

## Caracterización Estática de la Pérdida de Carga en un Ducto con una Función Polinomial

J. L. Rojas A. \* C. Verde \*

\* Instituto de Ingeniería, UNAM, 04510 Coyoacan, Mexico D.F.

Resumen: La primera parte del presente trabajo analiza la sensibilidad del comportamiento de un fluido en un ducto con ramales cuando opera en régimen no completamente turbulento. Del estudio, se concluye que la mayor sensibilidad se debe a variaciones en la pérdida de carga provocadas por cambios en los flujos y la presencia de ramales. Este hecho motivó la segunda parte del trabajo donde se propone identificar la fricción promedio  $f$  en función del flujo, en vez de usar parámetros como la rugosidad y viscosidad que son inciertos y poco confiables durante la vida útil de una instalación. Esta idea resulta muy útil para tareas de monitoreo de redes de ductos en línea, donde al disponer de un buen modelo de la pérdida de carga en función del flujo a lo largo de la vida útil del ducto es fundamental. En particular para un ducto hidráulico piloto de 170 [m] en forma de serpentín se caracteriza la pérdida de carga del flujo en términos de una función de fricción polinomial de primer orden. La selección del polinomio se válida mediante un modelo dinámico de dimensión finita, junto con un filtro extendido de Kalman el cual es usado como identificador.

*Palabras clave:* Función de fricción polinomial, Sensibilidad de la pérdida de carga en un ducto, Identificación de parámetros.

### 1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de las redes de ductos se caracteriza por diferentes parámetros que pueden desviarse de los valores de diseño debido a cambios de las condiciones de operación, variaciones en la demanda y envejecimiento. Por otro lado, un punto importante para los sistemas de detección y localización de fallas (FDI) en redes de ductos es la descripción del fluido a través de modelos que consideren los cambios y eventos anormales de la mejor manera posible (Verde et al., 2013). Así, en tareas de FDI el modelo del fluido se selecciona estableciendo un compromiso entre simplicidad y su viabilidad para localizar escenarios generales de fallas.

Una de las características básicas del comportamiento de un fluido en un ducto es la pérdida de carga por unidad de longitud (Chaudhry, 2014). Ésta característica depende de la viscosidad del fluido, de propiedades físicas del ducto como el diámetro, la rugosidad y el área transversal, así como del régimen de operación del flujo, determinado a través del número de Reynolds adimensional  $\mathbf{R}_e$  definido como

$$\mathbf{R}_e = \frac{VD}{\nu}, \text{ con } V = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

donde  $V$  [m/s] es la velocidad del fluido en el ducto,  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] la viscosidad cinemática del fluido,  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] el flujo,  $A$  [m<sup>2</sup>] el área del ducto y  $D$  su diámetro (laminar o turbulento). La pérdida de carga en un ducto ha sido estudiada ampliamente y existen diversas propuestas que la modelan vía un factor de fricción estático (Streeter et al., 2000). La función general de fricción

$$f(\mathbf{R}_e) = \left\{ \left( \frac{64}{\mathbf{R}_e} \right)^8 + 9.5 \left[ \alpha(\mathbf{R}_e) - \left( \frac{2500}{R_e} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{1/8} \quad (2)$$

$$\alpha(R_e) = \ln \left( \frac{\varepsilon_0}{3.7D} + \frac{5.74}{\mathbf{R}_e^{0.9}} \right)$$

fue propuesta por Swamee (1993) y depende de la rugosidad del ducto  $\varepsilon_0$  [m] y  $\mathbf{R}_e$ . El comportamiento de la función (2) para diferentes valores de  $\mathbf{R}_e$  y rugosidad relativa ( $\varepsilon_0/D$ ), se muestra en la Fig. 1 y es común usarla para seleccionar el valor de la fricción en un ducto.

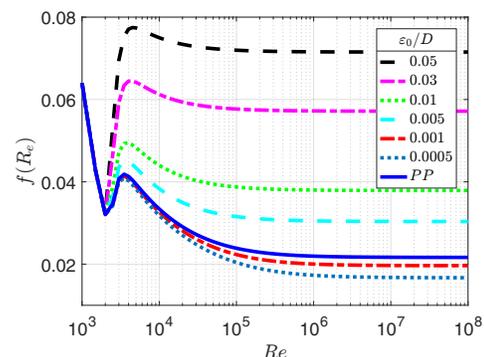


Figura 1. Representación gráfica de (2) donde la curva PP corresponde a los valores calculados de tablas para el ducto piloto

