

Distinguibilidad de Múltiples Fugas en un Ducto

* Laura P. Jiménez, ** C. Verde
Instituto de Ingeniería-UNAM
Coyoacán D.F. 04510, México
(52)-55-56233684
* LJimenezM@iingen.unam.mx
** verde@unam.mx

Resumen—Este trabajo aborda el problema de discriminar entre los casos de múltiples fugas y de una sola en un ducto. Debido a la imposibilidad de diagnosticar múltiples fugas con posiciones desconocidas, cuando el fluido se encuentra en estado permanente, y solamente se tienen mediciones de presiones y flujos en los extremos, se propone un generador de residuos que considera como estructura nominal el modelo dinámico de una sola fuga con parámetros estimados en línea, una vez que la condición anormal se ha detectado. Para que dicho modelo permita generar un residuo sensible con respecto a múltiples fugas y robusto ante una sola, se imponen condiciones de frontera específicas en el fluido a través de señales auxiliares. Así, el procedimiento permite: (1) reconstruir el flujo de escape y su posición cuando se trata de una única fuga; y (2) generar cotas de las secciones cuando existen dos fugas. El potencial de la propuesta, se ilustra con datos simulados usando los parámetros del ducto piloto de 135 m de longitud construido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Palabras clave: Distinguibilidad de fugas en ductos, Modelos con fugas, Análisis estructural, Señales auxiliares.

I. INTRODUCCIÓN

El principio para poder detectar e identificar fallas, *DIF*, en un proceso es la **redundancia que existe entre los datos** en condiciones normales y de falla (Frank *et al.*, 1999). La expresión

$$RAR(k, \dot{k}, \ddot{k} \dots) = 0 \quad (1)$$

obtenida de un modelo analítico se llama **Relación Analítica Redundante** para un conjunto detectable de fallas \mathcal{F} si para un vector conocido k con proceso libre de fallas, RAR es cero; y si ocurre una falla $f_i \in \mathcal{F}$, $RAR \neq 0$ (Blanke *et al.*, 2003). El número factible de RAR 's depende de las señales disponibles y la estructura del proceso bajo supervisión. Así que, entre más variables y relaciones entre ellas se conozcan, mejor será el desempeño que puede lograrse del sistema de diagnóstico para el proceso.

Se sabe que la estructura entre variables de un modelo analítico juega un papel importante para determinar si hay redundancia entre los datos (Cassal *et al.*, 1994). En particular, el análisis estructural (*AE*) basado en teoría de grafos permite estudiar, de manera sencilla, las capacidades de un modelo para detectar y aislar fallas, aplicable aún para sistemas no lineales y sin valores numéricos (Blanke *et al.*, 2003).

Por otra parte, la confiabilidad de las redes de ductos es una preocupación importante de los sectores involucrados en los sistemas de transporte de fluidos. Aunque los ductos están, en principio, diseñados con protecciones ocurren fugas y ruptura de las líneas con efectos costosos. El problema principal para la localización automática de fugas es el número reducido de sensores y de relaciones estáticas entre variables para determinar las posiciones exactas de las fugas, si se asume que el flujo se encuentra en estado permanente. La comunidad de seguridad de procesos ha propuesto localizadores de fugas usando técnicas de identificación de parámetros y teoría de observadores de sistemas dinámicos. Este tipo de localizadores, basados en modelos analíticos, en condiciones de fugas simultáneas, diagnostican una fuga falsa, caracterizada por la posición z_{eq} (Billman y Isermann, 1987), (Torres, 2011), (Verde *et al.*, 2011). Así, que la localización de múltiples fugas es un problema abierto, el cual requiere incrementar la redundancia entre los datos disponibles del ducto.

Los hechos arriba descritos motivaron el presente trabajo en donde se presentan condiciones y procedimientos factibles para discernir, entre múltiples fugas y una sola en el ducto, cuando se suponen las posiciones desconocidas en el modelo del fluido. Para aumentar la redundancia y así generar residuos insensible ante la presencia de una fuga y sensible al caso de más de una, se utiliza un modelo dinámico de tres estados con una fuga. Usando el concepto de grafo redundante, \mathcal{GR} , (Verde y Sánchez-Parra, 2010) se demuestra que existen residuos con dichas propiedades, cuando se estiman los parámetros asociados a una fuga en el modelo nominal usado en el generador de residuos, y se perturba el fluido introduciendo señales auxiliares en las condiciones de frontera del modelo.

