

Modelo de Propagación y Análisis de Ondas Acústicas para Detección de Fallas en Tuberías *

Jesús Peralta * Cristina Verde *

* Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México,
 04510, Ciudad de México, México
 (e-mail: JPeraltaC@ingen.unam.mx, verde@unam.mx)

Resumen: Este trabajo desarrolla formalmente un modelo de dimensión infinita que describe la propagación de ondas acústicas en una tubería con absorción en diferentes condiciones de falla. Asumiendo una fuente acústica del tipo impulso como señal de excitación, se obtiene la respuesta de la presión en condición de fallas para tres tipos de fallas: fuga, bloqueo y reducción de área. A partir del modelo lineal de dimensión infinita del gas en el ducto junto con condición de falla, se deriva la respuesta característica que definen los transitorios asociados con los eventos anormales. Así, las respuestas de la presión transitoria en un punto de *registro* en la tubería, validan resultados empíricos usados para la detección de fallas en una tubería de gas.

Palabras clave: Detección de Fallas, Modelado, Análisis Transitorio, Análisis en Frecuencia.

1. INTRODUCCIÓN

Las fallas en tuberías y redes hidráulicas son un problema mundial (Verde y Torres, 2017). Se han propuesto varias tecnologías para detectar y localizar escenarios de fallas. Estas incluyen balance de volumen, análisis de presión, detección acústica (DA), termografía y radar, etc. (Datta y Sarkar, 2016).

La reflectometría producida por una fuga en acueductos, ha sido usada por más de 30 años para localizarlas (Liu et al., 2017). También se ha mostrado que las emisiones acústicas (EA) son con frecuencia mucho más rápidas y baratas comparadas con otros métodos de hardware convencionales, tales como termografía infrarroja y ecografías ultrasónicas y electromagnéticas (Ahadi y Sarif-Bakhtiar, 2010). Los principales problemas que conlleva la propagación de la onda son: (a) la incertidumbre de la rapidez acústica c , (b) la estimación de los tiempos de llegada, especialmente para distancias largas y gasoductos (Liu et al., 2014), y además, (c) los datos se registran durante la respuesta transitoria inducida por la fuga.

Otra opción es la prueba transitoria fuera de línea diseñada considerando la discontinuidad producida por la falla. Esta prueba requiere solo una señal de excitación externa y datos de la presión transitoria en un punto del ducto para detectar eventos anormales (Blackstock,

* Este trabajo es apoyado por IT100519-DGAPA-UNAM y 280170conv2016-3 SENER-CONACyT.

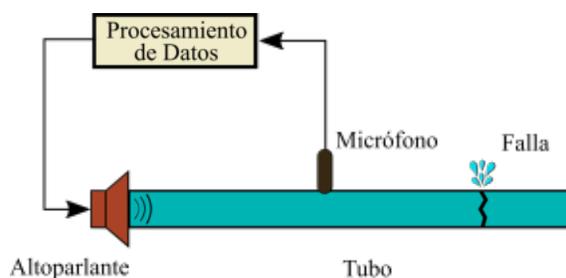


Fig. 1. Esquema de detección de fallas con señales acústicas en una tubería

2000). Así, si una señal acústica es inyectada al fluido, la impedancia en la línea cambia cuando hay una falla (Meniconi et al., 2011). Este método semiautomático requiere un actuador para la inyección de una señal acústica dentro de la línea y un transductor de presión que recopila la señal y permite la identificación de condiciones anormales en corto tiempo respecto a c , asumiendo que la propagación de la onda en condiciones normales es conocida. La Fig. 1 muestra la configuración genérica. Así, si un altoparlante se localiza aguas arriba de un micrófono y se presenta una discontinuidad aguas abajo del micrófono, la señal recopilada se modificará a partir del patrón de presión normal. Si se asume linealidad, el análisis puede ser ejecutado en el dominio del tiempo (Brunone y Ferrante, 2001) o en el dominio de la frecuencia (Lee et al., 2005). Una ventaja de esta técnica es que el diagnóstico se puede lograr con señales generadas mientras la falla esté activa.

