

## Detección e identificación de fallas secuenciales<sup>\*</sup>

J. L. Rojas A.<sup>\*</sup> C. Verde<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM, 04510 Coyoacán, México D.F.

---

Resumen: Se propone un método para la detección y localización de fallas secuenciales en donde el modelo no lineal con falla se identifica en línea a medida que éstas se presentan. Como objetivo principal se busca reducir el tiempo de identificación de los parámetros asociados a cada falla con la adecuación del modelo respectivo. En particular, se aprovecha el hecho que el comportamiento en estado permanente de múltiples fallas es equivalente a una sola falla. El procedimiento es una extensión al caso no lineal del método reportado por uno de los autores para localización de dos fugas en un ducto sin tomas laterales. En comparación con el trabajo previo se simplifica el proceso de localización con estimadores no lineales interconectados y se logra reducir el tiempo de respuesta del localizador. Los resultados en simulación para un ducto hidráulico piloto muestran la potencialidad del procedimiento.

*Palabras clave:* Detección de fallas secuenciales, modelo equivalente de fallas, estimación de parámetros, localizador de fugas en ductos.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El problema de detección y localización de fallas (FDI por las siglas en inglés) ha sido atacado por la comunidad de control desde los años ochenta y en un inicio para formular la tarea se usaron modelos lineales en el marco de identificación de parámetros, de observadores y de relaciones de paridad (Isermann, 2006). Poco se discutió, en ese entonces, el tratarlos como marcos complementarios. Sin embargo, dada la complejidad y dificultad para manejar todas las fallas con un solo enfoque, la tendencia actual es formular un problema de FDI combinando procedimientos.

En particular, los sistemas de monitoreo y supervisión de redes de ductos deben detectar y localizar tan rápido como sea posible los daños, ya que las consecuencias de estos ponen en riesgo tanto a la red como a la población y el medio ambiente, sin olvidar la pérdida económica que ello representa. Existen diversos principios físicos usados para supervisar la integridad de una red de ductos en línea por *software*. Si se dispone solamente de sensores de presión, flujo y temperatura del fluido, el balance de masas ha permitido desarrollar patentes y se han reportado diversos métodos a lo largo de los años Billman y Isermann (1987) Verde (2001), Torres et al. (2014), Moustafa et al. (2012).

Es importante notar que los métodos basados en el balance de masas para un solo ducto sin tomas laterales ubican la posición correcta solo en el caso de una fuga entre mediciones y que las fugas son identificables únicamente durante el tiempo que dure la respuesta transitoria del fluido provocada por las fugas (Verde et al., 2007). En la práctica, el bajo ancho de banda de los sensores limitan la aplicabilidad de diversas propuestas.

Se ha demostrado que en condiciones de equilibrio hay una equivalencia entre el modelo con una sola fuga y los escenarios múltiples, lo cual provoca que todos los métodos basados en la suposición de una sola fuga arrojen una falsa posición equivalente en el escenario múltiple en condiciones estáticas. En particular, se ha logrado caracterizar la familia de modelos con dos fugas equivalentes a una sola. Esta familia puede sólo ser conocida *a posteriori* y se ha usado junto con el método simple de optimización para detectar dos fugas fuera de línea (Verde et al., 2014).

Para resolver el problema de múltiples fugas, asumiendo que éstas son secuenciales y suficientemente espaciadas en el tiempo, Verde (2005) propuso un rastreo de la posición de la fuga junto con una transformación para ir localizando la nueva fuga y ajustando el modelo lineal con las fugas previas. Esta propuesta usa un identificador adaptable con tiempo de respuesta lento, lo cual limita el uso en casos reales. Así, el escenario de múltiples fugas sigue siendo un problema no resuelto completamente usando principios de balance de masas.

El problema arriba descrito sobre la supervisión de un ducto, motivaron el desarrollo de un localizador donde se asume que las fugas son secuenciales y se propone ajustar el modelo con fugas a medida que éstas se presentan con una pareja de estimadores basados en modelos no lineales. Esto tiene como ventaja el no incrementar el orden del modelo y reduce el tiempo de localización con respecto a métodos previos. De manera similar a otros métodos basados en balance de masas, la propuesta solamente considera la medición de los flujos y presiones en los extremos del ducto.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 introduce el modelo matemático del ducto y se detallan aspectos importantes del mismo. La sección 3 está dedicada al esquema de ajuste de los modelos con fugas de forma iterativa a medida que éstas se presentan. En

---

<sup>\*</sup> verde@unam.mx. Financiado por: II-UNAM, IT100414-DGAPA-UNAM, CONACYT

esta sección se incluye la estructura de los estimadores con estados aumentados usados como identificadores de parámetros. La sección 4 discute los resultados en simulación del localizador para un ducto piloto de 200 [m] con 3 fugas secuenciales. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones y planes futuros del desarrollo.

