

Localizador automático de fugas en un ducto

Rolando Carrera Méndez
Cristina Verde Rodarte

Universidad Nacional Autónoma de México

Se describe y analiza un método que permite detectar y ubicar fugas de líquidos en un ducto sin tomas laterales en tiempo real. A partir de una operación en estado permanente y del monitoreo de los gradientes de presión en los extremos de la tubería, se derivan expresiones que permiten detectar la existencia de una fuga y su localización. También se muestra que para fugas pequeñas se pueden obtener expresiones alternativas para la detección y localización, basadas en las desviaciones de los flujos con respecto a sus valores nominales. Dicha desviación se estima con un observador dinámico no lineal del comportamiento del flujo. La realización es de fácil implantación y el algoritmo de detección y localización requiere de pocos recursos de computación. Del análisis presentado se desprende que el localizador es muy sensible a las variaciones en la estimación de la fricción de D'Arcy-Weissbach del ducto.

Palabras clave: tuberías, fugas, aislamiento y detección de fallas (FDI), correlación, supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), observador dinámico.

Introducción

La confiabilidad y seguridad de las redes de distribución de fluidos es un problema importante y de gran preocupación en el ámbito mundial. Eventos externos, variaciones climatológicas, corrosión, envejecimiento, etcétera, ocurren y pueden provocar daños en la instalación. En general, 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 las fugas u obstrucciones con un mínimo de instrumentación y costo.

Algunos de los métodos usados en la práctica para localizar fugas y obstrucciones emplean, por ejemplo, lo siguiente: balance de masa en estado permanente, el cual tiene el inconveniente de ser sensible a perturbaciones y a la dinámica de la tubería; la prueba hidrostática, que requiere vaciar la tubería e inyectarle aire a presión (esta presión se monitorea durante un tiempo y si decae, entonces se concluye que hay una fuga; para localizarla se requiere segmentar, sellar y repetir la prueba hasta ubicarla); otra prueba que también requiere sacar de operación a la tubería es la inspección física que se hace con diablos (*pigs*), estos dispositivos recorren la tubería por dentro y llevan sensores que les permiten inspeccionar el estado de dete-

rioro y la existencia de grietas u orificios, lo que la vuelve costosa y lenta. En ocasiones los ductos están bajo tierra o en el mar, lo que dificulta su inspección, además de que no necesariamente operan en estado estacionario, por lo que los métodos arriba mencionados no siempre brindan resultados satisfactorios. Asimismo, como Liou (1996) ha hecho notar, la detección de fugas de magnitud considerable es más simple que la de pequeñas, pues estas últimas son producto del envejecimiento o de la lenta corrosión de los elementos de la red.

Desde un punto de vista práctico, los principales problemas para aislar y localizar automáticamente las fugas en este tipo de redes son los siguientes: el costo de los sensores de gran precisión, el ruido introducido por las mediciones, la incertidumbre en el modelo que describe el comportamiento del fluido en condiciones reales y la dependencia entre la magnitud de la fuga y la condición de operación del sistema.

Para mejorar la seguridad y confiabilidad de los sistemas dinámicos complejos, en el área de control automático se ha desarrollado, durante los últimos veinte años, una teoría para analizar y diseñar sistemas de detección y aislamiento de fallas (denotada FDI por sus siglas en inglés), usando tres filosofías diferentes. Estas herramientas se basan en la identificación de

parámetros del modelo afectados por las fallas (Isermann, 1984), la redundancia analítica de la evolución de las salidas de un sistema para estimar su comportamiento interno (Frank, 1991; Gertler, 1991) y la información heurística obtenida por los operadores de un proceso en condiciones normales y anormales (Singh *et al.*, 1987). Cabe hacer notar que estas tres vertientes explotan directa o indirectamente el conocimiento del comportamiento interno de un sistema y son, en la mayoría de las aplicaciones, muy rentables, al sustituir la multiplicidad de instrumentación por *software* (Gertler, 1998). En conclusión, se puede decir que estos autómatas proporcionan un mejor desempeño que los esquemas usados en el pasado apoyados en *hardware*. El libro de Chen y Patton (1999), recién publicado, describe de manera clara los métodos de análisis y diseño existentes para la localización e identificación de fallas en procesos dinámicos lineales, discutiendo sus ventajas y similitudes.

En el área de control se han abordado los problemas asociados con la detección y aislamiento de fugas y obstrucciones en ductos sin tomas laterales usando diferentes métodos. En particular, Billmann *et al.* (1987) proponen identificar en línea la fricción del ducto junto con el cálculo de la correlación cruzada de las desviaciones de los flujos medidos en los extremos del ducto con respecto a los estimados, considerando el tubo en condiciones de operación normales para localizar la posición de la fuga. Liou (1996) sugiere la identificación en línea de la respuesta dinámica para detectar el cambio en la respuesta y a partir de ahí aislar la falla; este autor solamente presenta resultados simulados. Por otro lado, Ashton (1998) emplea un modelo no lineal y coloca sensores intermedios en el ducto para aislar las obstrucciones; obviamente el incrementar los sensores no puede llevarse a cabo en la práctica, por lo que este método tiene poca factibilidad. Recientemente, Verde (2001) reporta resultados satisfactorios para localizar múltiples fugas usando un banco de observadores lineales (por ejemplo, en una representación de estado, los observadores permiten estimar el vector de estado a partir de ciertas mediciones del sistema) y tomando mediciones solamente de las presiones y gastos en los extremos del ducto. Lamentablemente, la realización del banco de observadores de la propuesta de Verde es aún compleja cuando se demanda un alto grado de precisión en la posición de las fugas. Por su parte, usando conceptos de teoría estadística, Dinis *et al.* (1999) presentan un método de detección únicamente para una fuga, empleando los valores medios de la fricción de la tubería en condiciones normales y de fuga, de manera similar a la idea original de Isermann propuesta en 1984.

De entre las cuatro propuestas brevemente arriba descritas, la más viable y simple de realizar como un autómata parecería ser el localizador desarrollado por Isermann y sus colaboradores (Billmann, 1987). Este método detecta sólo una fuga y está basado en los cambios existentes en el comportamiento del gradiente de presión de la tubería ante una fuga. En la derivación de este método se suponen mensurables las presiones y gastos en los extremos del ducto y que el fluido se encuentra en estado permanente en el instante en que se presenta la fuga. Sin embargo, los autores no reportan el desempeño del localizador cuando las suposiciones consideradas en la derivación de método no se cumplen cabalmente. Esta carencia nos llevó a estudiar detalladamente este procedimiento, considerando aspectos prácticos de realización y de tecnologías disponibles, y a obtener conclusiones sobre su viabilidad en una aplicación real.

En el presente trabajo se reporta el resultado de nuestro estudio, incluyendo un análisis de la sensibilidad del detector con respecto a la fricción de la tubería. Se demuestra que una incertidumbre en la fricción del orden de 1% provoca un error considerable en la ubicación de la fuga cuando ésta es pequeña. El desempeño del método se verifica con simulaciones y trabajo experimental usando una tubería piloto del laboratorio de hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Cabe hacer notar que se realizaron algunas adecuaciones del método original para el cálculo de los residuos.