Esta idea fue desarrollada por Vidal y Silva (2014) para el diseño de un dispositivo de diagnóstico para gasoductos. Sin embargo, no se reportó un modelo de propagación formal de las ondas acústicas ante diversos escenarios de falla. Estos hechos motivan este trabajo en el que el modelo lineal de propagación de ondas acústicas considerando la absorción y fallas, se deriva analíticamente al considerar las ecuaciones diferenciales parciales asociadas con el momento y el balance de masa de las ondas acústicas en una tubería. El modelo arroja que cada tipo de falla altera tanto la propagación de las ondas como la impedancia de la línea. Por lo tanto, el modelo propuesto permite la identificación de diversas fallas con un solo dispositivo de hardware y herramientas de reconocimiento de patrones.

Una ventaja del modelo es que es válida para cualquier condición de frontera. Con base en este modelo de propagación, las ondas acústicas se analizan en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Este modelo es la principal contribución del trabajo y no ha sido reportado. En particular, al asumir como condiciones de frontera un cuerpo rígido aguas abajo y un pequeño pulso de presión aguas arriba del ducto, se obtiene la presión en un punto de registro. Una ventaja de este procedimiento es que permite obtener propiedades genéricas fáciles de interpretar en el dominio del tiempo y que a partir de estos se caracterizan diversas fallas.

2. MODELO DEL FLUIDO

2.1 Modelo de Propagación

Considere un modelo linealizado de propagación de ondas acústicas planas a través de una tubería (Liu et al., 2015)

$$\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{\eta}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^3 p(x, t)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{\eta}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^3 u(x, t)}{\partial t \partial x^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

donde $(x, t) \in (x_1, x_2) \times (0, +\infty)$ reúne las coordenadas de espacio [m] y tiempo [s], respectivamente, $x_2 - x_1$ es la longitud de la tubería [m], $p(x, t)$ es la variación de la presión acústica [Pa], $u(x, t)$ es la variación de la velocidad de partícula [m/s], c es la rapidez del sonido en el medio [m/s], ρ_0 corresponde a la densidad del fluido en el equilibrio [kg/m³] y η es la viscosidad del fluido [kg/m s]. Al transformar (1) y (2) al dominio de la frecuencia, se obtiene

$$\frac{d^2 p(x, s)}{dx^2} = \gamma^2(s) p(x, s), \quad \frac{d^2 u(x, s)}{dx^2} = \gamma^2(s) u(x, s), \quad (3)$$

con la variable de propagación

$$\gamma(s) = \frac{s}{c} (1 + \delta_v s)^{-1/2} \quad (4)$$

donde $\delta_v = \nu/c^2$ y ν son el factor de fricción causado por la viscosidad y el coeficiente de viscosidad cinemática, respectivamente. Debido a que δ_v es muy pequeño para el

aire, (4) se puede aproximar por medio de su expansión binomial a

$$\gamma(s) = \frac{s}{c} - \alpha_v s^2, \quad (5)$$

donde $\alpha_v = \delta_v/2c$ es llamado el término de absorción.

Considerando condiciones de frontera arbitrarias en cualesquiera dos puntos de la línea, tal que $x_1 < x_2$, la solución de (3) es

$$\chi(x_2) = M_l(s) \chi(x_1), \quad \chi(x_i) = \begin{bmatrix} p(x_i, s) \\ u(x_i, s) \end{bmatrix}, \quad i \in \mathbb{N}, \quad (6)$$

y la matriz de transferencia para un segmento de línea nominal de longitud l o modelo de dos puertos, esta dado por

$$M_l(s) = \begin{bmatrix} \cosh \gamma(s) l & -Z(s) \sinh \gamma(s) l \\ -\frac{\sinh \gamma(s) l}{Z(s)} & \cosh \gamma(s) l \end{bmatrix}, \quad (7)$$

donde $l = x_2 - x_1$ y $Z(s) = \gamma(s) \rho_0 c^2 / s$ es la impedancia acústica de la línea.

