



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

DIAGNOSTICADOR ACÚSTICO DE FALLAS EN DUCTOS

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

PRESENTA:  
FERMÍN ÓSCAR DELGADO SANTIAGO

TUTORA PRINCIPAL  
DRA. MARÍA CRISTINA VERDE RODARTE, II UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, JULIO DE 2021



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. Maya Ortiz Paul Rolando

Secretario: Dra. Torres Ortiz Flor Lizeth

1<sup>er.</sup> Vocal: Dra. Verde Rodarte María Cristina

2<sup>do.</sup> Vocal: Dr. Orduña Bustamante Felipe

3<sup>er.</sup> Vocal: M. I. Carrera Méndez Rolando

Tesis realizada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México.

**TUTORA DE TESIS:**

Dra. María Cristina Verde Rodarte



---

**FIRMA**



# Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que me han apoyado:

A la Dra. María Cristina Verde Rodarte que me impulsó, me brindó su ayuda y su orientación en todo momento y que, además, me abrió las puertas del Instituto de Ingeniería donde encontré un espacio de trabajo agradable y edificante.

A mis sinodales que me obsequiaron su tiempo y su atención con la mejor voluntad, y cuyos comentarios, observaciones y correcciones han permitido que este trabajo se enriquezca.

A todos mis profesores, quienes siempre han demostrado un genuino deseo de compartir su conocimiento y experiencia, así como a mis compañeros de generación y de laboratorio: Alejandra, Jorge, Jesús, Jared y Alejandro, pues siempre que acudí a ellos me brindaron su atención.

A Sonia, Laura y Fermín.

Agradezco también al CONACyT por la financiación de mis estudios, por ser una institución que permite la democratización de la ciencia en nuestro país y por contribuir con el ideal de crear personas libres poniendo a su alcance educación de primer nivel sin importar su condición económica u origen social.

# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| Índice general  | I         |
| Índice de figuras   | III       |
| Índice de tablas  | V         |
| Lista de símbolos   | VI        |
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Estado del arte . . . . .  | 3         |
| 1.2. Antecedentes . . . . .   | 4         |
| 1.3. Objetivos y alcance . . . . .                                    | 5         |
| 1.4. Contribuciones . . . . .   | 6         |
| 1.5. Conclusiones . . . . .   | 6         |
| 1.6. Estructura del trabajo . . . . .                                 | 7         |
| <b>2. Análisis de ondas acústicas en un ducto con daños puntuales</b> | <b>8</b>  |
| 2.1. Propagación de ondas en un medio disipativo . . . . .            | 8         |
| 2.1.1. Ondas planas y consideraciones geométricas . . . . .           | 9         |
| 2.2. Propagación de la onda en aire como medio . . . . .              | 10        |
| 2.2.1. Impedancia . . . . .   | 11        |
| 2.2.2. Secuencia del fenómeno reflexión-transmisión . . . . .         | 12        |
| 2.3. Identificación de daños en el tubo via reflectometría . . . . .  | 14        |
| 2.3.1. Modelo de transferencia de un segmento intacto . . . . .       | 15        |
| 2.3.2. Modelos puntuales de la fallas . . . . .                       | 17        |
| 2.3.3. Concatenación de componentes . . . . .                         | 19        |
| 2.4. Patrón de propagación antes fallas usando grafos . . . . .       | 25        |
| 2.5. Simulación con datos de excitación reales . . . . .              | 28        |
| <b>3. Diseño y Construcción del diagnosticador acústico</b>           | <b>31</b> |
| 3.1. Construcción física . . . . .                                    | 31        |
| 3.2. Caracterización experimental de la señal de excitación . . . . . | 35        |
| 3.3. Estimación automática del patrón de fuga . . . . .               | 38        |
| <b>4. Resultados experimentales</b>                                   | <b>41</b> |
| 4.1. Medición de los parámetros del dispositivo . . . . .             | 41        |
| 4.1.1. Atenuación de ondas . . . . .                                  | 41        |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>ÍNDICE GENERAL</i>   | II        |
| 4.1.2. Estimación de la velocidad de propagación de la onda . . . . . | 43        |
| 4.2. Sensibilidad del dispositivo a uniones del tubo . . . . .        | 47        |
| 4.2.1. Condición normal sin falla . . . . .                           | 47        |
| 4.2.2. Condición de Orificio de 0.012 [m] . . . . .                   | 48        |
| 4.2.3. Generación de residuo para un orificio de 0.012 [m] . . . . .  | 50        |
| <b>5. Conclusiones</b>  | <b>52</b> |
| <b>Referencias</b>  | <b>56</b> |



# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Longitud de las líneas de ductos instalados por año para los países miembros de la EGIG  | 1  |
| 1.2. Número de incidentes de fuga por año   | 2  |
| 1.3. Número acumulado de incidentes de fuga   | 2  |
| 1.4. Clasificación de los métodos de detección de fallas en ductos  | 3  |
| 1.5. Esquema del dispositivo bajo estudio   | 5  |
| 2.1. Esquema del corte transversal del tubo represento como la guía de onda   | 9  |
| 2.2. Fallas vistas como discontinuidades en la onda: a) Caso de un orificio y b) Bloqueo parcial  | 10 |
| 2.3. Reflexión de una onda en presencia de un cambio de medio   | 11 |
| 2.4. Secuencia de onda incidente y reflejad producida por una discontinuidad en el tubo: a) Medio rígido (bloqueo) y b) Relajación (orificio) | 13 |
| 2.5. Configuración del tubo para la detección de fallas   | 14 |
| 2.6. Proceso Cualitativo de propagación de la onda inyectada en el tubo   | 15 |
| 2.7. Aproximación espacial para los elementos puntuales   | 18 |
| 2.8. Concatenación de los modelos individuales  | 20 |
| 2.9. Diagrama a bloques del simulador de la función de transferencia $G_1$ en Simulink  | 24 |
| 2.10. Señal de excitación, pulso cuadrado, para el sistema con los parámetros de la Tabla 2.3   | 25 |
| 2.11. Respuesta para el pulso cuadrado en un bloqueo con $\ell_0 = 0.35$ [m], $\ell_1 = 3.00$ [m] y $c_0 = 343$ [m/s]                         | 25 |
| 2.12. Respuesta para el pulso cuadrado en una fuga con $\ell_0 = 0.35$ [m], $\ell_1 = 3.00$ [m] y $c_0 = 343$ [m/s]                           | 26 |
| 2.13. Grafo orientado de la propagación de las señales en el sistema $G_1$  | 26 |
| 2.14. Señal de excitación usada en el sistema simulado con los parámetros de la Tabla 2.3   | 29 |
| 2.15. Respuesta ante el bloqueo con una estimación de $\tau_f = 0.01906$ [s] y los parámetros de la Tabla 2.3 y                               | 29 |
| 2.16. Respuesta ante el orificio con una estimación de $\tau_f = 0.01906$ [m] y los parámetros de la Tabla 2.3                                | 30 |
| 3.1. Integración del dispositivo  | 32 |
| 3.2. Respuesta en frecuencia para el micrófono de medición Behringer ECM8000  | 33 |
| 3.3. Respuesta en frecuencia para el micrófono de medición DBX RTA-M  | 33 |
| 3.4. Respuesta en frecuencia típica para un altavoz de agudos (tweeter audio driver) similar a la usada en las pruebas de laboratorio         | 36 |
| 3.5. Señal cuadrada de entrada y la respuesta del altavoz integrado al dispositivo  | 36 |

|  |    |
|--|----|
| 3.6. a) Evolución de la fuente de excitación de la señal generada en la computadora 3.1 y b) Evolución de la presión del dispositivo a 0.35 [m] de la bocina . . . . . | 37 |
| 3.7. Respuesta del dispositivo con la misma forma de la señal de excitación pero con dos distintos factor de amplificación de la señal . . . . .                       | 38 |
| 3.8. Registro de entrada y salida del dispositivo . . . . .  | 39 |
| 3.9. Respuesta experimental con un conjunto de experimentos independientes . . . . .   | 39 |
| 4.1. Respuesta comparativa de atenuación al final del tubo de pruebas . . . . .  | 42 |
| 4.2. Retrasos para diferentes distancias $\ell_1$ . . . . .  | 44 |
| 4.3. Distintas partes de la señal registrada . . . . .   | 47 |
| 4.4. 30 repeticiones de la respuesta a un mismo pulso . . . . .  | 49 |
| 4.5. Señal promediada de 30 registros . . . . .  | 49 |
| 4.6. Diferencia entre las señales (orificio abierto y cerrado) . . . . .   | 50 |
| 4.7. Residuo generado por la resta de señales . . . . .  | 50 |
| 4.8. Orificio abierto y cerrado, (acercamiento al punto de interés) . . . . .  | 51 |

# Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Efectos posibles según las relaciones de las impedancias entre dos medios . . . . .  | 12 |
| 2.2. Funciones $s_{ij}$ y $t_{ij}$ para una fuga y un bloqueo . . . . .   | 21 |
| 2.3. Parámetros para detección de fallas . . . . .  | 24 |
| 2.4. Resultados de la propagación de la señal inyectada en el nodo $v_8$ . . . . .  | 27 |
| 2.5. Parámetros de la señal emuladora de una bocina . . . . .   | 28 |
| 4.1. Resultados experimentales para la prueba con el micrófono en distintas posiciones en relación al bloqueo . . . . .                 | 46 |
| 4.2. Valores exactos de la configuración experimental <i>versus</i> estimación basada en los tiempos de recorrido de la señal . . . . . | 46 |

# Lista de símbolos

|                                |  |              |  |
|--------------------------------|--|--------------|--|
| $A_i$                          | Amplitud de la señal $i$                     | $t$          | tiempo                                     |
| $c_0$                          | Velocidad del sonido promedio                | $U(z, s)$    | Velocidad en el punto $z$ (Laplace)        |
| $f$                            | Frecuencia                                   | $u$          | Velocidad                                  |
| $G_i$                          | Matriz de transferencia $i$                  | $u_0$        | Velocidad en estado estacionario           |
| $h_0$                          | Cabezal piezométrico estacionario            | $u^+$        | Velocidad de onda incidente                |
| $K_i$                          | Ganancia $i$                                 | $u^-$        | Velocidad de onda reflejada                |
| $L$                            | Longitud total                               | $u^{tr}$     | Velocidad de onda transmitida              |
| $\ell_i$                       | Longitud del segmento $i$                    | $V(t)$       | Voltaje en función del tiempo              |
| $M^{\ell_i}$                   | Matriz de transferencia del segmento $i$     | $v_i$        | Nodo $i$                                   |
| $P(z, s)$                      | Presión en el punto $z$ (Laplace)            | $X$          | Estado (presión y velocidad)               |
| $\mathcal{P}_j^{z_k}$          | Matriz de transferencia para $j$ en $z_k$    | $Z$          | Impedancia                                 |
| $p$                            | Presión                                      | $Z_i$        | Impedancia del elemento $i$                |
| $p_0$                          | Presión en estado estacionario               | $Z_{ac-esp}$ | Impedancia acústica específica             |
| $p^+$                          | Presión de onda incidente                    | $z$          | Posición                                   |
| $p^-$                          | Presión de onda reflejada                    | $z_i$        | Posición del elemento $i$                  |
| $p^{tr}$                       | Presión de onda transmitida                  | $z^+$        | Posición a la derecha (infinitesimal)      |
| $q$                            | Velocidad del fluido                         | $z^-$        | Posición a la izquierda (infinitesimal)    |
| $q_0$                          | Velocidad promedio del fluido                | $\beta$      | Coefficiente de bloqueo                    |
| $R$                            | Coefficiente de reflexión                    | $\gamma$     | Variable de propagación                    |
| $R_f$                          | Coefficiente de reflexión del elemento $f$   | $\Delta_j z$ | Longitud del elemento $j$ (fuga o bloqueo) |
| $S$                            | Área transversal                             | $\eta$       | Coefficiente de pérdida por viscosidad     |
| $S_i$                          | Área transversal del elemento $i$            | $\lambda$    | Coefficiente de esfuerzo dilatacional      |
| $\mathcal{S}^{\ell_i, \ell_i}$ | Matriz de transferencia $\mathcal{S}$        | $\mu$        | Coefficiente de viscosidad cortante        |
| $s$                            | Frecuencia compleja                          | $\rho_0$     | Densidad promedio                          |
| $\text{sinc}(\phi)$            | Función $\sin(\phi)/\phi$                    | $\delta_\nu$ | Coefficiente de viscosidad                 |
| $T$                            | Coefficiente de transmisión                  | $\xi$        | Coefficiente de fuga                       |
| $T_f$                          | Coefficiente de transmisión del elemento $f$ | $\omega$     | Frecuencia angular                         |