De la Fig. 1, se observa que si  $\mathbf{R}_e < 10^6$ , el valor de  $f(\mathbf{R}_e)$  no es constante cuando se presentan cambios en la velocidad o viscosidad del fluido. Además, la presencia de un ramal sin control del fluido, provoca diferentes pérdidas de cargas antes y después del punto de la toma, dada la diferencia de velocidades del fluido. Sin embargo, muchos

\* Instituto de Ingeniería, IT100716-DGAPA-UNAM, CALGARY-CONACYT

de los sistemas automáticos de monitoreo de ductos consideran la función  $f(\mathbf{R}_e)$  constante despreciando los cambios de punto de operación y ramales (Korbicz et al., 2004), (Verde et al., 2007), (Ferrante y Brunone, 2003).

Los errores en la localización de fugas con modelos analíticos se han justificado debido a modelos aproximados, errores en la adquisición de datos o a los propios algoritmos de diagnóstico. En el caso de múltiples ramales, la situación es más crítica debido a las múltiples pérdidas de carga por unidad de longitud en el ducto. Así, una causa importante de los errores en el diagnóstico es la función de fricción cuando el fluido opera en un régimen no totalmente turbulento, como se muestra en este estudio.

Los hechos arriba mencionados motivaron analizar los efectos de los diversos parámetros de la función de fricción en un ducto con un ramal en la pérdida de carga. Con base en dicho análisis, se caracteriza una función polinomial de fricción estacionaria dependiente del gasto  $Q$  con solamente dos coeficientes a identificar. Esta función simplifica la tarea del diagnóstico e identificación de múltiples fallas en los ductos (Verde y Torres, 2017). La función de fricción polinomial se valida con datos sintéticos y reales tomados de la planta hidráulica piloto de 170 [m] de longitud aproximada del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Este trabajo se ha organizado de la siguiente forma. La Sección 2 describe el modelo del fluido en un ducto con y sin ramales junto con un modelo de dimensión finita aproximado. En la Sección 3 se analizan los errores de la presión en el punto del ramal cuando se considera la función de fricción constante. En la Sección 4 se estudia la sensibilidad del flujo ante variaciones en los parámetros físicos involucrados en la función de fricción (2) y se concluye que la rugosidad es el parámetro causante de los mayores errores entre datos sintéticos y experimentales. En la Sección 5 se propone una función de fricción polinomial, la cual depende del gasto  $Q$  simplificada con dos coeficientes que pueden ajustarse en línea con datos experimentales para la región de operación de un fluido. Finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones del trabajo.

## 2. MODELO DEL FLUIDO EN UN DUCTO RECTO

Consideré un ducto de longitud  $L$  sin inclinación con área transversal constante, en el cual se asume un fluido incompresible, con una distribución de velocidad uniforme y densidad constante, entonces el modelo dinámico del fluido, tomado de Chaudhry (2014), se describe por las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) de conservación de masa y de momento,

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_1} \frac{\partial Q(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial H(z,t)}{\partial z} + \phi(\mathbf{R}_e, Q(z,t)) &= 0 \\ \frac{\partial H(z,t)}{\partial t} + a_2 \frac{\partial Q(z,t)}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $t$  [s] es la variable de tiempo,  $z \in [0, L]$  [m] es la variable de posición relativa,  $H(z,t)$  [m] corresponde al cabezal de presión a lo largo del ducto,  $Q(z,t)$  [ $m^3/s$ ] es el flujo, y las constantes asociadas con las características físicas del ducto están dadas por

$$a_1 = gA \quad y \quad a_2 = \frac{b^2}{gA} \quad (4)$$

donde  $g$  [ $m/s^2$ ] es aceleración gravitacional constante,  $A$  [ $m^2$ ] el área transversal de la tubería,  $b$  [ $m/s$ ] la velocidad de onda del fluido y  $D$  [m] el diámetro interior. En el modelo (3) la pérdida de carga se asocia con el término

$$\phi(\mathbf{R}_e, Q(z,t)) = \frac{f(\mathbf{R}_e)}{2gDA^2} Q(z,t)|Q(z,t)| + \phi_u \quad (5)$$

donde la función  $f(\mathbf{R}_e)$  descrita en (2) se puede considerar constante solamente en un régimen completamente turbulento, es decir si  $\mathbf{R}_e > 10^6$ . El término dinámico  $\phi_u$  es función de la derivada del flujo  $\dot{Q}$  y se desprecia en este estudio, debido a que sus efectos son importante solamente al estudiar transitorios rápidos de presión, que no es el caso de estudio.

