - \mu Q_2 |Q_2| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde el vector de entrada es $u = [H_1 \ H_3]^T = [u_1 \ u_2]^T$, ya que estas señales son medidas y el vector de salida es $y = [Q_1 \ Q_2]^T$.

Así mismo, el modelo dinámico (6) involucra la Longitud de la tubería L , sin embargo el cálculo de este parámetro requiere el conocimiento del concepto de Longitud en Equivalente Recto (LER), que se describe en la siguiente subsección.

2.6 Longitud en Equivalente Recto

Los accesorios son imprescindibles en casi todo sistema de tuberías, y entre ellos se incluyen aquellos que permiten acomodar el trazado de la red a las condiciones topográficas del terreno como lo son: (acoplamientos, válvulas, codos, etc.). Los elementos mencionados producen pérdidas de carga que, al estar originadas por dispositivos concretos se conocen con el nombre de pérdidas localizadas, o menores. Las pérdidas localizadas se pueden expresar también en función de la LER de la tubería, que se define como la longitud de tubería que produce la misma pérdida de carga que el accesorio en cuestión. Por lo tanto la LER se puede expresar como: $LER = L_r + \sum L_l$, donde L_r es la longitud real del tramo de tubería analizado y $\sum L_l$ es la sumatoria de todas las pérdidas localizadas en el tramo analizado. De este modo L en (6) representará la LER entre los extremos de la tubería; z_1 será la LER entre el inicio de la tubería hasta el punto de la fuga, y $z_2 = L - z_1$ será la LER entre el punto de fuga y el final de la tubería, los cuales son calculados usando la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$LER = \frac{\Delta H(D^5 \pi^2 g)}{fQ^2 8} \quad (7)$$

donde ΔH es la caída de presión entre los puntos de interés en [m] y Q es el gasto volumétrico antes de la ocurrencia de la fuga.

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR

Se considera el sistema no lineal (6) en la forma compacta:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (8)$$

donde $x = [Q_1 \ H_2 \ Q_2 \ z_1 \ \lambda]^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$, $y = [h_1(x) \ h_2(x)]^T = [x_1 \ x_3]^T$ y una matriz $H(x)$ de las derivadas de Lie de $h_j(x)$ en la dirección del campo vector $f(x)$.

$$H(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ L_f h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h_1(x) \\ \vdots \\ h_p(x) \\ L_f h_p(x) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h_p(x) \end{bmatrix} \quad (9)$$

El sistema (8) cumple la condición de rango de observabilidad, $\text{rango}(O(x)) = \partial H(x)/\partial x = n$ y por lo tanto se puede elegir un observador de la forma:

$$\hat{x} = O^{-1}(x)(V(t)) \quad (10)$$

donde $O(x)$ es la matriz de observabilidad de (8) y $V(t)$ es una matriz de n vectores independientes de $H(x)$, ver Navarro et al (2012). Por lo tanto el observador está dado por (11)-(15):

$$\hat{x}_1(t) = x_1 \quad (11)$$

$$\hat{x}_2 = \frac{L - \hat{x}_4}{gA} (\hat{x}_3 + \mu \alpha_3^2) + u_2 \quad (12)$$

$$\hat{x}_3(t) = x_3 \quad (13)$$

$$\hat{x}_4 = \frac{L(\hat{x}_3 + \mu \alpha_3^2) - gA(u_1 - u_2)}{(\hat{x}_3 + \mu \alpha_3^2) - (\hat{x}_1 + \mu \alpha_1^2)} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_5 &= \frac{1}{\sqrt{\hat{x}_2}} \left[\frac{\hat{x}_4}{b^2} \left(\hat{x}_1 - \frac{2\mu \alpha_1 gA(\hat{x}_2 - u_1)}{\hat{x}_4} - 2\mu \alpha_1^3 \right) \right] \\ &+ \frac{1}{\sqrt{\hat{x}_2}} [x_1 - x_3 + \dot{u}_1] \end{aligned} \quad (15)$$

Se puede ver que para implementar el observador es necesario calcular los estimados de las derivadas de las señales medibles x_1, x_3, u_1 , para ello se utiliza el DERMD

propuesto por Levant (1998), el cual se describe en la siguiente subsección.