# Capítulo 1

## Introducción

El transporte de materiales por medio de ductos es de vital importancia para las sociedades modernas tanto por su impacto económico y ambiental como por sus implicaciones geopolíticas. La integridad de la infraestructura creada por los estados nacionales y las empresas privadas afecta la autonomía energética, el bienestar social, el desarrollo productivo y otras muchas áreas que son esenciales en todos los países (Balázs et al., 2020). En la tarea de dimensionar las repercusiones de eventos catastróficos relacionados con las redes de distribución por ductos, no solo existen enormes colecciones de datos y estadísticas que las naciones con políticas de transparencia ofrecen públicamente sobre sus redes y los incidentes asociados con ellos, sino que se da una creciente tendencia para organizar la información recabada y ofrecer un panorama completo del problema. (Cunha, 2012; Shengli y Yongtu, 2019; Chen et al., 2021)

En cuanto al aspecto económico se nota una clara tendencia a la alza en el número de incidentes y en el costo asociado debido a la obsolescencia de la infraestructura instalada para ductos con varios años de operación. Como un ejemplo, para ductos de la Eurozona (European Gas Pipeline Incident Data Group, 2018) *EGIG*, se tiene una incidencia de fugas generadas principalmente, y por orden de ocurrencia, por corrosión, defectos de fabricación e interferencia de agentes externos.

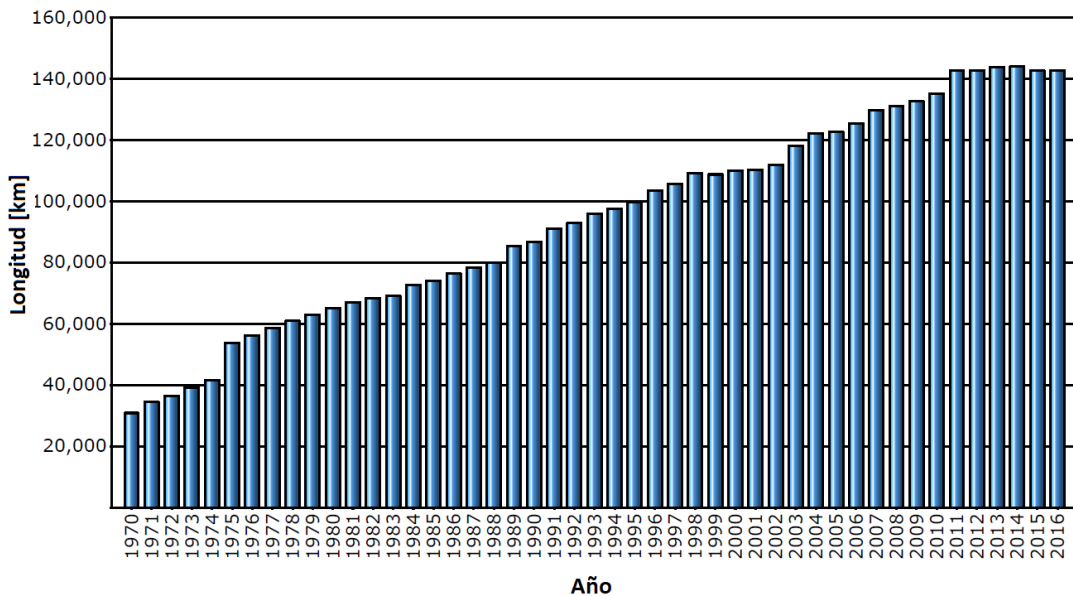


Figura 1.1: Longitud de las líneas de ductos instalados por año para los países miembros de la EGIG

Para esta organización en particular se tienen cifras de la longitud de líneas tendidas reportadas desde el año 1970 hasta el 2016 y de los incidentes por año y el acumulado en ese intervalo. Las Figuras 1.1 - 1.3 presentan cifras de manera comparativa para incidentes de fuga, estas son estadísticas ilustrativas de la incidencia de eventos, incluso en los países desarrollados; las cifras forman parte de un completo reporte que incluye una gran variedad de datos relevantes para el estudio de las fallas en sistemas de ductos considerando aspectos como el costo de vidas humanas en cada incidente.

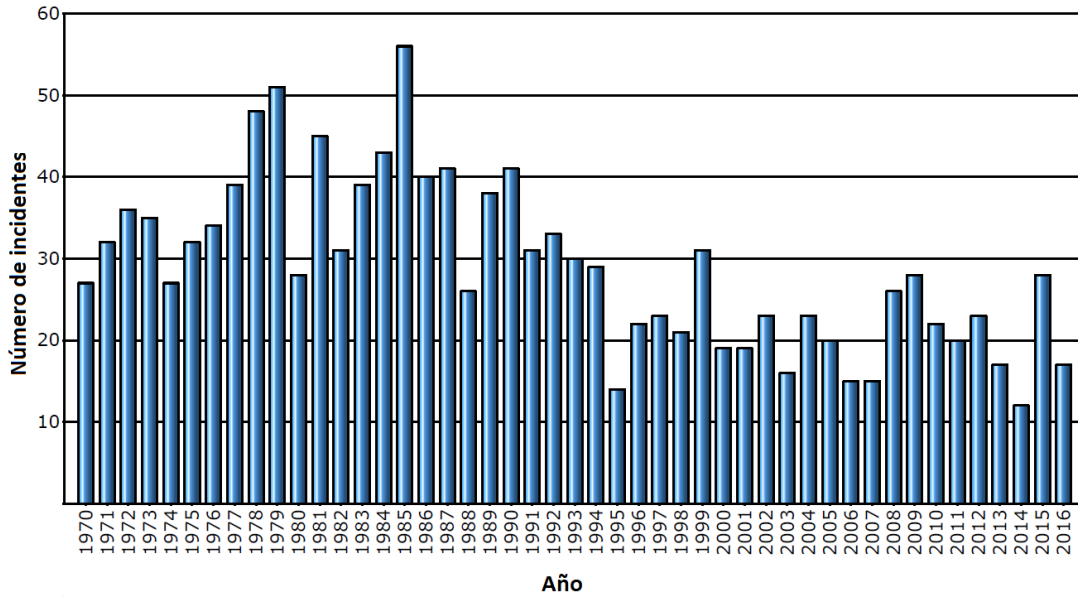


Figura 1.2: Número de incidentes de fuga por año

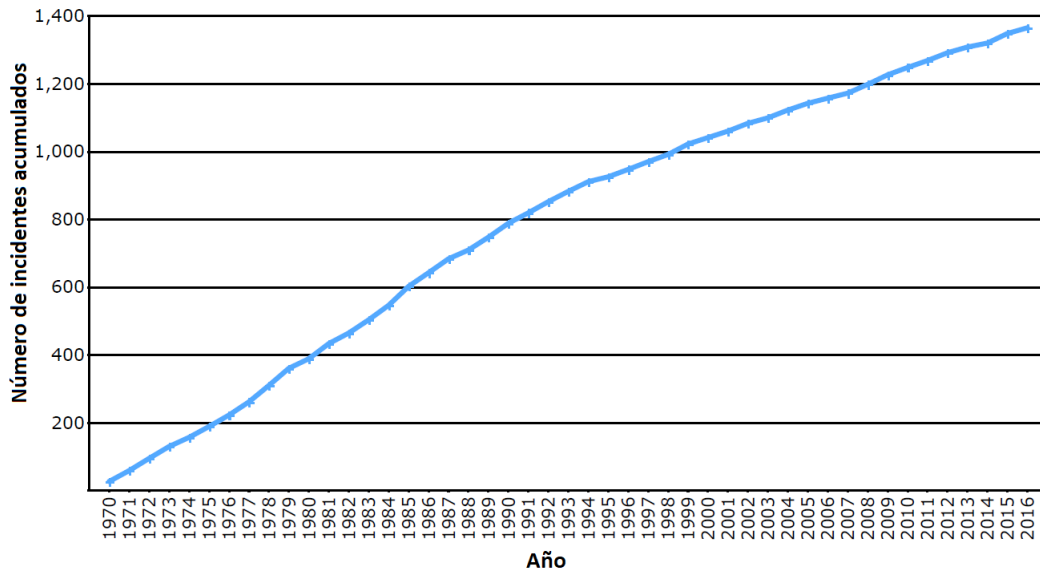


Figura 1.3: Número acumulado de incidentes de fuga

Por otro lado, para los Estados Unidos, el costo de vidas humanas y económico fue, para el año 2020, de 17 decesos, 43 lesionados y 286 600 226 dólares en 580 incidentes según cifras del Pipeline and

Hazardous Materials Safety Administration (2021); Biezma et al. (2020). Particularmente ilustrativo es el caso de pérdidas millonarias por afectaciones en la distribución de gas natural en México y Estados Unidos (Angulo y Barrera, 2020).

En este contexto se revela la necesidad de la investigación orientada al monitoreo de ductos de transporte de fluido que incluyen la detección, localización e identificación de las posibles fallas, ya sean ductos principales o de redes de distribución. Para ello se considera la operación tanto en línea como maniobras semiautomáticas. En particular, el método de detección de fallas semiautomático que se desea diseñar y construir está basado en el principio de reflectometría acústica.

## 1.1. Estado del arte

Los métodos de detección de fallas pueden clasificarse de distintas maneras, la Figura 1.4 (Zhang et al., 2015) presenta una clasificación basada en técnicas empleadas en la detección, cuya principal división se da entre los métodos basados en hardware y aquellos basados en software (Datta y Sarkar, 2016). Existen otros criterios de clasificación como el propuesto por Geiger (2014) que diferencia entre sistemas de detección internos y externos; y subclasificaciones que atienden el principio de funcionamiento, el grado de automatización y la capacidad de detección tiempo real, entre otros (Lu et al., 2020).