El proceso en línea para separar los casos de fallas se lleva a cabo por etapas, una vez que se ha detectado un desbalance de volumen. La primera parte del procedimiento consiste en estimar los parámetros de la fuga, tanto posición como orificio (z_{eq}, λ_{eq}), manteniendo el fluido en estado permanente y usando relaciones estáticas del modelo para una fuga. Esta estimación, aumenta la información redundante y permite generar residuos con el modelo estimado de fuga como nominal.

Una vez estimada los parámetros en condiciones de equilibrio, se excita el fluido con señales auxiliares; las cuales se

adicionan a las condiciones de frontera del modelo tratando de maximizar la ganancia de los residuos para el caso de dos fugas. Es decir, la señales auxiliares, se seleccionan de manera tal que los residuos sean insensibles al caso de una sola fuga y sensible para el caso múltiple. Para evaluar la ganancia de los residuos a las señales auxiliares, se propone la norma H_∞ , junto con el defasamiento entre las dichas variables. Esta forma de evaluar los residuos permite caracterizar patrones de fallas con la amplitud y la fase del operador. El desempeño del esquema para diagnosticar dos fugas se muestra por simulación tomando los parámetros de un ducto de agua piloto de 135 m de longitud (Carrera y Verde, 2001).

El contenido de este trabajo está organizado como sigue. En la sección II se presenta el modelo del fluido en el ducto asumiendo la presencia de dos fugas y considerando que sólo se conocen los flujos y presiones en los extremos. La sección III introduce el análisis estructural como herramienta para estudiar la redundancia entre mediciones de un proceso. En la sección IV se presenta el estudio estructural sobre las posibilidades de la estructura del fluido para diagnosticar fugas con dos escenarios. El primer escenario con posiciones de fugas conocidas, y el segundo con estimados de los parámetros del modelo nominal de una fuga y la presencia de señales auxiliares en las entradas del sistema. La sección V muestra las características del operador residuo-síñal auxiliar obtenido con datos simulados, en donde se evidencia que es posible diferenciar una fuga de múltiples. Finalmente, en la sección VI, se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

II. MODELO DINÁMICO DEL FLUIDO EN UN DUCTO CON FUGAS

Considerando el modelo no lineal unidimensional de un fluido en un ducto dado por

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

$$c^2 \frac{\partial Q(z, t)}{\partial z} + gA \frac{\partial H(z, t)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

obtenido usando ecuaciones de conservación de masa y momento y asumiendo un fluido incompresible (Chaudry, 1979), con $H(z, t)$ la presión en los extremos (m), $Q(z, t)$ la taza de flujo (m^3/s), z la coordenada de longitud (m), t la coordenada de tiempo (s), g la gravedad (m/s^2), A el área transversal (m^2), D el diámetro del ducto (m), c la velocidad de onda de presión (m/s) y $\mu = \frac{f}{2DA}$ donde f es el coeficiente (adimensional) de fricción de Darcy-Weisbach. La presencia de una fuga genera una nueva condición de frontera en el punto de fuga

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

donde Q^b y Q^a denotan los flujos antes y después de la fuga respectivamente. De acuerdo con (Verde, 2001) las ecuaciones (2) y (3) se pueden aproximar por n pares de

ecuaciones dinámicas no lineales

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

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

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

$$a_{1i} = \frac{gA}{z_i}, \quad a_{2i} = \frac{b^2}{z_i g A} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (7)$$

Si las fugas no están igualmente distribuidas, cada sección es de diferente tamaño y la pareja de parámetros (a_{1i}, a_{2i}) depende de las distancias las fugas, pero la estructura de (5-6) se mantiene.

III. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural (AE) esta basado en las relaciones entre variables de un sistema en la forma de un grafo orientado, o como una matriz de incidencia booleana, sin valores numéricos, en donde se describe la secuencia en que se evalúan las variables del sistema. Además AE ha permitido extender el concepto de relación analítica redundante (Verde y Sánchez-Parra, 2010), simplificando el análisis para generar residuos en un problema de diagnóstico de fallas.