## 2. MODELO DEL FLUIDO

El modelo dinámico de un fluido incompresible está descrito por las ecuaciones diferenciales parciales de movimiento y continuidad presentadas en (Chaudry, 1979), las cuales rompen su continuidad en la posición de la fuga. Desde un punto de vista de balance de masas para el diagnóstico de fugas se puede aproximar por un modelo de ecuaciones discretizadas espaciales donde la posición de la fuga fija determina los puntos mínimos de la discretización. El modelo dinámico mínimo no lineal para dos fugas arbitrarias de acuerdo con las variables y condiciones de frontera mostradas en la Fig. 1, está descrito por

$$\dot{Q}_1 = -\mu Q_1^2 + \frac{a_1}{z_1}(u_1 - H_2) \quad (1)$$

$$\dot{H}_2 = \frac{a_2}{z_1}(-Q_2 + Q_1 - \lambda_1 \sqrt{H_2}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_2 = -\mu Q_2^2 + \frac{a_1}{z_2}(H_2 - H_3) \quad (3)$$

$$\dot{H}_3 = \frac{a_2}{z_2}(-Q_3 + Q_2 - \lambda_2 \sqrt{H_3}) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_3 = -\mu Q_3^2 + \frac{a_1}{z_3}(H_3 - u_2) \quad (5)$$

y fue tomado de Verde (2005), donde  $H_i$  [m] es la carga de presión aguas arriba en la sección  $i$ ,  $Q_i$  [ $m^3/s$ ] es el flujo en la sección  $i$  correspondiente,  $z_i$  [m] son las distancias entre fugas con los coeficientes de descarga  $\lambda_i$  respectivos. Los parámetros constantes  $a_1 = gA$ ,  $a_2 = b^2/gA$ , la aceleración gravitatoria  $g$  [ $m/s^2$ ], el área transversal del ducto  $A$  [ $m^2$ ], el diámetro  $D$  [m], la velocidad de la onda de presión  $b$  [ $m/s$ ] y el coeficiente de fricción  $\mu = f/2DA$  son conocidos. Los parámetros usados se presentan en la Tabla 1 y caracterizan el ducto hidráulico piloto del laboratorio del Instituto de Ingeniería, UNAM.

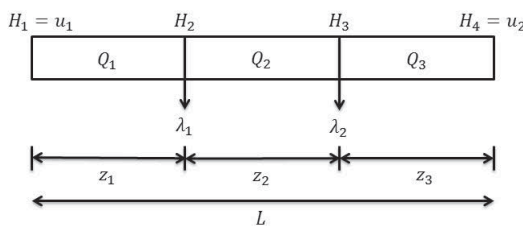


Figura 1. Representación del ducto y definición de variables

Tabla 1. Parámetros de Ducto Piloto

$L$	200 [m]	$D$	0.1[m]	$b$	1250[m/s]
$f$	0.02	$g$	9.81 [ $m/s^2$ ]		

Para el ducto hidráulico tratado se consideran las condiciones de frontera medibles  $u = [H_1, H_4]^T$  y los flujos en los extremos también, es decir,  $y = [Q_1, Q_3]^T$ . Se observa de la estructura del modelo (1-5) que cada fuga involucra

dos parámetros a identificar ( $\lambda_i, z_i$ ). Lo cual es un caso poco tratado en el contexto de FDI.

Con base en el modelo (1-5) se ha mostrado (Verde et al., 2014) que éste es equivalente, en estado permanente, al escenario de una fuga con  $\lambda_1 \neq 0$ ,  $\lambda_2 = 0$  y cualquier valor de  $z_2$  que satisfaga  $L - z_1 > z_2 > 0$ ; es decir la aislabilidad de dos fugas no es factible sin consideraciones dinámicas. Este hecho se ilustra en la Fig. 2 donde se grafica el transitorio de los flujos en los extremos para diversas parejas de fugas y todos convergen al mismo punto de equilibrio. Estos escenarios definen una familia de múltiples fallas con comportamiento equivalente en estado permanente. Las relaciones entre las posiciones y el flujo del modelo equivalente de múltiples fugas se reducen a (Korbicz et al., 2004)

$$Q_{eq}(s) = \lambda_{eq}(s) \sqrt{H_{eq}(s)} \\ = \sum_{i=1}^s \lambda_i \sqrt{H_{i+1}} = \sum_{i=1}^s Q_{fi} \quad (6)$$

$$z_{eq}(s) Q_{eq}(s) \cong \sum_{i=1}^s z_i Q_{fi} \quad (7)$$

donde  $Q_{eq}(s)$  es el gasto equivalente con  $s$  fugas en la posición equivalente  $z_{eq}(s)$  y  $Q_{fi}$  es el flujo provocado por el orificio con coeficiente de descarga  $\lambda_i$  en la posición respectiva  $z_i$ .