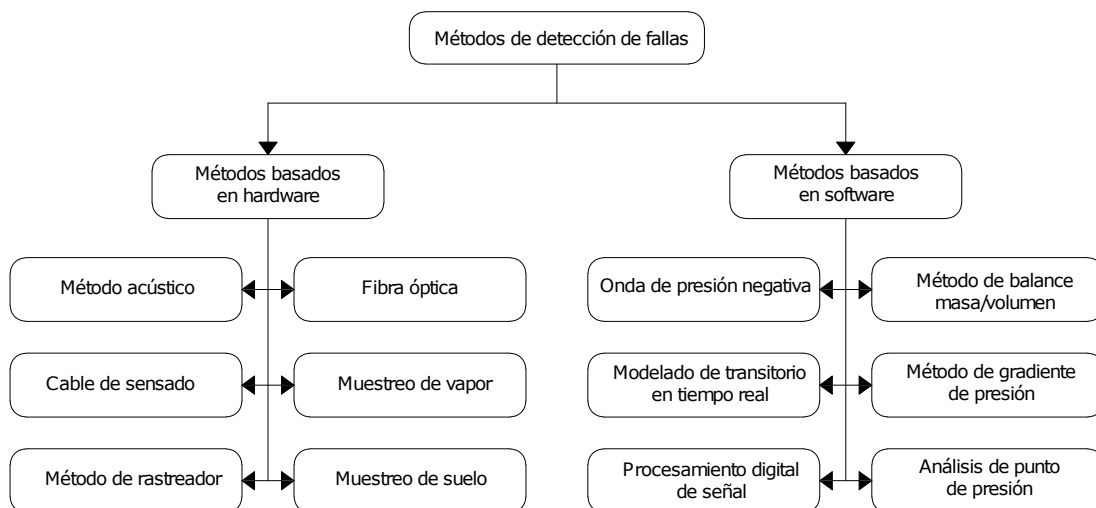


Figura 1.4: Clasificación de los métodos de detección de fallas en ductos

Los métodos basados en software requieren principalmente de los programas y algoritmos que utilizan bases de datos o modelo analíticos, pero no dejan de depender de los instrumentos que miden presión, flujo, y temperatura. La ventaja es que estos sensores son elementos normativos y ya estandarizados en los ductos de transporte. Por tanto no requieren instrumentación adicional. En cuanto al mecanismo que usa el software para la detección, ésta se logra a partir de una descripción del comportamiento del fluido en un ducto sano y con daño y una comparación con los datos reales con dicha descripción. Así, discrepancias entre las variables medidas del fluido y la estimación de dicha mediciones vía el modelo permiten inferir las condiciones en el ducto (Verde, 2001; Rojas y Verde, 2020).

Los métodos basados en hardware funcionan a partir de instrumentación específicamente implementada para la detección, por ello, su funcionamiento reside en fenómenos físicos distintos. Los métodos basados en hardware no están necesariamente acoplados al sistema de ductos, sino que pueden funcionar en un entorno relativamente cercano a él, ejemplo de ello son las aplicaciones de *muestreo de vapor*, *método de*

*rastreo, muestreo de suelo e inspección visual*. Los métodos basados en hardware, en general, requieren de mayor tiempo de calibración, el establecimiento de fases de pruebas y, en muchos casos, son incapaces de realizar la detección de manera automática en tiempo real. La mayoría de los métodos acústicos se clasifican en esta categoría pues requiere un conjunto de instrumentos de medición y actuadores no usuales en el transporte del fluido por ductos.

Dentro de los métodos de detección que utilizan el fenómeno acústico existen diversos enfoques. Un enfoque de detección basado en sonido es el de *detección de emisiones acústicas* (Fuchs and Riehle, 1991). En este método el sonido es generado por el propio fluido en movimiento que pasa por un punto de falla, este movimiento genera una señal acústica particular, conocida como *huella*, que se compara con una señal patrón del ducto sin falla. Este método es útil para indicar la aparición de la falla, pero no para la localización. Esto hecho se debe a que depende fuertemente de la posición de los sensores, además, requiere disponer de una señal de referencia adecuada y considerar el envejecimiento del ducto.

Otro enfoque basado en la detección acústica, particularmente de fugas, es el de *detección de onda negativa*, el cual basa su funcionamiento en la detección de una onda acústica de presión negativa provocada por la pérdida de masa en el punto donde se localiza la fuga. El transitorio debido a la fuga genera una onda de rarefacción acústica que puede ser detectado por sensores de presión colocados en puntos de interés y cuyo datos registrados pueden analizarse para obtener información acerca de las características de la fuga (Meng et al., 2012; Yuan et al., 2020). Este método depende de la ocurrencia de la falla como evento discreto y por tanto se basa en señales transitorias que ocurren en un intervalo de tiempo específico. Una desventaja de este tipo de técnica es que una vez que el transitorio desaparece la detección no es posible.

A diferencia de los métodos basados en onda de presión (Chu et al., 2020), se han propuestos otros métodos basados en principios acústicos que no requieren de maniobras con válvulas. Como afirma Datta y Sarkar (2016), dentro de los métodos acústicos, la subcategoría de métodos de detección por reflectometría son los más versátiles por su capacidad de detectar tanto bloqueos como fallas, además de ser aplicables al transporte de gases o líquidos con un rango amplio de densidad para distintas longitudes; junto con esta versatilidad se tiene una alta capacidad de detección al lograr ubicar fallas de hasta 1 % del diámetro del ducto en líneas rectas o con cambios de dirección. En este aspecto una limitación clara es la intrusividad del dispositivo generador de la señal acústica o de presión, sobre todo cuando se trabaja con fluidos que se mueven en un ducto en funcionamiento. Diversos trabajos se han desarrollado en ese aspecto centrandose principalmente en la excitación externa del ducto (Ogundare y Jaganathan, 2020) o el diseño de mecanismos mínimamente invasivos que permiten la detección con el ducto en funcionamiento y en tiempo real.

En cuanto al principio físico y del modelo computacional, los métodos acústicos Yusoff y Hassan (2016) utiliza una combinación de reflectometría con algoritmos de inteligencia artificial. La ventaja de este tipo de implementaciones es que no se requiere conocer el modelo y basta con recopilar la suficiente cantidad de datos para obtener una referencia del comportamiento del sistema en condiciones normales. Un algoritmo de aprendizaje correctamente implementado es capaz de reconocer y diferenciar las señales reflejadas de un ducto sano y con fallas. El problema es contar con datos clasificados adecuadamente para el aprendizaje.

## 1.2. Antecedentes

La línea de investigación de diagnóstico de fallas, de la que el presente trabajo forma parte, se cultiva en la UNAM por un grupo de investigadoras dentro del Instituto de Ingeniería. En este grupo se desarrolla investigación en métodos basados en hardware y en software. En cuanto a la reflectometría acústica, el



tema se ha tratado en distintas etapas, desde la caracterización de los segmentos de ducto con fugas (Rentería, 2017), la incorporación de la excitación acústica en un ducto (Oviedo, 2018) y el modelado matemático de los segmentos considerando la impedancia (Peralta y Verde, 2019). Las últimas aportaciones han permitido generar un modelo utilizando teoría de grafos y aprovecharlos para describir la respuesta de la onda de presión ante una fuente acústica de excitación (Peralta y Verde, 2021). Una de las motivaciones de esta línea de investigación fue la de replicar con el modelo matemático desarrollado los resultados experimentales presentados por Vidal y Silva (2014). La Figura 1.5. muestra un esquema del dispositivo específico que se ha estado estudiando por el grupo de detección de fallas.

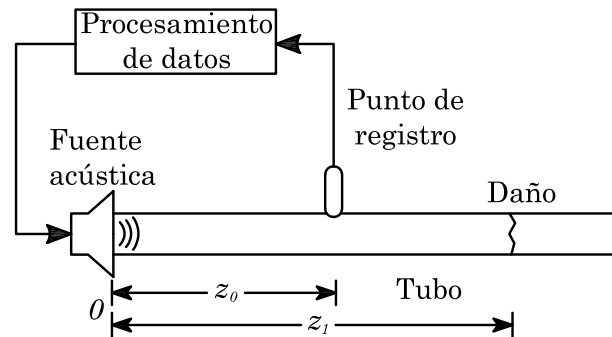


Figura 1.5: Esquema del dispositivo bajo estudio

En este contexto, surge esta tesis que tuvo como objeto diseñar y construir un dispositivo de validación de los modelos propuestos en la UNAM para la detección acústica de fallas en tuberías. Una de las razones y motivaciones principales para la construcción del dispositivo es la de considerar aspectos de factibilidad del principio en condiciones reales. En la primera etapa del desarrollo del método se han hecho suposiciones, así que se busca comprobar tanto la validación de éstas, como las medidas de los ensambles, la potencia de los actuadores y la sensibilidad de los instrumentos de medición. Además, se desea disponer de un modelo físico a escala para estudiar aspectos prácticos del dispositivo y en caso necesario realizar ajustes para mejorar el desempeño de la propuesta.

### 1.3. Objetivos y alcance

El objetivo general de este trabajo es implementar un banco de pruebas experimentales que incorpore las características propias de los ductos de transporte, así como los tipos de fallas que se quieren detectar y localizar. El principio de funcionamiento de este equipo se basa en el fenómeno de reflectometría acústica en un tubo con aire a temperatura ambiente.

Al implementar el banco experimental se pretende alcanzar cinco objetivos específicos:

1. Identificar los parámetros del ducto sin fallas.
2. Detectar la existencia o no existencia de una falla.
3. Conocer el tipo de falla presente, ya sea bloqueo o fuga.
4. Determinar cuantitativamente la magnitud de la falla.
5. Localizar la posición de la falla en el ducto y determinar el error de medición.

Para delimitar el tipo de mediciones y resultados obtenibles, se deben especificar las capacidades del banco experimental, las cuales dependen de los materiales, los instrumentos y la configuración implementada. En este trabajo, se considera un solo tubo de corte transversal circular hecho de un material rígido en cuyo interior se encuentra aire a temperatura ambiente. El tubo puede estar cerrado en uno o ambos extremos o puede presentar orificios en sus paredes, pero se considera como un sistema a presión atmosférica. El aire contenido en el tubo tiene una velocidad promedio en régimen permanente, por lo que, en ausencia de cualquier perturbación acústica, se trata de una masa de fluido estacionario. En cuanto al tipo de ondas sonoras que se propagan en el ducto, se considera que éstas son ondas planas (Blackstock, 2000). Los detalles específicos de diseño se tratan más extensamente en el Capítulo 3.

## 1.4. Contribuciones

En este trabajo se diseña e implementa un dispositivo para obtener resultados experimentales basados en el modelo desarrollado por Peralta y Verde (2019). Las características del diseño se basan principalmente en su versatilidad modular, su portabilidad y su bajo costo, que está debajo de los diez mil pesos mexicanos para el año 2020. Se presenta un conjunto de experimentos que permiten la validación del modelo matemático, la calibración del sistema de registro de señales, así como la detección en condiciones controladas de fallas en el sistema. Algunos de estos resultados han sido reportados en Peralta et al. (2020).

El año de realización de este proyecto coincidió con el inicio del confinamiento ocasionado por el virus *SARS-CoV-2* que limitó en gran medida la movilidad y la interacción entre el grupo de investigación a cargo de este proyecto. En particular las horas dedicadas al trabajo de laboratorio fueron grandemente reducidas lo que, sin duda limitó el alcance de los resultados obtenidos. Sin embargo, estos obstáculos pueden verse como una oportunidad para que nuevas pruebas y mejoras al diseño puedan incorporarse en trabajos subsecuentes.

## 1.5. Conclusiones

Se definió un conjunto de parámetros específicos para el aire como medio de propagación acústica. Con los parámetros establecidos fue posible desarrollar un diseño específico del dispositivo con las dimensiones apropiadas para la correcta visualización de la respuesta del sistema ante ondas arbitrarias. Los resultados experimentales sirvieron para validar las predicciones del modelo simulado y permitieron determinar las características críticas de la implementación física. Se pudo concluir que la posición de las fallas puede ser determinada con un error pequeño si los parámetros del medio son los correctos. Se pudo comprobar que para determinar el tipo de falla se requiere una gran relación señal-ruido que provoca reflexiones con la suficiente amplitud para estudiar las características de la señal, mostrando que el dispositivo permite localizar las uniones en el tubo, que representan cambios en el área menores al 5%.