Modelo del ducto con fuga

Considérese una tubería horizontal en donde el área de la sección del tubo es constante, el flujo es turbulento, la velocidad de la onda de presión es constante y la velocidad del flujo es pequeña, comparada con la velocidad de la onda de presión; entonces, el comportamiento del fluido en el tubo está gobernado por (Chaudry, 1979):

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{f}{2DA^2} Q|Q| = 0 \quad (1)$$

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

donde Q (m³/s) representa el flujo volumétrico, H (m) la carga de presión, t (s) es el tiempo, z (m) corresponde a la coordenada longitudinal, A (m²) es el área de la sección del tubo, g (m/s²) es la aceleración de la gravedad, f representa el coeficiente de la fricción de

D'Arcy-Weissbach y a (m/s) es la velocidad de la onda de presión en el fluido.

Una fuga en el punto z_f del ducto con flujo

$$Q_f(z_f) = \lambda \sqrt{H(z_f)}, \quad \text{con } \lambda > 0 \quad (3)$$

provoca una discontinuidad en el sistema de ecuaciones diferenciales parciales 1 y 2. Como consecuencia, el ducto con una fuga debe ser manejado como dos ductos o segmentos con una condición de frontera entre ellas

$$Q^a(z_f) = Q^b(z_f) + Q_f(z_f) \quad (4)$$

donde $Q^a(z_f)$ y $Q^b(z_f)$ denotan los flujos antes y después de la fuga, respectivamente (Verde, 1997). Entonces, si se considera una fuga, el comportamiento del fluido estará descrito por dos parejas de ecuaciones de la forma 1 y 2, con condición de frontera (ecuación 4) y las condiciones específicas de los extremos del ducto. Es decir, la fuga en el ducto incrementa el número de ecuaciones diferenciales parciales requeridas para describir el comportamiento del fluido.

Localizador de fugas

Considerando que la tubería tiene una longitud L y que el sistema opera en estado permanente sin fugas, la carga de presión, H , en un punto z cualquiera se puede determinar por la recta:

$$H(z) = H(0) + \frac{H(L) - H(0)}{L} z = H(0) - \frac{\Delta H}{L} z = H(0) + mz \quad (5)$$

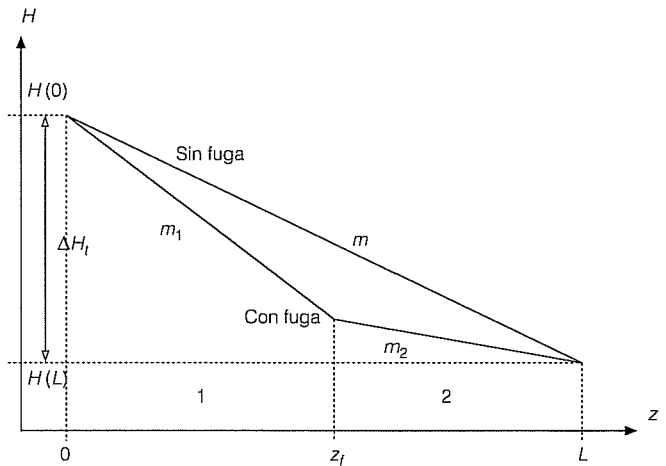
donde 0 y L son las coordenadas en los extremos aguas arriba y abajo de la tubería, respectivamente, y m corresponde a la pendiente. Además,

$$cQ_\infty^2 = -mL \quad (6)$$

con $c = fL/2DA^2$ y Q_∞ el gasto en estado permanente. La ilustración 1 muestra la recta de pendiente m , es decir, el comportamiento de la presión a lo largo de la tubería en condiciones normales.

Cuando se presenta una fuga $Q(z_f)$, la cual provoca cambios despreciables en las presiones $H(0)$ y $H(L)$, la condición de frontera impuesta por la fuga (ecuación 4) produce que cada uno de los dos tramos del ducto o conjunto de ecuaciones diferenciales parciales (ecuaciones 1 y 2) se comporte como un sistema aislado y cada uno tenga un gradiente de presión constante cuando el fluido está ya operando en régimen estacionario. Esto es, en condiciones de fuga, la

Ilustración 1. Comportamiento de la presión a lo largo de una tubería de diámetro constante.



tubería se divide en dos tramos: el segmento 1 aguas arriba de la fuga y el segmento 2 aguas abajo de la fuga. Así, el gradiente de la presión en el segmento 1 en condiciones de fuga en estado permanente se define por:

$$m_1 = \left. \frac{\partial H}{\partial z} \right|_{0 \leq z \leq z_f} \quad (7)$$

y el segundo segmento, por medio de:

$$m_2 = \left. \frac{\partial H}{\partial z} \right|_{z_f < z < L} \quad (8)$$

tal y como se muestra en la ilustración 1. Es decir, en condiciones sin fuga:

$$m = m_1 = m_2 = -\Delta H/L \quad (9)$$

y en presencia de una fuga:

$$m_1 \neq m_2 \quad (10)$$

independientemente de su posición y dimensión. Entonces, es posible determinar teóricamente la existencia de una fuga por medio de dos sensores de presión colocados en cada extremo del ducto y estimando las desviaciones de los gradientes de las presiones en cada uno de los dos segmentos con relación al valor nominal.

Para determinar la posición de fuga z_f se iguala la ecuación de la presión en el segmento antes de la fuga:

$$H(z) = H(0) + m_1 z \quad (11)$$

con la de después:

$$H(z) = H(L) + m_2(z - L) \quad (12)$$

obteniendo el punto buscado:

$$z_f = \frac{L}{1 - \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2}} \quad (13)$$

donde:

$$\Delta m_1 = m_1 - m \quad y \quad \Delta m_2 = m_2 - m \quad (14)$$

En un caso real, la aplicación directa de la ecuación 13 presenta inconvenientes, ya que el ruido de los sensores de presión puede ser grande y contamina la información; además, cuando la resolución de los sensores es pequeña, comparada con las desviaciones de los gradientes producidas por la fuga, el cambio en el cociente $\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2}$ podría ser imperceptible y entonces la fuga podría no ser localizada correctamente (Siebert, 1977).

En el caso de contar en la tubería con instrumentos para medición de presión y flujo, Billmann *et al.* (1987) proponen modificar el procedimiento arriba descrito sustituyendo en la ecuación 13 las desviaciones de los gradientes de presión, por las diferencias entre los flujos en los extremos del ducto en condiciones normales y en presencia de fuga.

Esta sustitución puede hacerse siempre y cuando los cambios provocados por la fuga en las presiones en los extremos del ducto $H(0)$ y $H(L)$ no sean considerables.