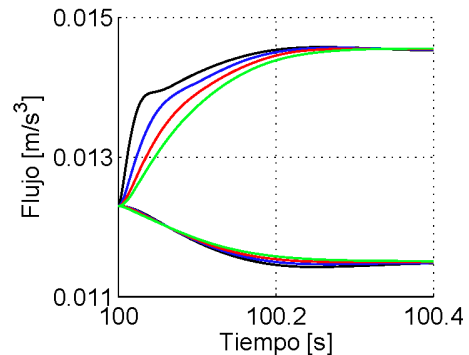


Figura 2. Transitorios de los flujos  $Q_1$  y  $Q_3$  para cuatro escenarios equivalentes con posición equivalente  $z_{eq}(2)$  y flujo de pérdida  $Q_{eq}(2)$

### 2.1 Propiedades estructurales del modelo

La forma usual de atacar el problema de identificar múltiples fallas es generar subsistemas desacoplados de algunas fallas y sensibles a otras. Asumiendo que las distancias entre fugas satisfacen  $z_1 > 0$ ,  $z_2 > 0$ , y  $z_3 > 0$ , la transformación de los estados

$$x_1 = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ H_2 \\ z_2 Q_2 + z_3 Q_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

del modelo (1-5) con inyección de  $y_2$  y el vector de parámetros  $z = [z_1, z_2]^T$ , genera el **Subsistema 1**

$$\dot{x}_1 = A_1(z)x_1 + B_1(z)u + \Phi_1(x_1, y_2, z, \lambda_1) \quad (9)$$

$$y_1 = C_1 x_1 \quad (10)$$

insensible al gasto de la **fuga 2** con detectabilidad local de la fuga 1 durante su efecto transitorio y

$$A_1(z) = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{a_1}{z_1} & 0 \\ \frac{a_2}{z_1} & 0 & -\frac{a_2}{z_1 z_2} \\ 0 & a_1 & 0 \end{pmatrix}, B_1(z) = \begin{pmatrix} \frac{a_1}{z_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & a_1 \end{pmatrix},$$

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} -\mu x_{11}^2 \\ \frac{a_2 \lambda_1 \sqrt{x_{12}}}{z_1} \\ -\mu \left( z_3 y_2^2 + \frac{z_1 (x_{13} - z_3 y_2)^2}{z_2} \right) \end{pmatrix},$$

$$C_1 = (1 \ 0 \ 0)$$

por tanto, este modelo permite:

- generar un residuo para la fuga 1 independientemente de valor de  $z$  asignado, y
- estimar el coeficiente de descarga  $\lambda_1$  si el vector  $z$  es conocido o estimado.

Por simetría del modelo (1-5), la transformación de los estados

$$x_2 = \begin{pmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 Q_1 + z_2 Q_2 \\ H_3 \\ Q_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

con inyección de  $y_1$ , genera el **Subsistema 2**

$$\dot{x}_2 = A_2(z)x_2 + B_2(z)u + \Phi_1(x_2, y_1, z, \lambda_2) \quad (12)$$

$$y_2 = C_2 x_2 \quad (13)$$

insensible al gasto producido por la **fuga 1** con detectabilidad local de la fuga 2 durante su transitorio, cuando la falla 1 está presente y

$$A_2(z) = \begin{pmatrix} 0 & -a_1 & 0 \\ \frac{a_2}{z_2^2} & 0 & -\frac{a_2}{z_2} \\ 0 & \frac{a_1}{z_3} & 0 \end{pmatrix}, B_2(z) = \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{a_1}{L - z_1 - z_2} \end{pmatrix},$$

$$\Phi_2 = \begin{pmatrix} -\mu \left( z_1 y_1^2 + \frac{(x_{21} - z_1 y_1)^2}{z_2} \right) \\ -\frac{a_2}{z_2^2} (z_1 y_1 + \lambda_2 \sqrt{x_{12}}) \\ -\mu x_{23}^2 \end{pmatrix},$$

$$C_2 = (0 \ 0 \ 1)$$

Además, si  $\lambda_2 = 0$ , o ya no es identificable, dado que su efecto transitorio dejó de manifestarse en (1, 5), este modelo puede usarse para estimar el parámetro  $z_1$  o el equivalente  $z_{eq}(s)$ , con  $\lambda_2 = 0$  y  $z_2 > 0$ .