Se pudo comprobar que hay tres factores que limitan la detección de múltiples fallas: primero, la interferencia debida a las reflexiones de los componentes y posibles fallas en un ducto genera señales poco definidas y poco útiles para detección; segundo, el ruido ambiental puede introducir ondas acústicas ajenas a la falla; tercero, la degradación de la señal debida a la pérdida de la amplitud de las reflexiones en cada choque con un accesorio o falla.

## 1.6. Estructura del trabajo

Este trabajo consta de cinco capítulos: en la introducción se ha expuesto el tema del trabajo con el fin de contextualizar, justificar y delinear el desarrollo del proyecto. En el Capítulo 2, se presentan los fundamentos teóricos, tanto en el sentido físico-matemático del fenómeno acústico, como en aquellos temas relacionados con la teoría de control y las técnicas de detección de fallas que se emplean en este proyecto. En este capítulo también se aborda el esquema de pruebas a realizar y las simulaciones realizadas. En el Capítulo 3, se establecen los aspectos más prácticos encaminados a la implementación de un sistema físico que permita validar las suposiciones asumidas en el desarrollo del modelo, y los elementos seleccionados en la construcción del dispositivo. En dicho capítulo se proporcionan también las especificaciones técnicas, tales como medidas, materiales, procedimientos e instrucciones de montaje del modelo físico. En el Capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos en los experimentos realizados, se lleva a cabo un análisis comparativo entre el comportamiento modelado matemáticamente y el observado en las pruebas en sus diversas configuraciones. La comparación de los resultados encaminada a explicar las discrepancias entre la teoría y los experimentos puede plantear buenos argumentos para trabajos futuros en esta área. Finalmente, en el Capítulo 5, se formulan las conclusiones del proyecto y se describen las posibles áreas de oportunidad para investigaciones futuras.

## Capítulo 2

# Análisis de ondas acústicas en un ducto con daños puntuales

En este capítulo se presentan los conceptos sobre los cuales se fundamenta la detección de fallas en un ducto por medio de reflectometría acústica. Para poder hacer uso de esa idea con fines prácticos en ingeniería, se requiere de la definición rigurosa de los factores que intervienen en la onda acústica, sus reflexiones, el medio de propagación y los fenómenos asociados que intervienen en todo el proceso.

La información aquí presentada se estructura comenzando por el concepto de propagación y haciendo uso de la ecuación de onda en un medio viscoso. La siguiente sección presenta el estudio de dos casos particulares de discontinuidad en un medio de propagación; el bloqueo y la apertura a la atmósfera para el caso del estudio al aire como medio acústico. Posteriormente se presenta el modelo de reflectometría acústica desde el punto de vista de la teoría de sistemas lineales y de matrices de transferencia. En la última sección se deriva el modelo que describe la evolución de una onda aplicada al dispositivo de detección propuesto, haciendo uso de la teoría de grafos para interpretar el comportamiento de la propagación.

### 2.1. Propagación de ondas en un medio disipativo

La propagación de ondas acústicas es un fenómeno bien estudiado y descrito desde el punto de vista científico y de sus aplicaciones. Se trata de la transferencia de la energía mecánica provocada por una perturbación generada en algún punto en el espacio y que se traslada a través del espacio y del tiempo. Las ecuaciones diferenciales parciales son las que describen este fenómeno debido a que incluyen la dependencia del tiempo ( $t$ ) y del espacio ( $z$ ) en su planteamiento (Campos, 2007a,b). En particular, se toma como punto de partida la ecuación (2.1)

$$\frac{\partial^2 p(z, t)}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 p(z, t)}{\partial z^2 \partial t} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

o su equivalente expresada en términos de la velocidad (2.2)

$$\frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 u(z, t)}{\partial z^2 \partial t} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.2)$$

que modelan la propagación en un medio viscoso.

En las ecuaciones (2.1) y (2.2) puede notarse que el conjunto del primer y tercer término corresponde a la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 p(z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(z, t)}{\partial t^2},$$

es decir, a la ecuación diferencial parcial que relaciona la propagación de la onda en el espacio (primer término) y en el tiempo (tercer término). El segundo término en estas ecuaciones corresponde a la disipación de energía y depende del mecanismo de disipación particular que se haya considerado. En este trabajo se considera la viscosidad del medio como la causa de la disipación. En cuanto a este término, el símbolo  $\eta = \lambda + 2\mu$  representa una combinación de coeficientes de viscosidad propias del fluido por el que pasa la onda.  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad cortante y  $\lambda$  el coeficiente de esfuerzo dilatacional o neto, estas constantes son también conocidas como primer y segundo coeficientes de viscosidad respectivamente. El segundo término de las ecuaciones depende tanto de la variable espacial como de la variable temporal. La densidad y velocidad del sonido para el fluido en reposo a una presión constante se simbolizan con  $\rho_0$  y  $c_0$  respectivamente.

De acuerdo a la motivación y justificación de esta tesis presentadas en el Capítulo 1, se tiene como objetivo construir un dispositivo que permita validar la propuesta de diagnóstico de fallas en un tubo basada en la inyección de un pulso aguas arriba (Peralta y Verde, 2021). En ese sentido, las pérdidas de energía siempre están presentes en un medio real y fenómenos como la viscosidad del medio de propagación o el efecto de capa límite no pueden ser despreciados. Aunque estos efectos tienen un efecto pequeño en la pérdida de energía por propagación, estos pueden ser modelados y cuantificados. Se tiene, por ejemplo, la pérdida de  $1.24 \times 10^{-10} f^2$  [dB/m] (en donde  $f$  es la frecuencia en [Hz]) para el aire a nivel del mar y a 20 [°C] (Blackstock, 2000), en este caso, como la variable  $f$  indica, las pérdidas dependen de la frecuencia o ancho de banda de la onda propagada.

### 2.1.1. Ondas planas y consideraciones geométricas

Considerando el dispositivo que se desea construir, es necesario restringir la dirección en la que se propaga la onda por medio de una guía, en este caso, un tubo de corte transversal constante. En esta parte del estudio no se requiere una forma particular para el perfil del tubo, pero las formas simples como cuadrados, rectángulos, elipses y, principalmente, círculos son las más usadas. Para restringir el movimiento de la onda y describir su comportamiento a lo largo del tubo tampoco se requiere un material en particular, aunque se asume que se trata de uno lo suficientemente rígido como para no deformarse ante el paso de la onda Ginsberg (2018); Melling (1973).

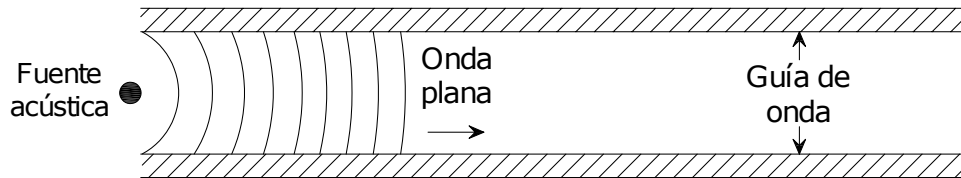


Figura 2.1: Esquema del corte transversal del tubo represento como la guía de onda

La Figura 2.1 muestra el corte longitudinal de un tubo que funciona como guía de onda. Independientemente del modo en que se genere la perturbación acústica, la onda se propaga desde un punto inicial  $z = 0$  y avanza a lo largo del tubo, el mismo fenómeno puede aplicarse a las señales que se desplazan en sentido contrario. Una onda que viaja a lo largo de un tubo con corte transversal constante se convierte en una onda plana siempre que no existan obstáculos dentro de la guía. Una onda que se genera en algún punto

del tubo tiene que recorrer cierta distancia para dejar de ser irradiante (omnidireccional) y convertirse en una onda plana. El valor específico de esta distancia depende de la fuente acústica y de la composición armónica de la señal (Magalotti et al., 1999; AES Standards Committee, 2012).

Hasta ahora solamente se ha presentado la ecuación de onda que ofrece el modelo de la propagación en el medio en una dirección. A continuación, se describe el fenómeno de reflexión acústica provocado por una discontinuidad en el medio contenido en el tubo. La discontinuidad puede deberse a

- Variación espacial de las condiciones en un mismo medio de propagación (densidad, temperatura, etcétera).
- La presencia de dos medios de propagación distintos.
- Cambios súbitos en la geometría del tubo.

En este contexto, cada discontinuidad se refiere a un cambio en las condiciones materiales o geométricas del medio. En el punto exacto donde sucede ese cambio se puede idealizar una interfaz o punto de contacto que divide al medio (o medios) de propagación. La interfaz se asume como infinitamente delgada y sin masa, su utilidad reside en que en ella se pueden incluir condiciones de frontera. Este trabajo tiene como uno de sus objetivos la detección de fallas en tuberías, en particular bloqueos y fugas; por ello es necesario relacionar los conceptos de *falla* y de *discontinuidad en el medio*. Las fallas bajo estudio se deben, básicamente, a cambios de geometría como muestra la Figura 2.2, en donde las líneas discontinuas indican la interfaz mencionada.

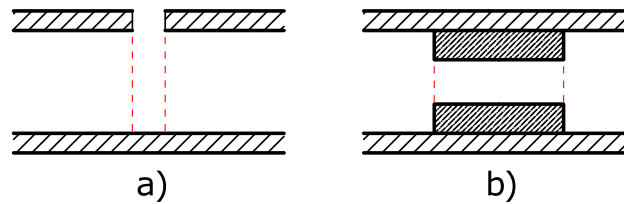


Figura 2.2: Fallas vistas como discontinuidades en la onda: a) Caso de un orificio y b) Bloqueo parcial

Una fuga es una perforación en la pared del tubo de manera que el medio de propagación de la onda está en contacto con el exterior. Este tipo de falla se muestra en la Figura 2.2 a). En Sharp y Campbell (1997) y Fuchs (2013) se establece que una perforación tiene un comportamiento análogo a un incremento en el diámetro del tubo. El bloqueo se debe a la presencia de un material mucho más denso que el medio de propagación en las paredes del tubo, lo cual reduce su diámetro; este tipo de falla se representa en la Figura 2.2 b). Aunque en este caso existe un material más denso en el interior del tubo, la propagación en esta discontinuidad también se rige por las características geométricas. Tanto las fugas como los bloqueos generan ondas reflejadas pero estas son cualitativamente distintas, por lo tanto, es necesario la descripción del comportamiento de las reflexiones para cada una de estas fallas y notar sus características particulares.

## 2.2. Propagación de la onda en aire como medio

El estudio de la propagación en el dominio del tiempo se realiza directamente ya que el ducto puede ser instrumentado para registrar y medir la evolución de las variables en su interior: presión y velocidad de la partícula. Ante un cambio en el medio de propagación de una onda, la interfaz creada en el punto de contacto permite establecer condiciones de frontera para la presión y velocidad. Dichas condiciones determinan el comportamiento de la onda reflejada y transmitida dependiendo de las propiedades materiales

o geométricas a cada lado de la interfaz. Cada una de las interfaces de la Figura 2.2 pueden ser vistas como en la Figura 2.3, en donde se muestran las condiciones en ambos lados del punto de contacto. Los símbolos que se usan para las ondas de presión y velocidad incidentes son  $p^+$  y  $u^+$  respectivamente. Las componentes de reflexión de las ondas que viajan de regreso, es decir en sentido negativo, son representadas por  $p^-$  y  $u^-$ . La presión y la velocidad de la onda transmitida se expresa con los símbolos  $p^{tr}$  y  $u^{tr}$ .