Así, si se definen los flujos en ambos extremos de la tubería en condiciones de fuga por medio de:

$$Q(0) = Q_\infty + \Delta Q_1 \quad y \quad Q(L) = Q_\infty + \Delta Q_2 \quad (15)$$

en donde Q_∞ corresponde al flujo permanente en condiciones normales de operación y las desviaciones ΔQ_1 y ΔQ_2 están asociadas con los efectos producidos por la fuga en el flujo de entrada y en el de salida, respectivamente, y si además se consideran pequeñas desviaciones de los flujos ΔQ_1 y ΔQ_2 en relación con el flujo nominal Q_∞ (esto es, $|\Delta Q_1| \ll |Q_\infty|$ y $|\Delta Q_2| \ll |Q_\infty|$), entonces los gradientes o desviaciones de presión se pueden expresar en términos de gastos sustituyendo la ecuación 6 en la ecuación 14:

$$\Delta m_1 = \frac{Lm_1 - cQ_\infty^2}{L} = \frac{cQ_1^2 - cQ_\infty^2}{L} \quad (16)$$

y:

$$\Delta m_2 = \frac{Lm_2 - cQ_\infty^2}{L} = \frac{cQ_2^2 - cQ_\infty^2}{L} \quad (17)$$

Por otro lado,

$$\begin{aligned} Q_1^2 - Q_\infty^2 &= \Delta Q_1^2 + 2Q_\infty \Delta Q_1 \quad y \\ Q_2^2 - Q_\infty^2 &= \Delta Q_2^2 + 2Q_\infty \Delta Q_2 \end{aligned} \quad (18)$$

así, si se cumple que $|\Delta Q_1| \ll |Q_\infty|$ y $|\Delta Q_2| \ll |Q_\infty|$, el primer término de ambas expresiones anteriores es mucho menor que el segundo y por tanto éstas se pueden aproximar por:

$$Q_1^2 - Q_\infty^2 \approx 2\Delta Q_1 Q_\infty \quad y \quad Q_2^2 - Q_\infty^2 \approx 2\Delta Q_2 Q_\infty \quad (19)$$

Sustituyendo la ecuación 19 en las desviaciones del gradiente de presión se tiene:

$$\Delta m_1 \approx \frac{2cQ_\infty}{L} \Delta Q_1 \quad y \quad \Delta m_2 \approx \frac{2cQ_\infty}{L} \Delta Q_2 \quad (20)$$

y sustituyendo la ecuación 20 en la ecuación 13 se obtiene:

$$\hat{z}_f \approx \frac{L}{1 - \frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_2}} \quad (21)$$

que corresponde a una estimación aproximada de la ubicación de la fuga basada en las desviaciones de los gastos nominales producidas por ésta. Por tanto, el problema original de conocer las desviaciones de los gradientes de presión para calcular z_f se ha transformado en determinar desviaciones de los gastos en los extremos del ducto cuando está presente la fuga.

La existencia de una fuga se puede detectar simplemente calculando en línea las desviaciones de los flujos. Es decir, la detectabilidad de una fuga se reduce a la condición de residuos usada en el área FDI (Chen y Patton 1999).

$$r_1 = \Delta Q_1 \neq 0 \quad y \quad r_2 = \Delta Q_2 \neq 0 \quad (22)$$

Por otro lado, se sabe de la teoría de estimación que los observadores o estimadores dinámicos de un proceso son sistemas que operan en paralelo con el proceso y son capaces de determinar su comportamiento interno usando mediciones de sus causas y efectos. Además, dichos observadores son una herramienta poderosa para estimar el estado parcial o total de un proceso aun ante la presencia de ruido, incertidumbres o entradas desconocidas (O'Reilly, 1983). Por este

motivo, se propone usar un estimador dinámico para calcular las desviaciones de los flujos o equivalentemente, los residuos r_1 y r_2 , y a continuación determinar la posición de la fuga a través de la expresión 21.

Estimador dinámico

El punto de partida para construir un estimador dinámico es el modelo de estado del sistema y su relación entre variables internas y señales mensurables. En el caso del modelo del fluido (ecuaciones 1 y 2), se puede lograr una representación de estado de dimensión finita discretizando tanto el espacio, por medio de una división en N segmentos de longitud $\Delta z = L/N$, como el tiempo t , a través de $t = k\Delta t$, con Δt , la unidad de tiempo y k entero, suponiendo todos los parámetros del modelo constantes.

También se emplean las siguientes consideraciones en la elaboración del modelo de estado del estimador: a) que entre cada segmento puede existir una fuga $\lambda\sqrt{H}$, en donde λ depende del tamaño y forma del orificio; b) que las presiones en los extremos del ducto son variables independientes, es decir, no dependen del comportamiento interno del fluido; c) las derivadas parciales para el i -ésimo tramo se pueden aproximar por (Chaudhry, 1979):

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial t} \right|_i = \frac{\eta(i+1, k+1) + \eta(i, k+1) - \eta(i+1, k) - \eta(i, k)}{2\Delta t} \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial z} \right|_i = \frac{\eta(i+1, k+1) + \eta(i+1, k) - \eta(i, k+1) - \eta(i, k)}{2\Delta z}$$

donde k indica el intervalo de tiempo, y d) que la variable en el tramo i está dada por el promedio $\eta_i(k) = 0.5(\eta(i, k) + \eta(i+1, k))$ para el gasto y $\eta_i(k) = \eta(i, k)$ para la presión.

Debido a que en la práctica se pueden tener variaciones en el gasto y las mediciones son ruidosas, el parámetro de fricción f presenta pequeñas desviaciones fluctuantes, por tanto se considera la fricción como una variable más del proceso que hay que estimar en línea.

Bajo estas consideraciones, al sustituir el operador (ecuación 23) y el equivalente η para Q y H en las ecuaciones 1 y 2 en los N tramos, después de una serie de reducciones algebraicas, se obtiene un modelo de parámetros concentrados no lineal del tipo (ver apéndice A):

$$x(k+1) = \Phi(x(k), u(k), u(k+1), \lambda, f(k)) \quad (24)$$

donde:

$$x(k) = [Q_0(k) \ Q_1(k) \dots Q_N(k) \ H_1(k) \ H_2(k) \dots H_{N-1}(k)]^T \quad (25)$$

representa el vector de estado; Φ es un vector de funciones no lineales;

$$u(k) = [H_0(k) \ H_N(k)]^T \quad (26)$$

es el vector de las entradas del sistema, y

$$\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_{N-1} \ 0]^T \quad (27)$$

corresponde al vector de fugas; $f(k)$ representa el valor de la fricción evaluada en el instante k .

Debido a que se busca estimar los residuos o desviaciones de los flujos en los extremos del ducto, se propone como vector de salida para el estimador:

$$y(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_{N+1}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0(k) \\ Q_N(k) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Esta ecuación, junto con la ecuación 24, es la base para estimar las desviaciones de los flujos ΔQ_1 y ΔQ_N . Además, como se mencionó anteriormente, es recomendable calcular en línea el valor del parámetro f , para evitar que variaciones pequeñas del valor nominal del gasto o errores de medición provoquen, a su vez, errores en el cálculo de los gastos.

Considerando que en ausencia de fugas el fluido se encuentra en estado estacionario y que los gastos responden lentamente ante variaciones en los puntos de operación, se propone dividir el proceso de estimación en dos pasos: primero se estima la fricción f , y después el valor de los flujos usando el valor calculado de la primera.

- Paso 1. Estimar la fricción con base en el modelo estático del fluido:

$$f = \frac{2DA^2g}{L} \left[\frac{H_0 - H_N}{Q_\infty^2} \right] \quad (29)$$

con Q_∞ el flujo en estado permanente. Con objeto de eliminar variaciones debidas al ruido, se filtran los valores medidos a través de una función autoregresiva. Así, la ecuación recursiva de la fricción se puede escribir como:

$$\hat{f}(k+1) = (1-\gamma)\hat{f}(k) + \gamma \frac{2DA^2g}{L} \left[\frac{H_0(k+1) - H_N(k+1)}{Q_\infty^2(k)} \right] \quad (30)$$

con $0 < \gamma < 1$.