El modelo que describe la propagación de una onda por un segmento de tubería sin discontinuidad (6), es la base de este estudio, ya que secciones de ducto pueden ser conectados con dispositivos puntuales que producen discontinuidades en la propagación de ondas acústicas acopladas con condiciones de frontera que representan fallas (Chaudhry, 2013). Por simplicidad en el modelo derivado con fallas, la dependencia de s será omitida,

2.2 Modelo de Fallas Concentradas

Una falla puntual produce una discontinuidad cuyo modelo es $\chi(x_j^+) = P_j \chi(x_j^-)$, donde $x_j^+ = x_j + \varepsilon$, $x_j^- = x_j - \varepsilon$, con $\varepsilon \rightarrow 0$, y x_j es la ubicación de la falla. La matriz P_j relaciona al estado aguas arriba y aguas abajo del componente. Así, P_j puede ser: una junta, un ramal, un bloqueo, una válvula, una reducción o una fuga localizada entre dos secciones de tubería. Una reducción de área de s_1 a s_2 es modelada por $P_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & r_e \end{bmatrix}$, donde $r_e = s_1/s_2$. El modelo de una fuga es $P_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\xi & 1 \end{bmatrix}$, donde ξ depende de la razón de la velocidad con respecto a la presión nominales. Un bloqueo en la línea tiene como modelo $P_b = \begin{bmatrix} 1 & -B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, donde B depende del tamaño del bloqueo, pérdida de presión y tasa de flujo. Por otro lado, un punto de registro o medición del estado del fluido puede ser asociado con un modelo llamado celda unitaria con $P_{reg} = I$.

2.3 Interconexión de Secciones en un Ducto

Sea una tubería de longitud L con un punto de registro localizado en $l_1 = x_0$ con modelo P_0 y una falla en la posición x_1 con matriz P_1 . Asumiendo que el punto de

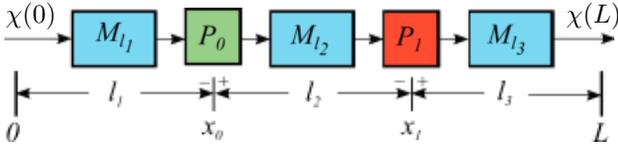


Fig. 2. Interconexión de secciones con un punto de registro en x_0 y una falla en la tubería en x_1

registro está localizado aguas arriba de la falla, el estado de la onda se reduce a

$$\chi(L) = Mf_L \chi(0) = \begin{bmatrix} mf_L(11) & mf_L(12) \\ mf_L(21) & mf_L(22) \end{bmatrix} \chi(0), \quad (8)$$

donde $Mf_L = M_{l_3}(P_1 M_{l_2})(P_0 M_{l_1})$, y las matrices de transferencia M_{l_i} , $i \in \{1, 2, 3\}$, corresponden a las secciones de tuberías sanas (7) de longitud l_i y $L = \sum l_i$. La Fig. 2 muestra la interconexión global de los segmentos con falla.

Dado que $\chi(x_0)$ satisface

$$\chi(x_0) = M_{l_1} \chi(0), \quad \chi(x_0) = (Mf_{L-l_1})^{-1} \chi(L),$$

donde

$$(Mf_{L-l_1})^{-1} = (M_{l_3} P_1 M_{l_2})^{-1} = \begin{bmatrix} \tilde{m}f(11) & \tilde{m}f(12) \\ \tilde{m}f(21) & \tilde{m}f(22) \end{bmatrix},$$

el estado de la onda en el punto de registro x_0 puede ser escrito en términos de las condiciones de frontera de la tubería $\chi(0)$ y $\chi(L)$ por medio de

$$\chi(x_0) = \frac{1}{2} [M_{l_1} (Mf_{L-l_1})^{-1}] \begin{bmatrix} \chi(0) \\ \chi(L) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

La ecuación (9) es válida para cualquier fuente de excitación acústica en los extremos de la línea. Este modelo general con pérdidas por absorción no ha sido reportado antes y es una de las principales contribuciones de este trabajo. En lo siguiente, se discute el análisis de resultados con condiciones de frontera y fallas específicas.