Para caracterizar el comportamiento del fluido se consideraran las condiciones de frontera en los extremos del ducto

$$H(0,t) = H_{in}(t) \quad y \quad H(L,t) = H_{out}(t). \quad (6)$$

### 2.1 Modelo con un ramal en el ducto

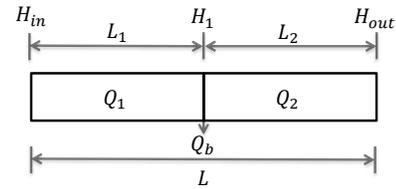


Figura 2. Variables del fluido en un ducto con ramal a la distancia  $L_1$  de extremo aguas arriba

La presencia de un ramal en el ducto con las variables descritas en la Fig. 2, provoca una discontinuidad en el modelo (3), por lo que el modelo toma la forma

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_1} \frac{\partial Q_i(z_i,t)}{\partial t} + \frac{\partial H_i(z_i,t)}{\partial z_i} + \phi_i(R_{e_i} Q_i(z_i,t)) &= 0 \\ \frac{\partial H_i(z_i,t)}{\partial t} + a_2 \frac{\partial Q_i(z_i,t)}{\partial z_i} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

para  $i = 1, 2$  y la variable espacial  $z_i \in [0, L_i]$ . Así, las condiciones de frontera entre sección satisfacen

$Q_i(L_i,t) = Q_{i+1}(0,t) + Q_b(t)$  y  $H_i(L_i,t) = H_{i+1}(0,t)$  donde  $Q_b(t)$  representa el flujo del ramal y las presiones en los extremos están dadas por  $H_1(0,t) = H_{in}(t)$  y  $H_2(L_2,t) = H_{out}(t)$ .

### 2.2 Modelo discretizado con un ramal en el ducto

Para analizar los efectos de un factor de fricción  $f$  constante en las dos parejas de EDP se aproximan las derivadas espaciales (7) por

$$\frac{\partial \nu(z,t)}{\partial z} \simeq \frac{\nu_{z_{k+1}}(t) - \nu_{z_k}(t)}{\Delta z_k} \quad (8)$$

donde  $\nu_{z_{k+1}}(t)$  y  $\nu_{z_k}(t)$  corresponden con los valores de  $\nu(t)$  en dos puntos contiguos de la discretización espacial y  $\Delta z_k$  es el valor de la discretización espacial (Polyanin y Zaitsev, 2014). Esta aproximación no altera el término no lineal asociado a la pérdida de carga. Así al sustituir (8)

en las parejas de ecuaciones (7) el modelo simplificado se reduce a

$$\begin{aligned}\dot{Q}_1 &= a_1 \left( \frac{H_{in} - H_1}{z_1} - \phi(\mathbf{R}_{e_1}, Q_1) \right), \\ \dot{H}_1 &= \frac{a_2}{z_1} (Q_1 - Q_2 - Q_b), \\ \dot{Q}_2 &= a_1 \left( \frac{H_1 - H_{out}}{L - z_1} - \phi(\mathbf{R}_{e_2}, Q_2) \right),\end{aligned}\quad (9)$$

con  $Q_b$  el flujo del ramal,  $Q_1$  y  $Q_2$  los flujos en cada sección,  $z_1$  la distancia del extremo aguas arriba al ramal y  $H_1$  la presión en el punto del ramal. Para las pérdidas de carga de cada sección se suponen dos números de Reynolds  $\mathbf{R}_{e_i}$  con  $i = 1, 2$ , es decir

$$\phi(\mathbf{R}_{e_i}, Q_i) = \frac{f(\mathbf{R}_{e_i})}{2gDA^2} Q_i |Q_i|. \quad (10)$$

### 2.3 Modelo físico del ducto hidráulico piloto

Para la generación de los datos sintéticos y experimentales se consideraron los parámetros del ducto hidráulico piloto del II UNAM, mostrados en la Tabla 1 y tomados de Cayetano (2016).