En el instante k_f que se presenta la fuga (ecuación 30) deja de ser válida, por lo que rigurosamente debe

detectarse el tiempo k_f y detener la estimación de la fricción $\hat{f}(k_f)$ a partir de dicho instante.

Como en la práctica no se conoce k_f , se sugiere almacenar un conjunto de estimados pasados de la fricción:

$$\{\hat{f}(i-d), \hat{f}(i-d+1), \dots, \hat{f}(i)\} \quad (31)$$

y usar la condición:

$$\hat{f} = \begin{cases} \hat{f}(i-d) & \text{fuga no detectada} \\ \hat{f}(k_u) & \text{fuga ya detectada} \end{cases} \quad (32)$$

donde $\hat{f}(k_u)$ corresponde al último valor estimado de $\hat{f}(k)$ antes de la detección de la fuga. El entero d se ajusta experimentalmente, considerando el tiempo requerido para que el efecto de fugas pequeñas se haga presente en los residuos (ecuación 22).

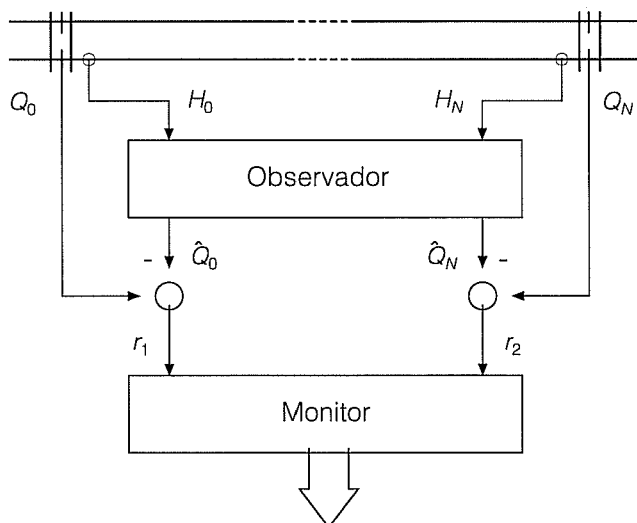
- Paso 2. A partir del modelo de la ecuación 24 con $\lambda = 0$, se calcula la ecuación dinámica del estimador u observador en lazo abierto:

$$\hat{x}(k+1) = \phi(\hat{x}(k), u(k), u(k+1), 0, \hat{f}(k)) \quad (33)$$

Así, si se conoce el vector de entradas $u(k)$ y $u(k+1)$ y la fricción $\hat{f}(k)$, con la ecuación 33 se puede obtener el vector estimado $\hat{x}(k)$ y calcular el vector de residuos o desviaciones:

$$r(k) = \begin{bmatrix} Q_0(k) - \hat{x}_1(k) \\ Q_N(k) - \hat{x}_{N+1}(k) \end{bmatrix} \quad (34)$$

Ilustración 2. Esquema para la supervisión y detección de fugas en una tubería.



donde $Q_0(k)$ y $Q_N(k)$ corresponden con los flujos medidos directamente en el ducto. La ilustración 2 muestra el diagrama esquemático del procedimiento aquí descrito.

Expresiones recursivas del localizador

Tomando en cuenta que se desea realizar el autómata detector de fugas en un sistema digital; que la correlación cruzada entre dos secuencias de datos discrimina las componentes de frecuencia ausentes en ambas secuencias (Franklin, 1990); que las mediciones en general están contaminadas, y que la presencia de una fuga implica que las condiciones de los dos residuos (ecuación 22) se deben satisfacer simultáneamente, resulta más adecuado monitorear la fuga usando como función de detección la correlación de las secuencias de las componentes del vector de los residuos

$$r_1(k) = Q_0(k) - \hat{x}_1(k) \quad \text{y} \quad r_2(k) = Q_N(k) - \hat{x}_{N+1}(k) \quad (35)$$

obtenidas con el observador en línea. Así, suponiendo disponibles estas secuencias, se puede emplear la versión recursiva de la función de correlación cruzada durante el intervalo móvil $(-M, M)$ (Siebert e Isermann, 1977).

$$\Phi_{r_1, r_2}(k) = \sum_{\tau=-M}^M \bar{\Phi}_{r_1, r_2}(\tau, k) \quad (36)$$

donde:

$$\bar{\Phi}_{r_1, r_2}(\tau, k) = (1 - \chi) \bar{\Phi}_{r_1, r_2}(\tau, k-1) + \chi r_1(k) r_2(k+\tau) \quad (37)$$

es un filtro pasabajas con $0 < \chi < 1$. Este cálculo reduce los efectos del ruido e incertidumbres en los residuos y tiene la ventaja de permitir monitorear la presencia de la fuga con una sola variable. Por tanto, se propone como criterio para determinar la existencia de una fuga la condición:

$$\text{Si } |\Phi_{r_1, r_2}(k)| = \begin{cases} < U_d \Rightarrow \text{no existe fuga} \\ \geq U_d \Rightarrow \text{existe fuga} \end{cases} \quad (38)$$

con U_d , un umbral seleccionado experimentalmente. Es decir, el criterio (ecuación 38) se evalúa en línea continuamente y cuando sobrepasa el umbral se mantiene constante el último estimado de la fricción y se inicia el cálculo de la posición de la fuga. Cabe hacer notar que un valor muy pequeño del umbral puede producir falsas alarmas y que, por el contrario, un valor grande tiene el efecto de no detectar fugas pequeñas. Por otro lado, como la autocorrelación es una forma para calcular el valor medio del segundo momento o cuadrado de la desviación estándar, se reemplazan los residuos

por sus autocorrelaciones en la ecuación de la posición de la fuga (ecuación 21). Así, si las autocorrelaciones de los residuos se calculan usando:

$$\Phi_{r_{fi}}(k) = \sum_{\tau=-M}^M \bar{\Phi}_{r_{fi}}(\tau, k) \quad \text{para } i=1,2 \quad (39)$$

donde:

$$\bar{\Phi}_{r_{fi}}(\tau, k) = (1-\chi)\bar{\Phi}_{r_{fi}}(\tau, k-1) + \chi r_i(k)r_i(k+\tau) \quad (40)$$

la expresión de la posición de la fuga (ecuación 21) se transforma en:

$$\hat{z}_i(k) = \frac{L}{1 + \sqrt{\frac{\Phi_{r_{f1}}(k)}{\Phi_{r_{f2}}(k)}}} \quad (41)$$

El cambio de signo en el denominador de esta ecuación con respecto a la ecuación 21 se debe a que en este caso los signos opuestos de las desviaciones de los gastos están explícitamente considerados. Finalmente, el flujo de fuga se calcula con la ecuación de balance de masa:

$$\hat{Q}_{zi}(k) = (1-\kappa)\hat{Q}_{zi}(k-1) + \kappa\{r_1(k-1) - r_2(k-1)\} \quad (42)$$

con $0 < \kappa < 1$.