2.4 Condiciones de Frontera

Para analizar el modelo (9) con escenarios de falla, la presión $p(0)$ se asume como la fuente de excitación aguas arriba de la línea, y aguas abajo se considera un cuerpo rígido con $u(L) = 0$. Las condiciones de frontera $u(0)$ y $p(L)$ pueden ser obtenidas por medio de (8), con esto

$$\chi(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ -mf_L(21) \\ -mf_L(22) \end{bmatrix} p(0) \quad \text{y} \quad \chi(L) = \begin{bmatrix} \det Mf_L \\ mf_L(22) \\ 0 \end{bmatrix} p(0). \quad (10)$$

Sustituyendo estas condiciones en (9), la función de transferencia general $G(s)$ desde la fuente de presión $p(0)$ a la presión registrada $p(x_0)$, es

$$G(s) = \frac{1}{2} \left(m_{l_1}(11) + \frac{\tilde{m}f(11) \det Mf_L - m_{l_1}(12) mf_L(21)}{mf_L(22)} \right). \quad (11)$$

En lo siguiente, se utilizará esta ecuación para obtener las funciones de transferencias asociadas a cada una de las fallas consideradas en este trabajo.

2.5 Funciones de Transferencia

Tubería sin Falla

Considerando condiciones sin falla (i.e. $P_1 = I$) en el ducto y después de algunas simplificaciones, se obtiene

$$G_n(s) = \frac{\cosh \gamma l_2}{\cosh \gamma(l_1 + l_2)}.$$

Sustituyendo las funciones hiperbólicas por funciones exponenciales, y asumiendo que la longitud $l_2 \gg l_1$, se obtiene

$$G_n = e^{-l_1 \gamma}, \quad (12)$$

o genéricamente

$$g(s) = e^{c_1 s + c_2 s^2},$$

con $c_2 = -\alpha_v c_1$ y $c_1 = -l_1/c$. Si se desprecia la absorción del ducto $c_2 = 0$, y entonces $g(s)$ corresponde a un retardo.

Tubería con Reducción

Sea $P_1 = P_r$, entonces

$$G_r(s) = \frac{r_e \cosh \gamma l_2 \cosh \gamma l_3 + \sinh \gamma l_2 \sinh \gamma l_3}{r_e \cosh \gamma(l_1 + l_2) \cosh \gamma l_3 + \sinh \gamma(l_1 + l_2) \sinh \gamma l_3},$$

donde $l_2 = x_1 - x_0$ y $l_3 = L - x_1$.

Si la longitud $l_3 \gg l_1 + l_2$ (tubería de longitud infinita), se reduce a

$$G_r = e^{-l_1 \gamma} \frac{1 + \Gamma_r e^{-2l_2 \gamma}}{1 + \Gamma_r e^{-2(l_1 + l_2) \gamma}}, \quad \text{donde } \Gamma_r = \frac{r_e - 1}{r_e + 1} \quad (13)$$

es el coeficiente de reflexión para una reducción.

Tubería con Fuga

Cuando $P_1 = P_l$, $G(s)$ resulta en

$$G_l(s) = \frac{\xi Z \sinh \gamma l_2 \cosh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_2 + l_3)}{\xi Z \sinh \gamma(l_1 + l_2) \cosh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_1 + l_2 + l_3)}.$$

Considerando una tubería de longitud infinita

$$G_l = e^{-l_1 \gamma} \frac{1 + \Gamma_l e^{-2l_2 \gamma}}{1 + \Gamma_l e^{-2(l_1 + l_2) \gamma}}, \quad \text{donde } \Gamma_l = \frac{-\xi Z}{\xi Z + 2} \quad (14)$$

es el coeficiente de reflexión para una fuga.

Tubería con Bloqueo

Si $P_1 = P_b$, entonces $G(s)$ está dada por

$$G_b(s) = \frac{\frac{B}{Z} \cosh \gamma l_2 \sinh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_2 + l_3)}{\frac{B}{Z} \cosh \gamma(l_1 + l_2) \sinh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_1 + l_2 + l_3)}.$$

Asumiendo una tubería de longitud infinita

$$G_b = e^{-l_1 \gamma} \frac{1 + \Gamma_b e^{-2l_2 \gamma}}{1 + \Gamma_b e^{-2(l_1 + l_2) \gamma}}, \quad \text{donde } \Gamma_b = \frac{B}{B + 2Z} \quad (15)$$

es el coeficiente de reflexión para un bloqueo.

