



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA - CONTROL

MODELO DE PROPAGACIÓN Y ANÁLISIS DE ONDAS
ACÚSTICAS EN TUBERÍAS PARA DETECCIÓN DE FALLAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JESÚS ALBERTO PERALTA CELERINO

TUTORA PRINCIPAL
DRA. MARÍA CRISTINA VERDE RODARTE
INSTITUTO DE INGENIERÍA - UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

Secretaria: Dra. Flor Lizeth Torres Ortiz

Vocal: Dra. María Cristina Verde Rodarte

1^{er}. Suplente: M.C. Libia Georgina Carmona Paredes

2^{do}. Suplente: Dr. Jaime Alberto Moreno Pérez

La tesis se realizó en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTORA DE TESIS:

Dra. María Cristina Verde Rodarte

A mi familia, por supuesto.

*"If you want to find the secrets of the Universe, think in terms of
energy, frequency and vibration."*

~ N. T.

Reconocimientos

Mi especial agradecimiento a mi tutora, la Dra. María Cristina Verde Rodarte; quien con su dirección, conocimiento, enseñanza, y experiencia, permitió el desarrollo de este trabajo; y quien por su dedicación, carácter y disciplina me han motivado a continuar con mi desarrollo académico profesional.

Extiendo mi agradecimiento a todos los sinodales, quienes con sus comentarios y correcciones, enriquecieron este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi *alma mater*, por acogerme y formarme. A la Facultad de Ingeniería, al Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería y al Instituto de Ingeniería, por todos los conocimientos y habilidades adquiridas dentro y fuera del aula.

Agradezco el apoyo recibido por parte de los proyectos IT100519-DGAPA-UNAM y 281070 conv. 2016-3 SENER-CONACyT. También quisiera reconocer y agradecer al apoyo recibido del CONACyT, por la beca que me fue otorgada para realizar mis estudios de maestría, bajo el CVU 859398.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Jesús Alberto Peralta Celerino. Ciudad de México, noviembre 2019

Resumen

Este trabajo de tesis desarrolla formalmente un modelo de dimensión infinita que describe la propagación de ondas acústicas en una tubería con absorción debida a la viscosidad del medio de propagación 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 falla para tres tipos de éstas: fuga, bloqueo y reducción de área. A partir del modelo lineal de dimensión infinita del gas en el ducto junto con las condiciones de frontera y de falla, se derivan las respuestas características que definen los transitorios asociados con los eventos anormales. Así, las respuestas de la presión transitoria en un punto arbitrario de *registro* en la tubería, validan resultados empíricos usados para la detección de fallas en una tubería de gas.

Abstract

This thesis work formally develops an infinite dimension model that describes the propagation of acoustic waves in a pipeline with absorption due to viscosity in different fault conditions. By assuming an acoustic source of the impulse type as the excitation signal, the response of the pressure in fault condition is obtained for three types of these: leakage, blockage and area reduction. From the linear model of the infinite dimension of the gas in the pipeline together with the boundary and fault conditions, the features responses that define the transients associated with the abnormal events are derived. Thus, the transient pressure responses at an arbitrary *register* point in the pipeline validate empirical results used for the fault detection in a gas pipeline.

Índice general

Índice de figuras	XV
Nomenclatura	XVII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Estado del Arte	2
1.3. Planteamiento del Problema	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivos Específicos	5
1.5. Contribución	6
1.6. Estructura de la Tesis	6
2. Modelo de Propagación	9
2.1. Modelo de Propagación	9
2.2. Modelos de Fallas Concentradas	13
2.3. Interconexión de Secciones en un Ducto	14
2.3.1. Punto de Registro Aguas Arriba de las Fallas	14
2.3.1.1. Condiciones de Frontera: Caso 1	16
2.3.2. Punto de Registro Aguas Abajo de las Fallas	16
2.3.2.1. Condiciones de Frontera: Caso 2	17
2.4. Funciones de Transferencia	18

ÍNDICE GENERAL

2.4.1.	Tubería sin Falla	18
2.4.2.	Tubería con Reducción	19
2.4.3.	Tubería con Fuga	20
2.4.4.	Tubería con Bloqueo	21
2.5.	Función de Transferencia General para Una Falla	21
2.5.1.	Periodicidad de la Función de Transferencia	23
2.5.2.	Periodicidad de la Magnitud de la Función de Transferencia	24
2.6.	Función de Transferencia para Dos Fallas	25
2.7.	Diagrama de Bloques de la Función de Transferencia para n Fallas	26
3.	Análisis de las Respuestas en Frecuencia y Transitoria	29
3.1.	Análisis de la Respuesta Transitoria	29
3.1.1.	Propiedades de la Propagación de la Onda	32
3.1.2.	Análisis de la Envolvente de Presión	34
3.2.	Análisis de la Respuesta en Frecuencia	36
4.	Conclusiones	41
	Bibliografía	43

Índice de figuras

1.1. Esquema de detección de falla con señales acústicas en una tubería	4
2.1. Interconexión de secciones en una tubería con un punto de registro aguas arriba de las fallas	15
2.2. Interconexión de secciones en una tubería con un punto de registro aguas abajo de las fallas	17
2.3. Interconexión de secciones en una tubería con un punto de registro: a) aguas arriba y b) aguas abajo de la falla	19
2.4. Diagrama de bloques para una falla	22
2.5. Interconexión de secciones con un punto de registro y dos fallas	25
2.6. Diagrama de bloques para dos fallas	25
2.7. Diagrama de bloques para n fallas	27
3.1. Envoltente y presión acústica con absorción para el ducto nominal	31
3.2. Envoltente y presión acústica con absorción para el ducto: (a) con reducción, (b) con una fuga y (c) con un bloqueo	33
3.3. Efecto en la envoltente debido al cambio de absorción manteniendo el ancho de pulso constante	35
3.4. Efecto en la envoltente debido al cambio del ancho de pulso manteniendo la absorción constante	35
3.5. Ganancia de las funciones de transferencia: (a) sin absorción y (b) con absorción	37

ÍNDICE DE FIGURAS

- 3.6. Ganancia de las funciones de transferencia a diferentes distancias sin absorción: (a) reducción, (b) fuga y (c) bloqueo 38
- 3.7. Ganancia de las funciones de transferencia a diferentes magnitudes sin absorción: (a) reducción, (b) fuga y (c) bloqueo 39

Nomenclatura

Variables y Constantes Físicas

a	Ancho de pulso
A	Área de sección transversal
B	Parámetro de bloqueo
c	Rapidez del sonido
C_p	Capacidad calorífica a presión constante
C_v	Capacidad calorífica a volumen constante
E_n	Envolvente de presión
G_κ	Función de transferencia de κ
L	Longitud de la tubería
\mathcal{M}	Masa molar de la sustancia como medio de propagación
$P(x,t)$	Presión instantánea
$p(x,t)$	Presión acústica (variación con respecto a $P(x,t)$)
$p(x,s)$	Presión acústica en el dominio de la frecuencia
p_0	Presión atmosférica

NOMENCLATURA

$p(0)$	Señal de excitación del sistema
r_e	Parámetro de reducción
R	Constante universal de los gases ideales
s	Variable de Laplace
t	Coordenada temporal
t_p	Tiempo de propagación
T	Temperatura termodinámica
T_κ	Coefficiente de transmisión de κ
$u(x,t)$	Velocidad de partícula
$u(x,s)$	Velocidad en el dominio de la frecuencia
x	Coordenada espacial
$Z(s)$	Impedancia acústica
α_v	Término de absorción
$\gamma(s)$	Variable de propagación
Γ_κ	Coefficiente de reflexión de κ
δ_v	Factor de viscosidad
ζ	Índice adiabático
η	Viscosidad
λ	Coefficiente de viscosidad dilatacional
μ	Coefficiente de viscosidad de corte

NOMENCLATURA

ν	Coefficiente de viscosidad cinemática
ξ	Parámetro de fuga
$\rho(x, t)$	Densidad acústica (variación con respecto a $\varrho(x, t)$)
ρ_0	Densidad de equilibrio
$\varrho(x, t)$	Densidad instantánea
$\chi(x)$	Vector de estados del fluido en el punto x

Conjuntos de Números

\mathbb{N}	Números naturales
\mathbb{Z}	Números enteros
\mathbb{Q}	Números racionales
\mathbb{R}	Números reales
\mathbb{C}	Números complejos

Acrónimos y otros Símbolos

CF	Condiciones de frontera
$\text{erf}(t)$	Función de error
$D_\nu(t)$	Función cilíndrica parabólica de orden ν
$(p, q) = 1$	p y q son primos relativos con $p, q \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo presenta el tema abordado en la tesis, así como la motivación y el estado del arte para elaborarla. También se plantean los objetivos y se presenta la estructura de la tesis.

1.1. Motivación

Las redes de ductos son unas de las infraestructuras más importantes en el mundo debido a que por medio de ellas se transportan diferentes tipos de fluidos de alto valor económico como hidrocarburos, principalmente; y dan frente a la necesidad de satisfacer la demanda generada por el crecimiento de las poblaciones (Soldevila, 2018).

Un tema de gran interés para las autoridades encargadas del servicio y mantenimiento es la eficiente distribución del fluido. Así, uno de los principales retos para mejorar la eficiencia en la distribución es minimizar las pérdidas ocasionadas por fallas, tales como: fugas, daños en la fabricación de los componentes que integran el sistema, corrosión en las paredes del ducto, bloqueos parciales ocasionados por deposición de minerales, tomas clandestinas, fenómenos naturales como sismos, entre otros (Pérez et al., 2014).

Las fallas en tuberías y redes son un problema global (Verde y Torres, 2017) que pueden ocasionar incrementos en los costos de reparación, que finalmente son cubiertos por el consumidor final; además de significantes pérdidas económicas, catástrofes industriales, daños ecológicos irreparables, e inclusive pérdidas humanas.

Con base en la información generada por CONAGUA y SEMARNAT (2018), donde muestran las interacciones entre el agua y la economía Mexicana en el año 2016 en términos

de flujos físicos de agua, reportan que en total se extrajeron del ambiente 216 593 hm³ de agua de manera superficial, pluvial y subterránea, de los cuales se consumieron 29 937 hm³ por: el alcantarillado y saneamiento, el sector primario, la industria y servicios, hogares, capacitación y tratamiento y la energía eléctrica. Dado que las hidroeléctricas regresan al ambiente prácticamente el 100 % del agua utilizada, los retornos totales ascienden a 61 034 hm³, de los cuales 30 866 hm³ fueron pérdidas (51 %) debidas a fugas en los sistemas de captación y distribución.

Por lo anterior, la necesidad de mejorar y crear nuevas técnicas de detección y localización semiautomáticas de fallas en el menor tiempo posible y a un bajo costo, que ayuden a garantizar la seguridad y aumentar la eficiencia de los procesos de distribución.

1.2. Estado del Arte

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). Según los niveles automáticos, los procedimientos generalmente pueden clasificarse en tres categorías principales: 1) la detección automática, la cual incluye la detección por monitoreo por medio de un sistema automático sin un operador humano en la instalación; 2) el segundo grupo es la detección semiautomatizados, que requieren un cierto tipo de maniobra con intervención parcialmente humana a fin de detectar la falla, y 3) detección manual, incluye procedimientos de detección manuales y generalmente requiere dispositivos específicos activados por operadores humanos (Adnan et al., 2015).

Las pruebas semiautomáticas basadas en el golpe de ariete (maniobras como off/on de bombas o válvulas) son de alto riesgo para las instalaciones (Verde y Torres, 2017). Renteria et al. (2016) presentan un análisis de la propagación de la onda de presión a lo largo de una tubería para localizar posibles fugas, mediante la generación de una señal transitoria de prueba del tipo escalón, la cual se genera mediante el cierre de una válvula, ocasionando la aparición del fenómeno de golpe de ariete.