Tabla 1. Parámetros del ducto piloto

Significado	Dimensión
Longitud ( $L$ )	169.43 [m]
Rugosidad ( $\varepsilon_0$ ) (NORSOK, 1997)	$1.5e^{-4}$ [m]
Viscosidad cinemática $\nu$ (25°C)	$9.97 \times 10^{-7}$ [m <sup>2</sup> /s]
Diámetro ( $D$ )	0.1016 [m]
Velocidad de la onda ( $b$ )	1330 [m/s]
Posición del ramal ( $z_1$ )	84.715 [m]
Intervalo del $Re$	$[2.3 - 2.5] \times 10^5$
Intervalo del flujo	$[0.013 - 0.018]$ [m <sup>3</sup> /s]
Fluido	agua
Fricción ( $f$ ) eq. (1)	0.022

## 3. SENSIBILIDAD DE LA PÉRDIDA DE CARGA

Para analizar el efecto de considerar el factor de fricción constante en el modelo del fluido se realizaron dos experimentos. Los resultados se compararon con un modelo patrón simulado con el *software* comercial EPANET (2010). El cabezal de presión simulado en el ramal  $\overline{Hp}(z_1, t)$ , es el patrón de referencia en el punto  $z_1$  para un conjunto de flujos del ramal  $Q_b$  y diversos puntos de operación.

Así, el error porcentual en estado permanente del cabezal de presión se define como

$$e(H_1) = 100 \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{|\overline{Hp}(z_1, t) - H_1(z_1, t)|}{\overline{Hp}(z_1, t)}, \quad (11)$$

El primer experimento consiste en simular el modelo (9) para diversos flujos del ramal  $Q_b$ , considerando dos casos para la función (10): uno con la fricción constante e igual en todo el ducto y como función del flujo en cada sección de acuerdo con (2).

Las Figs. 3 y 4 muestran los errores de la presión en el punto del ramal (11), tanto con el factor constante como con la función dependiente del flujo respectivo. Comparando ambos errores se observa un orden de magnitud de 2% al considerar la fricción constante. Se hace notar, que con la

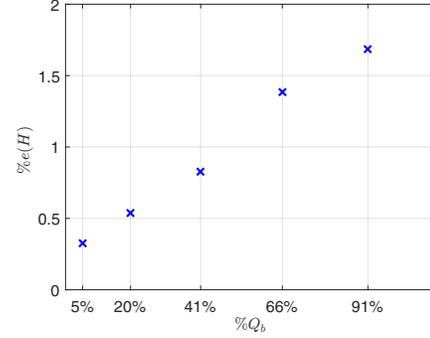


Figura 3. Error porcentual del cabezal de presión con presión  $H_{in} = 18m$ , fricción constante y distintos flujos  $Q_b$  del ramal

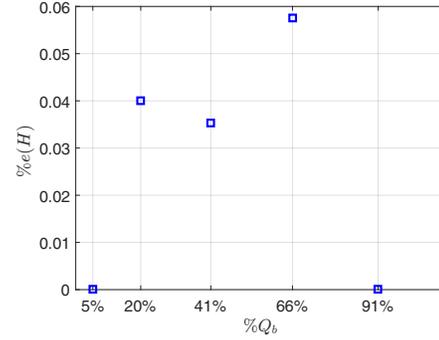


Figura 4. Error porcentual del cabezal de presión con presión  $H_{in} = 18m$ , función de fricción (2) y distintos flujos  $Q_b$  del ramal

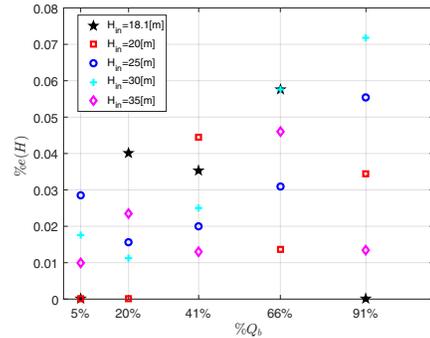


Figura 5. Error porcentual del cabezal de presión con la función de fricción dependiente del flujo y diferentes puntos de operación

fricción constante se tiene una relación cuasi lineal entre el error y el flujo del ramal. Así, solamente en ramales con un flujo muy pequeño con respecto al flujo primario se puede suponer  $f(\mathbf{R}_{e_1}) \simeq f(\mathbf{R}_{e_2})$ .