En consecuencia:

- Para una fuga en una región de búsqueda del ducto

$$SR := z_1 + z_2 = L - z_3 \quad (14)$$

se pueden diseñar dos residuos ( $r_1, r_2$ ) para detección; uno para cada subsistema respectivo ( (9, 10) ó (12, 13) ) bariendo todas las combinaciones posibles de parámetros del vector  $z$  en  $SR$ . Así, cada uno de los residuos cruzará por cero sólo cuando las posiciones del barrido coinciden con la posición real de la fuga respectiva. Es decir, definiendo desviaciones de las posiciones

$$e_{z_1} := z_1 - z_1^* \text{ y } e_{z_2} := z_2 - z_2^* \quad (15)$$

donde \* denota valor real, los residuos  $r_1$  y  $r_2$  ante una sola fuga tienen las siguientes propiedades:

- Si  $\lambda_i = 0$ , para cualquier  $e_{z_1} \neq 0$  y  $e_{z_2} \neq 0$ , entonces  $r_i = 0$ ,
- Si  $\lambda_i \neq 0$ ,  $e_{z_1} \neq 0$  y  $e_{z_2} \neq 0$ , entonces  $r_i \neq 0$ ,
- Si  $\lambda_i \neq 0$ ,  $e_{z_1} = 0$  y  $e_{z_2} = 0$ , entonces  $r_i \neq 0$ ,
- Si  $\lambda_j \neq 0$  y  $\lambda_i = 0$ ,  $e_{z_j} = 0$ , para cualquier  $e_{z_i} \neq 0$ , entonces  $r_i = 0$ ,
- Para  $i = 1, 2$  y  $j = 3 - i$ .

- Para dos fugas, solamente hay una ventana de tiempo  $\tau$  en que las fugas son identificables con los subsistemas; es decir, el comportamiento de ellos difiere del modelo equivalente de múltiples fugas ( $z_{eq}(2)$  y  $\lambda_{eq}(2)$ ) sólo en el intervalo  $\tau$  es cuando los subsistemas son útiles para la estimación de parámetros. En consecuencia, la sensibilidad ante distintos parámetros en cada subsistema puede complementarse para la identificación de múltiples fugas al suponer que éstas son secuenciales.

Como consecuencia, el manejar la sensibilidad de los subsistemas en ventanas de tiempo permite reformular el problema de localización, combinando estimadores de parámetros de forma lógica cuando las fugas están espaciadas en el tiempo. Esto hace factible la aislabilidad de múltiples fugas. A continuación, se propone un esquema recursivo para localizar fugas secuenciales, más general que el propuesto por Verde (2005), usando observadores no lineales permiten ajustar el modelo de falla equivalente.

### 3. LOCALIZADOR SECUENCIAL DE FALLAS

El problema del localizador, como en la mayoría de los escenarios de FDI, se divide en la detección y la reconstrucción de los parámetros asociados a la fallas ante cada evento. La Fig. 3 muestra el esquema propuesto dividido en la parte de detección y de evaluación de residuos considerando que la estimación de parámetros es factible solo en ciertas ventanas de tiempo, algo usual en procesamiento de señales, y donde EKF denota filtro de Kalman extendido. Dada la relevancia de clarificar la lógica del esquema, el diseño del EKF y sus ventajas como estimador variantes en el tiempo se presentan al final de la sección.

#### 3.1 Detector

La primera etapa del proceso es el **Detector** y consta de un indicador de síntoma ante la existencia de condiciones anormales junto con un aproximador de la posición de la falla  $z_{eq}(1)$  vía un residuo que barre todas las posiciones posibles en el ducto de manera periódica. Se usa un residuo dinámico para robustificar la detección y evitar falsas alarmas al inicio del monitoreo y ante cambios en puntos de operación. El residuo  $r$  se diseña considerando el subsistema (12, 13) y vale cero en operación normal independientemente de los valores de  $z_1$  y  $z_2$  para cualquier punto de operación, cuando se satisface (14).