Sattar y Chaudhry (2008) presentan una técnica utilizando la respuesta en frecuencia del fluido para la detección de bloqueos parciales en una tubería, en el cual concluyen que los bloqueos parciales incrementan la amplitud de las oscilaciones de presión en armónicos pares, las cuales son usadas para predecir la localización y magnitud del bloqueo parcial.

La reflectometría producida por una fuga en acueductos, ha sido usada por más de 30 años (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). Considerando que la rapidez de propagación de una señal acústica en un fluido es $c = \Delta x / \Delta t$ con Δx y Δt incrementos en la distancia y tiempo, respectivamente, la posición de la fuga en una tubería puede ser estimada por

$$l_f = \frac{L + cD}{2}$$

donde D es la diferencia del tiempo de llegada entre dos señales transitorias producidas por una fuga y L es la distancia entre los puntos de los transductores que recopilan las señales. Los principales problemas técnicos con este procedimiento son los siguientes: (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. La limitante es que la máxima distancia L tal que se observe la señal de presión puede ser muy pequeña.

Otra técnica 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 presión transitoria en un punto del ducto para detectar eventos anormales (Blackstock, 2000). Así, si una señal acústica pequeña 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 registre la señal. Esta idea permite la identificación de condiciones anormales en corto tiempo respecto a la velocidad del sonido asumiendo que

la propagación de la onda en condiciones normales es conocida. La Figura 1.1 muestra la configuración genérica. Si un altoparlante está localizado 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. Sharp y Campbell (1997) usan esta técnica para detectar daños en instrumentos musicales. Si se asume linealidad, el análisis de la onda de presión provocada por señales de prueba pueden ser ejecutadas en el dominio del tiempo (Brunone y Ferrante, 2001) o en el dominio de la frecuencia (Lee et al., 2005a). Una ventaja de este tipo de perturbación del fluido es que el diagnóstico se puede lograr con señales acústicas exógenas generadas siempre que la falla esté activa.

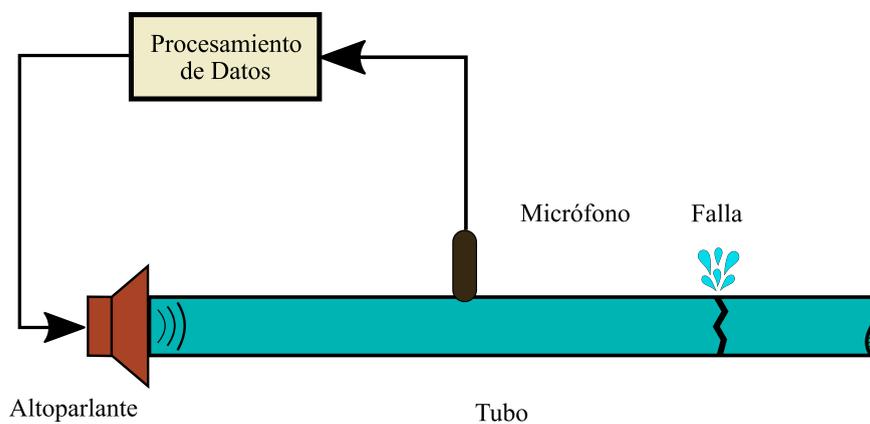


Figura 1.1: Esquema de detección de falla con señales acústicas en una tubería

1.3. Planteamiento del Problema

La idea anterior fue desarrollada por Vidal y Silva (2014) para el diseño de un dispositivo de diagnóstico para gasoductos. Sin embargo, no se reportó una descripción formal del dispositivo ni tampoco un modelo de propagación formal de las ondas acústicas ante diversos escenarios de fallas, el tipo de material del ducto, ni la potencia de la señal acústica y la sensibilidad del micrófono. Oviedo (2019) presenta un método basado en reflectometría para detectar múltiples fallas en ductos, para el cuál obtuvo un procedimiento general de la obtención de la expresión analítica de la onda de presión acústica al aplicar una excitación al fluido usando un modelo lineal de dimensión infinita en el dominio de la frecuencia.

La desventaja del trabajo reportado por [Oviedo \(2019\)](#), es que el modelo no considera pérdidas por absorción, y tampoco fue analizado cuando se considera una fuga como falla. Estos hechos motivan este trabajo en el que el modelo lineal de la propagación de ondas acústicas considerando la absorción debida a la viscosidad 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. A partir del modelo se concluye 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 diversos tipos de fallas cuando se diseña un dispositivo de hardware que use herramientas de reconocimiento de patrones ([Theodoridis y Koutroumbas, 2009](#)).

1.4. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es derivar un modelo lineal que describa la propagación de ondas acústicas por medio de un fluido con condiciones de frontera en una tubería con absorción debida a la viscosidad y obtener la respuesta analítica de la onda de presión acústica en presencia de una falla del tipo: reducción de área, fuga y bloqueo.

1.4.1. Objetivos Específicos

- Analizar la propagación de la onda de presión a lo largo de un ducto en presencia de fallas, localizar la ubicación y estimar el parámetro de la falla a partir de la respuesta en un punto del ducto.
- Analizar la respuesta en frecuencia de cada una de las funciones de transferencia desde una señal de excitación $p(0)$ hasta un punto de registro $p(x_0)$ asociadas a cada tipo de falla.
- Extender el modelo lineal para el caso de dos fallas y dar una representación por medio de diagrama de bloques para el caso de n fallas.

1.5. Contribución

La contribución principal es lo novedoso del modelo lineal de propagación de ondas acústicas que permite considerar diferentes condiciones de frontera y diferentes tipos de fallas en un ducto con una señal de excitación. Con base en este modelo, la propagación de estas ondas se analizan bajo diversos escenarios de fallas en los dominios de la frecuencia y del tiempo. Este modelo no ha sido reportado anteriormente. En particular, al asumir como condiciones de frontera un cuerpo rígido aguas abajo y un pequeño pulso de presión aguas arriba del ducto, la presión en un punto cualquiera del ducto registra los efectos anormales del ducto. Una ventaja de este procedimiento es que permite obtener propiedades fáciles de interpretar en el dominio del tiempo y que a partir de estas se caracterizan diversas fallas.

1.6. Estructura de la Tesis

Esta tesis ha sido organizada en cuatro capítulos. Luego de esta introducción, en el Capítulo 2 se deriva el modelo lineal de propagación de ondas acústicas en tuberías, así como la transformación al dominio de la frecuencia, la cual permite utilizar el método de la matriz de transferencia para determinar la respuesta de la tubería por medio de la interconexión de secciones con fallas. Además, hace estudio al considerar que un punto de registro es localizado aguas arriba de una falla con condiciones de frontera específicas y asumiendo un tubo de longitud infinita. Además, se explican los procedimientos para obtener expresiones generales de las funciones de transferencia desde una fuente de presión hasta un punto de registro para los casos de una y dos fallas. Con base en estos procedimientos, es posible representar a las funciones de transferencia por medio de diagramas de bloques, inclusive cuando n fallas están presentes en el ducto. El Capítulo 3 se ocupa del análisis de las respuestas en frecuencia y transitoria, donde la ubicación de las fallas es más fácil de analizar mediante la respuesta transitoria de la presión en el punto de registro generado por una señal acústica exógena, así como de la estimación del parámetro asociado a cada tipo de falla por medio de la magnitud de los frentes de onda y de los coeficientes de reflexión de presión. Finalmente, los principales resultados y conclusiones del análisis se sintetizan en el

Sec. 1.6

ESTRUCTURA DE LA TESIS

Capítulo 4.

Modelo de Propagación

Este capítulo presenta el modelo matemático no lineal de dimensión infinita que describe la propagación de ondas acústicas planas en una sola dirección a través del flujo de un gas en una tubería con absorción debida a la viscosidad. El modelo está integrado por un par de ecuaciones diferenciales parciales (EDPs) conocidas como ecuaciones de momento y continuidad. Considerando un punto de operación, dichas ecuaciones son linealizadas y permiten relacionar en cualquier punto del ducto a la presión y densidad del fluido. Para un intervalo finito de ducto, la matriz de transferencia es usada para analizar y determinar la respuesta en frecuencia de la tubería teniendo uno o más elementos puntuales como fugas, bloqueos y reducciones de área, a lo largo del ducto.

2.1. Modelo de Propagación

Una onda mecánica es una perturbación o desviación de una propiedad física de un medio, que se propaga a través del espacio. Las ondas acústicas (sonido), constituyen un tipo de fluctuación de presión que puede existir en un fluido compresible. Cuando las ondas acústicas se propagan en un medio, parte de la energía de la onda se convierte a energía calorífica y se produce atenuación en la amplitud. Las fuentes de disipación de energía pueden ser divididas en dos categorías generales: (1) aquellas que son intrínsecas del medio y (2) aquellas que son asociadas con las fronteras del medio. La viscosidad, la conducción de calor, entre otros mecanismos de pérdida de energía, causan absorción del sonido. La absorción debida a la viscosidad ocurre cuando hay un movimiento relativo entre las porciones adyacentes del

medio, como durante la deformación por corte o la compresión y expansión que acompañan la transmisión de una onda de sonido (Kinsler et al., 2000).

Considere el flujo de un fluido compresible en una sola dirección a través de un ducto horizontal de longitud L [m], con un área de sección transversal constante A [m²], y suponga que la velocidad de la partícula $u(x,t)$ [m/s] y la densidad instantánea $\rho(x,t)$ [kg/m³] son las mismas sobre una sección transversal. Considerando que los cambios convectivos en la velocidad del fluido son despreciables, las ecuaciones de propagación de ondas acústicas pueden ser derivadas de las ecuaciones de continuidad y movimiento que rigen la dinámica del fluido considerando absorción debida a la viscosidad. Estas ecuaciones pueden ser expresadas como en Blackstock (2000) y White (2006):

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{\rho(x,t)} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} + \rho(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - \eta \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0, \quad (2.2)$$

donde $(x,t) \in (0,L) \times (0,+\infty)$ reúne las coordenadas de espacio [m] y tiempo [s], respectivamente. $P(x,t)$ es la presión instantánea [Pa], $\eta = \lambda + 2\mu$ en [kg/m · s] en la cual μ es el coeficiente de viscosidad de corte y λ es el coeficiente de viscosidad dilatacional.

El coeficiente de viscosidad de corte μ , juega un papel importante en el estudio de la dinámica de fluidos. A pesar de que μ ha sido medido para varios fluidos, la viscosidad dilatacional λ (también conocida como viscosidad de volumen, volumétrica o segundo coeficiente de viscosidad) de muchos fluidos es desconocida a pesar de su papel fundamental para la dinámica de fluidos. Ésta se vuelve importante para aquellos efectos donde la compresibilidad del fluido es esencial, además, es importante para describir la atenuación del sonido en gases moleculares. La absorción de la energía del sonido en el fluido depende de la frecuencia del sonido, es decir, de la velocidad de compresión y expansión del fluido (Cramer, 2012).

Utilizando la hipótesis de Stokes (White, 2006), la cual es válida para algunos fluidos, tales como los gases nobles:

$$\lambda + \frac{2}{3}\mu = 0, \quad (2.3)$$

se tiene que

$$\eta = \frac{4}{3}\mu. \quad (2.4)$$

En general, para un modelo de pequeña señal, las variables de presión y densidad están descritas por medio de sus valores nominales en el punto de operación y sus desviaciones. Por lo tanto, pueden ser descritas por

$$P(x,t) = p_0 + p(x,t), \quad (2.5)$$

$$\varrho(x,t) = \rho_0 + \rho(x,t), \quad (2.6)$$

donde ρ_0 corresponde a la densidad de equilibrio (ambiente), p_0 es la presión ambiente (atmosférica), y $\rho(x,t)$, $p(x,t)$ son las variaciones producidas por las perturbaciones acústicas en la densidad y presión instantáneas, respectivamente.