El segundo experimento, tiene como objeto analizar los errores porcentuales (11) ante variaciones en el punto de operación del ducto, por tanto, se simuló el fluido con el modelo (9) y con EPANET para un conjunto de puntos de operación y diversos flujos en el ramal. La Fig. 5 muestra los errores de la pérdida de carga. Se observa que el error tiene una magnitud menor a 1% y aumenta con el flujo del ramal; es decir, se incrementa a medida que la presión  $H_{in}$  o el flujo del ramal  $Q_b$  aumentan. Este hecho confirma la sensibilidad de la pérdida de carga en un ducto con

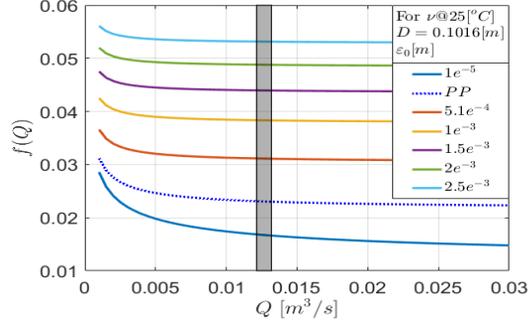


Figura 6. Comportamiento de la función  $f(Q)$  considerando diámetro del ducto, viscosidad constante y distintas rugosidades. Para la curva de PP se usan los valores de la Tabla 1

un ramal, aun para flujos en estado estacionario. En este análisis se asume que no hay pérdida de carga en el punto del ramal.

Por tanto, en el modelo de la pérdida de carga (10) se debe considerar la fricción como una función del flujo si existe un ramal o el fluido presenta desviaciones del punto de operación nominal. Esta conclusión es importante, si el modelo es utilizado para una tarea de *FDI*, debido a que a priori, se desconoce tanto el tipo de falla como su magnitud.

#### 4. INCERTIDUMBRES EN LA FUNCIÓN DE FRICCIÓN

La función de fricción tiene dos tipos de parámetros: aquellos que se mantienen constantes a lo largo de la vida útil de una instalación como son longitud, área transversal etc., y aquellos que se desvían de los valores de fábrica en función del mantenimiento del ducto, condiciones de operación y del medio ambiente. En este último grupo están la rugosidad  $\epsilon_0$  y la viscosidad cinemática  $\nu$ . Los valores reportados en tablas de dichos parámetros son adecuados para el diseño; sin embargo es necesario estimarlos en línea, o al menos validarlos de forma periódica, cuando se utilizan en sistemas automáticos de control y monitoreo en tiempo real.

La rugosidad  $\epsilon_0$  es un parámetro muy incierto, debido al envejecimiento de un ducto, a los sólidos que se adhieren a las paredes y a la corrosión en caso de metales. Por tanto, ignorar desviaciones de su valor de diseño provoca falsas alarmas por parte de los sistemas de monitoreo. Para estudiar los efectos de la función de fricción en términos directos del flujo se simuló el ducto con los parámetros físicos reportados en la Tabla 1 con diámetro y viscosidad cinemática constante considerando una temperatura específica de  $25^\circ\text{C}$  ( $\nu@25^\circ\text{C}$ ) constante y con diversos valores de rugosidad. Este escenario se simuló con el *software* Pipeline Studio (2013). El comportamiento específico de la función de fricción (2) en términos del flujo se muestra en la Fig. 6. Se observa la fuerte variación dependiente de la rugosidad  $\epsilon_0$  y del flujo  $Q$  en el intervalo de operación del ducto piloto, indicada en la gráfica con el área sombreada.

Por otro lado, el parámetro asociado a la viscosidad cinemática  $\nu$  depende de la temperatura del fluido y normalmente se utilizan los valores reportados en tablas. Este

parámetro está presente en  $\mathbf{R}_e$ , por tanto, su variación altera la función de fricción. La Fig. 7 muestra el patrón de la viscosidad en función de la temperatura para el agua.

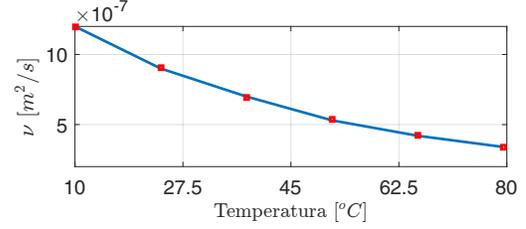


Figura 7. Variación de la viscosidad cinemática  $\nu$  respecto a la temperatura, tomado de Pipeline Studio (2013)

Para estudiar el efecto de la incertidumbre de la viscosidad cinemática  $\nu$  en la pérdida de carga, se realizaron experimentos con la planta piloto y con el simulador industrial Pipeline Studio (2013), el cual permite modificar la temperatura del fluido. La rampa patrón de presión  $H_{in}$  usada en ambas simulaciones corresponde a datos de la planta piloto y se muestra en el Fig. 8. La variación de la presión fue generada desde  $16.5 [m]$  hasta  $18.75 [m]$  con una ventana de tiempo de  $600 [s]$ .