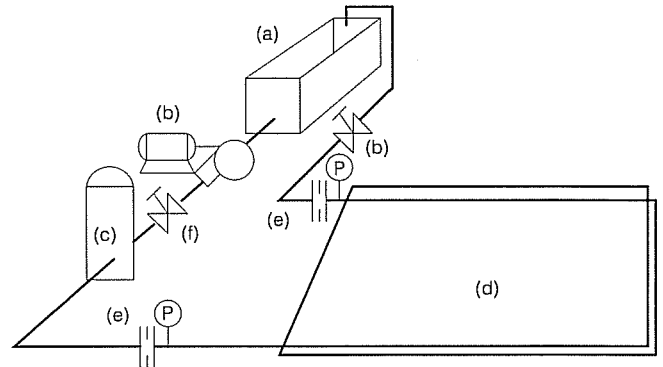
Resumiendo, el cálculo de los residuos r_1 y r_2 vía el observador y las secuencias registradas de flujos y presiones en los extremos del ducto a cada Δt de tiempo junto con la ecuación 41 integran el autómata localizador de fugas en línea.

Instalación experimental

El ducto piloto de agua usado para las pruebas experimentales consta de una tubería de hierro galvanizado de 0.105 m de diámetro y 132.56 m de longitud (Verde, 1999). La configuración del prototipo se muestra en la ilustración 3 y está compuesta por: a) un tanque de almacenamiento de 7.4 m³, aproximadamente; b) una bomba hidráulica de 50 CP (f) válvulas de compuerta para regular el flujo; c) un tanque de presión hidroneumático para atenuar transitorios; d) una tubería en una configuración de espiral doble que en su final desemboca en el tanque de almacenamiento, y e) los puntos de medición de flujo y presión.

De la instalación descrita en el párrafo anterior sólo la parte correspondiente a la espiral doble es usada con fines de detección de fugas. A la entrada y a la salida de la espiral doble se tienen dos carretes intercambiables donde se fijan los instrumentos de me-

Ilustración 3. Esquema de la instalación experimental.



dicción de presión y flujo. Estos dos puntos constituyen los extremos del ducto en el estudio. El cuadro 1 muestra algunos puntos de operación de la instalación experimental. También se tienen cuatro puntos intermedios donde se pueden provocar fugas; estos puntos están constituidos por carretes, los cuales tienen soldados tubos de una pulgada de diámetro y válvulas de esfera para regular el flujo de fuga.

Para la implantación del localizador en tiempo real se utilizaron sensores de flujo de tipo rotor y de presión tipo piezoresistivo (Verde, 1999), una interfaz de datos y señales comercial de National Instruments (National, 1996), una computadora personal y el lenguaje gráfico LabVIEW de National Instruments (National, 1999).

Análisis con datos simulados

Para ajustar los parámetros de diseño y analizar el desempeño del localizador de fugas se realizaron pruebas considerando las dimensiones de la instalación experimental y con datos simulados para varias condiciones del sistema.

La selección del tiempo de muestreo se basó en la desigualdad $6 \leq \omega_s/\omega_b \leq 40$ reportada por Franklin (1990) para ello, donde ω_s es la frecuencia de muestreo y ω_b es el ancho de banda del sistema. A partir de la respuesta de frecuencia del modelo simulado con los parámetros de la tubería experimental se obtuvo el valor de $\omega_b = 0.01$ Hz. Por tanto, se seleccionó el perio-

Cuadro 1. Puntos de operación, valores experimentales.

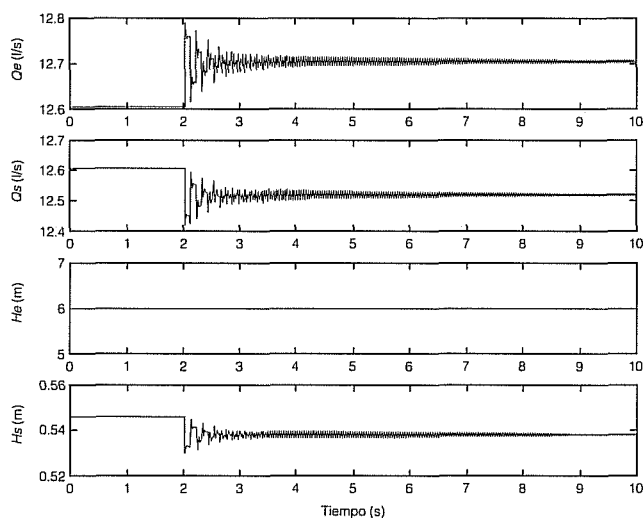
Gasto Q_∞ (l/s)	Caída de presión ΔH (mca)	Fricción f
7.0	2.91	0.0690
9.6	3.94	0.0501
11.2	5.09	0.0429
13.9	6.31	0.0380

do de muestreo de un segundo para todos los experimentos. Pruebas realizadas sobre la sensibilidad del método con relación a la frecuencia ω_s indicaron que es robusto para $\omega_s \geq 1$ Hz.

La realización del simulador y el localizador se llevó a cabo con el paquete matemático *MATLAB* (Math, 1999). Para el observador discreto se dividió la tubería en tres tramos, debido a que el algoritmo es insensible a la discretización espacial. Las desviaciones registradas de la posición teórica con esta discretización fueron del orden de 0.001%. El ajuste del umbral (ecuación 38) para disparar el sistema de alarma se calibró simulando varias fugas; el valor usado en las siguientes pruebas fue de $U_d = -2 \times 10^{-8} \text{ m}^6/\text{s}^2$. Los valores seleccionados para las constantes de tiempo de los filtros de la autocorrelación y correlación cruzada fueron $\chi = \gamma = 0.01$, ya que con ellos se logró un buen compromiso entre velocidad de respuesta del filtro y atenuación del ruido.

La primera prueba se realizó provocando una fuga de 0.19 l/s o 1.5% con relación al gasto nominal Q_∞ , en el punto medio de la tubería (66.28 m) a los dos segundos de iniciada la simulación. La evolución de los gastos y presiones del modelo discreto se muestran en la ilustración 4. Con base en estos datos, el autómata localizador calcula la correlación cruzada (ecuación 36) de los residuos y en el momento que la correlación rebasa el umbral U_d se dispara el cálculo tanto de la ubicación de la fuga (ecuación 41) como de la pérdida provocada por ésta (ecuación 42). La evolución del detector de la posición y gasto de fuga asociada con

Ilustración 4. Datos simulados de flujos y presiones en los extremos de la tubería con una fuga de 1.5% del gasto nominal, localizada en el centro del ducto.



este proceso se muestran en la ilustración 5. El valor medio de la posición es de aproximadamente 66.5 m. Es decir, se tiene un error de 0.33% en la ubicación de la fuga y se observa que el gasto provocado por ella fue estimado prácticamente sin error, ya que Q_{fuga}/Q_0 tiende a 0.015.

La detección, ubicación y cálculo de la magnitud de la fuga presentada arriba se llevaron a cabo en condiciones ideales. Para estudiar los efectos de señales contaminadas en el localizador se realizó una prueba adicionándole ruido con un valor medio de 0.5% del

Ilustración 5. Detección, ubicación y cuantificación de la fuga con datos simulados.