Las variables producidas por la perturbación acústica $p(x,t)$ y $\rho(x,t)$, pueden asumirse como pequeñas cantidades de primer orden. Suponiendo que $p \ll p_0$ y $\rho \ll \rho_0$, (2.1) y (2.2) pueden ser linealizadas con respecto a algún comportamiento en estado estacionario definido por p_0 y ρ_0 . Dicha linealización produce las siguientes ecuaciones

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - \eta \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0. \quad (2.8)$$

Por otra parte, como el fluido es compresible, se satisface la siguiente relación constitutiva (Kinsler et al., 2000)

$$\rho(x,t) = \frac{1}{c^2} p(x,t). \quad (2.9)$$

La rapidez del sonido c [m/s], está dada por Castellan (1983)

$$c = \sqrt{\frac{\zeta RT}{\mathcal{M}}}, \quad (2.10)$$

donde $\zeta = C_p/C_v$ es el índice adiabático que es el cociente entre las capacidades caloríficas a presión y volumen constantes, respectivamente; R , es la constante universal de los gases

ideales [J/mol·K]; T es la temperatura termodinámica [K]; y \mathcal{M} es la masa molar de la sustancia como medio de propagación [kg/mol].

Manipulando matemáticamente (2.7), (2.8) y (2.9) de acuerdo con Liu et al. (2015), se obtiene

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{\eta}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^3 p(x,t)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2}, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{\eta}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^3 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}. \quad (2.12)$$

Transformando ambas ecuaciones al dominio de la frecuencia, por medio de la transformada de Laplace, se obtiene

$$\frac{d^2 p(x,s)}{dx^2} = \gamma^2(s)p(x,s), \quad \frac{d^2 u(x,s)}{dx^2} = \gamma^2(s)u(x,s), \quad (2.13)$$

y

$$\gamma(s) = \frac{s}{c} (1 + \delta_v s)^{-1/2} \quad (2.14)$$

es la variable de propagación; $\delta_v = \nu/c^2$ y $\nu = \eta/\rho_0$ son el factor de fricción causado por la viscosidad y el coeficiente de viscosidad cinemática, respectivamente.

De acuerdo con Blackstock (2000), para aire y agua a 20°C, los valores de ν y c son $1.50 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, $c = 343 \text{ m/s}$; y $1.004 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ y $c = 1480 \text{ m/s}$, respectivamente. Por consecuente, los valores correspondientes de δ_v , $1.275 \times 10^{-10} \text{ s}$ y $4.584 \times 10^{-13} \text{ s}$, son muy pequeños. Esto permite la aproximación de (2.14) con únicamente los dos primeros términos de su expansión binomial como

$$\gamma(s) = \frac{s}{c} - \alpha_v s^2, \quad (2.15)$$

donde $\alpha_v = \delta_v/2c$, es llamado el término de absorción debido a la viscosidad.

Considerando la solución de (2.13) con condiciones de frontera en los puntos x_1 y x_2 de la línea, tal que $x_1 < x_2$, de acuerdo con Chaudhry (2013) se obtiene

$$\begin{bmatrix} p(x_2, s) \\ u(x_2, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma(s)l & -Z(s) \sinh \gamma(s)l \\ -\frac{\sinh \gamma(s)l}{Z(s)} & \cosh \gamma(s)l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(x_1, s) \\ u(x_1, s) \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

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 (2.16) que describe la propagación de una onda por un segmento de tubería sin discontinuidades 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, la dependencia de s es omitida y el vector de estados del fluido en el punto x es definido como

$$\chi(x) = \begin{bmatrix} p(x, s) \\ u(x, s) \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Así, (2.16) se reduce a

$$\chi(x_2) = M_l \chi(x_1), \quad (2.18)$$

donde la matriz de transferencia para un segmento de línea nominal de longitud l esta dado por

$$M_l = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & -Z \sinh \gamma l \\ -\frac{\sinh \gamma l}{Z} & \cosh \gamma l \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

2.2. Modelos de Fallas Concentradas

En general, las instalaciones de tuberías incluyen diversos componentes distribuidos y puntuales, los cuales producen alteraciones en la propagación de ondas acústicas. Un efecto similar es producido por una falla. Un componente puntual (concentrado) en un punto x_j de la línea, es modelado como una matriz de dos puertos, la cual relaciona al estado del fluido antes y después del componente por medio de

$$\chi(x_j^+) = P_j \chi(x_j^-), \quad (2.20)$$

donde $x_j^+ = x_j + \varepsilon$, $x_j^- = x_j - \varepsilon$, con $\varepsilon \rightarrow 0$, y la matriz P_j relaciona al estado aguas arriba y aguas abajo del componente. Así, P_j puede ser el modelo de una junta, un ramal, un bloqueo,

una válvula, una reducción o una fuga localizada entre dos secciones de tubería.

Aquí, se consideran tres tipos específicos de fallas:

1. Una reducción de área de s_1 a s_2 con $r_e = s_1/s_2$, es modelada por (Munjal, 1987)

$$P_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & r_e \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

2. El modelo de una fuga es

$$P_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\xi & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

donde ξ depende de la razón de la velocidad con respecto a la presión nominales (para más detalle véase Chaudhry (2013)).

3. Un bloqueo puede ser modelado como

$$P_b = \begin{bmatrix} 1 & -B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

donde B depende del tamaño del bloqueo, pérdida de presión y tasa de flujo en el punto intermedio x_j (Chaudhry, 2013).

Por otra parte, un punto de registro o medición del estado del fluido puede ser asociado con un modelo llamado celda unitaria con $P_{reg} = I$, donde I es la matriz identidad.

2.3. Interconexión de Secciones en un Ducto

2.3.1. Punto de Registro Aguas Arriba de las Fallas

Sea un tubería de longitud L [m] con un punto de registro localizado en $l_1 = x_0$, y sean n fallas con sus respectivos modelos de dos puertos P_i , en las posiciones x_i , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Asumiendo que la posición de las fallas son tales que $x_0 < x_i < x_{i+1}$, de acuerdo con Chaudhry

(2013), el modelo completo de dos puertos de la onda acústica está dado por

$$\chi(L) = Mf_L \chi(0) = \begin{bmatrix} mf_L(11) & mf_L(12) \\ mf_L(21) & mf_L(22) \end{bmatrix} \chi(0), \quad (2.24)$$

donde

$$Mf_L = M_{l_{n+2}}(P_n M_{l_{n+1}})(P_{n-1} M_{l_n})(\dots)(P_0 M_{l_1}),$$

y las matrices de transferencias M_{l_k} , $k \in \{1, 2, \dots, n+2\}$, corresponden a las secciones de tuberías sanas de longitud l_k (2.19) con $L = \sum l_k$. La Figura 2.1 muestra la interconexión global de los segmentos con fallas.

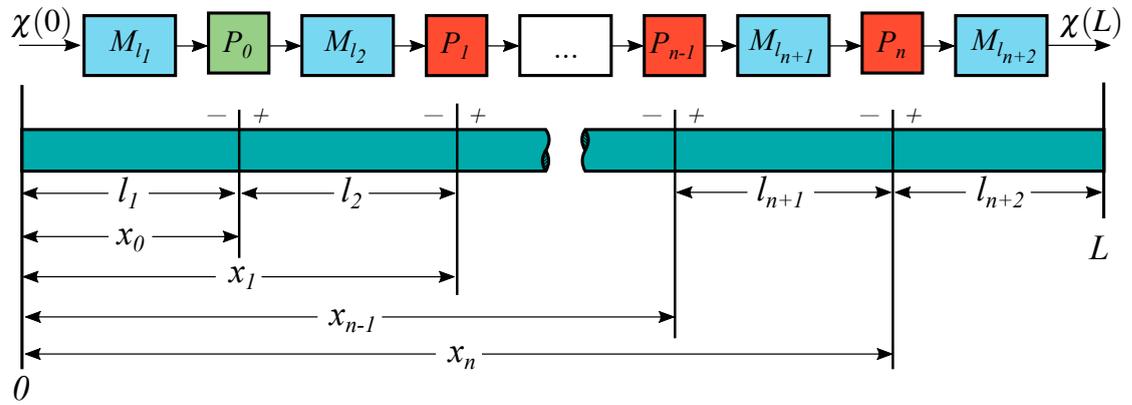


Figura 2.1: Interconexión de secciones en una tubería con un punto de registro aguas arriba de las fallas

Note que el vector de estado en el punto de registro $\chi(x_0)$ satisface las siguientes ecuaciones en términos de las condiciones de frontera de la línea (Oviedo, 2019)

$$\chi(x_0) = M_{l_1} \chi(0), \quad \chi(x_0) = (Mf_{L-x_0})^{-1} \chi(L), \quad (2.25)$$

donde

$$\begin{aligned} (Mf_{L-x_0})^{-1} &= (M_{l_{n+2}} P_n M_{l_{n+1}} P_{n-1} M_{l_n} \dots P_2 M_{l_3} P_1 M_{l_2})^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} \tilde{m}f(11) & \tilde{m}f(12) \\ \tilde{m}f(21) & \tilde{m}f(22) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Por lo tanto, el estado de la onda en el punto de registro $\chi(x_0)$ puede escribirse en términos

de las condiciones de frontera de la tubería $\chi(0)$ y $\chi(L)$ como

$$\chi(x_0) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} M_{l_1} & (M_{f_{L-x_0}})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi(0) \\ \chi(L) \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

2.3.1.1. Condiciones de Frontera: Caso 1

Para analizar el modelo (2.26) 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 $p(L)$, se pueden obtener por medio de (2.24), obteniéndose

$$\chi(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{mf_L(21)}{mf_L(22)} \end{bmatrix} p(0), \quad \chi(L) = \begin{bmatrix} \frac{\det M_{f_L}}{mf_L(22)} \\ 0 \end{bmatrix} p(0). \quad (2.27)$$

Sustituyendo estas condiciones en (2.26), la función de transferencia general $G_f^-(s)$ de la fuente de presión $p(0)$ a la presión de registro $p(x_0)$ es

$$G_f^-(s) = \frac{p(x_0)}{p(0)} = \frac{1}{2} \left(m_{l_1}(11) + \frac{\tilde{m}f(11) \det M_{f_L} - m_{l_1}(12)mf_L(21)}{mf_L(22)} \right). \quad (2.28)$$

2.3.2. Punto de Registro Aguas Abajo de las Fallas

Si se asume que las fallas se encuentran aguas arriba del punto de registro, por simetría, también se puede obtener la función de transferencia considerando nuevamente una tubería de longitud L con un punto de registro localizado en x_n , y n fallas con sus respectivos modelos de dos puertos P_i , en las posiciones x_i , $i \in \{0, 1, \dots, n-1\}$. Asumiendo que las posiciones de las fallas son tales que $x_i < x_{i+1}$, el modelo completo de la onda acústica está dado por (2.24). La Figura 2.2 muestra la interconexión global de los segmentos con fallas.