3.1 Diferenciador Exacto Robusto por Modos Deslizantes

Sea $s(t) \in C^{\bar{k}}[0, \infty)$, una función diferenciable y sea $k \leq \bar{k}$, entonces el diferenciador de k -ésimo orden es definido como una aplicación como sigue:

$$SD_k(s(t)) \mapsto col(s(t), \xi_1, \dots, \xi_k) \quad (16)$$

SD_k = k -ésima derivada por Modos Deslizantes de la señal $s(t)$. El cual provee estimación exacta en tiempo finito bajo condiciones ideales cuando el ruido no está presente.

donde:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_0 &= \xi_0 \\ \xi_0 &= -\varphi_k \Gamma^{k+1} \left| \xi_0 - s(t) \right|^{k+1} \text{sign}(\xi_0 - s(t)) + \xi_1 \\ \dot{\xi}_1 &= \xi_1 \\ \xi_1 &= -\varphi_{k-1} \Gamma^k \left| \xi_1 - \xi_0 \right|^{k-1} \text{sign}(\xi_1 - \xi_0) + \xi_2 \\ &\vdots \\ \dot{\xi}_{k-1} &= \xi_{k-1}, \\ \xi_{k-1} &= -\varphi_1 \Gamma^2 \left| \xi_{k-1} - \xi_{k-2} \right|^2 \text{sign}(\xi_{k-1} - \xi_{k-2}) + \xi_k \\ \dot{\xi}_k &= -\varphi_0 \Gamma \text{sign}(\xi_k - \xi_{k-1}) \end{aligned} \quad (17)$$

donde $\xi_i, (i = 0, \dots, k)$ es la estimación de la i -ésima derivada $s^{(i)}(t)$. $\varphi_i (i = 0, \dots, k)$ son los parámetros del diferenciador. Para el caso de la ganancia Γ , la siguiente condición es dada: **Condición 1:** El parámetro Γ es seleccionado tal que es un límite superior para $|s^{k+1}|$. Si la **Condición 1** se cumple, entonces $col(s(t), \xi_1, \dots, \xi_{n-1}) = col(s(t), \dot{s}(t), \dots, s^{(n)}(t))$ en tiempo finito.

Para el presente caso de estudio la señales: x_1, x_3 y u_1 , que son medidas se consideran como $s(t)$, en (17), cada una de manera individual, para estimar las siguientes derivadas: \hat{x}_1 , \hat{x}_3 y \hat{u}_1 , con $k=1$, los parámetros son elegidos como: $\varphi_1=1.1$, $\varphi_2=1.5$. Posteriormente se estima la segunda derivada de x_1 (\hat{x}_1), con $k=2$, y los parámetros son elegidos como: $\varphi_1=1.1$, $\varphi_2=1.5$, $\varphi_3=2$, en ambos casos la ganancia $\Gamma=1$, Levant (1998). Una vez obtenidas las estimaciones: \hat{x}_1 , \hat{x}_3 y \hat{u}_1 , el observador (11)-(15) estima, $x_2=H_2$, $x_4=z_1$ y $x_5=\lambda$, ver Navarro et al. (2012).

4. RESULTADOS EN TIEMPO REAL

4.1 Descripción del prototipo

Para el presente trabajo, se consideró el prototipo de tuberías citado en la introducción, el cual transporta agua y cuyos tubos están fabricados con Polopropileno Copolímero Random (PP-R) bajo la norma de fabricación NMX-E-226/2-1998-SCFI. El diagrama esquemático del prototipo se muestra en la Fig. 2.

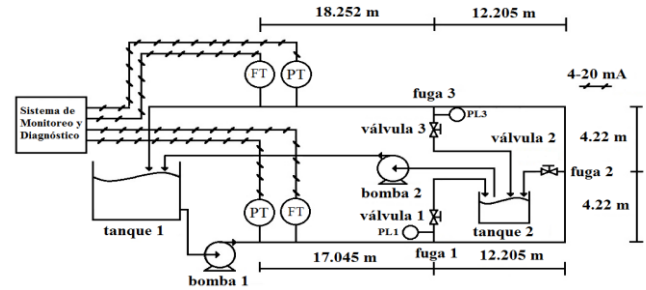


Fig. 2. Esquema del prototipo de tubería.