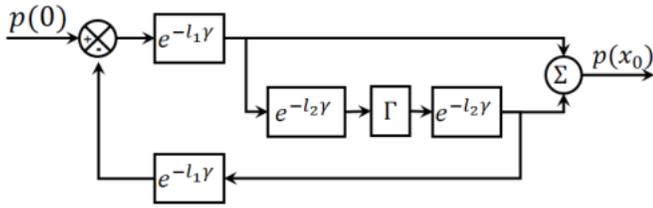


Fig. 3. Diagrama de bloques de la función de transferencia para una falla

2.6 Diagrama de Bloques General del Fluido

Las funciones de transferencia (12), (13), (14) y (15) pueden ser escritas de manera general como

$$G_f(s) = e^{-l_1\gamma} \frac{1 + \Gamma e^{-2l_2\gamma}}{1 + \Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma}} \quad (16)$$

donde Γ es de acuerdo al tipo de falla considerado. En la Fig. 3 es representada por medio de un diagrama de bloques.

La ecuación (16) tiene el factor $(1 + \Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma})^{-1}$, el cual puede expandirse por medio de su serie binomial con $|\Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma}| < 1$, que al desarrollar algebraicamente resulta

$$G_f(s) = e^{-l_1\gamma} + \Gamma e^{-(l_1+2l_2)\gamma} - \Gamma e^{-(3l_1+2l_2)\gamma} - \Gamma^2 e^{-(3l_1+4l_2)\gamma} + \Gamma^2 e^{-(5l_1+4l_2)\gamma} + \Gamma^3 e^{-(5l_1+6l_2)\gamma} - \dots \quad (17)$$

3. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DEL MODELO

La Tabla 1 muestra los parámetros utilizados en las simulaciones.

3.1 Análisis de la Respuesta en Frecuencia

La Fig. 4, muestra los diagramas de magnitud de Bode de las funciones de transferencias asociadas a cada una de las fallas: (a) sin absorción y (b) con absorción. Note que la magnitud de cada tipo falla tiene un patrón periódico asociado. Para los parámetros usados el periodo es de π rad/s. La Fig.4b muestra que para frecuencias altas la magnitud disminuye. La Fig. 5 muestra la magnitud de $G_l(s)$ al cambiar la ubicación de la falla. Observe que para estos parámetros de simulación, entre cada $\Delta\omega$ rad/s se generan $2n - 1$ máximos y mínimos, donde $n = x_1$. La Fig. 6, muestra la ganancia de $G_l(s)$ al variar la magnitud de la falla manteniendo su posición.

3.2 Análisis de la Respuesta Transitoria

La principal preocupación desde el punto de vista del diagnóstico de fallas es la caracterización de la respuesta transitoria de la presión registrada durante un intervalo de tiempo. Así, este hecho motivó la selección de una señal acústica como un pulso de duración corta dada por $p(0) = \frac{1}{s}(1 - e^{-as})$ donde a especifica el ancho de pulso. Considerando la función de transferencia general (17), uno puede ver que

Tabla 1. Parámetros de las simulaciones

$c =$	1 m/s	$\rho_0 =$	1 kg/m ³	$\alpha_v =$	0.0005 s ² /m
$x_0 =$	1 m	$x_1 =$	3 m	$a =$	0.1 s
$r_e =$	2	$\xi =$	0.8 m/Pa · s	$B =$	5 Pa · s/m

- Cada término de la suma representa un frente de onda, donde los dos primeros son: la señal acústica de la fuente y la primer reflexión ocasionada por la falla, respectivamente.
- Despreciando el término de absorción ($c_2 = 0$), los términos de la suma se reducen a la forma $e^{c_1 s}$, y Γ se convierte en una constante, lo que significa que el modelo se reduce a un conjunto de retardos.
- Sea q el coeficiente de γ en (17). Para analizar una ventana de T segundos, (17) se debe truncar hasta el último término que satisfaga $-q/c \leq T$. Aquí, se analiza una ventana de 15 s.
- El coeficiente de reflexión Γ^n , $n \in \mathbb{N}$, para la fuga y bloqueo, puede expandirse de manera similar a como se hizo con (16) hasta k términos.