El vector de estado en el punto de registro x_n satisface las siguientes ecuaciones en términos de las condiciones de frontera de la línea

$$\chi(x_n) = M_{f_{x_n}} \chi(0), \quad \chi(x_n) = (M_{l_{n+2}})^{-1} \chi(L), \quad (2.29)$$

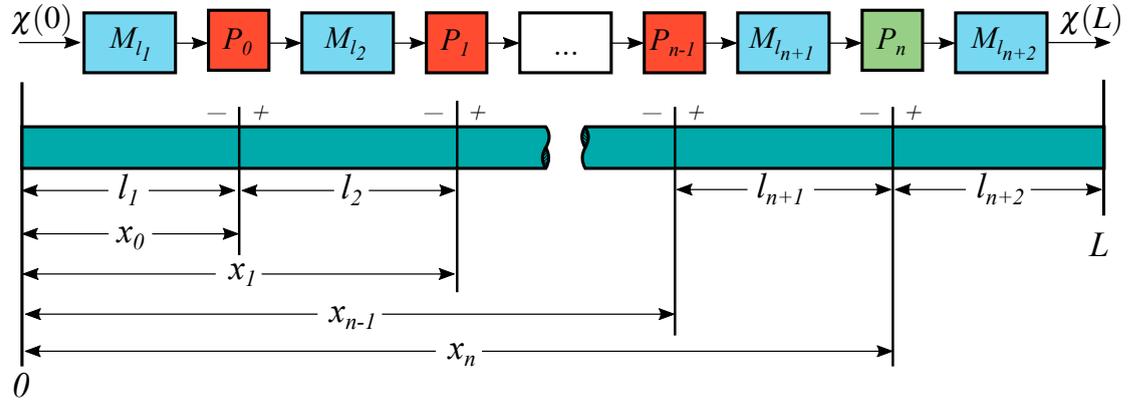


Figura 2.2: Interconexión de secciones en una tubería con un punto de registro aguas abajo de las fallas

donde

$$Mf_{x_n} = M_{l_{n+1}}P_{n-1}M_{l_n}\dots P_2M_{l_3}P_1M_{l_2}P_0M_{l_1} = \begin{bmatrix} \tilde{m}f_{x_n}(11) & \tilde{m}f_{x_n}(12) \\ \tilde{m}f_{x_n}(21) & \tilde{m}f_{x_n}(22) \end{bmatrix}.$$

Por lo tanto, el estado de la onda en el punto de registro x_n puede ser escrito en términos de las condiciones de frontera de la tubería $\chi(0)$ y $\chi(L)$ por

$$\chi(x_n) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Mf_{x_n} & (M_{l_{n+2}})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi(0) \\ \chi(L) \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

2.3.2.1. Condiciones de Frontera: Caso 2

Ahora se analiza el modelo de propagación (2.30). Aguas arriba de la línea, la presión se asume como constante, por lo que $p(0) = 0$, y aguas abajo se considera a $p(L)$ como una fuente sonora. Las dos condiciones de frontera $u(0)$ y $u(L)$ pueden ser obtenidas por medio de (2.24) como

$$\chi(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{mf_L(12)} \end{bmatrix} p(L), \quad \chi(L) = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{mf_L(22)}{mf_L(12)} \end{bmatrix} p(L). \quad (2.31)$$

Sustituyendo estas condiciones en (2.30), la función de transferencia general $G_f^+(s)$ desde la fuente de presión $p(L)$ a la presión registrada $p(x_n)$ es descrita por

$$G_f^+(s) = \frac{1}{2} \left(m_{l_{n+2}}(22) + \frac{\tilde{m}f_{x_n}(12) - m_{l_{n+2}}(12)m_{fL}(22)}{m_{fL}(12)} \right). \quad (2.32)$$

Las ecuaciones (2.26) y (2.30) son válidas para cualquier fuente de excitación acústica en los extremos de la línea. Estos modelos generales con pérdidas por absorción no han sido reportados y son de las principales contribuciones de este trabajo. En la siguiente sección, se utilizará la ecuación (2.28) para obtener las funciones de transferencias asociadas a cada una de las fallas consideradas en este trabajo.

2.4. Funciones de Transferencia

A continuación, se obtienen las funciones de transferencia para una tubería nominal y para una tubería con una falla considerando las condiciones de frontera del Caso 1, donde por simplicidad se omitirá el superíndice – de $G_f(s)$. Para las condiciones de frontera del Caso 2 se da únicamente la función resultante. Las funciones de transferencia asociadas a cada una de las fallas, incluyendo el caso nominal, se pueden expresar por medio de una función de transferencia general que depende del coeficiente de reflexión de presión. Siguiendo un procedimiento similar, es posible obtener la expresión general de la función de transferencia para el caso de dos fallas, el cual es descrito por medio de sus coeficientes de reflexión y transmisión.

La Figura 2.3 muestra la interconexión de secciones para el caso de una falla.

2.4.1. Tubería sin Falla

Considerando condiciones sin falla (i.e. $P_1 = I$) en el ducto y sustituyendo los elementos de M_{l_1} y $(M_{f_{L-l_1}})^{-1}$ en (2.28), después de algunas simplificaciones, se obtiene

$$G_n(s) = \frac{\cosh \gamma l_2}{\cosh \gamma(l_1 + l_2)}. \quad (2.33)$$

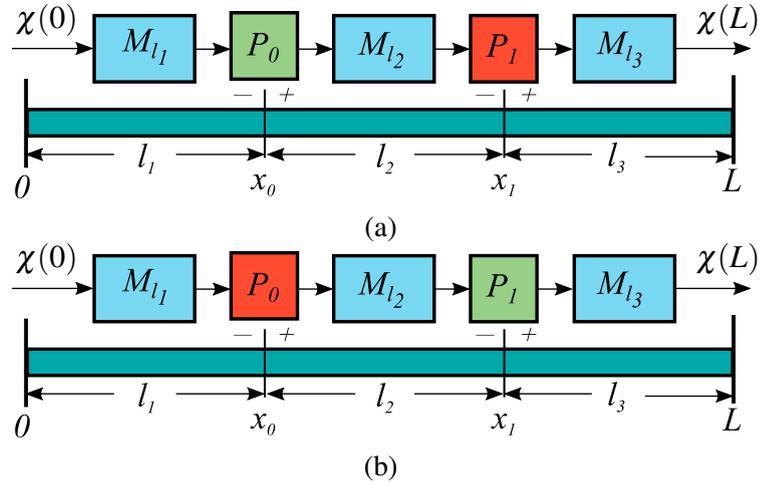


Figura 2.3: Interconexión de secciones en una tubería con un punto de registro: a) aguas arriba y b) aguas abajo de la falla

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

$$G_n = e^{-l_1\gamma} = e^{-\frac{l_1}{c}s + \alpha_v l_1 s^2}. \quad (2.34)$$

Esto nos indica que la función de transferencia es una función exponencial de la forma

$$g(s) = e^{c_1 s + c_2 s^2} \quad (2.35)$$

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

Para las CF del Caso 2, la función de transferencia es

$$G_n^+ = e^{-l_3\gamma}. \quad (2.36)$$

2.4.2. Tubería con Reducción

Sea $P_1 = P_r$ (2.21) entonces

$$G_r(s) = \frac{r_e \cosh \gamma l_2 \cosh \gamma l_3 + \sinh \gamma l_2 \sinh \gamma l_3}{r_e \cosh \gamma(l_1 + l_2) \cosh \gamma l_3 + \sinh \gamma(l_1 + l_2) \sinh \gamma l_3}, \quad (2.37)$$

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) entonces la ecuación anterior se

reduce a

$$G_r = e^{-l_1\gamma} \frac{1 + \Gamma_r e^{-2l_2\gamma}}{1 + \Gamma_r e^{-2(l_1+l_2)\gamma}} \quad (2.38)$$

donde

$$\Gamma_r = \frac{r_e - 1}{r_e + 1} \quad (2.39)$$

es el coeficiente de reflexión de presión para el escenario con una reducción, y el coeficiente de transmisión está dado por

$$T_r = 1 + \Gamma_r. \quad (2.40)$$

Análogamente, para las CF del caso 2, la función de transferencia es

$$G_r^+ = e^{-l_3\gamma} \frac{1 - \Gamma_r e^{-2l_2\gamma}}{1 - \Gamma_r e^{-2(l_2+l_3)\gamma}}. \quad (2.41)$$

2.4.3. Tubería con Fuga

Por otra parte, si se considera una fuga con modelo (2.22), la función de transferencia está dado por

$$G_l(s) = \frac{\xi Z \sinh \gamma l_2 \cosh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_2 + l_3)}{\xi Z \sinh \gamma(l_1 + l_2) \cosh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_1 + l_2 + l_3)}. \quad (2.42)$$

Considerando una tubería de longitud infinita

$$G_l = e^{-l_1\gamma} \frac{1 + \Gamma_l e^{-2l_2\gamma}}{1 + \Gamma_l e^{-2(l_1+l_2)\gamma}}, \quad (2.43)$$

donde

$$\Gamma_l = \frac{-\xi Z}{\xi Z + 2} \quad (2.44)$$

es el coeficiente de reflexión de presión para una fuga, y el coeficiente de transmisión es

$$T_l = 1 + \Gamma_l. \quad (2.45)$$

Note que a diferencia del coeficiente de reflexión y transmisión para una reducción, estos dependen de s .

Sec. 2.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA GENERAL PARA UNA FALLA

De la misma manera, para las CF del Caso 2, la función de transferencia es

$$G_l^+ = e^{-l_3\gamma} \frac{1 + \Gamma_l e^{-2l_2\gamma}}{1 + \Gamma_l e^{-2(l_2+l_3)\gamma}}. \quad (2.46)$$

2.4.4. Tubería con Bloqueo

El último escenario aquí considerado es un bloqueo en la línea con $P_1 = P_b$, y la función de transferencia $G_b(s)$ es

$$G_b(s) = \frac{\frac{B}{Z} \cosh \gamma l_2 \sinh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_2 + l_3)}{\frac{B}{Z} \cosh \gamma(l_1 + l_2) \sinh \gamma l_3 + \cosh \gamma(l_1 + l_2 + l_3)}. \quad (2.47)$$

Asumiendo una tubería de longitud infinita

$$G_b = e^{-l_1\gamma} \frac{1 + \Gamma_b e^{-2l_2\gamma}}{1 + \Gamma_b e^{-2(l_1+l_2)\gamma}} \quad (2.48)$$

donde

$$\Gamma_b = \frac{B}{B + 2Z} \quad (2.49)$$

es el coeficiente de reflexión de presión para un bloqueo, y su coeficiente de transmisión es

$$T_b = 1 - \Gamma_b. \quad (2.50)$$

De la misma manera que el caso anterior, estos coeficientes dependen de s .

Finalmente, para las CF del Caso 2, la función de transferencia resulta

$$G_b^+ = e^{-l_3\gamma} \frac{1 + \Gamma_b e^{-2l_2\gamma}}{1 + \Gamma_b e^{-2(l_2+l_3)\gamma}}. \quad (2.51)$$

2.5. Función de Transferencia General para Una Falla

Las funciones de transferencia (2.34), (2.38), (2.43) y (2.48) pueden ser escritas de manera general como

$$G_f(s) = e^{-l_1\gamma} \frac{1 + \Gamma e^{-2l_2\gamma}}{1 + \Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma}} \quad (2.52)$$

donde Γ es de acuerdo al tipo de falla considerado. En la Figura 2.4 se representa por medio de un diagrama de bloques.

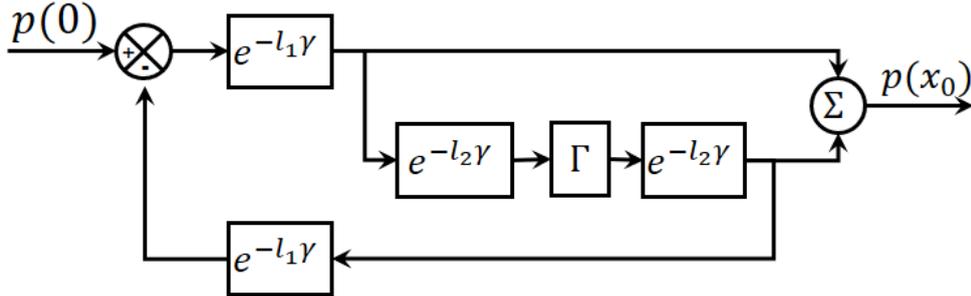


Figura 2.4: Diagrama de bloques para una falla

Por medio de esta representación, uno puede observar la manera en la que la señal $p(0)$ es registrada por primera vez en el punto de registro con un retardo dado por el bloque $e^{-l_1\gamma}$, y a la atenuación que recibe por el coeficiente de reflexión Γ debido a la falla; luego es registrada por segunda vez con un retardo dado por los bloques $e^{-l_2\gamma}$. Por otra parte, el bloque que aparece como retroalimentación negativa, nos indica las reflexiones que existen entre la fuente acústica y la falla.