Dicho prototipo está equipado con un sensor de presión y un sensor de gasto en cada extremo de la tubería, los sensores de gasto son modelo *Proline Promag 10P* y los sensores de presión son modelo *PMP 41*, ambos marca *Endress Hauser*. Cabe señalar que las mediciones de estos sensores: $Q_{in}(t)$, $Q_{out}(t)$, $H_{in}(t)$ y $H_{out}(t)$, respectivamente, son utilizadas por el algoritmo para aislar la fuga. Por otro lado, también se cuenta con 2 sensores de presión marca *Winters*, colocados sobre las válvulas 1 y 3 que emulan una fuga. Es importante señalar que la única finalidad de éstos sensores de presión, es el de permitir validar las estimaciones de presión en los puntos de fuga, y estas mediciones: $H_{L1}(t)$ y $H_{L3}(t)$, no son utilizadas por el algoritmo de aislamiento. También se tiene un sensor de temperatura tipo *PT 100*, colocado en el tanque 1. Así mismo, para distribuir el agua, se cuenta con una bomba centrífuga de 5HP modelo 7502MEAU marca *Siemens*TM (bomba 1) controlada con un variador de frecuencia de 0-60 Hz, para ajustar la presión de la bomba. Tres válvulas de paso están colocadas a los 17.045 m (válvula 1), 33.47 m (válvula 2), 49.895 m (válvula 3). Finalmente, para evitar que el agua se desperdicie, se cuenta con un sistema de recuperación del agua en dónde una bomba centrífuga 1 HP (bomba 2) modelo *3HME100* marca *Evans*, retorna el agua desde el tanque 2 al tanque 1. El sistema de monitoreo y diagnóstico utiliza la tarjeta de adquisición NI USB-6229 de *National Instruments*TM, interactuando con *LabView*TM, y *Matlab*TM. La computadora utilizada tiene las siguientes características: Procesador *IntelR Core*TM i7-2600K 3.40GHz; 16 GB (15.7GB) en RAM, DDR3 833MHz; OS *Windows*TM 8. Finalmente los parámetros de la tubería son:

Tabla 1. Parámetros del prototipo de tuberías

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Longitud entre sensores	L_r	68.147	m
Diámetro interno	D	0.0627	m
Espesor	σ	0.0013	m
Rugosidad	ϵ	7×10^{-6}	m
Inclinación	θ	0	grados

4.2 Procesamiento de las señales

Las señales $Q_{in}(t)=Q_1(t)$, $Q_{out}(t)=Q_2(t)$, $H_{in}(t)=H_1(t)$, $H_{out}(t)=H_3(t)$ y $T(t)$ (temperatura del agua) son empleadas por el algoritmo de aislamiento y las señales $H_{L1}(t)$ y $H_{L3}(t)$ son utilizadas para la comprobación de los resultados según sea el caso. Todas estas mediciones son adquiridas a una frecuencia de muestreo de 125 Hz (equivalente a un periodo de muestreo de 0.008 s) y son tratadas mediante el siguiente filtro de media móvil:

$$r(n) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} g(n-l) \quad (18)$$

donde $M=3$, $r(n)$ es la señal filtrada y $g(n)$ es la señal a filtrar.

4.3 Experimento

El escenario del experimento es el siguiente: la temperatura se mantiene casi constante durante el experimento, en promedio 37.4°C ; a esta temperatura, las propiedades físicas del agua son: $\nu = 6.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho = 993.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, por lo tanto el factor de fricción es $f = 0.0158$ y el equivalente recto de toda la tubería es $LER = 86.86 \text{ m}$. El algoritmo es inicializado en condiciones de estado estacionario sin fuga como sigue: La cabeza de presión al inicio de la tubería es $H_1(0) = 20.1778 \text{ m}$ y al final de la tubería es $H_3(0) = 10.6187 \text{ m}$. Los gastos $Q_1(0) = Q_2(0) = 0.009 \text{ m}^3/\text{s}$; la condición inicial de $z_1(0) = \frac{1}{2} LER \text{ m}$; el parámetro λ se inicializa como; $\lambda(0) = 0 \text{ m}^{5/2}/\text{s}$, finalmente $H_2(0) = 15.3982 \text{ m}$, fue calculada con la ecuación de Darcy-Weisbach a la distancia $z_1(0)$. La fuga 1 es inducida en la válvula 1 a los 62 s de iniciado el experimento ($t_{fuga} = 62 \text{ s}$). El observador inicia el aislamiento de la fuga con la activación de una simple alarma que indica la presencia de la fuga cuando $|Q_{entrada} - Q_{salida}| > 1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, este umbral fue elegido en base a la varianza del ruido en la medición de los gastos. La Figura 3 muestra las cabezas de presión en los extremos de la tubería.

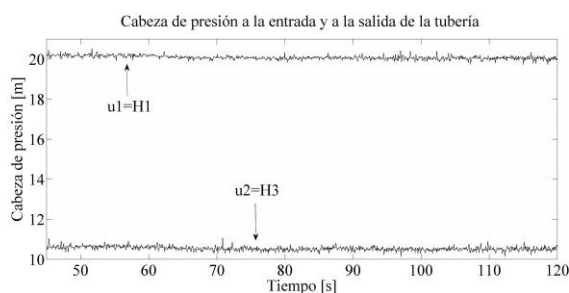


Fig. 3. Cabezas de presión H_1 y H_3 medidas.