La expansión anterior incluye únicamente funciones del tiempo de las clases

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ s^\beta \frac{g(s)}{s} \right\} \text{ y } \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{s^\beta e^{-as} g(s)}{s} \right\},$$

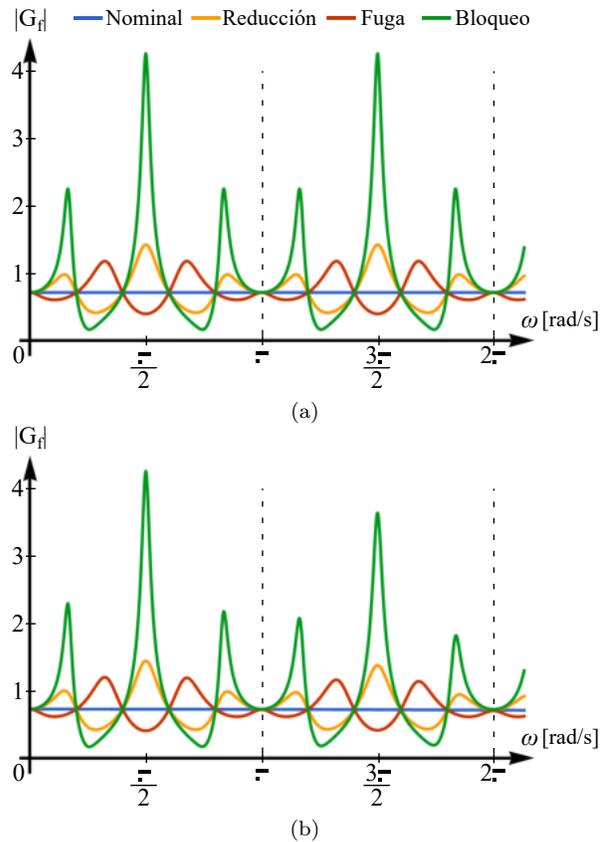


Fig. 4. Diagrama de magnitud de Bode de las funciones de transferencia: (a) sin absorción y (b) con absorción

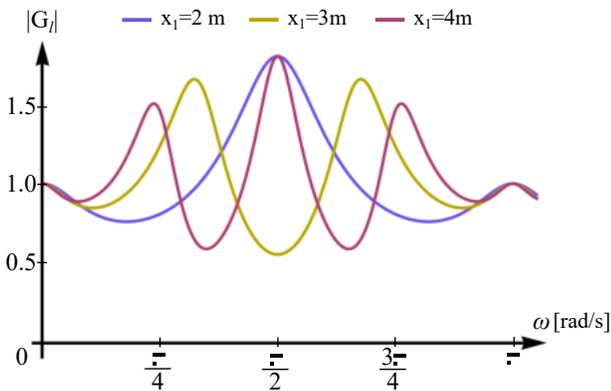


Fig. 5. Magnitud de $G_l(s)$ a diferentes distancias manteniendo ξ constante

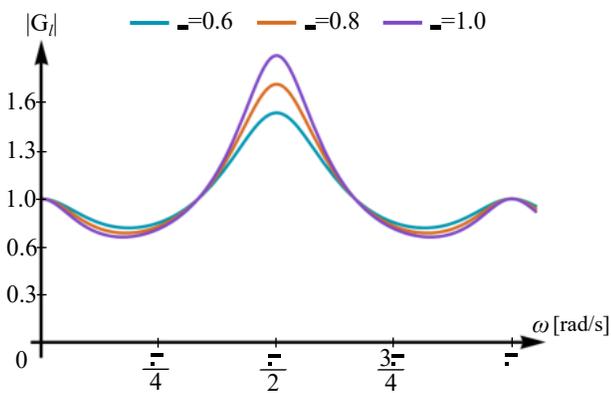


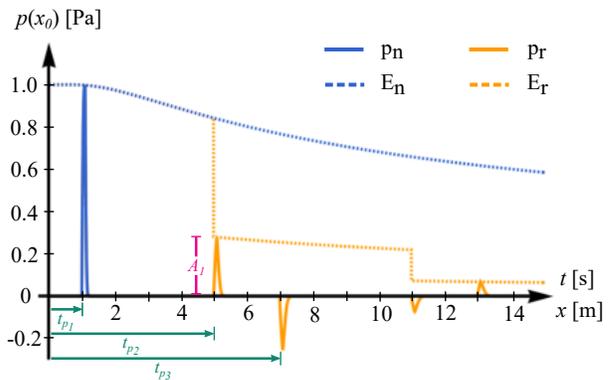
Fig. 6. Magnitud de $G_l(s)$ a diferentes magnitudes manteniendo x_1 constante

donde $\beta \in \mathbb{N}$. La segunda función es la primera con un término exponencial e^{-as} . Las transformadas inversas pueden ser encontradas en Campbell y Foster (1931). Con esto, la obtención de la presión en el dominio del tiempo ha sido implementada y agregada en Mathematica (Inc., 2018).