Para aproximar la posición con  $r$ , se barre  $z_1$  entre  $\varepsilon_a > 0$  y  $SR - \varepsilon_b > 0$  de forma lineal con una señal auxiliar periódica  $s_T$  de baja frecuencia, donde  $\varepsilon_a$  y  $\varepsilon_b$  son delimitadores para evitar en el modelo distancias negativas entre fugas.

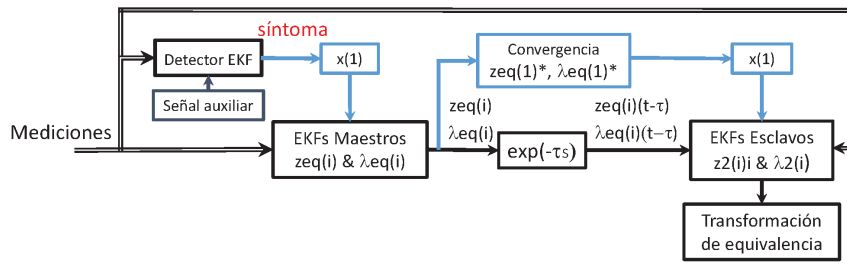


Figura 3. Esquema del detector y estimación secuencial de los parámetros de fallas en donde el azul denota variables de activación

De esta forma se logra que el residuo  $r$  cruce por cero idealmente cuando  $s_T = z_1^*$ . Es decir, el cruce por cero del residuo identifica de forma periódica el intervalo  $I_z = [z_1^-, z_1^+]$  alrededor de la posición  $z_1^*$ ; de manera análoga a un radar. Específicamente, se usa una señal triangular  $s_T$  de periodo  $T$  para éste fin conectada al detector en la Fig. 3.

El generador de residuos se diseña con un EKF del sistema (12, 13) con entradas exógenas  $[u, y_1, z_1]^T$ ,  $z_1$  como señal periódica y como residuo el error de salida

$$r = y_2 - \hat{y}_2 \quad (16)$$

La evolución temporal de  $r$  durante 100 [s] de condición normal y después con una fuga localizada en  $z_1 = 50$  [m] se muestra en la Fig. 4. Se verifica que  $r$  permanece en cero hasta los 100 [s] y después tiene un comportamiento periódico, cruzando por cero cuando el valor de la señal auxiliar coincide con la posición  $z_1$ . Los parámetros usados fueron  $\varepsilon_a = \varepsilon_b = 10$  [m] y  $SR = 160$  [m].

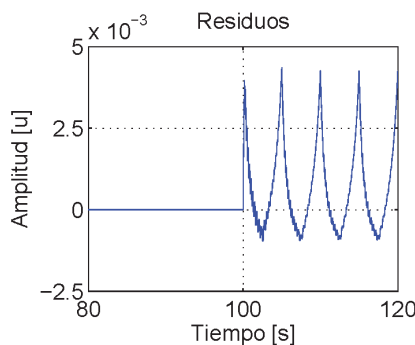


Figura 4. Comportamiento del residuo  $r$  periódico ante una fuga en la posición  $z_1 = 50$  [m]

Una propiedad de este residuo es que la transformación

$$r_T(z_1) = s_T \delta(r) \quad (17)$$

con  $\delta$  la función impulso, genera un tren de impulsos cuya magnitud se encuentra en el intervalo  $I_z$  y es equivalente a aproximar de manera periódica los cruces por cero del residuo. Al extrapolar el tren de pulsos con su último valor se genera la señal

$$R_T(z_1) = \begin{cases} z_1^- & \text{para } t < kT \\ z_1^+ & \text{para } t > kT \end{cases} \quad (18)$$

cuyo valor se aproxima a  $z_1$ . Así, el valor RMS de esta señal es un evaluador del residuo y activa la identificación de los parámetros (línea azul del esquema) con condición inicial  $z_1(0)$ . La Fig. 5 describe el comportamiento de las señales sincronizadas en condición de fuga en donde la línea roja marca el valor  $z_1$ . La gráfica superior muestra la señal  $s_T$ , la intermedia el tren de pulsos  $r_T(z_1)$  y la inferior la señal  $R_T(z_1)$  retenida.