El sistema

$$\dot{x} = f_m(x, \tilde{x}, u, \theta, f, \bar{f}), \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad u \in \mathbb{R}^{n_u}, \quad (8)$$

$$y = h(x, \tilde{x}, u, \theta, f, \bar{f}), \quad y \in \mathbb{R}^{n_y}, \quad (9)$$

$$0_p = m(x, \tilde{x}, u, \theta, f, \bar{f}), \quad \tilde{x} \in \mathbb{R}^s, \quad 0_p \in \mathbb{R}^p \quad (10)$$

con u y y variables conocidas, x las variables desconocidas, θ , el vector de parámetros, $f \in \mathbb{R}^f$ y $\bar{f} \in \mathbb{R}^d$ las fallas a ser detectadas y despreciadas respectivamente, se describe por medio de un grafo bipartita $\mathcal{G}(\mathcal{C} \cup \mathcal{V}, \mathcal{E})$ donde los nodos del conjunto \mathcal{V} son las variables del sistema, los nodos del conjunto de restricciones \mathcal{C} son las ecuaciones y conjunto de aristas \mathcal{E} se forma con los elementos

$$e_{ij} = \begin{cases} (c_i, v_j) & \text{si y sólo si } v_j \text{ aparece en } c_i \\ 0 & \text{por el contrario} \end{cases}$$

En la descripción matricial, la arista e_{ij} se representa por \bullet en la fila i , columna j . De acuerdo con (8, 9, 10), $|\mathcal{C}| = 2n + n_y + p$, y el conjunto de variables $\mathcal{V} = \mathcal{X}_g \cup \mathcal{K} \cup \mathcal{F} \cup \bar{\mathcal{F}} \cup \theta$, se define por:

- las variables desconocidas $\mathcal{X}_g = \mathcal{X} \cup \dot{\mathcal{X}} \cup \tilde{\mathcal{X}}$ con cardinalidad $2n + s$;
- las variables conocidas $\mathcal{K} = \mathcal{U} \cup \mathcal{Y}$; con variables exógenas \mathcal{U} y variables medidas \mathcal{Y} cuya cardinalidad es n_u y n_y respectivamente; $n_k = |\mathcal{K}| = n_u + n_y$;
- las fallas y perturbaciones \mathcal{F} y $\bar{\mathcal{F}}$ con cardinalidad f y d respectivamente;
- cada variable de estado x_i involucra una restricción

$$\dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt} \quad (d)$$

- el vector de parámetros, θ .

Una falla f_j que modifica c_i de la condición normal, provoca que cualquier trayectoria del grafo orientado que pase por c_i se vera afectada por f_j independientemente de los valores numéricos involucrados.

Para orientar las aristas en la matriz de incidencia, cada c_i debe ser usada solamente para calcular una variable de conjunto \mathcal{V} , y al proceso de orientación se llama **aparejamiento**. El símbolo \oplus en la fila i y columna j denota que la restricción c_i sirve para calcular la variable v_i .

III-A. Redundancia en un grafo

Los subsistemas aparejados con $|\mathcal{C}| > |\mathcal{X}|$ son los únicos interesantes, desde el punto de vista de detección de fallas (Blanke *et al.*, 2003). Por tanto, la existencia de *RAR*'s, implica que el grafo tiene más restricciones que variables desconocidas y el máximo número de relaciones redundantes está acotado por $|\mathcal{C}| - |\mathcal{X}_g|$ (Krysander *et al.*, 2008). La relación entre variables \mathcal{K}^+ con restricciones \mathcal{C}^+ en las cuales el conjunto \mathcal{X}_g^+ se ha sustituido, determina las *RAR*'s. Una vez que se ha obtenido el aparejamiento en \mathcal{G}^+ , las restricciones involucradas se pueden interpretar como operadores desde un conjunto de variables conocidas hacia otro, donde el camino está determinado por el proceso de concatenación.

Definición 1: Sea

$$\mathcal{K}_i = \mathcal{U}_{si} \cup y_i \quad (11)$$

un subconjunto de variables conocidas aparejadas con el subconjunto de restricciones \mathcal{C}_i , los nodos iniciales \mathcal{U}_{si} y el nodo objetivo y_i , entonces

$$\mathcal{GR}_i(\mathcal{C}_i; \mathcal{U}_{si}; y_i) \quad (12)$$

es un **Grafo Redundante** si

- los caminos entre los nodos de salida \mathcal{U}_{si} y el objetivo y_i son consistentes y se pueden obtener por concatenación \mathcal{C}_i y
- hay falta de consistencia en los caminos entre \mathcal{U}_{si} y y_i cuando existe una falla en cualquier elemento del camino.