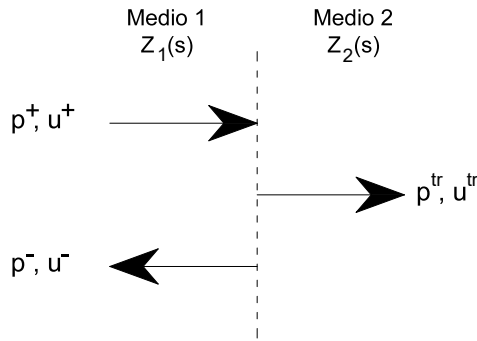


Figura 2.3: Reflexión de una onda en presencia de un cambio de medio

Las condiciones que deben satisfacerse en la interfaz, que es una capa infinitamente delgada y sin masa, aseguran que el fluido se comporta de una manera físicamente posible, además, son el fundamento para las definiciones de los coeficientes de reflexión y transmisión que se presentarán más adelante. Para las componentes incidente, reflejada y transmitida de una onda de presión se tiene la condición

$$p^+ + p^- = p^{tr}, \quad (2.3)$$

que indica que la presión de ambos lados de la interfaz debe ser la misma. De no cumplirse esta condición la capa sin masa se aceleraría infinitamente según la segunda ley de Newton.

Para las componentes incidente, reflejada y transmitida de una onda de velocidad de la partícula se tiene

$$u^+ + u^- = u^{tr} \quad (2.4)$$

que expresa la continuidad en el movimiento de las partículas en ambos lados de la interfaz. En el caso particular de un cambio en las áreas transversales del tubo con  $S_1$  y  $S_2$  son útiles las expresiones para el flujo volumétrico

$$q^+ + q^- = q^{tr} \quad \text{ó} \quad S_1 u^+ + S_1 u^- = S_2 u^{tr}, \quad (2.5)$$

sobre todo si el medio es el mismo y lo único que cambia es la geometría.

### 2.2.1. Impedancia

La Figura 2.3 indica que las componentes incidente, reflejada y transmitida de una onda dependen de las impedancias del medio o de los medios de propagación. En general, las impedancias del medio pueden representarse como una función compleja  $Z_n(s)$ , con  $n = 1, 2, \dots$  para cada medio. La propagación sin pérdidas es un caso particular en donde las impedancias son números reales y las ondas reflejadas y transmitidas tienen siempre la misma forma que la onda incidente cambiando, solo su amplitud. En un

caso general, con impedancias complejas, las ondas registradas se deforman al propagarse, pues se presenta el fenómeno de dispersión (He, 2000; Koruk, 2014).

En acústica la *impedancia* tiene el mismo sentido análogo al de su sistema eléctrico o en hidráulica, se caracteriza como una relación entre una variable de esfuerzo (presión) y una variable de flujo (velocidad de partícula). La impedancia es una forma de representar la oposición que ofrece el medio al paso de una onda. En esta disciplina, sin embargo, se aplican varias definiciones para la impedancia, basadas sobre todo en aspectos geométricos, cada una con distinta utilidad; entre ellas la más común es la *impedancia acústica específica* ( $Z_{ac-esp}$ ) (Fahy, 2001). La impedancia es dependiente de la dirección de propagación de la onda. Una vez definida la dirección y el sentido positivo de desplazamiento se tiene, para ondas que avanzan,  $p = Z_0 u$ ; del mismo modo, para ondas que retroceden, se tiene  $p = -Z_0 u$ , en donde  $Z_0 = \rho_0 c_0$  es la impedancia característica del medio. Se trata de la relación entre la presión en un punto y la velocidad de partícula en ese punto. Para la ecuación de onda sin pérdidas se tiene

$$Z_{ac-esp} = \frac{p}{u} \tag{2.6}$$

En adelante  $Z_{ac-esp}$  se escribe solo como  $Z$  mayúscula, **que no debe ser confundida con el símbolo de  $z$  minúscula que representa posición.**

Cuando existe disipación la impedancia depende también de la frecuencia de la onda propagada. La Sección 2.3.1 presenta la impedancia de manera más general en el caso de disipación, se expresa mediante un número complejo de la forma  $Z(s)$ .

### 2.2.2. Secuencia del fenómeno reflexión-transmisión

Una onda incidente que pasa por  $z_o$ , donde el subíndice  $o$  se refiere al punto de *observación*, y cuya parte reflejada regresa al mismo punto después de un tiempo  $t_i$  es, conceptualmente, el principio fundamental de la reflectometría. El análisis de las características de la onda reflejada revela algunos parámetros de la discontinuidad que provoca la reflexión, estos parámetros están relacionados con la función de variable compleja que describe la impedancia. Aparte de esto, la geometría del tubo es otro factor que influye en las particularidades de la señal reflejada.

En cuanto al medio, una alta impedancia indica un material poco denso o poco elástico en el que una onda se propaga con mayor dificultad. El aire a 20 [°C] tiene una impedancia característica de  $Z_0 = 415$  [Rayl<sub>MKS</sub>].

| Medio 1        | Medio 2               | Interpretación                                    |
|----------------|-----------------------|---|
| $ Z_1 $ (aire) | $ Z_2  \gg  Z_1 $     | Bloqueo de material rígido en el extremo del tubo |
| $ Z_1 $ (aire) | $ Z_2  \ll  Z_1 $     | El tubo está abierto a la atmósfera               |
| $ Z_1 $ (aire) | $ Z_2  \approx  Z_1 $ | aire o un fluido con impedancia similar           |

Tabla 2.1: Efectos posibles según las relaciones de las impedancias entre dos medios

La Tabla 2.1 presenta los posibles casos cuando en el tubo lleno de aire existe una interfaz con medios de disintintas impedancias a cada lado. Los casos de interés son los dos primeros, pues estos ofrecen señales reflejadas. En el tercer caso no existe una reflexión o esta es despreciable pues la onda se propaga sin dificultad al pasar por la interfaz. En cualquier caso, la relación entre las impedancias de dos medios da origen a los coeficientes de reflexión y transmisión. El primero ( $R$ ) indica qué parte de la onda incidente se refleja en sentido opuesto en el tramo del tubo que se acaba de recorrer. El coeficiente de transmisión



( $T$ ) denota qué parte de la onda incidente se propaga más allá de la interfaz a través del segundo medio. Estos coeficientes se definen como

$$R = \frac{p^-}{p^+} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.7)$$

$$T = \frac{p^{tr}}{p^+} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.8)$$

o bien, si la geometría cambia pero el medio no, la ecuación (2.5) puede usarse para obtener los coeficientes en relación a las áreas de los segmentos de ducto como

$$R = \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \quad T = \frac{2S_2}{S_2 + S_1} \quad (2.9)$$

para todos los cuales debe cumplirse la condición

$$1 + R = T. \quad (2.10)$$

Si bien, por simplicidad del análisis, se asume que el pulso es cuadrado, este enfoque es válido para señales arbitrarias; en una implementación experimental las señales obtenidas de la fuente acústica no son idénticas a las señales generadas por computadora, pero se espera el mismo comportamiento en cuanto a incidencia, reflexión y transmisión de las ondas.

La Figura 2.4 a) muestra la secuencia del choque de la onda de presión cuadrada para el caso de un bloqueo total hecho de un material rígido. La onda *imagen*, es un recurso usado en acústica para representar el choque elástico. La onda de presión se desplaza hasta alcanzar  $z_r$ , la posición del cambio de medio. Como en este caso se trata de un material rígido, la presión alcanza valores elevados, el doble de la amplitud original, pues las partículas no pueden desplazarse. Este tipo de reflexión tiene la misma fase que la onda incidente.

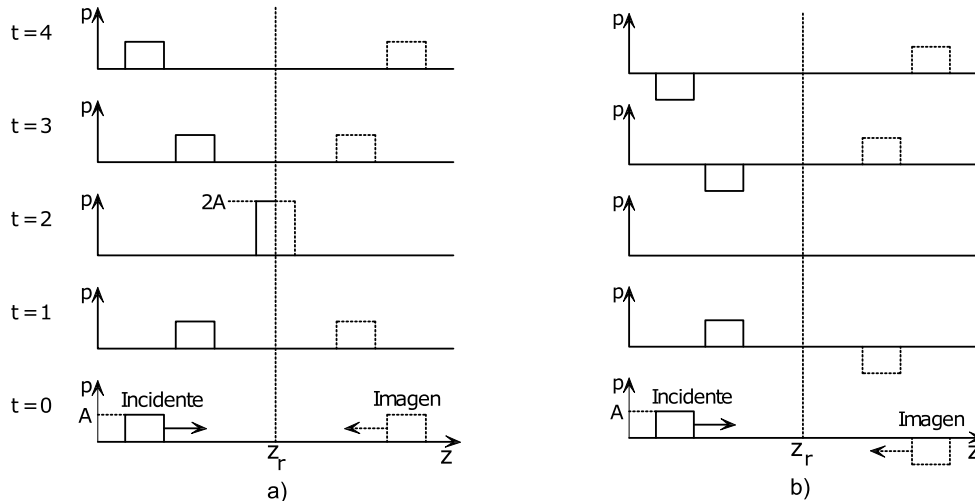


Figura 2.4: Secuencia de onda incidente y reflejad producida por una discontinuidad en el tubo: a) Medio rígido (bloqueo) y b) Relajación (orificio)

La Figura 2.4 b) muestra el caso en el que la onda se encuentra con una ampliación de diámetro o una perforación. Está condición no provoca que la onda escape o se extinga como podría asumirse, sino que genera un vacío o presión negativa que se propaga en dirección contraria la onda incidente. Este caso

se conoce como *relajación de presión* y también aparece en cambios de geometría como ampliaciones de diámetro. Este tipo de reflexión tiene la fase invertida en relación a la onda incidente.

El único caso en el que la onda se propaga más allá de  $z_r$  sin que exista una onda reflejada es cuando los cambios de impedancia son mínimos, es decir, tienen valores muy parecidos; lo que sería trivial en la condición de que sólo se trata de un mismo medio, o en un caso más interesante en el que se trata de dos materiales diferentes para los cuales su impedancia es semejante. Se cumple pues que las impedancias tienen aproximadamente el mismo valor ( $Z_1 \approx Z_2$ ). La utilidad de esta condición es que el sonido puede propagarse de manera semejante y con pocas pérdidas entre dos materiales con diferentes propiedades físicas (o químicas) y comportarse de manera “*acústicamente transparente*” (Adair and Cook, 1973).