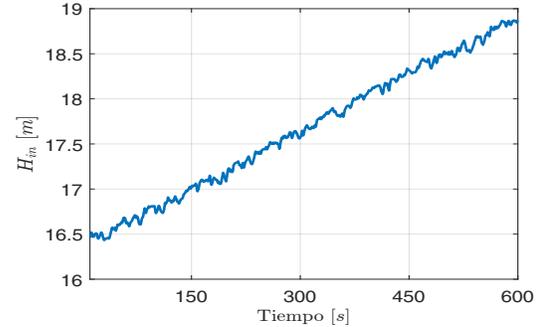


Figura 8. Evolución de la presión de entrada en la planta piloto

Como medida de comparación se usó el error normalizado del flujo sin ramal

$$\%e_{Q_1}(t) = 100 \frac{|Q_m(t) - Q_1(t)|}{Q_m(t)}, \quad (12)$$

donde  $Q_m$  corresponde con el flujo sintético patrón y  $Q_1$  es el flujo del modelo bajo prueba.

El efecto de la temperatura en el comportamiento del fluido se evaluó con el flujo sintético  $Q_m$  generado con Pipeline Studio (2013) para diferentes temperaturas [ $15^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$ ], y con la rampa de presión de la Fig. 8. Con temperatura constante, se generó el flujo  $Q_1$  también con Pipeline Studio (2013). La evolución de la familia de errores (12) mostrada en la Fig. 9 permite afirmar que la temperatura afecta marginalmente al flujo en el intervalo de temperaturas consideradas con un máximo error de  $0.8\%$ .

Por otro lado, calculando (12) con datos del ducto piloto para la misma secuencia de datos  $H_{in}$  con temperatura constante de  $25 [^\circ\text{C}]$  se obtuvieron los errores mostrados en la Fig. 10. Esta comparación arroja un error del orden de  $40\%$ . Como consecuencia, el modelo de fricción del ducto piloto tiene errores considerables al suponer los parámetros de la tabla 1. Este hecho, producto de la sensibilidad en el

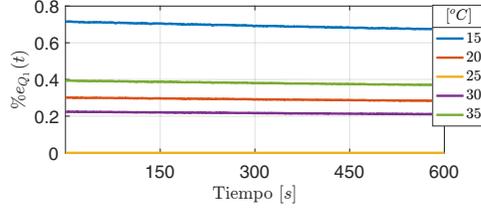


Figura 9. Error (12) del flujo con desviaciones en  $\nu$  provocadas por variaciones de temperatura

modelo con respecto a la función (2) ha originado diversas propuestas para identificar la función de fricción en línea (Jiménez et al., 2017), (Cayetano, 2016).

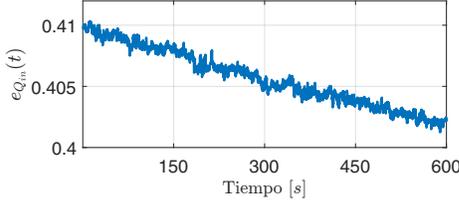


Figura 10. Error normalizado entre el flujo sintético con  $\nu@25^\circ C$  constante y flujo medido en el ducto piloto

## 5. FUNCIÓN POLINOMIAL DE FRICCIÓN

En las secciones previas, se hizo notar la dificultad de disponer de un modelo nominal adecuado para monitoreo de ducto, donde la causa principal es la variabilidad de la rugosidad. Esto motivó proponer un método práctico para identificar la función de fricción en términos del flujo del fluido, que es fácil de medir en campo. A continuación se presenta la propuesta.

### 5.1 Identificación del parámetro $f$

Considere el modelo (9) el cual en ausencia de ramales se puede reducir a

$$\dot{Q} = \frac{a_1}{L} (H_{in} - H_{out}) - \frac{\theta_f}{2DA} Q^2 \quad (13)$$

donde de acuerdo con Isermann y Münchhof (2011), si las variaciones del parámetro  $f$  son suaves con respecto a la dinámica de  $Q$ , es posible aumentar al estado con el parámetro desconocido y formular la identificación de  $\theta_f = f$  como una tarea de estimación de estado. Así, el modelo aumentado se describe como

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \frac{a_1}{L} (H_{in} - H_{out}) - \frac{\theta_f}{2DA} Q^2, \\ \dot{\theta}_f &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

con la variable medida  $y = Q$ . Para el sistema (14) la condición de observabilidad está garantizada dado que la matriz de observabilidad

$$\mathcal{O}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{Q\theta_f}{AD} & -\frac{Q^2}{2AD} \end{bmatrix} \quad (15)$$

es de rango pleno para todo  $Q > 0$ . Entonces, se puede diseñar un Filtro de Kalman Extendido (EKF) para estimar tanto  $Q$  como  $\theta_f$  (Gelb, 1994).