La ecuación (2.52), puede ser escrita como

$$G_f(s) = e^{-l_1\gamma} \left(1 + \Gamma e^{-2l_2\gamma}\right) \left(1 + \Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma}\right)^{-1} \quad (2.53)$$

donde el factor $\left(1 + \Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma}\right)^{-1}$ puede expresarse por medio de una serie binomial con exponente negativo de la siguiente manera

$$\left(1 + \Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma}\right)^{-1} = 1 - \Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma} + \Gamma^2 e^{-4(l_1+l_2)\gamma} - \Gamma^3 e^{-6(l_1+l_2)\gamma} + \dots \quad (2.54)$$

con $|\Gamma e^{-2(l_1+l_2)\gamma}| < 1$. Al sustituir (2.54) en (2.53) y desarrollar algebraicamente resulta

$$G_f(s) = e^{-l_1\gamma} + \Gamma e^{-(l_1+2l_2)\gamma} - \Gamma e^{-(3l_1+2l_2)\gamma} - \Gamma^2 e^{-(3l_1+4l_2)\gamma} + \Gamma^2 e^{-(5l_1+4l_2)\gamma} + \Gamma^3 e^{-(5l_1+6l_2)\gamma} - \dots \quad (2.55)$$

2.5.1. Periodicidad de la Función de Transferencia

La periodicidad de la función de transferencia $G_f(s)$ ayudará a entender y analizar mejor el fenómeno físico asociado a dicha función. En este apartado, se describe el procedimiento para calcular el periodo de la función de transferencia general para una falla. Primero, se dan la definición de función periódica y dos propiedades de la función exponencial compleja.

De acuerdo con Ahlfors (1979):

Definición 2.5.1 Una función $f : \text{Dom}_f \subseteq \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ es periódica con periodo w , si $\exists w \in \mathbb{C}$ tal que $f(z) = f(z+w) \forall z \in \text{Dom}_f$.

Propiedad 2.5.1 La función exponencial compleja e^z es una función periódica con periodo $2\pi k j$ con $k \in \mathbb{Z}$, es decir $e^z = e^{z+2\pi k j}$.

Propiedad 2.5.2 La función exponencial compleja e^z tiene el mismo periodo que la función $a + be^z$ con $a, b \in \mathbb{R}$ y $b \neq 0$.

Sea la función de transferencia (2.52) con $l_1, l_2, c \in \mathbb{R}^+$ y sea $\alpha_v = 0$, entonces $\gamma = s/c$ y $\Gamma \in \mathbb{R}$. Considere el caso cuando $l_1, l_2 \in \mathbb{Q}^+$, es decir

$$l_i = \frac{p_i}{q_i}, \quad i \in \{1, 2\}, \quad p_i, q_i \in \mathbb{Z} \text{ y } q_i \neq 0 \text{ tal que } (p_i, q_i) = 1, \quad (2.56)$$

por lo que el signo de p_i es igual al signo de q_i . Al sustituir s por $j\omega$ en (2.52), se obtiene

$$G_f(j\omega) = e^{\frac{-l_1}{c}j\omega} \frac{1 + \Gamma e^{\frac{-2l_2}{c}j\omega}}{1 + \Gamma e^{\frac{-2(l_1+l_2)}{c}j\omega}}. \quad (2.57)$$

Supongamos que $G_f(j\omega)$ es periódica, por lo que de acuerdo con la Definición 2.5.1 se debe cumplir que

$$G_f(j\omega) = G(j\omega + j\omega_s), \quad \omega_s \in \mathbb{R}. \quad (2.58)$$

Entonces

$$e^{\frac{-l_1}{c}j\omega} \frac{1 + \Gamma e^{\frac{-2l_2}{c}j\omega}}{1 + \Gamma e^{\frac{-2(l_1+l_2)}{c}j\omega}} = e^{\frac{-l_1}{c}(j\omega + j\omega_s)} \frac{1 + \Gamma e^{\frac{-2l_2}{c}(j\omega + j\omega_s)}}{1 + \Gamma e^{\frac{-2(l_1+l_2)}{c}(j\omega + j\omega_s)}}.$$

Usando las Propiedades 2.5.1 y 2.5.2 se deben satisfacer las siguientes igualdades

$$\begin{aligned} e^{\frac{-l_1}{c}j\omega} &= e^{\frac{-l_1}{c}j\omega - 2\pi k_1 j} = e^{\frac{-l_1}{c}(j\omega + j\omega_s)}, \\ e^{\frac{-2l_2}{c}j\omega} &= e^{\frac{-2l_2}{c}j\omega - 2\pi k_2 j} = e^{\frac{-2l_2}{c}(j\omega + j\omega_s)}, \\ e^{\frac{-2(l_1+l_2)}{c}j\omega} &= e^{\frac{-2(l_1+l_2)}{c}j\omega - 2\pi k_3 j} = e^{\frac{-2(l_1+l_2)}{c}(j\omega + j\omega_s)}, \end{aligned}$$

y sin pérdida de generalidad considere a $k_1, k_2, k_3 \in \mathbb{Z}^+$. Por lo que igualando exponentes y haciendo uso de 2.56

$$\begin{aligned} \frac{l_1}{c}\omega_s = 2\pi k_1 &\Rightarrow k_1 = \frac{l_1}{2\pi c}\omega_s = \frac{p_1}{2\pi c q_1}\omega_s, \\ \frac{2l_2}{c}\omega_s = 2\pi k_2 &\Rightarrow k_2 = \frac{l_2}{\pi c}\omega_s = \frac{p_2}{\pi c q_2}\omega_s, \\ \frac{2(l_1+l_2)}{c}\omega_s = 2\pi k_3 &\Rightarrow k_3 = \frac{l_1+l_2}{\pi c}\omega_s = \frac{p_1 q_2 + p_2 q_1}{\pi c q_1 q_2}\omega_s. \end{aligned} \quad (2.59)$$

El problema se traduce en encontrar el menor valor de ω_s que satisfaga las tres ecuaciones anteriores. Propóngase

$$\omega_s = \frac{2\pi c q_1 q_2}{M_s}, \quad (2.60)$$

donde al sustituir esta ecuación en el conjunto de Ecuaciones (2.59) podemos cancelar los términos en el denominador. Finalmente, note que p_1 y p_2 deben ser múltiplos de M_s , donde el menor M_s es el máximo común divisor de p_1 y p_2 . Por lo tanto

$$\omega_s = 2\pi c \frac{q_1 q_2}{\text{m.c.d.}(p_1, p_2)}. \quad (2.61)$$

2.5.2. Periodicidad de la Magnitud de la Función de Transferencia

Al obtener la magnitud de la Ecuación (2.57) y considerando que $\alpha_v = 0$ resulta

$$|G_f(j\omega)| = \sqrt{\frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\frac{2\omega l_2}{c}\right)}{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\frac{2\omega(l_1+l_2)}{c}\right)}}, \quad (2.62)$$

la cual también es periódica.

Al seguir un procedimiento similar al presentado anteriormente, se puede demostrar que

el periodo para esta función es

$$\omega_g = \pi c \frac{q_1 q_2}{\text{m.c.d.}(p_1, p_2)}. \quad (2.63)$$

2.6. Función de Transferencia para Dos Fallas

La Figura 2.5 es un dibujo esquemático de la interconexión de secciones considerando dos fallas en el ducto aguas abajo de un punto de registro.

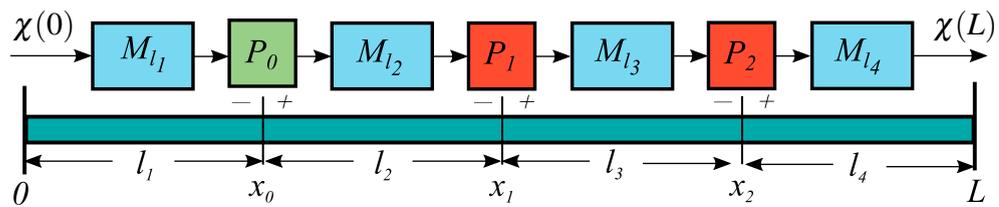


Figura 2.5: Interconexión de secciones con un punto de registro y dos fallas

Siguiendo un procedimiento similar al presentado en la Sección 2.4 para cada uno de los escenarios con falla y asumiendo que \$l_4 \gg l_1 + l_2 + l_3\$, a partir de (2.28) las funciones de transferencia pueden ser escritas de manera general como

$$G_{f_2}(s) = e^{-l_1 \gamma} \frac{1 + \Gamma_1 e^{-2l_2 \gamma} - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2l_3 \gamma} + \Gamma_2 (T_1 - \Gamma_1^2) e^{-2(l_2 + l_3) \gamma}}{1 + \Gamma_1 e^{-2(l_1 + l_2) \gamma} - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2l_3 \gamma} + \Gamma_2 (T_1 - \Gamma_1^2) e^{-2(l_1 + l_2 + l_3) \gamma}}, \quad (2.64)$$

donde los subíndices 1 y 2 indican el coeficiente de reflexión o transmisión, asociado a la primera y a la segunda fallas, respectivamente. En la Figura 2.6, la función \$G_{f_2}(s)\$ se representa por medio de un diagrama de bloques con \$E_i(s) = e^{-l_i \gamma(s)}\$, \$i \in \{1, 2, 3\}\$.

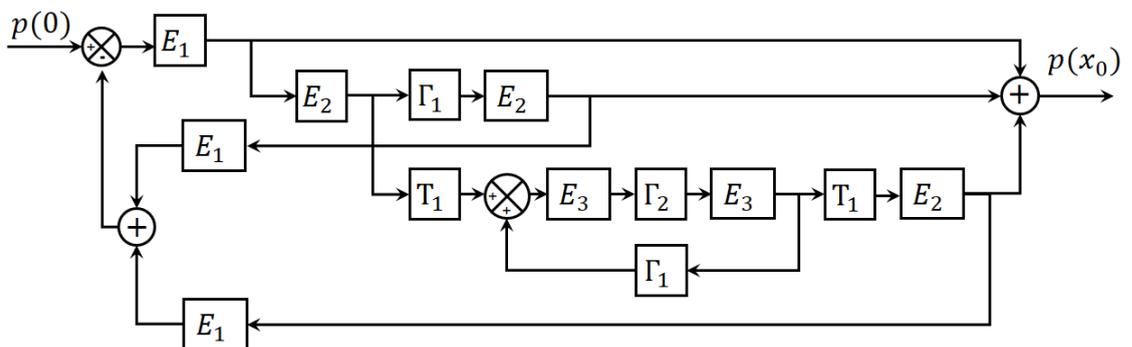


Figura 2.6: Diagrama de bloques para dos fallas

2.7. Diagrama de Bloques de la Función de Transferencia para n Fallas

Al seguir un razonamiento similar al efectuado para obtener las funciones de transferencia generales para el caso de una y dos fallas, es posible construir el diagrama de bloques de la Figura 2.7 que representa el caso cuando n fallas están presentes en el ducto de acuerdo al esquema de la Figura 2.1, donde $E_i(s) = e^{-l_i\gamma(s)}$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Del diagrama de bloques presentado podemos describir lo siguiente:

1. La señal de excitación de presión es registrada por primera vez en el punto de registro con un retardo dado por el bloque $E_1(s)$.
2. Esta señal se propaga hasta incidir sobre la primer falla con un retardo l_2 .
3. La señal incidente es dividida en dos señales: la señal reflejada y la señal transmitida; donde la magnitud de estas señales están dadas por sus coeficientes de reflexión y transmisión.
4. La señal reflejada es registrada en el punto de registro con un retardo l_2 , la cual continuará propagándose hasta incidir con la fuente de excitación. Este hecho está descrito por la retroalimentación negativa. Luego, el comportamiento de la propagación de esta señal continua de acuerdo a lo señalado en el punto 1.
5. La señal transmitida incide sobre la segunda falla con un retardo l_3 , donde esta señal es nuevamente dividida en dos señales de acuerdo al punto 3.
6. Las retroalimentaciones positivas que se observan, son las señales que se reflejan entre cualesquiera dos fallas.