La Figura 4 muestra la evolución de los gastos Q_1 y Q_2 .

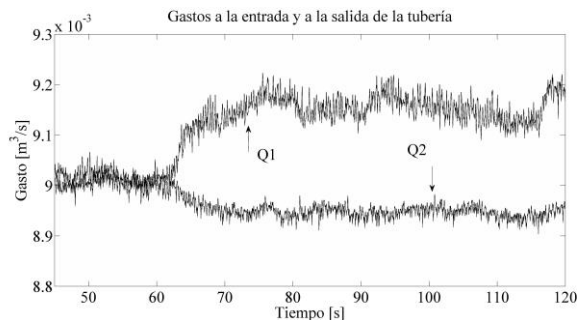


Fig. 4. Gastos Q_1 y Q_2 medidos.

La Figura 5 muestra H_2 y \hat{H}_2 . La Tabla 2 muestra las características estadísticas correspondientes en el intervalo de tiempo $I = [65, 120] \text{ s}$.

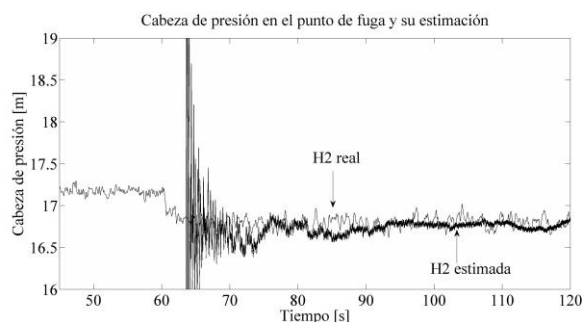


Fig. 5. Cabeza de presión en el punto de fuga H_2 y \hat{H}_2 .

Tabla 2. Características estadísticas para H_2 y \hat{H}_2

	H_2	\hat{H}_2
Media aritmética	16.7941 m	16.7281 m
Desviación estándar	0.0676 m	0.1054 m

El error en la estimación es -0.3929% con respecto a la media aritmética de la medición real en el intervalo I . La Figura 6, muestra λ y su estimado $\hat{\lambda}$. La Tabla 3 muestra las características estadísticas correspondientes.

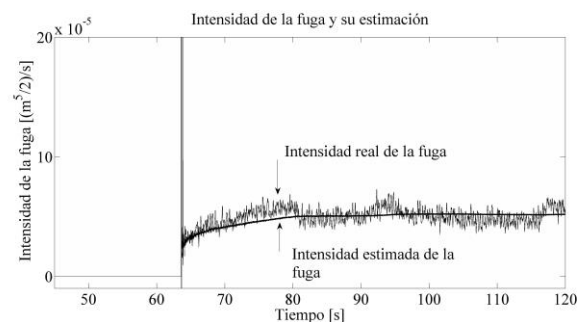


Fig. 6. Parámetro λ y su estimación $\hat{\lambda}$, respectivamente

Tabla 3. Características estadísticas para λ y $\hat{\lambda}$

	λ	$\hat{\lambda}$
Media aritmética	$4.96 \times 10^{-3} \text{ m}^{5/2}/\text{s}$	$4.91 \times 10^{-3} \text{ m}^{5/2}/\text{s}$
Desviación estándar	$6.67 \times 10^{-6} \text{ m}^{5/2}/\text{s}$	$4.40 \times 10^{-6} \text{ m}^{5/2}/\text{s}$

El error en la estimación es de -1.4954% con respecto a la media aritmética de la magnitud real calculada en I . El gasto $Q_f = 0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$ es calculado usando (4) con $\hat{\lambda}$ y \hat{H}_2 , que es equivalente al 2.2715 % del gasto nominal. La Fig. 7 muestra la posición z_1 en LER usando (7) con $\Delta H = H_{in}(t) - H_{Li}(t)$, y su estimación \hat{z}_1 en LER. La Tabla 4 muestra las características estadísticas correspondientes.