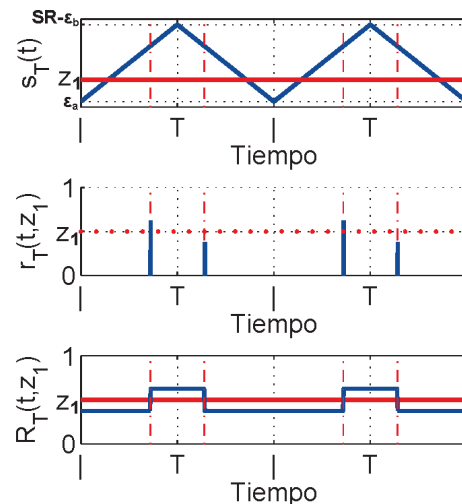


Figura 5. Señales asociadas al evaluador del residuo  $R_T(z_1)$

Obteniendo la aproximación de la posición de la fuga  $z_1$ , vía  $R_T(z_1)$ , se termina la tarea del detector y se activa la pareja de estimadores de la primera posición  $z_{eq}(1)$  y del coeficiente de descarga  $\lambda_{eq}(1)$ .

### 3.2 Estimación coordinada de parámetros

La segunda etapa del proceso consiste en la identificación coordinada de los parámetros y se lleva a cabo con dos parejas de estimadores del tipo EKF con estados aumentados asignados a los parámetros desconocidos y que operan como maestros y esclavos. Considerando la detectabilidad local de los subsistemas, se asigna como condición inicial del estado en los estimadores el valor RMS de (18).

Los dos EKF's maestros identifican los parámetros equivalentes a una fuga  $z_{eq}(i)$  y  $\lambda_{eq}(i)$  y sus ganancias se ajustan cada vez que se presenta una fuga, según se describe en

la sección 3.3. Estos estimadores corresponden al bloque izquierdo del esquema de localización y el entero  $i$  indica el número de fugas presentes. La adaptación al modelo equivalente de estos dos maestros permite estar en condiciones de localizar una nueva fuga, una vez que la última fuga se ha identificado y el efecto transitorio provocado por ésta tiende a cero.

Los otros dos EKF's de la derecha son esclavos y tienen como objetivo estimar los parámetros de la última fuga  $z_i$  y  $Q_i$  dependiendo de los parámetros equivalentes estimados  $\hat{z}_{eq}(i-1)$  y  $\hat{\lambda}_{eq}(i-1)$ . La estimación es factible solamente durante una ventana de tiempo vía la inyección de los parámetros retrasados, de ahí el retraso en el esquema. La activación de los esclavos se ejecuta cuando  $\hat{z}_{eq}(1)$  y  $\hat{Q}_{eq}(1)$  convergen.

### 3.3 Estructura de los EKF's

Considerando el modelo (12, 13) con  $\lambda_2 = 0$ , la región de búsqueda (14), y extendiendo el espacio de estado con el parámetro desconocido  $z_1 = z_{eq}(i)$ , se diseña para

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{z}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_2(z_1)x_2 + B_2(z_1)u + \Phi_2(x_2, z_1, y_1, 0) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$y_2 = (C_2 \ 0) \begin{pmatrix} x_2 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

un EKF (Reif et al., 1998), obteniendo el estimado  $\hat{z}_1$  o equivalentemente  $\hat{z}_{eq}(i)$ . Una ventaja del EKF es que su ganancia  $K$  se adapta para cada fuga de forma automática al resolver la ecuación de Riccati permanentemente.

Similarmente, considerando (9, 10), la región de búsqueda (14), inyectando  $\hat{z}_1 = \hat{z}_{eq}(i)$  y extendiendo el estado con el parámetro  $\lambda_1 = \lambda_{eq}(i)$  se diseña para

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\lambda}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1(\hat{z}_1)x_1 + B_1(\hat{z}_1)u + \Phi_1(x_1, \hat{z}_1, y_2, \lambda_1) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$y_1 = (C_1 \ 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ \lambda_1 \end{pmatrix} = C_1 x_1$$

un EKF obteniendo el estimado del coeficiente de descarga  $\hat{\lambda}_1 = \hat{\lambda}_{eq}(i)$ .

Cuando ambos estimadores maestros convergen, los modelos con la última falla se asocian a los subsistemas nominales equivalentes con una fuga.

Cabe hacer notar que, la pareja de estimadores esclavos opera con los subsistemas intercambiados con respecto a los maestros. Así, el estado del subsistema (9, 10) extendido se usa para identificar  $z_2$  con inyección de los estimados retardados un tiempo  $\tau$  denotados  $\hat{\lambda}_1(i)(t-\tau)$  y  $\hat{z}_1(i)(t-\tau)$ . El subsistema (12, 13) se extiende con el parámetro  $\lambda_2$  y se inyectan los estimados  $\hat{z}_2 = z_2(i)$  y  $\hat{\lambda}_1(i)(t-\tau)$  y  $\hat{z}_1(i)(t-\tau)$  ignorando los cambios en los estimadores de los maestros durante un tiempo  $\tau$ . Nuevamente se emplean EKF para ambas estimaciones. Se retrasan los parámetros estimados de los maestros en los esclavos, para usar los valores de la penúltima fuga equivalente para la identificación de la última fuga. Así que el parámetro  $\tau$  determina el tiempo mínimo entre cada nueva fuga. Una vez pasada esta ventana de tiempo, los

esclavos olvidan los valores estimados y están en condición de estimar una segunda fuga.