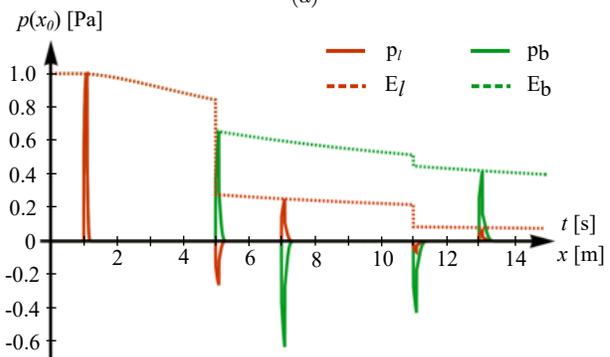
El número k tal que las funciones de transferencias son propiamente aproximadas depende del parámetro de falla. Como un criterio para la selección del número de términos k , se usa la diferencia $\Delta_p = p(x_0)_k - p(x_0)_{k+1}$ entre la onda de presión. De este modo $|\Delta_p| < 0.001$ es considerado aceptable y se logra con $k = 6$.

Como marco de referencia para el análisis, la Fig. 7a p_n muestra la evolución de la presión registrada para una tubería nominal con absorción y es interpretada como sigue: la señal corresponde a la fuente acústica atenuada, la cual viaja en el fluido y llega al punto de registro después de $t_{p1} = 1$ s o equivalentemente a viajar $l_1 = 1$ m. La línea discontinua E_n muestra la envolvente de presión. La Fig. 8 muestra como varía la envolvente de presión de p_n al variar el ancho de pulso manteniendo la absorción constante.

Propiedades de la Propagación de la Onda



(a)



(b)

Fig. 7. Presión acústica y envolvente en el ducto con absorción; casos (a) nominal y reducción, (b) fuga y bloqueo

Las características de las ondas con factor de absorción se pueden extraer de las ondas de propagación generadas para una reducción, una fuga y un bloqueo en el punto de registro presentadas en la Fig. 7. En la Fig. 7a, el tiempo t_{p1} denota el tiempo de llegada de la onda de la fuente al punto de registro, y t_{p2} es el tiempo de llegada de la onda reflejada producida por la falla. Del comportamiento de las ondas, se encontraron las siguientes características:

- El tiempo en el que la onda viaja desde la fuente al punto de registro y el tiempo requerido para que la onda viaje desde la fuente hasta el punto de falla en x_1 más el tiempo de retorno de la onda reflejada para llegar al punto de registro, es invariante con respecto a la clase de falla.
- Las características del tiempo identificado están vinculadas a la distancia desde el punto de registro hasta la falla por

$$l_2 = \frac{t_{p2} - t_{p1}}{2} c.$$

Las posiciones de las fallas $l_2 = 2$ m o $x_1 = 3$ m son identificadas correctamente.

- El tercer pulso registrado es generado por la reflexión de la segunda onda en el tiempo $t_{p3} = t_{p2} + 2t_{p1}$.
- En el caso de fuga, se produce la onda reflejada de una fase opuesta a la fuente. Este fenómeno no está presente en las fallas de bloqueo y reducción. Este hecho

es justificado ya que la impedancia Z_L con una fuga es reducida en el coeficiente de reflexión $R_c = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$ es negativo si $Z_L \rightarrow 0$ con Z_0 la impedancia característica.