Considerando las matrices de covarianza  $Q_a = \text{diag}(1, 1 \times 10^{-3})$  y  $R_a = 1$  asociadas a los estados y a la variable medida respectivamente, se implementó el EKF en Simulink

MATLAB (2016). De este modo, excitando la instalación experimental con la presión patrón aguas arriba de la Fig. 8, el EKF estimó el comportamiento de los estados  $\hat{Q}$  y  $\hat{\theta}_f$  mostrados en la Fig. 11. Finalmente, al parametrizar el comportamiento de las dos variables  $\hat{\theta}_f$  y  $\hat{Q}$  se obtuvo la función graficada en la Fig. 12. La forma de la función hace suponer que ésta puede identificarse con un polinomio nominal de primer o segundo orden.

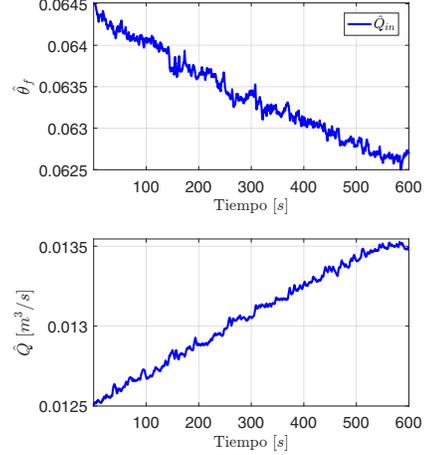


Figura 11. Evolución de los parámetros estimados con datos experimentales  $\hat{\theta}_f$  y  $\hat{Q}$

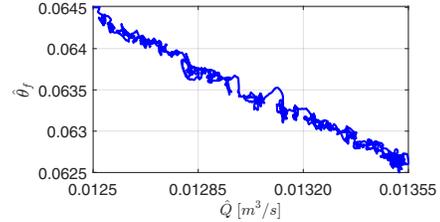


Figura 12. Caracterización estática del flujo  $\hat{Q}$  versus el parámetro  $\hat{\theta}_f$  con datos experimentales

### 5.2 Caracterización de la función $f(Q)$

Con base en el comportamiento del flujo  $\hat{Q}$  versus la fricción  $\hat{\theta}_f$  en estado estacionario de la Fig. 12, se propone caracterizar el fenómeno con una función polinomial en términos del flujo, sin hacer uso de los parámetros físicos inciertos  $\varepsilon_0$  y  $\nu$ .

Para ello, se considera la secuencia de los estimados en los puntos de equilibrio ignorando los datos del comportamiento transitorio de los estimados de (14). Es decir, el EKF es un medio que genera el patrón característico de la fricción en términos del flujo en cualquier ducto. Una ventaja del estimador es su propiedad de ser óptimo con respecto a ruidos blancos en las mediciones y en el estado en una vecindad del punto de operación.

En particular, la función de fricción polinomial de la Fig. 12, se supone de la forma

$$f(Q) = \alpha Q + \beta.$$

Con ayuda de la la función *polyfit* de MATLAB (2016) correspondiente al algoritmo de mínimos cuadrados, se

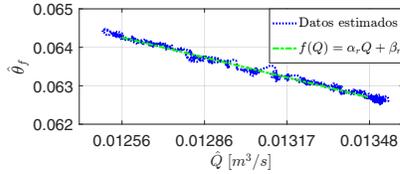


Figura 13. Caracterización utilizando la función  $f(Q) = \alpha Q + \beta$  con datos reales

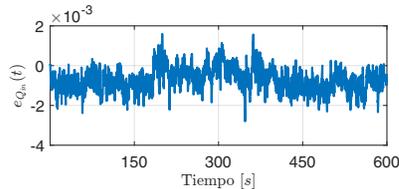


Figura 14. Error entre los flujos con el modelo (13) utilizando la función polinomial y los datos reales

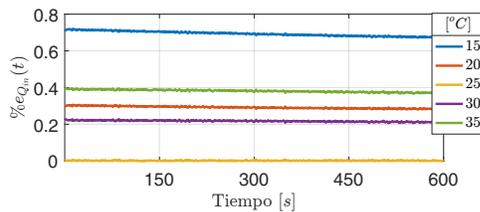


Figura 15. Error del flujo con  $f(Q) = \alpha Q + \beta$  con datos sintéticos

ajustaron los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  obteniendo  $\alpha = -1.7058$  y  $\beta = 0.0856$ . La Fig. 13 muestra la recta con los parámetros optimizados y los puntos usados para ello.