### 3.4 Registro de eventos

Teniendo el historial de parámetros de las fugas se pueden obtener los parámetros físicos a medida de su ocurrencia vía (6-7). Esta etapa del localizador corresponde al bloque inferior de la Fig. 3.

El escenario utilizado para presentar el esquema considera que las fugas subsecuentes ocurren aguas abajo de las otras, lo cual no siempre es el caso. Por simetría de las variables del fluido, se puede generar fácilmente un modelo espejo con respecto al origen del ducto, el cual debe diseñarse de manera similar al caso presentado. Es decir, se diseñan los estimadores con el mismo procedimiento, pero referenciando las posiciones con respecto al punto final del ducto  $L$ .

## 4. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

Para validar el esquema propuesto, se simuló el modelo del flujo con tres fugas secuenciales y los parámetros de la Tabla 1, usando *Simulink - MATLAB<sup>R</sup>*. El escenario de fugas se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Escenario de fugas

$z_1 = 50 [m]$	$t_1 = 100 [s]$	$\lambda_1 = 0,001$
$z_2 = 30 [m]$	$t_2 = 400 [s]$	$\lambda_2 = 0,001$
$z_3 = 40 [m]$	$t_3 = 600 [s]$	$\lambda_3 = 0,001$
$z_{eq}(1) = 50 [m]$	$z_{eq}(2) = 58 [m]$	$z_{eq}(3) = 80 [m]$
$\lambda_{eq}(1) = 0,001$	$\lambda_{eq}(2) = 0,002$	$\lambda_{eq}(3) = 0,003$

Se seleccionó la región de búsqueda  $SR = 160 [m]$  con  $\epsilon_a = \epsilon_b = 10 [m]$  y el periodo  $T = 5 [s]$  de la señal triangular.

La Fig. 6 describe en la parte superior la posición equivalente estimada  $\hat{z}_{eq}(i)$  con  $i = 1, 2, 3$  y su complemento. En la parte inferior se muestra el estimado del coeficiente de descarga equivalente  $\lambda_{eq}(i)$  con  $i = 1, 2, 3$ . Se observa en ambas gráficas que en ausencia de falla los estimadores maestros no están activados y una vez activados el transitorio es suave ante cada nueva condición de equivalencia  $z_1 = z_{eq}(i)$  y  $\lambda_1 = \lambda_{eq}(i)$ .

La Fig. 7 muestra los parámetros estimados por los esclavos junto con el estimado retardado de la posición equivalente proveniente del maestro. La gráfica superior corresponde a  $\hat{z}_2(i)$  equivalente. La parte inferior describe por ventanas de tiempo el parámetro asociado al orificio de la fuga. Se observa de éstas que cuando  $\lambda_2 = 0$  o sea antes de la segunda fuga el valor estimado de la posición no tiene sentido. A partir de la ocurrencia de la segunda fuga los esclavos estiman los valores de la última fuga durante una ventana de tiempo  $\tau = 100 [s]$  para después olvidar dichos valores; y estar nuevamente en condiciones de estimación. Finalmente, la Fig. 8 muestra la evolución temporal de las ganancias ( $K_{ij}$ ) del estimador maestro asociado a la posición  $z_{eq}(i)$  y se observa que dicha ganancia se adapta ante cada nuevo escenario de falla. Esta potencialidad del EKF de ajustar el nuevo modelo equivalente lo hace robusto ante cada nueva fuga.