- Las ondas reflejadas son atenuadas, incluso en la ausencia de absorción. De los coeficientes de reflexión para las tres fallas, las relaciones entre la magnitud de la falla y la amplitud A_1 puede ser calculado aproximadamente como:

$$r_e = \frac{1 + A_1}{1 - A_1}; \quad \xi = \frac{2}{\rho_0 c} \frac{|A_1|}{1 - |A_1|}; \quad B = 2\rho_0 c \frac{A_1}{1 - A_1}.$$

El problema principal en una aplicación práctica de este modelo de localización de fallas es la atenuación de la onda inducida predominantemente por las fallas y no por la absorción. Cuanto mayor sea la magnitud de la falla, mayor será la amplitud de la onda reflejada.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Este trabajo desarrolló un modelo de propagación de ondas acústicas en una tubería expresada como una función de transferencia que incluye el término absorción causada por la viscosidad del fluido. Una ventaja de este modelo es que permite el análisis de diversos escenarios de falla con condiciones de frontera discontinuas, en lugar de los modelos basados sobre una descripción de Fourier. Ya que existen diversas aplicaciones donde se requiere de un modelo de propagación, el desarrollo de este modelo ofrece una herramienta potencial que se puede lograr con herramientas de cálculo simbólico como *Mathematica*.

Con base en el modelo propuesto con y sin el término de absorción, se obtuvo la caracterización de las ondas acústicas de tres clases de fallas: bloqueo, fuga y reducción de área, asumiendo un pulso aguas arriba de la tubería como una perturbación acústica. Así, la señal patrón dada por la amplitud y el tiempo de llegada de la onda en un punto de registro para las tres fallas consideradas permitió la localización de las fallas y la estimación de su magnitud. Además, estos patrones validaron los resultados experimentales dados por (Vidal y Silva, 2014) sin una justificación analítica.

Importante en este estudio es la conclusión de que la atenuación dominante es debido a la propia falla y no a la absorción.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahadi, M. y Sarif-Bakhtiar, M. (2010). Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals. *Applied Acoustics*.
- Blackstock, D. (2000). *Fundamentals of physical acoustics*. John Wiley and Sons.
- Brunone, B. y Ferrante, M. (2001). Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients. *J. Hydraul. Res.*, 39(5), 539–547.
- Campbell, G.A. y Foster, R.M. (1931). *Fourier integrals for practical applications*. Technical publications

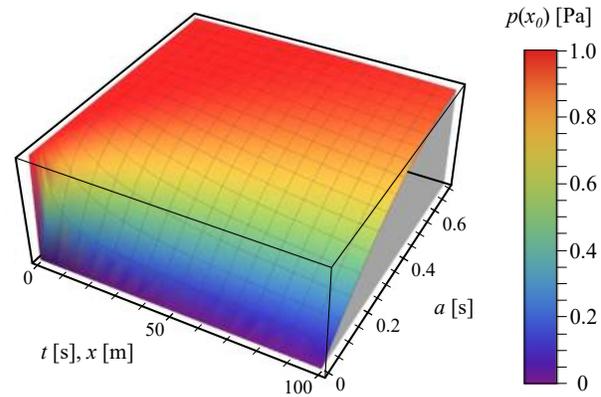


Fig. 8. Envolvente de p_n al variar el ancho de pulso manteniendo la absorción constante

- (American Telephone and Telegraph Company):. Mathematical physics. Bell telephone laboratories.
- Chaudhry, M.H. (2013). *Applied Hydraulic Transients*. SpringerLink: Bücher. Springer Science & Business Media, 3rd edition.
- Datta, S. y Sarkar, S. (2016). A review on different pipeline fault detection methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 97–106.
- Inc., W.R. (2018). *Mathematica*, Version 11.3. Champaign, IL, 2018.
- Lee, P., Vitkovsky, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J., Lee, P., Vitkovský, J., Simpson, M., y Liggett, J. (2005). Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study. *Journal of Sound and Vibration*, 284(3), 1051–1075.
- Liu, C.W., Li, Y.X., Yan, Y.K., Fu, J.T., y Zhang, Y.Q. (2015). A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 236–246.
- Liu, C., Li, Y., Fang, L., y Xu, M. (2017). Experimental study on a de-noising system for gas and oil pipelines based on an acoustic leak detection and location method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 151.
- Liu, C., Li, Y., Meng, L., Wang, W., y Zhang, F. (2014). Study on leak-acoustics generation mechanism for natural gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 174–181.
- Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., y Massari, C. (2011). Transient tests for locating and sizing illegal branches in pipe systems. *Journal of Hydroinformatics, IWA*.
- Verde, C. y Torres, L. (eds.) (2017). *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. Springer.
- Vidal, J.L. y Silva, L.L. (2014). Acoustic reflectometry for blockages detection in pipeline. In *OTC Brasil*, 3382–3388. Offshore Technology Conference.