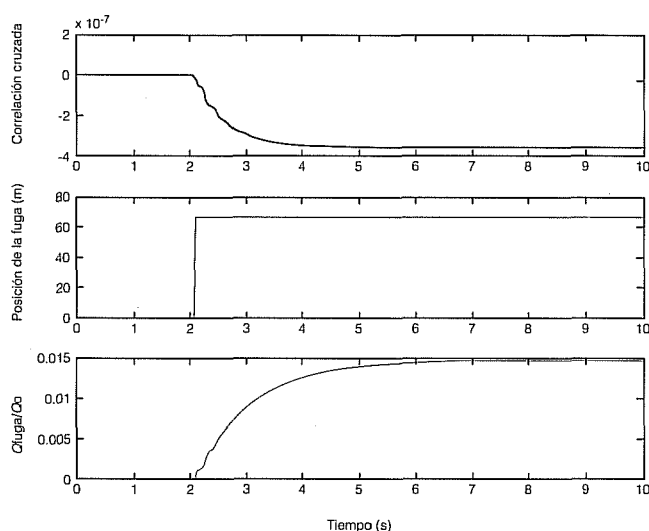
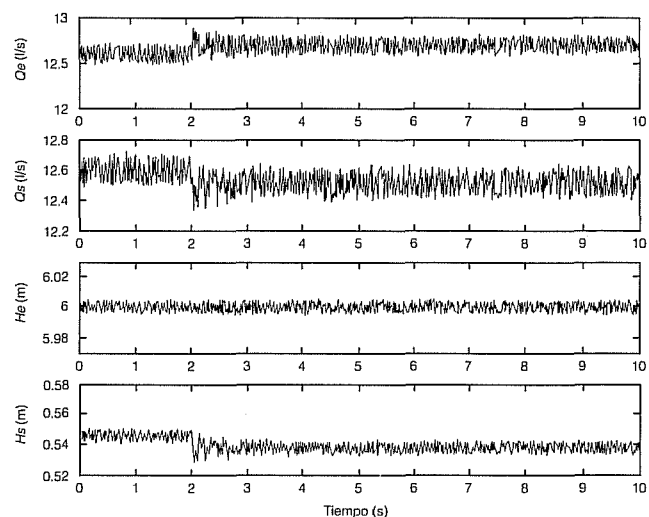


Ilustración 6. Comportamiento del modelo simulado con ruido aditivo.



valor medio de la señal, con distribución uniforme, a los registros de datos (este valor del ruido fue caracterizado a partir del análisis de registros experimentales). La ilustración 6 muestra la evolución de los gastos y presiones simulados con ruido y condiciones semejantes a las del análisis anterior. El desempeño del localizador bajo estas condiciones se muestra en la ilustración 7. Se observa que la presencia del ruido provoca una desviación en la localización. Específicamente, el valor medio de la posición es de 66 m con una desviación estándar de 4.95 m, equivalente a $\pm 3.7\%$ de error de

Ilustración 7. Detección, ubicación y cuantificación de la fuga con ruido aditivo en los sensores.

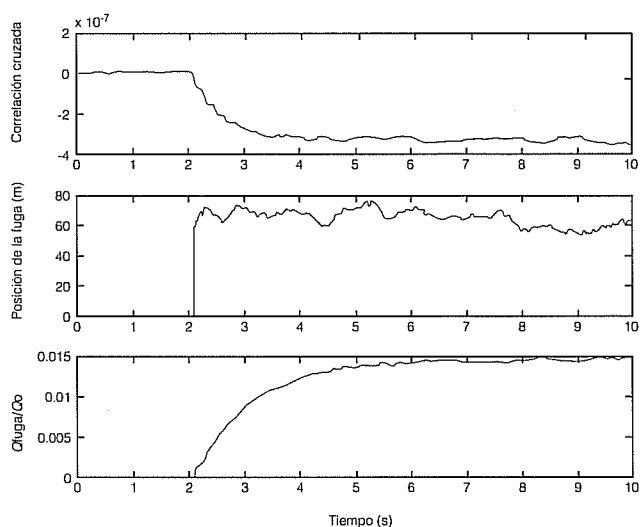
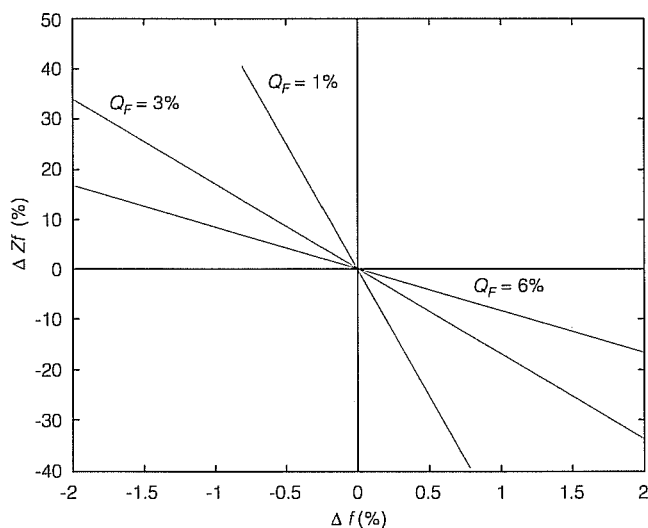


Ilustración 8. Sensibilidad del localizador ante incertidumbre en la fricción.



escala total. En cuanto a la magnitud de la fuga, ésta tiene un valor medio de 1.5%, semejante al caso del registro sin ruido.

Con objeto de analizar el desempeño del localizador ante una desviación en la fricción f se realizaron simulaciones, suponiendo errores en este parámetro para varios orificios de fuga. La ilustración 8 muestra el comportamiento del error en la posición $\Delta \hat{Z}_f$, en función de la desviación Δf para tres porcentajes de gasto de fuga. Se observa que entre menor sea la fuga mayor es el error en su ubicación ante una incertidumbre en la fricción. En particular, fugas menores a 1% del gasto nominal y errores pequeños del orden de 0.5% en la fricción provocan un error apreciable de 40% en su ubicación. Por tanto, para contar con un localizador confiable es indispensable tener una estimación precisa de la fricción del sistema.