Los símbolos $\bullet \rightarrow$ y $\rightarrow \bullet$ respectivamente, se usan para indicar los nodos inicial y objetivo. Se hace notar que para un \mathcal{GR} específico, los miembros de \mathcal{U}_{si} son variables independientes correlacionada con y_i por los caminos del grafo redundante. En este marco de trabajo, las fallas conocidas a priori se consideran nodos inconsistentes. Las ventajas genéricas de un \mathcal{GR}_i son:

- Se pueden generar sub-grafos distribuidos donde causa y efecto se pueden manejar indistintamente.
- La firma de fallas se obtiene sin valores numéricos.

Estas propiedades son útiles en la búsqueda de nuevos sensores o trayectorias que mejoren la firma de fallas para un problema de detección de fallas.

III-B. Excitación de un grafo redundante

La redundancia de un \mathcal{GR} se puede perder para ciertos valores de los nodos en el grafo orientado. Por tanto, se debe verificar que la redundancia prevalece ante cualquier excitación. Este hecho es equivalente a la condición de excitación persistente requerida en la identificación de parámetros (Ljung, 1987).

A continuación, se explota el concepto de \mathcal{GR} para generar residuos sensibles a las fugas del modelo (5,6).

IV. REDUNDANCIA PARA EL DIAGNÓSTICO DE MÚLTIPLES FUGAS

IV-A. Detectabilidad con posiciones conocidas

Considere, el modelo (5-6) donde se miden los gastos y presiones en los extremos, y que existen dos fugas uniformemente distribuidas, y posiciones conocidas, así que $a_{11} = a_{12} = a_{13}$ y $a_{21} = a_{23}$. En el marco del *AE* significa que el conjunto de variables conocidas está dado por $\mathcal{K} = \{H_1, H_4, Q_1, Q_4\}$ y el conjunto de restricciones se reduce a:

$$\begin{aligned} c_1; & \dot{Q}_1 = a_{11}(H_1 - H_2) - \mu Q_1 |Q_1| \\ c_2; & \dot{H}_2 = a_{21}(Q_1 - Q_2 - \lambda_1 \sqrt{H_2}) \\ c_3; & \dot{Q}_2 = a_{12}(H_2 - H_3) - \mu Q_2 |Q_2| \\ c_4; & \dot{H}_3 = a_{23}(Q_2 - Q_3 - \lambda_2 \sqrt{H_3}) \\ c_5; & \dot{Q}_3 = a_{13}(H_3 - H_4) - \mu Q_3 |Q_3| \\ d_1; & \dot{Q}_1 = \frac{dQ_1}{dt} \\ d_2; & \dot{H}_2 = \frac{dH_2}{dt} \\ d_3; & \dot{Q}_2 = \frac{dQ_2}{dt} \\ d_4; & \dot{H}_3 = \frac{dH_3}{dt} \\ d_5; & \dot{Q}_3 = \frac{dQ_3}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

Entonces, $|\mathcal{C}| - |\mathcal{X}_g| = 10 - 8 = 2$, $|\mathcal{K}| = 4$ y se pueden obtener tres grafos redundantes representativos ignorando dos restricciones del conjunto \mathcal{C} . La generación de los tres \mathcal{GR} está reportada en (Jiménez, 2011), de donde se obtiene la matriz de firma de fugas de la tabla I. Se observa de la tabla que ambas fugas, pueden ser detectadas aún si ocurren simultáneamente. Sin embargo, este estudio es poco interesante, dado que se suponen posiciones conocidas. Se requiere manejar la pareja (z_1, z_2) como desconocida en el proceso de aparejamiento.

TABLA I: Matriz de firma de fugas

Grafo redundante	λ_1	λ_2
$\mathcal{RG}_1(\mathcal{C} \setminus \{c_5, d_5\}; \{H_1, H_4, Q_1\}; Q_3)$	1	1
$\mathcal{RG}_2(\mathcal{C} \setminus \{c_2, d_2\}; \{H_4, Q_1, Q_3\}; H_1)$	0	1
$\mathcal{RG}_3(\mathcal{C} \setminus \{c_4, d_4\}; \{H_1, Q_1, Q_3\}; H_4)$	1	0

IV-B. Modelo de falla para la detectabilidad de dos fugas

Para posiciones de fugas desconocidas, se incrementan el número de variables desconocidas en (13), resultando

$|\mathcal{X}_g| = 10$; como consecuencia, no hay redundancia en dicho modelo. Así que es necesario adicionar restricciones asociadas al modelo o aumentar el número de mediciones para diagnosticar las fugas.