### 2.3. Identificación de daños en el tubo via reflectometría

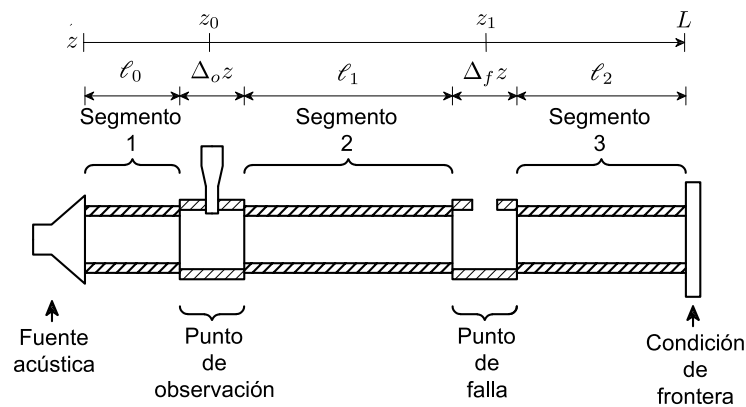


Figura 2.5: Configuración del tubo para la detección de fallas

Recientemente, Vidal y Silva (2014) presentaron un método para la detección de bloqueos basado en el principio de reflectometría acústica desde un punto de vista experimental con resultados satisfactorios. Esta idea generó inquietudes en el grupo de detección de fallas del Instituto de Ingeniería (Oviedo, 2018). Actualmente, Peralta y Verde (2019) han realizado varios estudios para analizar, desde un punto de vista formal, la aplicabilidad del método propuesto por Vidal y poder así caracterizar la respuesta del detector ante bloqueos y orificios en el dispositivo. La Figura 2.5 presenta esquemáticamente las partes que conforman el dispositivo a estudiar y que consta de un elemento generador de la onda o fuente acústica en  $z = 0$ ; un punto de observación modelado por una matriz ubicado en  $z_0$ ; una falla ubicada en  $z_1$ ; y un elemento final que caracteriza las condiciones de frontera en  $z_2 = L$ . Cada uno de estos elementos se interconectan por medio de segmentos de ductos intactos, todos con el mismo corte transversal y área, pero que pueden ser de distintas longitudes, por tanto, los puntos  $z_i$  dependen de las longitudes  $\ell_i$ .

Cuando la bocina excita al dispositivo se tiene una secuencia de eventos que caracteriza la propagación de ondas. La Figura 2.6 muestra de forma cualitativa la propagación de la señal inyectada y el proceso se puede describir de la siguiente forma:

1. La fuente acústica genera una onda que se propaga por el Segmento 1.
2. Después de viajar una cierta distancia la onda pasa por el punto de observación en donde es registrada por medio de un sensor.

3. La onda continua su recorrido por el segmento 2 hasta llegar a la discontinuidad provocada por la falla. Parte de la onda se refleja y otra parte se transmite hacia el segmento 3.
4. Finalmente la onda reflejada regresa nuevamente al punto de observación en sentido contrario.

En este esquema existen múltiples reflejos subsecuentes debidos a las interacciones entre las condiciones de frontera en  $z = L$  y la falla  $P_1$ , pero dicha superposición de señal es poco útil para identificar el tipo de fallas y su magnitud.

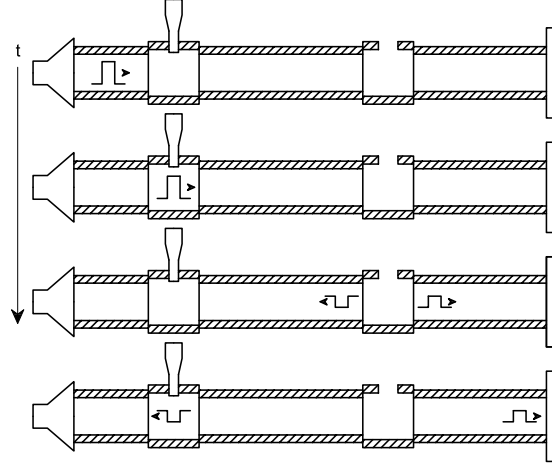


Figura 2.6: Proceso Cualitativo de propagación de la onda inyectada en el tubo

Los elementos de observación y de falla que integran el dispositivo completo de la Figura 2.5, tienen por lo general una longitud  $\Delta_{oz}$  y  $\Delta_{fz}$  respectivamente. Sin embargo, en Sattar y Chaudhry (2008) y en Chaudhry (2014) se establece que estos elementos pueden considerarse puntuales dada su longitud en comparación con el tamaño del tubo y por tanto se puede considerar como elementos con una superficie infinitamente delgada. Así pues,  $\Delta_{oz} \rightarrow 0$  y  $\Delta_{fz} \rightarrow 0$  cuando se agrupan los parámetros. Bajo estas condiciones las dimensiones del dispositivo son  $z_0 = \ell_0$ ,  $z_1 = \ell_0 + \ell_1$  y  $z_2 = \ell_0 + \ell_1 + \ell_2 = L$ . A continuación, en la Sección 2.3.1 se deriva el modelo de propagación para los segmentos del tubo intacto y en la Sección 2.3.2 se proponen los modelos y parámetros para las fallas puntuales.

### 2.3.1. Modelo de transferencia de un segmento intacto

Para derivar el modelo de propagación en un segmento de tubo intacto se utilizan las siguientes ecuaciones reportadas en Blackstock (2000)

$$\frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 u(z, t)}{\partial z^2 \partial t} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.11)$$

y

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial p(z, t)}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = 0, \quad (2.12)$$

La Ecuación (2.11) ha sido descrita en la sección 2.1 y se repite aquí por convenciencia. Por otro lado, la Ecuación (2.12) representa una ley física que relaciona la presión y la velocidad, de manera análoga a una línea de transmisión eléctrica. La ecuación (2.12) se obtiene al combinar la ecuación de continuidad

del fluido y la ecuación que establece la relación entre presión y densidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0 \quad p = c^2 \rho.$$

Tomando la transformada de Laplace de (2.11) con respecto a  $t$  se tiene la expresión

$$\left(1 + \frac{\eta}{\rho_0 c_0^2} s\right) \frac{d^2 U(z, s)}{dz^2} = \frac{s^2}{c_0^2} U(z, s). \quad (2.13)$$

la cual puede escribirse de manera más compacta como

$$\frac{d^2 U(z, s)}{dz^2} = \gamma^2(s) U(z, s), \quad (2.14)$$

donde la función de propagación

$$\gamma(s) = \frac{\tilde{\gamma}(s)}{c_0} \quad (2.15)$$

incluye el coeficiente de viscosidad  $\delta_\nu$ , y se reduce a

$$\tilde{\gamma} = s/\sqrt{1 + \delta_\nu s} \quad \delta_\nu = \eta/\rho c_0^2.$$

Por tanto, la solución de (2.14) toma la forma

$$U(z, s) = K_1(s) \sinh\left(\tilde{\gamma}(s) \frac{z}{c_0}\right) + K_2(s) \cosh\left(\tilde{\gamma}(s) \frac{z}{c_0}\right). \quad (2.16)$$

donde  $K_1(s)$  y  $K_2(s)$  son funciones de la variables compleja  $s$  y que se determinan en función de las condiciones de frontera del segmento que se esté considerando.

De manera similar, se puede obtener la transformada de Laplace para la ecuación de la presión 2.12, la cual está dada por

$$\frac{s}{c_0} P(z, s) + \rho_0 \frac{dU(z, s)}{dz} = 0. \quad (2.17)$$

Así que, al sustituir la derivada de la velocidad en esta ecuación se tiene la expresión de la presión en el dominio de  $s$ .

$$P(z, s) = -Z(s) \left[ K_1(s) \cosh\left(\tilde{\gamma}(s) \frac{z}{c_0}\right) + K_2(s) \sinh\left(\tilde{\gamma}(s) \frac{z}{c_0}\right) \right] \quad (2.18)$$

como función de  $K_1(s)$  y  $K_2(s)$  y de la impedancia acústica específica del segmento

$$Z(s) = \rho_0 c_0 \tilde{\gamma}(s)/s. \quad (2.19)$$

Considerando la configuración del tubo bajo estudio, cada segmento intacto tiene diferentes condiciones de frontera (presión y velocidad) en sus extremos. Por tanto se denotan la posición al inicio del tubo con el símbolo  $z^-$  y al final con  $z^+$  y por tanto la longitud  $\ell_i$  de cada segmento  $i$  se caracteriza por

$$\ell_i = z^+ - z^-$$

De esa manera, las condiciones de presión y velocidad en los extremos de cada segmento se reducen a la notación siguiente.

|           | Al inicio del segmento ( $z^-$ ) | Al final del segmento ( $z^+$ ) |
|-----------|----------------------------------|---------------------------------|
| Presión   | $P(z_i^-, s)$                    | $P(z_i^+, s)$                   |
| Velocidad | $U(z_i^-, s)$                    | $U(z_i^+, s)$                   |

Por otro lado, las funciones complejas en cada segmento  $K_1(s)$  y  $K_2(s)$  se puede determinar en función del estado en la frontera al inicio del segmento como

$$K_1(s) = -\frac{1}{Z(s)}P(z_i^-, s) \quad K_2(s) = U(z_i^-, s).$$

Tomando en cuenta que el vector de estado esta formado por la presión y la velocidad en cualquier posición del ducto. El vector de estado  $X$  evaluado en los dos extremos de cada segmento se escribe como

$$X(z_i^-, s) = \begin{bmatrix} P(z_i^-, s) \\ U(z_i^-, s) \end{bmatrix} \quad X(z_i^+, s) = \begin{bmatrix} P(z_i^+, s) \\ U(z_i^+, s) \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

y se encuentran relacionados por

$$X(z_i^+, s) = M^{\ell_i}(s)X(z_i^-, s) \quad (2.21)$$

donde la matriz de transferencia  $M^\ell(s)$

$$M^{\ell_i}(s) = \begin{bmatrix} \cosh\left(\tilde{\gamma}(s)\frac{\ell_i}{c_0}\right) & -Z(s)\sinh\left(\tilde{\gamma}(s)\frac{\ell_i}{c_0}\right) \\ -\frac{1}{Z(s)}\sinh\left(\tilde{\gamma}(s)\frac{\ell_i}{c_0}\right) & \cosh\left(\tilde{\gamma}(s)\frac{\ell_i}{c_0}\right) \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

o con la notación compacta

$$M^\ell = \begin{bmatrix} m_{11}^\ell & m_{12}^\ell \\ m_{21}^\ell & m_{22}^\ell \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

De este modo, el modelo (2.23) permite describir la propagación de la onda en cada uno de los tres segmentos, 1, 2, 3, de la configuración mostrada en la Figura 2.5.

### 2.3.2. Modelos puntuales de la fallas

Para modelar los componentes adicionales que conforman el sistema bajo estudio y que corresponden al punto de observación y fallas se considera que estos son elementos puntuales modelados como sistemas de dos puertos estáticos, es decir se modelan como

$$X(z_k^+) = \mathcal{P}_d^{z_k} X(z_k^-) \quad (2.24)$$

donde se usa la letra caligráfica  $\mathcal{P}$  para indicar la matriz y diferenciarla de las condiciones de presión simbolizadas por  $P$ . El subíndice  $k$  que aparece junto a  $z$  representa el número de elementos que pueden existir a lo largo del tubo ( $k = 1, 2, \dots$ ) y el subíndice  $d$  describe el tipo de componente que representa. En particular,  $d$  se sustituye usando la siguiente notación:  $o$  para un punto de medición u observación;  $j$  para una unión;  $l$  para una fuga y  $b$  para un bloqueo. Si se considera que la longitud de de cada componente es despreciable en comparación con la longitud total del tubo, se pueden esquematizar las distancias como en la Figura 2.7 donde

$$z_k^+ = z_k + \varepsilon \quad z_k^- = z_k - \varepsilon \quad \text{y} \quad \varepsilon \rightarrow 0$$

Con esta aproximación la matriz de transferencia  $\mathcal{P}_d^{z_k}$  correspondiente para cada componente del sistema se presenta a continuación.