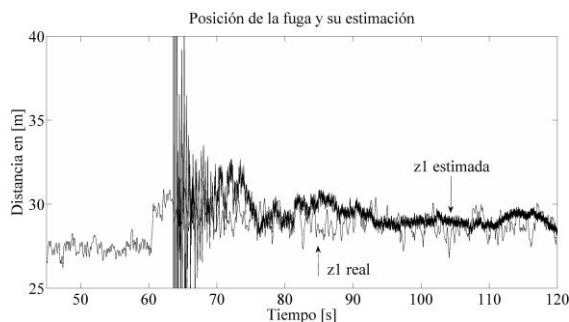


Fig. 7. Posición de la fuga z_1 en LER y su estimación \hat{z}_1 en LER.

Tabla 4. Características estadísticas para λ y $\hat{\lambda}$

	z_1	\hat{z}_1
Media aritmética	28.6674 m	29.4304 m
Desviación estándar	0.8616 m	0.9905 m

El error en la estimación es 2.6615% con respecto a la media aritmética de la posición real calculada en el intervalo I .

5. CONCLUSIONES

La estimación de la posición para una fuga menor al 5 % del gasto nominal fue precisa. Otros algoritmos implementados en el mismo prototipo, entre ellos el Filtro de Kalman extendido (FKE) no han sido capaces de aislar fugas adecuadamente por debajo de ese porcentaje, en el caso del FKE se han aislado fugas alrededor del 10% del gasto nominal. El algoritmo presentado se puede utilizar para redundancia analítica junto con otros algoritmos para localizar una fuga. Como trabajo a futuro el algoritmo se implementará en línea y con variaciones de temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT, por el apoyo a través del proyecto 177656.

REFERENCIAS

Begovich O., Pizano-Moreno A., y Besançon G. (2012). Online implementation of a leak isolation algorithm in a plastic pipeline prototype, *Latin American Applied Reach Journal, LAAR*, vol. 42.

Besançon G., (2007). *Nonlinear Observers and Applications*, LNCIS, Springer.

Billman L., y Isermann R. (1987). Leak detection methods for pipelines. *Automatica*, vol. 23, pp. 381-385.

Chaudhry M. H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold.

Crowe, Roberson, Elger, (1998). *Mecánica de fluidos*. 7 ed, CECSA.

De Carlo R.A., Zak S., y Drakunov S. V. (2011). *The Control Handbook: a Volume in the Electrical Engineering Handbook Series*, Charper 50, Variable Structure, Sliding Mode Controller Design. CRC Press, Inc.

Eiswirth M., L. S. Burn, (2001). New Methods for detect Diagnosis of Water Pipelines. In Conf. on Water Pipeline Systems, 28-3, March, UK.

Levant A., (1998). Robust Exact Differentiation via Sliding Mode Technique. *Automatica*, vol. 34, No. 3, pp. 379-384.

Navarro, A, Begovich O., Besançon G., y Dulhoste J. (2011). Real-time leak isolation based on state estimation in a plastic pipeline, in *Control Applications (CCA), IEEE International Conference*, pp. 953-957.

Navarro, A, Begovich O., Sánchez-Torres J. D., Besançon G., y Murillo J. A. P. (2012). Leak detection and isolation using an observer based on robust sliding mode differentiators, en *World Automation Congress (WAC)*, pp. 1-6.

Navarro A., Sánchez-Torres J. D., Begovich O., Besançon G., Patiño-Murillo J. A., (2013). An Algebraic Observer for Leak Detection And Isolation in Plastic Pipelines. In *European Control Conference (ECC)*, July 17-19, Zürich, Switzerland.

Pizano-Moreno A., Begovich O., (2010). Isolation of Two Non-Concurrent Leaks in Water Pipelines. In *7th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, September 8-10, Tuxtla Gutierrez, México.

Pizano-Moreno A., Begovich O., (2012). Leak Isolation with Temperature Compensation in Pipelines. In *9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, September 26-28, Mexico City, México.

Roberson J. A., and Cassidy J. J. (1998) y Chaudhry M. H. *Hydraulic Engineering*. Wayne Anderson.

Swamee K., y Jain K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *Hydraulics Division*, vol. 102, pp. 657-664.

Utkin V., Guldner J., y Shi J. (2009). *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. Second Edition (Automation and Control Engineering). CRC Press, 5.

Verde C., (2001). Leakage Location in Pipelines by Minimal Order Nonlinear Observer. *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, VA June 25-27.

Verde C., Morales-Menendez R., Garza L. E., Vargas A., Velasquez-Roug C., Rea C., Aparicio, C. T., De la Fuente J. O., (2008). Multi-Leak Diagnosis in Pipelines A comparision of Approaches. *70th Mexican International Conference on Artificial Intelligence*.

Wylie E. B., Street L., Sou L., (1993). *Fluid Transients in Systems*. Ed. Prentice Hall.