Para validar el método de identificación, la Fig. 14 muestra el error normalizado de los datos experimentales y los calculados con el modelo utilizando la función de fricción polinomial estimada. Se observa un error del orden de  $10^{-3}$  que puede considerarse despreciable.

Para estudiar la sensibilidad de la función polinomial con respecto a la temperatura, se realizó la identificación de la función con la misma presión patrón de la Fig. 8 pero usando datos sintéticos generados con Pipeline Studio (2013) y con el modelo reducido (13). En este caso los coeficientes fueron  $\alpha = -0.0312$  y  $\beta = 0.0231$ . El error resultante entre los flujos simulados con Pipeline Studio y con la función simplificada se presenta en la Fig. 15; se observa que la magnitud del error es menor a 1%, siendo éste similar al mostrado en la Fig. 7 generado con la función (2) para la caída de presión.

## 6. CONCLUSIONES

En la primera parte del trabajo se discute la sensibilidad de la pérdida de carga estacionaria con respecto a la función de fricción al asumir como constante dicha función cuando se tiene un ducto con ramales. Además, se estudia el efecto de la incertidumbre en el parámetro de fricción en el comportamiento del fluido. Este estudio se realiza con datos simulados y datos experimentales y se concluye que la función de fricción debe ser parametrizada en términos del flujo  $Q$ . Esto con objeto de ser identificada en tiempo real en redes de ductos. Además, se propone una función

polinomial con solo dos parámetros que pueden identificarse de forma muy simple con un barrido en todos los puntos de operación del ducto. Los parámetros identificados para la función de fricción polinomial han sido validados con datos sintéticos y experimentales. Además, los valores estimados con datos reales han sido usados en un localizador de fallas con un desempeño satisfactorio cuyos resultados pueden ser consultados en el reporte Rojas (2017). Una ventaja del procedimiento es que el ajuste del polinomio puede realizarse cada vez que se realice un mantenimiento del ducto, permitiendo encontrar fallas incipientes en su interior.

## REFERENCIAS

- Cayetano, R. (2016). *Identificación de parámetros de fricción en ductos con tomas laterales*. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chaudhry, M.C. (2014). *Applied hydraulic transients*. Springer: New York.
- EPANET (2010). Software that models the hydraulic and water quality behavior of water distribution piping systems. Technical report, U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Ferrante, M. y Brunone, B. (2003). Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests: 1. Harmonic analysis. *Advances in Water Resources*, 26, 95–105.
- Gelb, A. (1994). *Applied Optimal Estimation*. MIT Press.
- Isermann, R. y Münchhof, M. (2011). *Identification Dynamic Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Jiménez, J., Torres, L., Rubio, I., y Sanjuan, M. (2017). *Auxiliary Signal Design and Liénard-type Models for Identifying Pipeline Parameters*, chapter 6, 99–124. 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.
- MATLAB (2016). *version 9.0.0 (R2016a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- NORSOK (1997). Norsok standar p-cr-001, rev. 2. Technical report, Norwegian petroleum industry.
- Pipeline Studio (2013). Software. In *Energy Solutions International*. <http://www.energy-solutions.com/>.
- Polyanin, A.D. y Zaitsev, V.F. (2014). *Handbook Nonlinear Partial Differential Equation*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press.
- Rojas, J. (2017). Identificación de fugas secuenciales. Technical report, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Streter, V.L., Wylie, B., y W., B.K. (2000). *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill.
- Swamee, P.K. (1993). Design of a submarine oil pipeline. *Journal of Transportation Engineering*, 119(1), 159–170.
- Verde, C., Gentil, S., y Morales-Menendez, R. (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Trillas.
- Verde, C. y Torres, L. (2017). *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. Springer.
- Verde, C., Visairo, N., y Gentil, S. (2007). Two leaks isolation in a pipeline by transient response.