Análisis de resultados experimentales

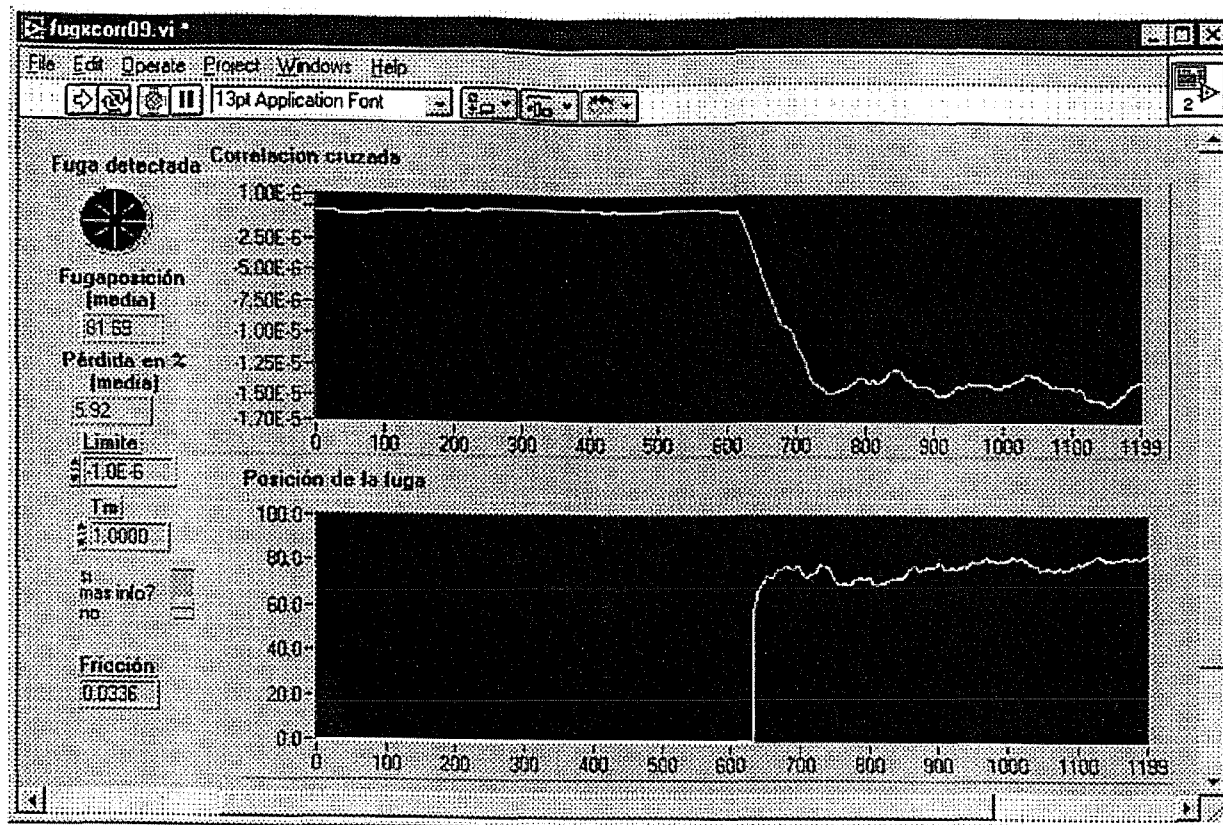
Como se mencionó en la descripción del método, la fricción no necesariamente es constante en las condiciones en que trabaja el modelo de laboratorio, así que la realización del autómata en el caso experimental involucra la estimación de dicho parámetro. Siguiendo el procedimiento indicado en el paso 1, se estableció un periodo de muestreo $T_m = 1$ s, un umbral para el disparo de la fuga $U_d = -2 \times 10^{-6}$ en la ecuación 38 y un retraso $d = 30$ en la ecuación 31. Los valores de los filtros de autocorrelación y correlación cruzada usados fueron semejantes a las pruebas en simulación.

Las pruebas experimentales se realizaron provocando cuatro fugas en posiciones diferentes en la instalación. En el cuadro 2 se muestran los resultados comprimidos de estos experimentos. La segunda columna indica la estimación de la fricción antes de la presencia de la fuga; la tercera corresponde a la cuantificación del gasto de fuga; la cuarta está asociada con los valores medios de las posiciones de las fugas, y la última indica las desviaciones de las posiciones con respecto a los valores reales. Estos resultados permiten ver que las desviaciones de la posición son variables

Cuadro 2. Localización y cuantificación de 1as fugas.

Punto de fuga (m)	Fricción f	Fuga (l/s)	Localización estimada (m)	Desviación (%)
15.15	0.0341	0.78	18.21	+2.31
49.46	0.0338	0.53	44.25	-3.93
83.25	0.0336	0.58	81.69	+1.18
117.39	0.0333	0.43	113.29	-3.39

Ilustración 9. Panel del detector de fugas. Fuga en el tercer punto.



para condiciones de operación similares, lo cual no permite caracterizar las condiciones adecuadas de operación del localizador.

Las evoluciones del detector y localizador para la tercera fuga del cuadro 2 se presentan en la ilustración 9. El proceso se operó durante veinte minutos y las fugas se provocaron a los diez minutos de iniciada la prueba.

Finalmente se hicieron pruebas experimentales cambiando el punto de operación y, simultáneamente, provocando una fuga en el ducto. El desempeño del localizador bajo estas condiciones fue muy pobre, ya que fue incapaz de ubicar la posición de la fuga.

Conclusiones

Se presenta un análisis de la factibilidad de un localizador automático de fugas en una tubería en tiempo real basado en la caracterización del comportamiento de la presión ante la presencia de una fuga en estado estacionario. Las pruebas realizadas en simulación y con datos experimentales permiten llegar a las siguientes observaciones:

- La simplicidad de las ecuaciones 36, 41 y 42 para calcular la detección, localización y cuantificación de la fuga, respectivamente, tienen la ventaja de requerir pocos recursos computacionales y, por lo tanto, el método es viable de implementarse en tiempo real.
- La presencia de ruido en las mediciones afecta principalmente la localización de la fuga, aun con datos simulados. Así, desde un punto de vista práctico, se necesita mejorar la robustez del localizador o, en su caso, del observador en presencia de ruido, ya que éste es inevitable en una instalación real.
- La desviación máxima en la localización de la fuga en las pruebas experimentales es de 3.9% de la longitud total para una fuga de 5.4%, con respecto al flujo nominal, lo cual puede ser aceptable a pesar del error en la caracterización de la fricción.
- El método tiene un buen desempeño cuando la tubería cambia de punto de operación lentamente, ya que en estas condiciones se logra estimar la fricción en condiciones de no fuga y la señal de alarma no se activa.

- Pruebas realizadas con una fuga durante un transitorio activaron la alarma, pero la localización de la fuga fue incorrecta. Esto se explica, pues al detectar la fuga, la fricción deja de estimarse y, por tanto, a pesar de usar un modelo no lineal en el observador, las estimaciones de los flujos son erróneas.
- Los errores del localizador ante incertidumbres en la estimación de la fricción lo hacen vulnerable en aplicaciones reales. Se requiere identificar dinámicamente la fricción o hacer insensible el cálculo de los residuos con respecto a este parámetro.
- Desde el punto de vista de instrumentación, la resolución de los sensores de flujo limita el tamaño de fugas que pueden detectarse. Gastos de fuga menores a 0.5 l/s no pudieron detectarse correctamente, ya que los medidores de flujo son insensibles a dichos cambios.

En opinión de los autores, las limitaciones encontradas podrían reducirse de manera drástica si se sustituye el modelo dinámico en paralelo de la tubería por un modelo retroalimentado, diseñado a partir de la teoría de observadores con entradas desconocidas (Hautus, 1983). Esta hipótesis está siendo actualmente estudiada y validada como parte de los objetivos de un proyecto conjunto entre el Instituto de Ingeniería y el Laboratorio de Automática de Grenoble, Francia.