La ventaja que tiene esta representación, es que puede ser implementada en *Simulink*® siempre y cuando los E_i corresponda a retardos puros, es decir $\alpha_v = 0$. Además, el punto de registro puede ser colocado arbitrariamente.

Sec. 2.7. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA n FALLAS

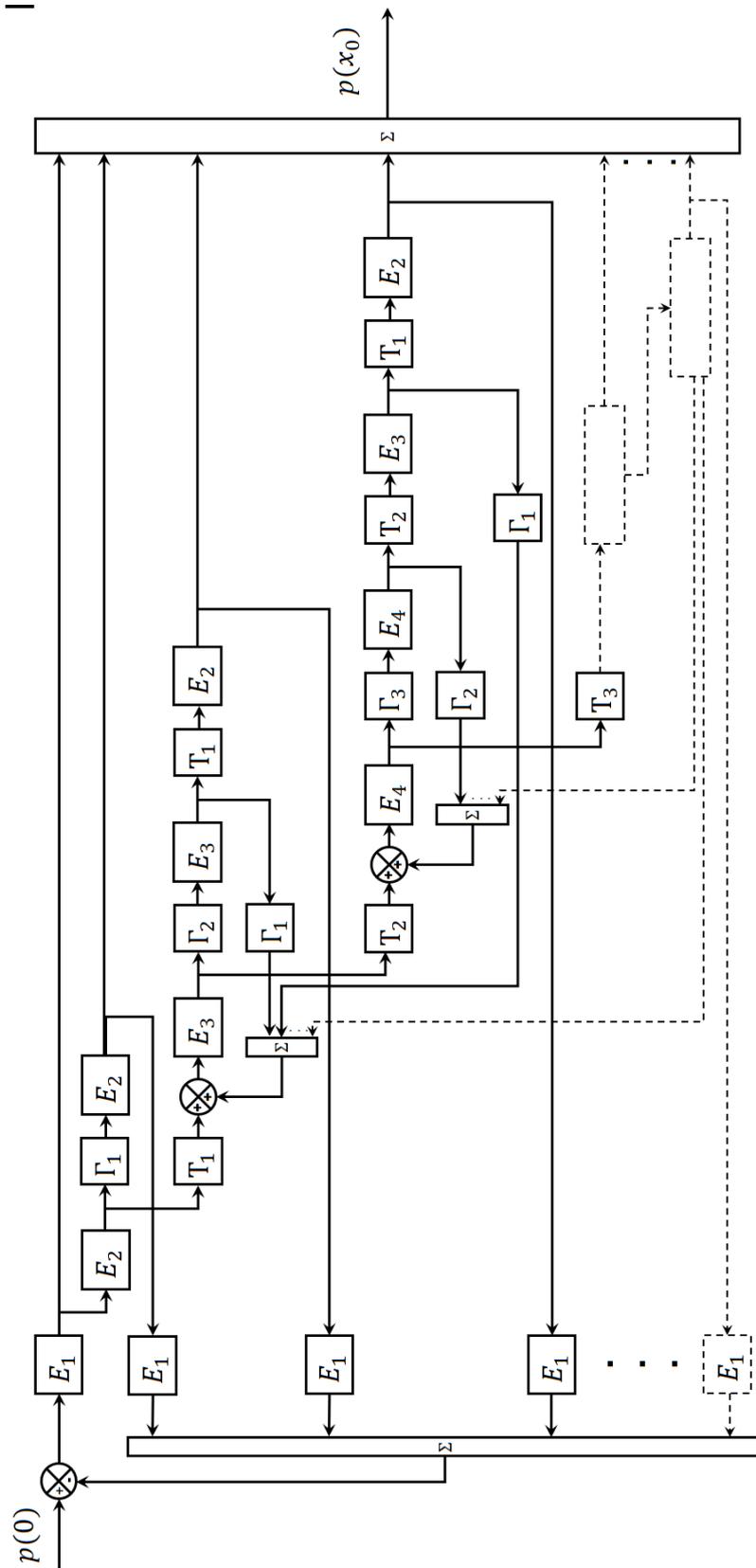


Figura 2.7: Diagrama de bloques para n fallas

Análisis de las Respuestas en Frecuencia y Transitoria

Para mostrar el análisis del comportamiento de las respuestas en frecuencia y transitoria de la presión registrada en el punto x_0 , las simulaciones presentadas en este capítulo consideran el caso en el que los parámetros están dados por la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros de las simulaciones

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

3.1. 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 (2.55)

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

uno puede ver que

- Cada término de la suma representa un frente de onda, donde los dos primeros son: la señal acústica de la fuente y la 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. Esto significa que el modelo se reduce a un conjunto de retardos.
- Sea q el coeficiente de γ en (2.55). Para analizar una ventana de T segundos, la Ecuación (2.55) 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 llevarse a la forma $\delta_1^n (1 + \delta_2)^{-n}$, donde $(1 + \delta_2)^{-n}$ puede expandirse por medio de una serie binomial con k términos, con la condición $|\delta_2| < 1$.

La expansión anterior incluye únicamente funciones del tiempo de las clases

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

o

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

Las funciones de la derecha corresponden a las de la izquierda con un término exponencial e^{-as} . Las transformadas inversas de estas clases pueden ser encontradas en [Campbell y Foster \(1931\)](#), en los números 728.5 y 731.1, las cuáles se presentan en la [Tabla 3.2](#).

La función de error $\text{erf}(t)$ está definida como

$$\text{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-u^2} du, \quad (3.1)$$

y $D_{\beta-1}(t)$ es la función cilíndrica parabólica de orden $\beta - 1$ la cual depende de $\text{erf}(t)$.

Con lo anterior, la obtención de la presión en el dominio del tiempo ha sido implementada y agregada en Mathematica ([Inc., 2018](#)).

Tabla 3.2: Transformadas Inversas de Laplace

$F(s)$	$f(t)$
$\frac{1}{s} e^{c_1 s + c_2 s^2}$	$\frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{t+c_1}{2\sqrt{c_2}} \right) + 1 \right) \mathcal{U}(t+c_1)$
$\frac{s^\beta}{s} e^{c_1 s + c_2 s^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi(2c_2)^\beta}} \exp \left(-\frac{t+c_1}{8c_2} \right) \times D_{\beta-1} \left(-\frac{t+c_1}{\sqrt{2c_2}} \right) \mathcal{U}(t+c_1)$

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 Figura 3.1, 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.

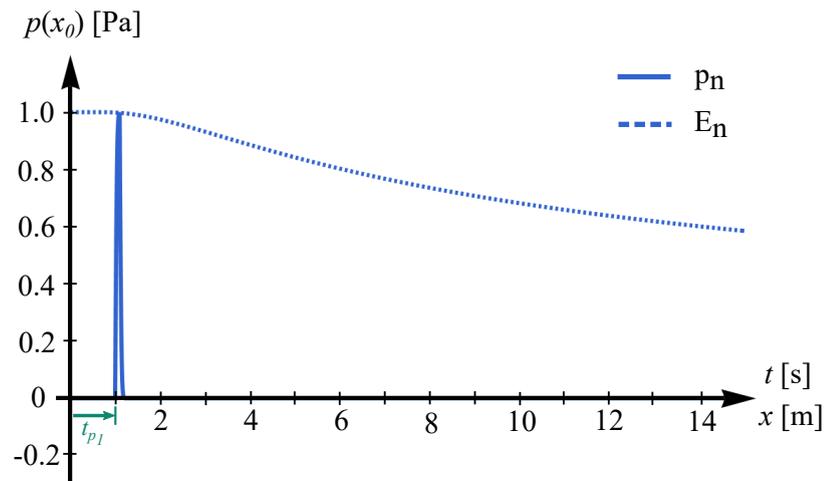


Figura 3.1: Envolvente y presión acústica con absorción para el ducto nominal

La línea discontinua E_n muestra la envolvente de presión cuya ecuación está dada por

$$E_n = \text{erf} \left[\frac{a}{2\sqrt{\alpha_v ct}} \right]. \quad (3.2)$$

3.1.1. Propiedades de la Propagación de la Onda

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 Figura 3.2.

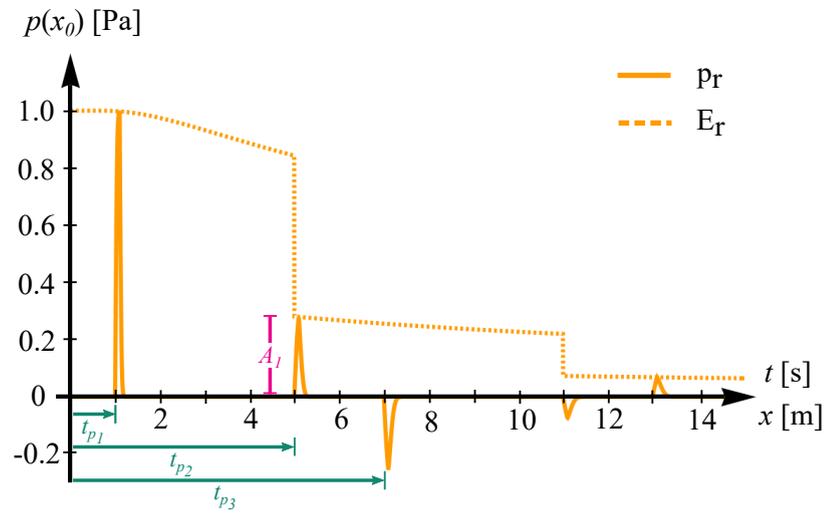
En la Figura 3.2a, el tiempo t_{p1} denota el tiempo de llegada de la onda de la fuente al punto de registro, y t_{p2} es el tiempo de llegada de la onda reflejada producida por la falla. Del comportamiento de las ondas, se encontraron las siguientes características:

- 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

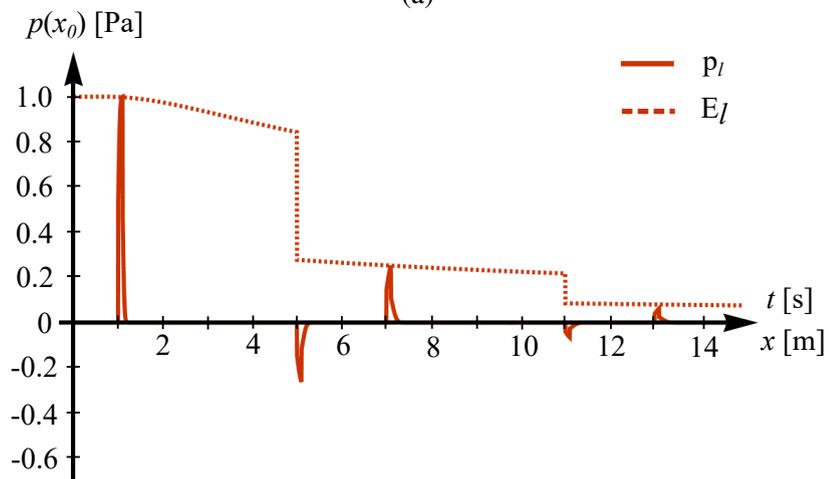
$$l_2 = \frac{t_{p2} - t_{p1}}{2} c.$$

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

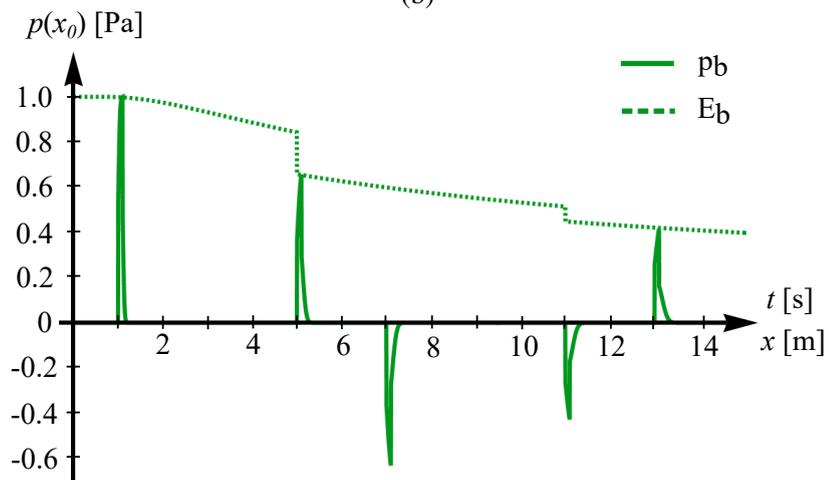
- El tercer pulso registrado es generado por la reflexión de la segunda onda en el tiempo $t_{p3} = t_{p2} + 2t_{p1}$.
- En el caso de fuga, se produce la onda reflejada de una fase opuesta a la fuente. Este fenómeno no está presente en las fallas de bloqueo y reducción. Este hecho es justificado ya 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 (Cheng1966).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2: Envolvente y presión acústica con absorción para el ducto: (a) con reducción, (b) con una fuga y (c) con un bloqueo