Si existen dos fugas con posiciones z_1 y z_2 , es decir

$$\begin{aligned} (z_1, \lambda_1, t_1) &: \text{ con } \lambda_1 > 0 \quad t_1 \geq 0 \\ (z_2, \lambda_2, t_2) &: \text{ con } \lambda_2 > 0 \quad t_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

y el flujo se encuentra en estado permanente, la relación

$$Q_1^\infty - Q_3^\infty = \lambda_1 \sqrt{H_1^\infty - \frac{\mu z_1}{a_1} (Q_1^\infty)^2} + \lambda_2 \sqrt{H_4^\infty - \frac{\mu(L-z_1-z_2)}{a_1} (Q_3^\infty)^2} \quad (15)$$

donde ∞ denota estado permanente, vincula posiciones y orificios de las fugas (Verde *et al.*, 2007). Además, el parámetro

$$z_{eq} := \frac{a_1(H_1^\infty - H_4^\infty)}{\mu((Q_1^\infty)^2 - (Q_3^\infty)^2)} - \frac{L(Q_3^\infty)^2}{((Q_1^\infty)^2 - (Q_3^\infty)^2)} \quad (16)$$

para todo $Q_1^\infty \neq Q_3^\infty$ caracteriza múltiples fugas con el mismo conjunto de valores en estado permanente; este valor ha sido validado en el ducto piloto. Así, z_{eq} es una valor falso de fuga cuando existen dos fugas y arroja el resultado correcto, $z_{eq} = \hat{z}_1$, para una fuga. Además, usando (15), y manteniendo el fluido en condición de equilibrio, se puede estimar correctamente $\hat{\lambda}_1$ con $\lambda_2 = 0$ para el caso de una fuga.

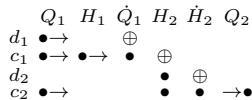
La pregunta es cómo incluir la información de $(z_{eq}, \hat{\lambda}_1)$ para aumentar la redundancia de la estructura.

Tomando en cuenta que la estimación es correcta para una fuga, se propone usar el modelo dinámico estimado de una falla como modelo nominal en la generación de los residuos. Este hecho permite, generar un residuo idealmente insensible al caso estimado de una falla y que se desviará de cero ante la presencia de dos fugas.

Para obtener el \mathcal{GR} , el punto de partida es el modelo con parámetros estimados de una fuga

$$\begin{aligned} c_1; \quad \dot{Q}_1 &= a_{11}(z_{eq})(H_1 - H_2) - \mu Q_1 |Q_1| \\ c_2; \quad \dot{H}_2 &= a_{21}(z_{eq})(Q_1 - Q_2 - \hat{\lambda}_1 \sqrt{H_2}) \\ c_3; \quad \dot{Q}_2 &= a_{12} z_{eq} (H_2 - H_3) - \mu Q_2 |Q_2| \\ d_1; \quad \dot{Q}_1 &= \frac{dQ_1}{dt} \\ d_2; \quad \dot{H}_2 &= \frac{dH_2}{dt} \\ d_3; \quad \dot{Q}_2 &= \frac{dQ_2}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

Considerando nodos iniciales $\{H_1, Q_1\}$ y el nodo objetivo Q_2 , se establece el grafo redundante con el apareamiento siguiente



sin pasar por $\{c_3, d_3\}$. Así,

$$R_4(t) = Q_2(t) - \hat{Q}_2(t)$$

con $\hat{Q}_2(t)$ estimado, es un residuo insensible a la presencia de la fuga estimada y sensible ante la presencia de dos fugas dado que los estimados son incorrectos. Para amplificar el comportamiento del residuo ante los escenarios de fallas posible, se propone una excitación persistente en los extremos del ducto.

IV-C. Distingibilidad de fugas con señales auxiliares

Una fuga provoca una onda de presión transitoria en el fluido, por lo que el fenómeno puede ser analizado a través de fenómenos transitorios (Colombo *et al.*, 2009). Al alterarse el comportamiento transitorio del fluido con la fuga, es posible maximizar las respuestas de los residuos con señales de prueba adicionales a las condiciones de frontera del ducto, para distinguir diversos escenarios de fugas.

Estudios en simulación, omitidos por razones de espacio, han mostrado que la respuesta del residuo R_4 es función de los diferentes escenarios de fugas, cuando la presión aguas abajo del ducto toma la forma de una señal senoidal. Así que, con ayuda de una válvula al final del ducto, cuya apertura describe la función

$$H_3(t) = \bar{H}_3 + h_3 \sin(\omega t)$$

genera un residuo

$$R_4(t) = \bar{R}_4 + \sum_{i=1}^{i=\infty} r_i \sin(i\omega t) \quad (18)$$

cuya magnitud y fase de la primera armónica dependen del patrón de fugas.