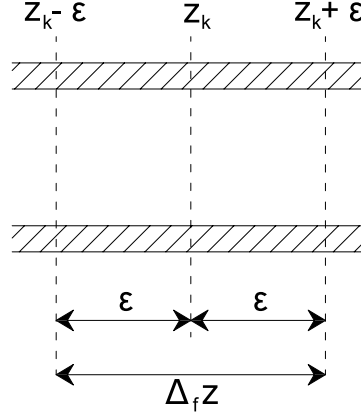


Figura 2.7: Aproximación espacial para los elementos puntuales

### Puntos de observación y de unión

Cuando se considera el punto de unión u observación, se asume que dicho elemento no afecta la propagación de la onda y por tanto la matriz de transferencia se reduce a

$$X(z_k^+) = \mathcal{P}_j^{z_k} X(z_k^-) \quad \mathcal{P}_j^{z_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

se usa el subíndice  $o$  para el caso de un punto de observación o medición. Es decir  $\mathcal{P}_o^{z_k} = \mathcal{P}_j^{z_k}$ . Se hace notar que en cualquier aplicación real las uniones y los puntos de observación difieren de esta caracterización de matriz unitaria. Sin embargo, se considera en este trabajo que sus efectos no alteran de manera considerable la propagación de la onda en condiciones de falla que es el fenómeno que se desea estudiar.

### Punto del Orificio

Cuando se considera un orificio, Chaudhry (2014) caracteriza el orificio en términos del cabezal piezométrico  $H$  y del caudal  $Q$  del fluido en un ducto. Dado que estas variables están directamente relacionadas con la presión y la velocidad de partícula se puede considerar el mismo modelo puntual. Por tanto, se asume que la matriz de transferencia que vincula el estado antes y después de elemento puede expresarse como

$$X(z_k^+) = \mathcal{P}_l^{z_k} X(z_k^-), \quad (2.26)$$

con la matriz

$$\mathcal{P}_l^{z_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\xi & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Así, el parámetro  $\xi$  establece el cambio de la velocidad entre el medio después y antes del punto de fuga ( $X(z_k^+)$  y  $X(z_k^-)$ ) respectivamente y depende de las características físicas de la fuga. El coeficiente  $\xi$  para la fuga depende de la descarga constante de la fuga y de la pérdida de presión de la forma  $\xi = u_0/2p_0$ , con unidades recíprocas a las de una impedancia acústica. El subíndice 0 representa el estado estacionario de dicha fuga. Una propiedad de esta matriz es que

$$\det(\mathcal{P}_l^{z_k}) = 1$$

En términos de los coeficientes adimensionales de reflexión y de transmisión para el caso de perforación o ampliación de diámetro se tiene

$$R_l(s) = -\frac{\xi Z(s)}{2 + \xi Z(s)} \quad T_l(s) = \frac{2}{2 + \xi Z(s)} \quad (2.28)$$

Estas ecuaciones representan los coeficientes de reflexión y transmisión, los cuales deben cumplir con las condiciones establecidas en las Ecuaciones (2.7) - (2.10) de la sección 2.2.2 . Aquí se establece el caso particular para la fuga y más adelante (Ecuación (2.32)) para el caso de bloqueo.

### Punto del Bloqueo

Cuando se considera un bloqueo discreto, de manera similar al caso de un orificio, se puede establecer la relación entre la entrada y la salida en términos de presiones y velocidades antes y después del bloqueo. De acuerdo con Chaudhry (2014) el modelo puntual en términos de cabezal de presión y caudal se expresa como

$$\begin{bmatrix} H(z_k^+) \\ Q(z_k^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{2\Delta h_0}{q_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(z_k^-) \\ Q(z_k^-) \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Por tanto, considerando las relaciones

$$q_0 = S u_0 \quad \Delta h_0 = \Delta p_0 \quad Q(z_k) = S U(z_k)$$

en las que el subíndice 0 representa el valor promedio. Se tienen los símbolos  $q_0$  para el caudal promedio,  $u_0$  para la velocidad promedio del flujo y  $\Delta p_0$  para el cambio en la presión promedio.  $S$  representa el área transversal del tubo. Esto plantea las relaciones entre la presión y el cabezal, así como entre el caudal y velocidad de la partícula. Se tiene entonces

$$P(z_k^+) = P(z_k^-) - \frac{2\Delta p_0}{u_0} U(z_k) \quad U(z_k^-) = U(z_k) = U(z_k^+) \quad (2.30)$$

Estas expresiones pueden escribirse en forma matricial como

$$\mathcal{P}_b^{z_k} = \begin{bmatrix} 1 & -\beta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

para una señal acústica cuyo determinante vale uno y el parámetro de  $\beta = 2\Delta p_0/u_0$ . En este escenario de manera análoga a la fuga se pueden establecer los coeficientes de reflexión y transmisión sin dimensiones por medio de

$$R_b(s) = \frac{\beta Z(s)}{2 + \beta} \quad T_b(s) = \frac{2Z(s)}{2Z(s) + \beta}. \quad (2.32)$$

### 2.3.3. Concatenación de componentes

Una vez obtenidos los modelos individuales de los elementos que conforman el dispositivo que se estudia, se puede generar el modelo completo mediante la concatenación de todos. En ese sentido, los modelos de las entradas y salidas de cada segmento de tubo, y los elementos puntuales se conectan en forma serial como lo muestra la Figura 2.8. Así, utilizando algebra de bloques matriciales se tiene que el estado  $X(z_0)$  en el punto de observación está relacionado con el estado  $X(0)$  con la condición de frontera dada por la bocina.

$$X(z_0) = M^{\ell_0} X(0). \quad (2.33)$$

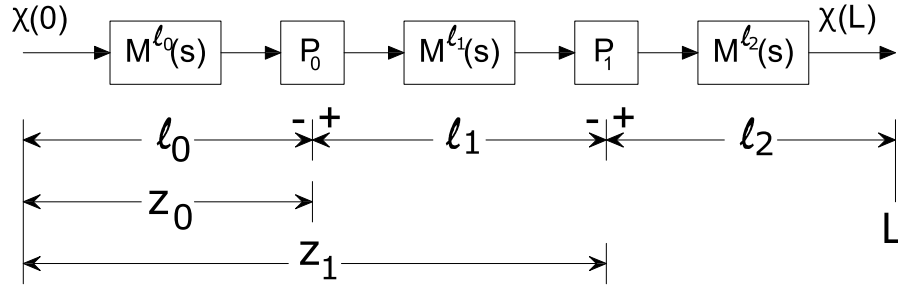


Figura 2.8: Concatenación de los modelos individuales

Por otro lado, el estado en la condición frontera en el extremo inferior  $X(L)$  se puede expresar en función de la condición de frontera del extremo superior como

$$X(L) = M^{\ell_2} \mathcal{P}_f^{z_1} M^{\ell_1} X(z_0) = \mathcal{S}^{\ell_2, \ell_1} X(z_0). \quad (2.34)$$

$\mathcal{S}$  representa una matriz y no debe confundirse con  $S$  usada para indicar el área transversal del tubo. El subíndice  $f$  indica que se trata de una fuga y  $\det(\mathcal{S}^{\ell_2, \ell_1}) = 1$ . Por tanto considerando

$$\mathcal{S}^{\ell_2, \ell_1} = M^{\ell_2} \mathcal{P}_f^{z_1} M^{\ell_1} \quad (2.35)$$

y manipulando las ecuaciones (2.33) y (2.34) se tiene Oviedo (2018)

$$X(z_0) = \frac{1}{2} \left( M^{\ell_0} X(0) + (\mathcal{S}^{\ell_2, \ell_1})^{-1} X(L) \right). \quad (2.36)$$

Esta relación vincula el estado  $X(z_0)$  en el punto de observación con las condiciones de frontera en los extremos de todo el dispositivo  $X(0)$  y  $X(L)$ .

Por otro lado, la matriz de transferencia que vincula las condiciones de frontera globales del sistema toma la forma

$$X(L) = TX(0) \quad \text{con} \quad T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \mathcal{S}^{\ell_2, \ell_1} M^{\ell_0} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11}^{\ell_0} & m_{12}^{\ell_0} \\ m_{21}^{\ell_0} & m_{22}^{\ell_0} \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Así que, considerando esta última relación y las condiciones de frontera globales dadas por

- la presión  $P(0)$  que corresponde la señal de excitación generada por la bocina,
- la velocidad  $U(L) = 0$  que corresponde al material rígido colocado en el extremo inferior,

la descripción del estado  $X(L)$  en términos de la excitación se puede escribir como

$$X(L) = \begin{bmatrix} P(L) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}P(0) + t_{12}U(0) \\ t_{21}P(0) + t_{22}U(0) \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

multiplicando las matrices correspondientes en (2.37). Por tanto a partir de este sistema se pueden expresar las condiciones de frontera en términos de la excitación  $P(0)$  como

$$X(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ -t_{21} \\ t_{22} \end{bmatrix} P(0), \quad X(L) = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_{22}} \\ 0 \end{bmatrix} P(0). \quad (2.39)$$



Al sustituir estos vectores de estados en (2.36) se tiene la matriz de transferencia que vincula el estado en el punto  $z_0$  con la fuente sonora  $P(0)$  como excitación.

$$X(z_0) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} P(0), \quad (2.40)$$

donde

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left( M^{\ell_0} \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{t_{21}}{t_{22}} \end{bmatrix} + (\mathcal{S}^{\ell_2, \ell_1})^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{t_{22}} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad \text{con} \quad (\mathcal{S}^{\ell_2, \ell_1})^{-1} = \begin{bmatrix} s_{22} & -s_{12} \\ -s_{21} & s_{11} \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

Por tanto, sustituyendo  $M^{\ell_0}$  y las funciones  $s_{ij}$  en (2.41), la matriz de transferencia se reduce a

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} m_{11}^{\ell_0} - m_{12}^{\ell_0} \frac{t_{21}}{t_{22}} + \frac{s_{22}}{t_{22}} \\ m_{21}^{\ell_0} - m_{22}^{\ell_0} \frac{t_{21}}{t_{22}} - \frac{s_{21}}{t_{22}} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Debido a que los términos  $s_{ij}$  y de  $t_{ij}$  dependen de la falla y de las características particulares de los segmentos, la Tabla 2.2 presenta los términos que permiten obtener la matriz de transferencia en términos de los parámetros asociados a la fuga y bloqueo  $\xi$  y  $\beta$  respectivamente.

|          | Fuga   | Bloqueo  |
|----------|--|--|
| $s_{11}$ | $m_{11}^{\ell_1+\ell_2} - \xi m_{12}^{\ell_2} m_{11}^{\ell_1}$               | $m_{11}^{\ell_1+\ell_2} + \beta m_{11}^{\ell_2} m_{21}^{\ell_1}$               |
| $s_{12}$ | $m_{12}^{\ell_1+\ell_2} - \xi m_{12}^{\ell_1} m_{12}^{\ell_1}$               | $m_{12}^{\ell_1+\ell_2} + \beta m_{11}^{\ell_1} m_{22}^{\ell_1}$               |
| $s_{21}$ | $m_{21}^{\ell_1+\ell_2} - \xi m_{22}^{\ell_1} m_{21}^{\ell_1}$               | $m_{21}^{\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_1} m_{21}^{\ell_1}$               |
| $s_{22}$ | $m_{22}^{\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_1} m_{22}^{\ell_1}$             | $m_{22}^{\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_1} m_{22}^{\ell_1}$               |
| $t_{21}$ | $m_{21}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} - \xi m_{22}^{\ell_1} m_{21}^{\ell_0+\ell_1}$ | $m_{21}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_1} m_{21}^{\ell_0+\ell_1}$ |
| $t_{22}$ | $m_{22}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} - \xi m_{22}^{\ell_1} m_{12}^{\ell_0+\ell_1}$ | $m_{22}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_1} m_{22}^{\ell_0+\ell_1}$ |

Tabla 2.2: Funciones  $s_{ij}$  y  $t_{ij}$  para una fuga y un bloqueo

Por tanto, sustituyendo en (2.42) las funciones específicas mostradas en la Tabla 2.2 se obtienen las funciones de transferencia de  $G_1$  y  $G_2$  para la fuga

$$G_1 = \frac{m_{22}^{\ell_1+\ell_2} - \xi m_{22}^{\ell_2} m_{12}^{\ell_1}}{m_{22}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} - \xi m_{22}^{\ell_2} m_{12}^{\ell_0+\ell_1}} \quad G_2 = -\frac{m_{21}^{\ell_1+\ell_2} - \xi m_{22}^{\ell_2} m_{11}^{\ell_1}}{m_{22}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} - \xi m_{22}^{\ell_2} m_{12}^{\ell_0+\ell_1}},$$

y para el bloqueo

$$G_1 = \frac{m_{22}^{\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_2} m_{22}^{\ell_1}}{m_{22}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_2} m_{22}^{\ell_0+\ell_1}} \quad G_2 = -\frac{m_{21}^{\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_2} m_{21}^{\ell_1}}{m_{22}^{\ell_0+\ell_1+\ell_2} + \beta m_{21}^{\ell_2} m_{22}^{\ell_0+\ell_1}}.$$

Tomando en cuenta que el único estado que se mide en el punto  $z_0$  es la presión, de aquí en adelante se analiza solamente la función  $G_1$ .