- Las ondas reflejadas son atenuadas, incluso en la ausencia de absorción. De los coeficientes de reflexión para las tres fallas (2.39), (2.44) y (2.49), las relaciones entre la magnitud de la falla y la amplitud A_1 , que corresponde a la magnitud del segundo frente de onda, puede ser calculado aproximadamente como:

- Reducción de área:

$$r_e = \frac{1 + A_1}{1 - A_1}.$$

- Fuga:

$$\xi = \frac{2}{\rho_0 c} \frac{|A_1|}{1 - |A_1|}.$$

- Bloqueo:

$$B = 2\rho_0 c \frac{A_1}{1 - A_1}.$$

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.

3.1.2. Análisis de la Envoltente de Presión

La ecuación (3.2)

$$E_n = \operatorname{erf} \left[\frac{a}{2\sqrt{\alpha_v ct}} \right],$$

permite obtener las envolventes de presión que se muestran en las Figuras 3.3 y 3.4.

La Figura 3.3 muestra cómo el comportamiento de la envoltente de presión E_n al variar la absorción manteniendo el ancho de pulso constante. A mayor absorción, mayor es la atenuación de la onda acústica.

La Figura 3.4 muestra como varía E_n al variar el ancho de pulso manteniendo la absorción constante. Como resultado de la gráfica mostrada en la Figura 3.4, cuanto mayor es el ancho de pulso, mayor es el alcance de la señal a lo largo del ducto, y viceversa. Esto significa que la detección de una falla está restringida por el ancho de pulso, debido a que si la falla está más allá del alcance de la señal, ésta no podrá ser detectada debido a la absorción.

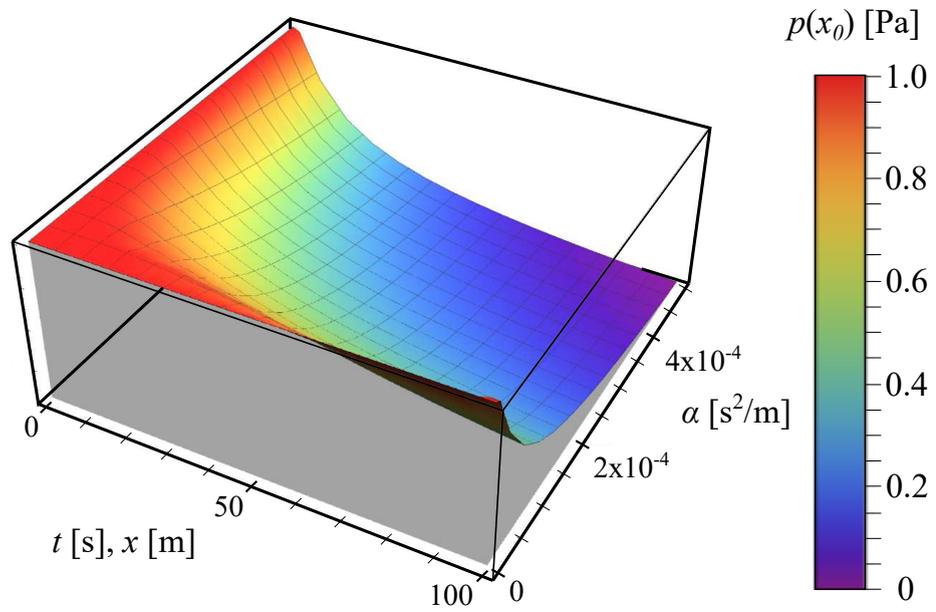


Figura 3.3: Efecto en la envolvente debido al cambio de absorción manteniendo el ancho de pulso constante

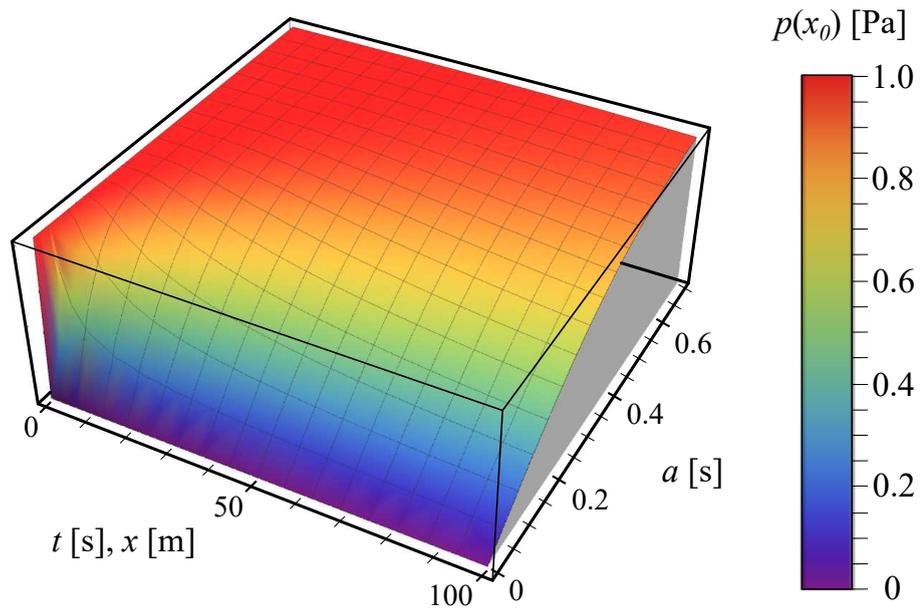


Figura 3.4: Efecto en la envolvente debido al cambio del ancho de pulso manteniendo la absorción constante

3.2. Análisis de la Respuesta en Frecuencia

Las características de la respuesta en frecuencia de la tubería dependen de las condiciones de frontera, de la configuración del sistema, de la rapidez de la onda, del efecto de fricción y de las fugas o bloqueos en una tubería (Sattar et al., 2008). Las tuberías actúan como filtros (Lee et al., 2005b) reforzando y transmitiendo las señales de entrada a frecuencias particulares (frecuencias de resonancia) y atenuando señales a otras frecuencias (frecuencias anti resonantes). La respuesta en frecuencia de $G_f(s)$ describe el comportamiento de la presión en la tubería ante varias frecuencias relacionando tanto la amplitud y fase de la entrada y la salida del sistema para cada frecuencia.

La Figura 3.5, muestra los diagramas de magnitud 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. Este periodo puede ser calculado por medio de (2.63) siempre y cuando $\alpha_v = 0$. Para los parámetros usados de acuerdo a la Tabla 3.1 el periodo es de $\omega_g = \pi$ rad/s. La Figura 3.5b muestra que para frecuencias altas la magnitud disminuye.

La Figura 3.6 muestra la magnitud de $G_f(s)$ al cambiar la ubicación de la falla. Observe que entre cada ω_g se generan $2n - 1$ máximos y mínimos, donde $n = x_1$. Esto permite localizar la falla partiendo de esta gráfica. La desventaja, es que el sistema debe ser excitado por señales con un amplio rango de frecuencias, lo que puede representar un riesgo para la instalación dependiendo de las condiciones físicas de la instalación y del tiempo que toma realizar la maniobra de excitación.

La Figura 3.7, muestra la ganancia de $G_f(s)$ al variar la magnitud de la falla manteniendo su posición en $x_1 = 3$. Mientras mayor es el parámetro de la falla, mayor será la amplitud de la onda reflejada para ciertas frecuencias.

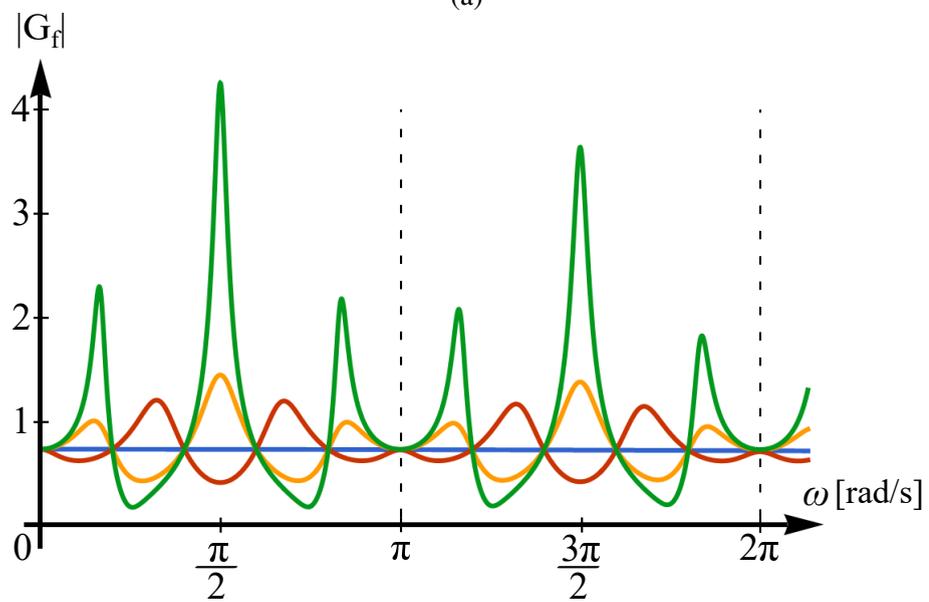
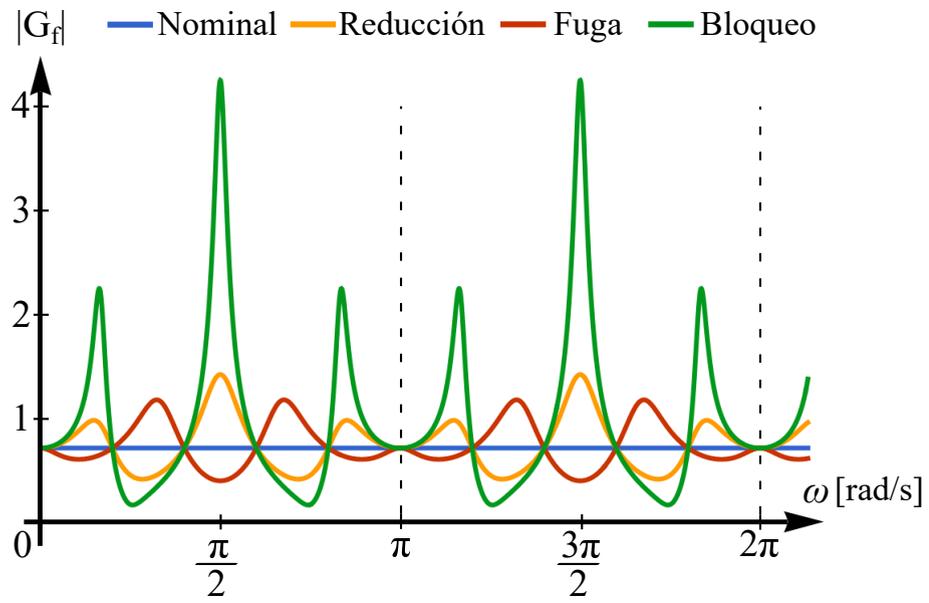