Considerando el escenario de una fuga, dado que el modelo nominal que genera R_4 coincide con la fuga real, $R_4 \approx 0$. Por el contrario, para dos fugas, $r_1 \neq 0$ y existe un defasamiento con respecto a la señal senoidal de H_3 .

Con objeto de evitar choques de ondas de presión en el ducto provocadas por la señal de excitación, la frecuencia de ésta debe ser menor que la de resonancia del fluido. De acuerdo con (Lee *et al.*, 2005) la frecuencia de resonancia está dada por

$$\omega_{th} = \frac{\pi c}{2L} \quad (19)$$

donde c es la velocidad de la onda de presión y L la longitud del ducto. Usando (19) para los datos de la tubería piloto se obtiene $\omega_{th} = 14.817 \text{ rad/s}$. Pruebas en simulación han mostrado que la separabilidad de los escenarios de fuga se puede llevar a cabo con señales senoidales de frecuencia $\omega_e = 0.06 \text{ rad/s}$.

V. ESCENARIOS DE PRUEBA Y RESULTADOS

Para probar el procedimiento arriba descrito se consideraron dos escenarios de fugas simulados con los parámetros del ducto piloto de la UNAM (Carrera y Verde, 2001).

V-A. Una fuga

El primer escenario corresponde al caso de una fuga provocada a los 40 s, de iniciada la simulación. El coeficiente de apertura es $\lambda_1 = 0.0001$ y la fuga está localizada a 66.27 m. La figura (1) describe la evolución de tres de las variables medidas del ducto :

- La parte superior describe la presión aguas abajo, la cual es constante los primeros 150 s, y después evoluciona siguiendo las variaciones de la válvula.
- La parte inferior muestra los flujos, en donde la curva sólida es el flujo de entrada y la punteada el de salida; se identifica a partir de la presencia de la fuga la diferencia en los flujos de acuerdo a lo esperado, el flujo de entrada aumenta y el de salida disminuye. Además una vez que se adiciona la excitación senoidal, ésta se refleja en ambos flujos.

Una vez detectada una diferencia mayor al umbral entre los gastos de entrada y salida, y pasado el efecto transitorio, se estiman los parámetros del modelo de una fuga resultando $z_{eq} = 66.15 m$ y $\hat{\lambda}_1 = 0.0001$. Usando estos estimados, se ajustan los valores del generador de residuos $R_4(t)$ y en el instante $t = 150 s$ se incluye en la presión aguas abajo, la señal $0.025\sin(0.06t)$ vía la válvula. La figura (2) describe los estimados de los parámetros y la evaluación del residuo R_4 . Se observa que la evolución tanto de z_{eq} , como de $\hat{\lambda}_1$ se mantiene constante a lo largo de todo el proceso de distinguibilidad dado que se estiman con relaciones estáticas, y sin excitación externa. La parte inferior de la figura describe la evolución del residuo. Se distingue errores numéricos del orden de 10^{-7} en los primeros 40 s, a partir del $t = 40 s$ se identifican dos transitorios, al inicio de la fuga y de la señal de excitación a los 150 s. Tomando en cuenta que los gastos nominales del ducto son del orden de milésimas de m^3/s , se puede afirmar que el residuo es prácticamente insensible a una fuga.

V-B. Dos fugas

En el segundo escenario se simulan dos fugas simultáneamente a 40 s con $\lambda_2 = 6.228e^{-5}$, $z_1 = 44.10 m$, $\lambda_2 = 1.053e^{-4}$ y $z_2 = 88.20 m$. Este evento arroja estimados falsos de $z_{eq} = 69.27 m$ con $\hat{\lambda}_{eq} = 0.000164$. Sin embargo, con ellos se sintoniza el residuo R_4 y se inyecta en la presión la excitación $0.025\sin(0.06t)$, a los 150 s. A pesar del error, el estimado z_{eq} puede ser usado para acotar la secciones de búsqueda de las dos fugas, pues la primera se encuentra a la derecha y la segunda a la izquierda del z_{eq} . La figura (3) muestra la evolución de tres de las mediciones antes las dos fugas. La gráfica superior corresponde a la presión aguas abajo del ducto en donde se verifica que durante los primeros 150 s es constante, y después sigue la señal de excitación. La gráfica inferior, corresponde a los gastos, la curva sólida es el de entrada y la punteada es el de salida; se verifica que durante la ausencia de las fuga ambos gastos son iguales. A partir de la ocurrencia de las fugas se separan los gastos, y a los 150 s cuando se aplica