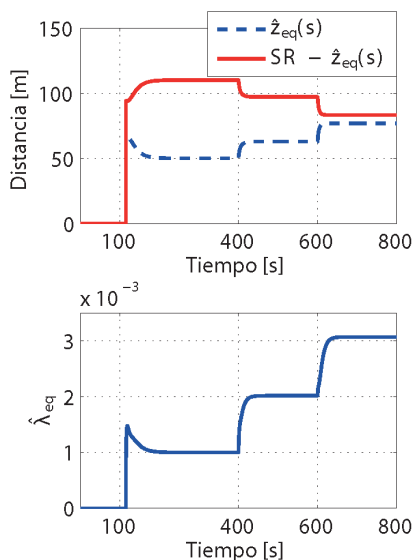


Figura 6. Evolución de los estimados de posición  $\hat{z}_{eq}(i)$  y del coeficiente de descarga  $\hat{\lambda}_{eq}(i)$  para  $i = 1, 2, 3$

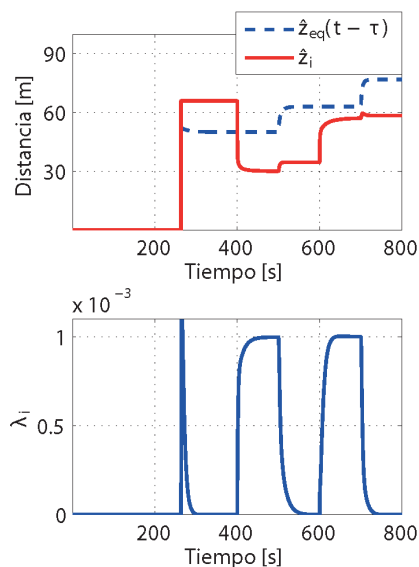


Figura 7. Evolución de los estimados de  $\hat{z}_2(i)$  y  $\hat{\lambda}_2(i)$  para  $i = 1, 2, 3$

### 5. CONCLUSIONES

Se presenta un método para estimar fugas secuenciales en un ducto. Se muestra que el desacoplar los gastos de fuga vía dos subsistemas simplifica el problema de diagnóstico obteniendo residuos con propiedades interesantes de robustez y sensibilidad en una ventana de tiempo para la identificación de las fugas. Las simulaciones muestran que los tiempos de respuesta de los estimadores dinámicos son aceptables y sobre todo son robustos ante cada nuevo escenario de fuga. En conclusión, el reajuste de los modelos de falla mejora tanto la región como el tiempo de convergencia de los estimadores con respecto a trabajos anteriores.

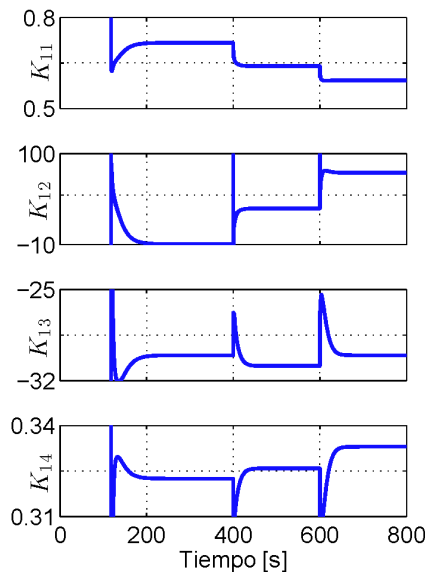


Figura 8. Evolución de los coeficientes de la ganancia del EKF del estimador  $\hat{z}_{eq}(i)$

### REFERENCIAS

Billman, L. y Isermann, R. (1987). Leak detection methods for pipelines. *Automatica*, 23(3), 381–385.

Chaudry, M.C. (1979). *Applied hydraulic transients*. Von Nostrand Reinhold Co.

Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer.

Korbicz, J., Koscielny, J.M., Kowalczyk, Z., y Cholewa, W. (2004). *Fault Diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications.*, chapter Detecting and Locating Leaks in Transmission Pipelines, 821–864. Springer, Germany.

Moustafa, K.F., Kaik, Y., Alda, S., y Omar, F. (2012). Leak localization in pipelines via computational pipeline monitoring. *Journal of Pressure Vessel Technology, ASME*, 134, 7 pages.

Reif, K., Sonnemann, F., y Unbehauen, R. (1998). An ekf-based nonlinear observer with a prescribed degree of stability. *Automatica*, 34(9), 1119–1123.

Torres, L., Verde, C., Besancon, G., y Gonzalez, O. (2014). High gain observers for leak location in subterranean pipelines of liquefied petroleum gas. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 24, 1127–1141.

Verde, C. (2001). Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice*, 9, 673–682.

Verde, C. (2005). Accommodation of multi-leak location in a pipeline. *Control engineering practice*, 13, 1071–1078.

Verde, C., Molina, L., y Torres, L. (2014). Parameterized transient model of a pipeline for multiple leaks location. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, 177–185. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2014.02.013>.

Verde, C., Visairo, N., y Gentil, S. (2007). Two leaks isolation in a pipeline by transient response. *Adv. Water Resource*, 30(8), 1711–1721.