Figura 3.5: Ganancia de las funciones de transferencia: (a) sin absorción y (b) con absorción

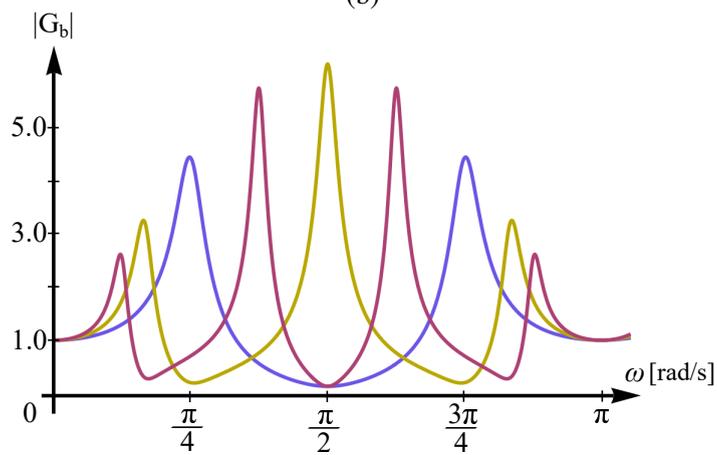
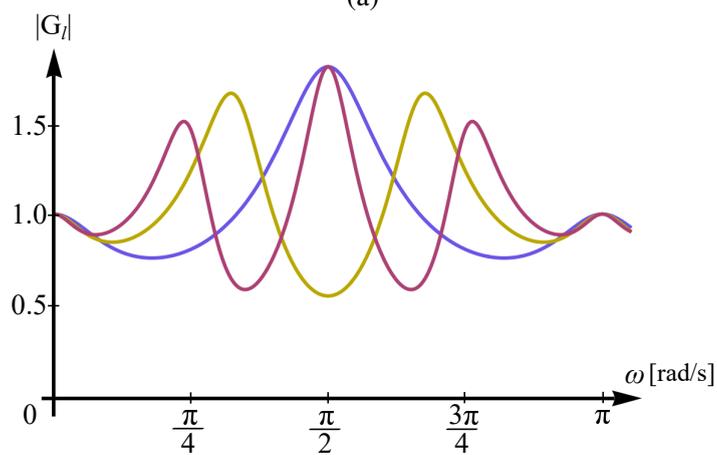
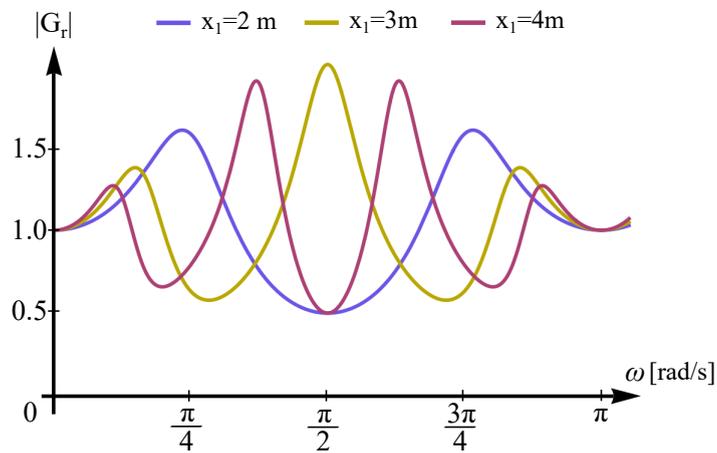


Figura 3.6: Ganancia de las funciones de transferencia a diferentes distancias sin absorción: (a) reducción, (b) fuga y (c) bloqueo

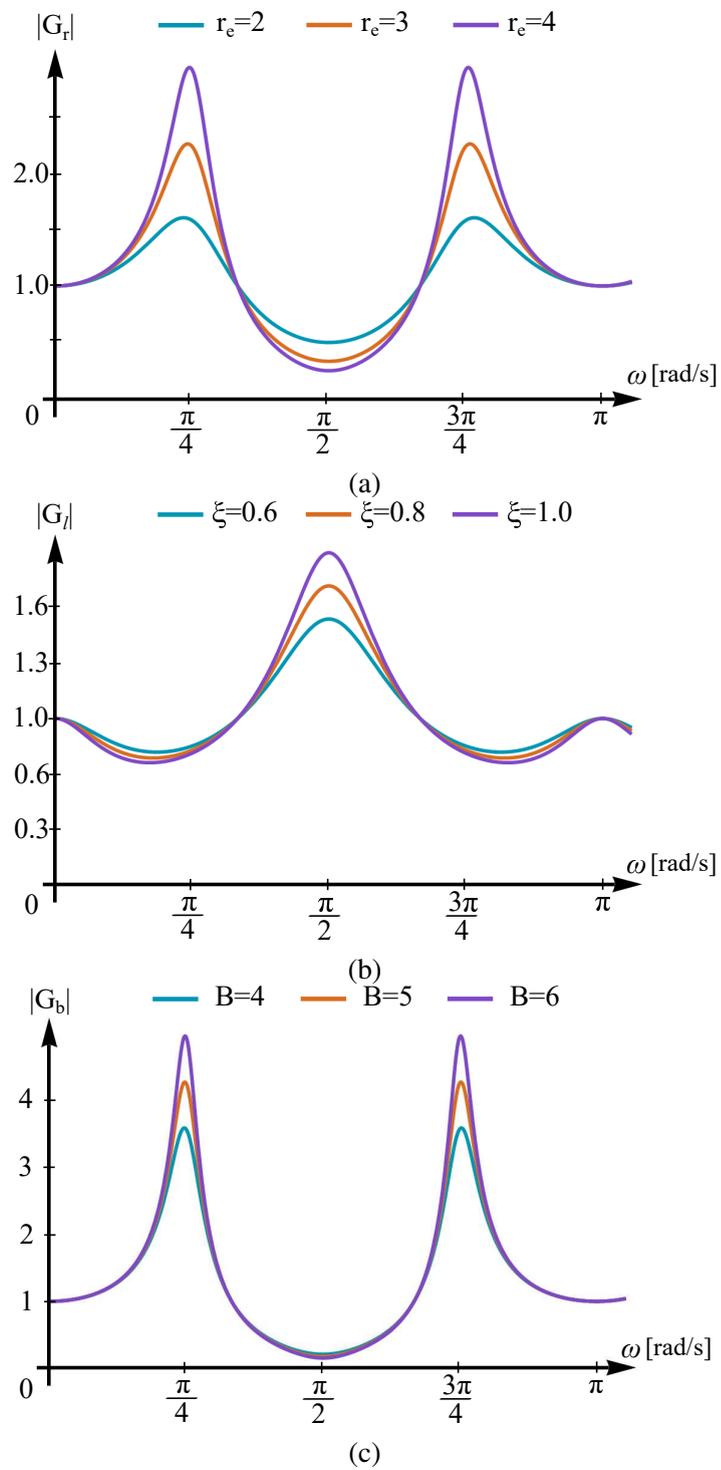


Figura 3.7: Ganancia de las funciones de transferencia a diferentes magnitudes sin absorción: (a) reducción, (b) fuga y (c) bloqueo

Capítulo 4

Conclusiones

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* (Inc., 2018).

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).

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

Si bien los resultados presentados no son concluyentes, brindan la posibilidad de ampliar el alcance de la técnica y diseñar un prototipo físico para el desarrollo de herramientas de diagnóstico de fallas en tuberías basadas en emisiones acústicas.

Bibliografía

- Adnan, N.F., Ghazali, M.F., Amin, M.M., y Hamat, A.M. (2015). Leak detection in gas pipeline by acoustic and signal processing - A review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 100, 012013. IOP Publishing. [2](#)
- 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*. [3](#)
- Ahlfors, L.V. (1979). *Complex Analysis*. McGraw-Hill, 3er edition. [23](#)
- Blackstock, D. (2000). *Fundamentals of physical acoustics*. John Wiley and Sons. [3](#), [10](#), [12](#)
- Brunone, B. y Ferrante, M. (2001). Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients. *J. Hydraul. Res.*, 39(5), 539–547. [4](#)
- Campbell, G.A. y Foster, R.M. (1931). *Fourier integrals for practical applications*. Technical publications (American Telephone and Telegraph Company).: Mathematical physics. Bell telephone laboratories. [30](#)
- Castellan, G.W. (1983). *Physical Chemistry*. Physical Chemistry. Addison-Wesley Publishing Company, 3 edition. [11](#)
- Chaudhry, M.H. (2013). *Applied Hydraulic Transients*. SpringerLink: Bücher. Springer Science & Business Media, 3rd edition. [12](#), [13](#), [14](#)
- CONAGUA y SEMARNAT (2018). Estadísticas del Agua en México 2018. Technical report, CONAGUA, SEMARNAT. [1](#)

BIBLIOGRAFÍA

- Cramer, M.S. (2012). Numerical estimates for the bulk viscosity of ideal gases. *Physics of Fluids*, 24(6). 10
- 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. 2
- Inc., W.R. (2018). Mathematica, Version 11.3. 30, 41
- Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A., y Sanders, J. (2000). *Fundamentals of Acoustics*. A Wiley-Interscience publication, 4 edition. 10, 11
- Lee, P., Vitkovsky, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J., Lee, P., Vítkovský, J., Simpson, M., y Liggett, J. (2005a). Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study. *Journal of Sound and Vibration*, 284(3), 1051–1075. 4
- Lee, P., Vítkovský, J., Simpson, M., y Liggett, J. (2005b). Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks. *J. Hydraul. Eng.*, 131(7), 596–604. 36
- 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. 12
- 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. 3
- 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. 3
- 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*. 3
- Munjaj, M.L. (1987). *Acoustics of Ducts and Mufflers With Application to Exhaust and Ventilation System Design*. A Wiley-Interscience publication. 14

BIBLIOGRAFÍA

- Oviedo, Á.B. (2019). *Respuesta ondulatoria ante una excitación acústica en un ducto presurizado*. Ph.D. thesis, Universidad Nacional Autónoma de México. [4](#), [5](#), [15](#)
- Pérez, R., Cugueró, M.A., Cugueró, J., y Sanz, G. (2014). Accuracy assessment of leak localisation method depending on available measurements. In *Procedia Engineering*, volume 70. [1](#)
- Renteria, F., Verde, C., y Torres, L. (2016). Locating leaks by using the step response of a pipeline. In *Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, SysTol*, volume 2016-Novem. [2](#)
- Sattar, A.M., Chaudhry, M.H., y Kassem, A.A. (2008). Partial blockage detection in pipelines by frequency response method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 76–89. [36](#)
- Sattar, A. y Chaudhry, M. (2008). Leak detection in pipelines by frequency response method. *J. Hydraul. Res.*, 26(1), 138–151. [2](#)
- Sharp, D.B. y Campbell, D.M. (1997). Leak detection in pipes using acoustic pulse reflectometry. *Acustica*, 83(3), 560–566. [4](#)
- Soldevila, A. (2018). *Robust Leak Localization in Water Distribution Networks Using Machine Learning Techniques*. Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. [1](#)
- Theodoridis, S. y Koutroumbas, K. (2009). *Pattern Recognition*. Academic Press an imprint of Elsevier. [5](#)
- Verde, C. y Torres, L. (eds.) (2017). *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. Springer. [1](#), [2](#)
- Vidal, J.L. y Silva, L.L. (2014). Acoustic reflectometry for blockages detection in pipeline. In *OTC Brasil*, 3382–3388. Offshore Technology Conference. [4](#), [41](#)
- White, F.M. (2006). *Viscous Fluid Flow*. College Ie. McGraw-Hill, 3 edition. [10](#)