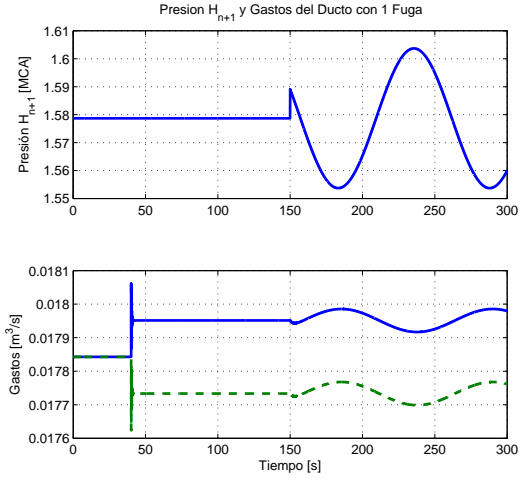


Figura 1: Evolución de la presión de excitación y gastos para una fuga provocada a los 40 s con excitación a partir de 150 s

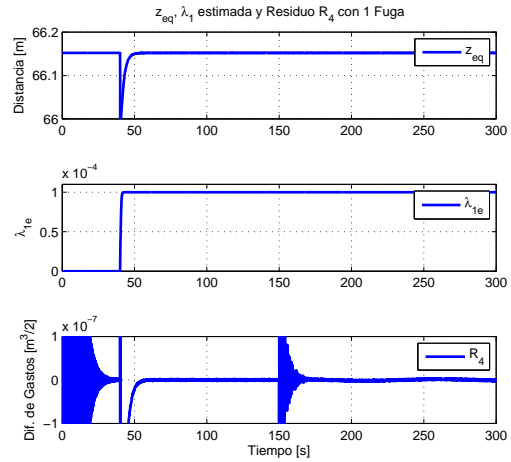


Figura 2: Estimación de parámetros y evolución del residuo R_4 para una fuga provocada a los 40 s con excitación a partir de 150 s

la señal de excitación, como se esperaba, los gastos se ven afectados por ella.

La figura (4) muestra los parámetros estimados, sin sentido físico, y el residuo R_4 . La evolución de los parámetros estimados presenta un comportamiento estático similar al caso de una fuga. La evolución del residuo, es muy ruidoso durante los primeros 40 s en donde no existen fugas. Durante el intervalo $[40 - 150] s$, a pesar de la presencia de dos fugas, el residuo es insensible dado que no existe excitación. A partir del instante $t = 150 s$, se observa un nuevo transitorio debido a la inyección de la señal de excitación y una oscilación con un factor de amplificación mayor que para una fuga.

Pruebas realizadas con distintos orificios y posiciones de fuga, pero con la misma z_{eq} arrojan distintos patrones

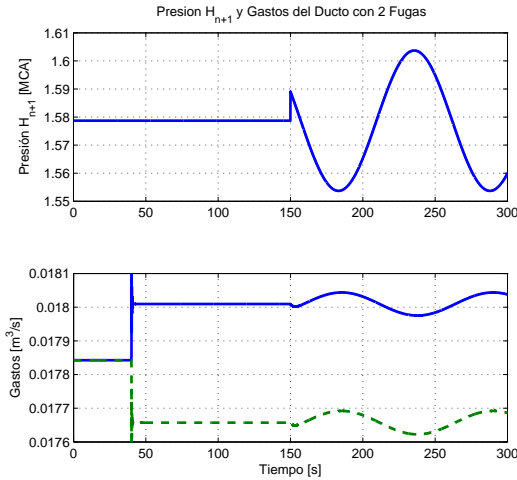


Figura 3: Evolución de la presión y gastos para dos fugas iniciadas a los 40 s y una excitación aplicada después de la estimación del modelo con una fuga

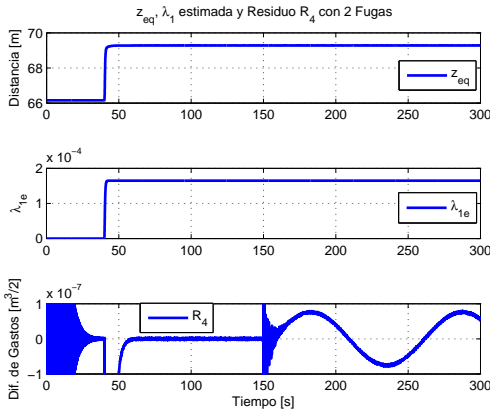


Figura 4: Estimación de parámetros falsos y evolución del residuo R_4 para dos fugas iniciadas a los 40 s y una excitación aplicada después de la estimación del modelo con una fuga

caracterizados por **amplitud** y **fase** del operador R_4/h_3 . La figura 5 muestra las características para diversos escenarios.