Recibido: 02/05/2000

Aprobado: 14/07/2000

Referencias

- Ashton, S.A, D.N. Shields y S. Daley, "Fault detection in pipelines using nonlinear observers" *UKACC International Conference on Control '98.IEE, Conference publication*, vol. 455, Londres, 1998, pp. 135-140.
- Billmann, L. y R. Isermann, "Leak detection methods for pipelines", *Automatica*, vol. 23, 1987, pp. 381-385.
- Chaudhry, M.H., *Applied hydraulic transients*, Van Nostrand Reinhold Co., Nueva York, 1979. 503 pp.
- Chen, J.S. y R. Patton, *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- Dinis, J.M., A.K. Wojtanowics, S. Scott y L. Leak, "Detection in liquid subsea flowlines with no recorded feed rate", *J. Energy Resources Technology*, vol. 121, 1999, pp. 161-166.
- Frank, P. "Enhancement of robustness in observer based fault detection", *Safe Process 91*, Baden Baden, 1991. pp. 99-111.
- Franklin, G.F. *et al.*, *Digital control of dynamic systems*, Addison-Wesley Publishing Co., 1990, 841 pp.
- Gertler, J., *Fault detection and diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, 1998, 486 pp.
- Gertler, J., "Analytical redundancy methods in fault detection" *Safe Process 91*, Baden Baden, 1991. pp. 9-22.
- Hautus, M.L.J., "Strong detectability and observers", *Linear Algebra and its Applications*, vol. 50, 1983, pp. 353-368.
- Isermann, R., "Process fault detection based on modelling and estimation methods", *Automatica*, vol. 20, 1984, pp. 387-404.
- Liou, J.C.P., "Pipeline integrity monitoring using the impulse response", *International Pipeline Conference ASME*, San Francisco, California, 1996, pp. 1137-1142.
- Math Works, Inc., *MATLAB*, Natick, Massachusetts, 1999.
- National Instruments Co., Lab-PC-1200, *AI USER MANUAL*, NI, Austin, Texas, 1996.
- National Instruments Co., *LabVIEW User Manual*, NI, Austin, Texas, 1999.
- O'Reilly, J., *Observers for Linear Systems*, Academic Press, Londres, 1983, pág. 246.
- Siebert, H. y R. Isermann R., "Leckerkennung und lokalisierung bei pipelines durch on-line-korrelation mit einem prozessrechner", *Regelungstechnik*, vol. 3, 1977, pp. 69-100.
- Singh, M.G., K.S. Hindi, G. Schmidt y S.G. Tzafestas, "Fault detection & reliability", *Second European Workshop on Fault Diagnosis, Reliability and Related Knowledge*, UMIST, Manchester, del 6 al 8 de abril de 1987, pp. 105-112.
- Verde, C., "Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines", *Control Eng. Practice*, Elsevier, en prensa, Londres, 2001.
- Verde, C. y R.A. Carrera, *Modelo de una tubería en condiciones de falla*, proyecto 6119, informe a patrocinador, II-UNAM, México, D.F., 1997, 52 pp.
- Verde, C. y R.A. Carrera, *Configuración y calibración de la planta piloto para detección de fugas en tuberías*, proyecto 7136, informe interno, II-UNAM, México, D.F., 1999, 27 pp.

Apéndice

a) Modelo discreto del ducto

La forma explícita de la ecuación de estado no lineal (24) se obtiene dividiendo la tubería en N tramos y sustituyendo las derivadas parciales en las ecuaciones 1 y 2 por las aproximaciones (ecuación 23). Además se considera $Q_i = 0.5(Q(i,k) + Q(i+1,k))$, $H_i = H(i,k)$ en las ecuaciones resultantes y se introduce en la ecuación asociada con la conservación de masas la condición de frontera, provocada por la fuga aguas abajo del i -ésimo tramo. Como resultado de estos pasos se tiene para el i -ésimo tramo:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -\alpha_1 & \alpha_1 \\ -1 & 1 & \alpha_2 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_i(k+1) \\ Q_{i+1}(k+1) \\ H_i(k+1) \\ H_{i+1}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\alpha_1 & -\alpha_1 \\ 1 & -1 & \alpha_2 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_i(k) \\ Q_{i+1}(k) \\ H_i(k) \\ H_{i+1}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K(k)(Q_i(k) + Q_{i+1}(k)) \\ -2\lambda_{i+1}\sqrt{H_{i+1}(k)} \end{bmatrix} \quad (43)$$

donde λ_i es un parámetro que depende del orificio de la fuga del i -ésimo tramo y

$$\alpha_1 = Ag\Delta t/\Delta z, \quad \alpha_2 = Ag\Delta z/a^2\Delta t, \quad K(k) = f(k)\Delta t/4DA$$

Compactando las expresiones para los N tramos y usando las definiciones de las ecuaciones 25 y 26 se obtiene una expresión de la forma:

$$Ax(k+1) = Bx(k) + C(x(k), \lambda, f(k)) + Du(k+1) + Eu(k) \quad (44)$$

donde:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & \alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & -\alpha_1 & \alpha_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\alpha_1 & \alpha_1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_1 \\ -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & \alpha_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & \alpha_2 & \alpha_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_2 & \alpha_2 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha_2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & -\alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \alpha_1 & -\alpha_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_1 & -\alpha_1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha_1 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & \alpha_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \alpha_2 & \alpha_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_2 & \alpha_2 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha_2 \end{bmatrix}$$

$$C(x(k), \lambda, f(k)) = \begin{bmatrix} -K(k)(x_1(k) + x_2(k)) \\ -K(k)(x_2(k) + x_3(k)) \\ \vdots \\ -K(k)(x_{N-2}(k) + x_{N-1}(k)) \\ -K(k)(x_{N-1}(k) + x_N(k)) \\ -2\lambda_1\sqrt{x_{N+1}(k)} \\ -2\lambda_2\sqrt{x_{N+2}(k)} \\ \vdots \\ -2\lambda_{N-1}\sqrt{H_{2N-1}(k)} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\alpha_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_2 \end{bmatrix}^T$$

$$E = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \alpha_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha_2 \end{bmatrix}^T$$

las matrices constantes A y B son de dimensión $2N \times 2N$, D y E de $2N \times 2$ y el vector de funciones de $C(x(k), \lambda, f(k))$ de $2N \times 1$.

Finalmente, despejando $x(k+1)$ de la ecuación 44 se obtiene:

$$x(k+1) = A^{-1}[Bx(k) + C(x(k), \lambda, f(k)) + Du(k+1) + Eu(k)] \quad (45)$$

que corresponde a la expresión explícita para la ecuación de estado no lineal (24).

Abstract

Carrera Méndez, R. & C. Verde Rodarte, "Automatic leak location in a pipe", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 2, pages 139-151, April-June, 2001.

A real time method for detecting and locating leaks in pipes is analyzed. By monitoring pressure gradients of a pipe in a steady state operation, expressions that indicate the existence of a leak and its location are derived. For small leaks it is possible to deduce alternative expressions based on in- and outflow deviations from their nominal values. These deviations are estimated by means of a nonlinear dynamic flow observer. It is an easy task to carry out this system and the detection and location algorithm requires low resources. As a result of this analysis it was found that the identifier is very sensitive to variations of the D'Arcy-Weissbach friction.

Key words: pipes, leaks, fault detection and isolation (FDI), correlation, supervision control and data acquisition (SCADA), dynamic observer.

Dirección institucional del autor:

Rolando Carrera Méndez

Cristina Verde Rodarte

Correo electrónico: racm@pumas.iingen.unam.mx

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ingeniería

Laboratorio de Automatización

Apartado Postal 70-472, Ciudad Universitaria

04510 Coyoacán, México, D.F.

México

Teléfono (01) 5622 8128

Fax (01) 5622 8130