VI. CONCLUSIONES

Se propone un esquema para distinguir los casos de una fuga o dos con sensores únicamente en los extremos del ducto. El diseño propuesto es desarrollado con el concepto de grafos redundantes y las limitaciones del esquema se discuten usando el comportamiento físico del del ducto. Si la posiciones de las fugas son conocidas el problema de diagnóstico es trivial; los escenarios críticos corresponden a las posiciones desconocidas. Se muestra, por medio de un residuo con el modelo de una falla que se puede distinguir entre el caso de una fuga y el caso de dos fugas, cuando

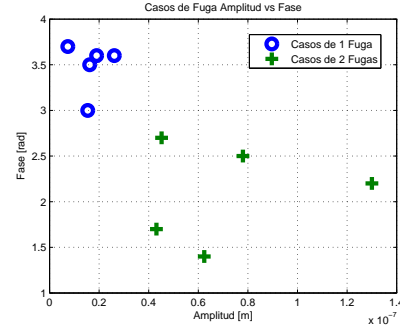


Figura 5: Regiones de los patrones para una y dos fugas

se adiciona una señal de excitación adecuada. La potencia del sistema de diagnóstico se muestra con resultados simulados. Como trabajo futuro se busca optimizar la señal de excitación, y localizar la posición de dos fugas.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con financiamiento de la DGAPA-PAPIIT-UNAM y de CONACYT.

REFERENCIAS

- Billman, L. y R. Isermann (1987). Leak detection methods for pipelines. *Automatica* **23**(3), 381–385.
- Blanke, M., M. Kinnaert, J. Lunze y M. Staroswiecki (2003). *Diagnosis and Fault Tolerant Control*. Springer. Berlin.
- Carrera, R. y C. Verde (2001). Localizador automático de fugas en un ducto. *Ingeniería Hidráulica en México XVI*, 139–151.
- Cassal, J. P., M. Staroswiecki y P. Declerck (1994). Structural decomposition of large scale systems for the design of failure detection and identification procedure. *Systems Science* **20**, 31–42.
- Chaudry, Hanif M. (1979). *Applied hydraulic transients*. Von Nostrand Reinhold Co. New York, USA.
- Colombo, A. F., P. Lee y B.W. Karney (2009). A selective review of transient-based leak detection methods. *Hidro-environment Research* **2**(1), 212–227.
- Frank, P., G. Schreier y E. Alcorta-Garcia (1999). *Nonlinear Observers for Fault Detection and Isolation*. pp. 399–466. Vol. Lecture Notes in Control and Information Science 244. Springer. Berlin.
- Jiménez, L. P. (2011). Residuos periodicos para detección de múltiples fugas en un ducto. Maestría en control. Posgrado en Ingeniería UNAM. Ciudad Universitaria, DF, México.
- Krysanter, M., J. Åslund y M. Nyberg (2008). An efficient algorithm for finding minimal over-constrained sub-systems for model based diagnosis. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans* **38**(1), 197–206.
- 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.
- Ljung, Lennart (1987). *System Identification: Theory for the user*. Prentice Hall. New Jersey.
- Torres, Lizeth (2011). Modèles et observateurs pour les systèmes d'écoulement sous pression. Extension aux systèmes chaotiques. Tesis de doctorado. Universidad de Grenoble.
- Verde, C. (2001). Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice* **9**, 673–682.
- Verde, C., L. Molina y R. Carrera (2011). Practical issues of leak diagnosis in pipelines. En: *18th IFAC World Congress, Milano Italy*, p. in press.
- Verde, C., N. Visairo y S. Gentil (2007). Two leaks isolation in a pipeline by transient response. *Applied Water Resources*, **30**, 1711–1721.
- Verde, C. y Marino Sánchez-Parra (2010). *Gas Turbine*. Cap. Application of Structural Analysis to Improve Fault Diagnosis in a Gas Turbine, pp. 1–26. Sycom.