Por otro lado, para estudios transitorios es más conveniente hacer una interpretación en el dominio de  $s$  a través de funciones exponenciales que las hiperbólicas, así que usando la versión de funciones hiperbólicas de la matriz (2.23) y sustituyendo los términos en  $G_1$  se tiene la función de transferencia para el orificio:

$$G_1 = \frac{\frac{1}{2} \left( e^{\frac{\ell_1+\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_1+\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) + \frac{\xi Z}{4} \left( e^{\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) \left( e^{\frac{\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} - e^{-\frac{\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \right)}{\frac{1}{2} \left( e^{\frac{\ell_0+\ell_1+\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_0+\ell_1+\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) + \frac{\xi Z}{4} \left( e^{\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) \left( e^{\frac{\ell_0+\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} - e^{-\frac{\ell_0+\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \right)} \quad (2.43)$$

y para el bloqueo:

$$G_1 = \frac{\frac{1}{2} \left( e^{\frac{\ell_1 + \ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_1 + \ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) - \frac{\beta}{4Z} \left( e^{\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} - e^{-\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) \left( e^{\frac{\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \right)}{\frac{1}{2} \left( e^{\frac{\ell_0 + \ell_1 + \ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_0 + \ell_1 + \ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) - \frac{\beta Z}{4Z} \left( e^{\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} - e^{-\frac{\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} \right) \left( e^{\frac{\ell_0 + \ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + e^{-\frac{\ell_0 + \ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \right)} \quad (2.44)$$

Expandiendo los factores de los numeradores y denominadores de las ecuaciones (2.43) y (2.44), se tiene para el orificio

$$G_1 = \frac{e^{-\frac{\ell_0}{c_0} \tilde{\gamma}} - \left( \frac{\xi Z}{2 + \xi Z} \right) e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( \frac{\xi Z}{2 + \xi Z} \right) e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( \frac{2 - \xi Z}{2 + \xi Z} \right) e^{\frac{\ell_0 - 2\ell_1 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}}{1 - \left( \frac{\xi Z}{2 + \xi Z} \right) e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( \frac{\xi Z}{2 + \xi Z} \right) e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( \frac{2 - \xi Z}{2 + \xi Z} \right) e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}} \quad (2.45)$$

y para el bloqueo

$$G_1 = \frac{e^{-\frac{\ell_0}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( \frac{\beta}{2Z + B} \right) e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} - \left( \frac{\beta}{2Z + B} \right) e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( \frac{2Z - \beta}{2Z + \beta} \right) e^{\frac{\ell_0 - 2\ell_1 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}}{1 + \left( \frac{\beta}{2Z + B} \right) e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} - \left( \frac{\beta}{2Z + B} \right) e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( \frac{2Z - \beta}{2Z + \beta} \right) e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}} \quad (2.46)$$

Se observa de ambas descripciones, que las sumas de las exponenciales están multiplicadas por funciones racionales dependientes de la falla y de la impedancia del ducto. Más aún, dichos términos en ambas funciones  $G_1$  corresponden a los coeficientes de reflexión y transmisión provocadas por la falla tal y como se definieron en (2.28) y (2.32). Así, que se propone una expresión general de  $G_1$  que cubra ambas fallas en términos de los coeficientes respectivos para el orificio y el bloqueo. En esta expresión general utiliza los coeficientes de reflexión y de transferencia  $R_f$  y  $T_f$  para una falla en general, de ahí el subíndice  $f$ . Cuando se trata de una fuga se utiliza el subíndice  $l$  ( $R_l$  y  $T_l$ ) como en la Expresión 2.28 y cuando se trata de un bloqueo se usa el subíndice  $b$  ( $R_b$  y  $T_b$ ) como en la Expresión 2.32. Es decir, la función general se reduce a

$$G_1 = \frac{e^{-\frac{\ell_0}{c_0} \tilde{\gamma}} + R_f e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + R_f e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( T_f^2 - R_f^2 \right) e^{\frac{\ell_0 - 2\ell_1 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}}{1 + R_f e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + R_f e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}} + \left( T_f^2 - R_f^2 \right) e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1 - 2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}}, \quad (2.47)$$

o equivalentemente como

$$G_1 = \frac{e^{-\frac{\ell_0}{c_0} \tilde{\gamma}} + R_f e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + T_f^2 e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \left( \frac{e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}}{1 - R_f e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}} \right)}{1 + R_f e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + T_f^2 e^{-\frac{2\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \left( \frac{e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}}{1 - R_f e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}} \right)}. \quad (2.48)$$

De la estructura de  $G_1$  se observa que ésta puede considerarse como una realización de dos sistemas retroalimentados en paralelo de la forma

$$G_1 = \frac{A + B}{1 + AB} = \frac{A}{1 + AB} + \frac{B}{1 + AB} \quad (2.49)$$

con

$$A = e^{-\frac{\ell_0}{c_0} \tilde{\gamma}} \quad (2.50)$$

$$B = R_f e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} + T_f^2 e^{-\frac{\ell_0 - 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \left( \frac{e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}}{1 - R_f e^{-\frac{2\ell_2}{c_0} \tilde{\gamma}}} \right). \quad (2.51)$$

Se hace notar además que el factor

$$\frac{e^{-\frac{2\ell_2}{c_0}\tilde{\gamma}}}{1 - R_f e^{-\frac{2\ell_2}{c_0}\tilde{\gamma}}}$$

también corresponde a un sistema retroalimentado asociado los reflejos que ocurren entre la posición de la falla  $z = z_1$  y el extremo del ducto en  $z = L$ .

Una ventaja de expresar a  $G_1$  con una estructura de funciones exponenciales retroalimentadas es que ésta puede ser simulada con ayuda de funciones retardo considerando cualquier señal de excitación  $P(0)$ .

Por otro lado, considerando que los términos exponenciales en (2.48) tienen la forma

$$D(s) = e^{-\frac{\ell_i}{c_0}\tilde{\gamma}(s)}, \quad (2.52)$$

se puede aproximar el término de la potencia considerando que la función de propagación está dada por  $\tilde{\gamma}(s) = \frac{s}{\sqrt{1 + \delta_\nu s}}$  que puede aproximarse mediante los dos primeros términos de una serie de Taylor, los cuales son

$$\tilde{\gamma}(s) \approx s + \frac{\delta_\nu}{2}s^2,$$

así, la ecuación (2.52) se puede escribir como

$$D(s) \approx e^{a_1^i s + a_2^i s^2}, \quad \text{con } a_1^i = -\frac{\ell_i}{c_0}, \quad a_2^i = \frac{\delta_\nu \ell_i}{2 c_0}. \quad (2.53)$$

Si el término asociado con la viscosidad  $a_2^i$  es despreciable,  $D(s)$  se reduce a la exponencial  $e^{a_1^i s}$  que corresponde en el dominio del tiempo con un retardo de valor  $a_1^i$ . Bajo estas condiciones,  $G_1$  puede ser implementada en Simulink siguiendo la estructura serial de dos sistemas retroalimentados (2.49) y mostrada en la Figura 2.9.

Los valores de las constantes utilizadas dependen de las condiciones particulares del medio en que se realiza una prueba experimental, por ello es necesario considerar las variaciones posibles en este aspecto. La ubicación geográfica en la que se realizan los experimentos afecta el resultado final, ya que ni la presión atmosférica ni la densidad del aire son independientes de la altitud, para ello es preferible expresar de manera funcional la densidad del aire con respecto a la presión atmosférica como

$$\rho_0 = \gamma \frac{P_0}{c_0^2},$$

de este modo las mediciones son más congruentes con los resultados experimentales. Una prueba en la Ciudad de México implica parámetros bien distintos debido a la altitud, ya que se tiene una presión atmosférica de 78 [kPa] aproximadamente, lo que resulta en  $\rho_0 = 0.93$  [kg/m<sup>3</sup>] usando una relación de calores específicos  $\gamma = 1.4$ . En las simulaciones se usa una densidad de 1.21 [kg/m<sup>3</sup>] para coincidir con las constantes propuestas en la bibliografía utilizada pero se deben tomar en cuenta las consideraciones mencionadas.

Considerando los parámetros mostrados en la Tabla 2.3 se simuló la función de transferencia  $G_1$  usando como señal de excitación un impulso de duración 0.45 [ms] que inicia a los 0.55 [ms]. Los valores de las constantes físicas son tomadas de Blackstock (2000) y únicamente las características de las fallas son elegidas arbitrariamente.

Las respuestas impulso, tanto para el bloqueo como para el orificio, se muestran en las Figuras 2.11 y 2.12 respectivamente. Se observa en ambas figuras la presencia de un primer impulso que registra el

micrófono a los 1.57 [ms] y que se puede asociar al impulso propagado por el primer segmento del tubo intacto. Además, se presenta una pareja de impulso a los 19.063 [ms] de excitar el tubo y que son producto de la reflexión provocada por las fallas. Comparando esta pareja de pulsos se observa una diferencia entre el escenario de orificio y de bloqueo. En el caso del bloqueo la pareja de pulsos mantiene la fase de la señal original, mientras que para el orificio las parejas están defasadas con respecto al pulso de excitación. La tercera pareja de impulsos registrados en el micrófono se deben a las ondas reflejadas en la bocina y que son de poca utilidad para caracterizar las fallas. En conclusión, la segunda pareja de impulsos es la que ofrece posibilidades para diagnosticar la falla en el tubo.

Sin embargo, a partir de estas simulaciones, no es posible obtener expresiones que sirvan como firmas de fallas para caracterizar su coeficientes de reflexión y posición  $z_1$ . Este problema está presente también al estudiar la estructura retroalimentada de  $G_1$ . Así que resulta conveniente buscar otro método para la caracterización en general de la relación existente entre respuesta al impulso y fallas, es decir el patrón de fallas. Esta problemática motivó el uso de la teoría de grafos para obtener una caracterización adecuada. Esta propuesta se presenta en la siguiente sección.

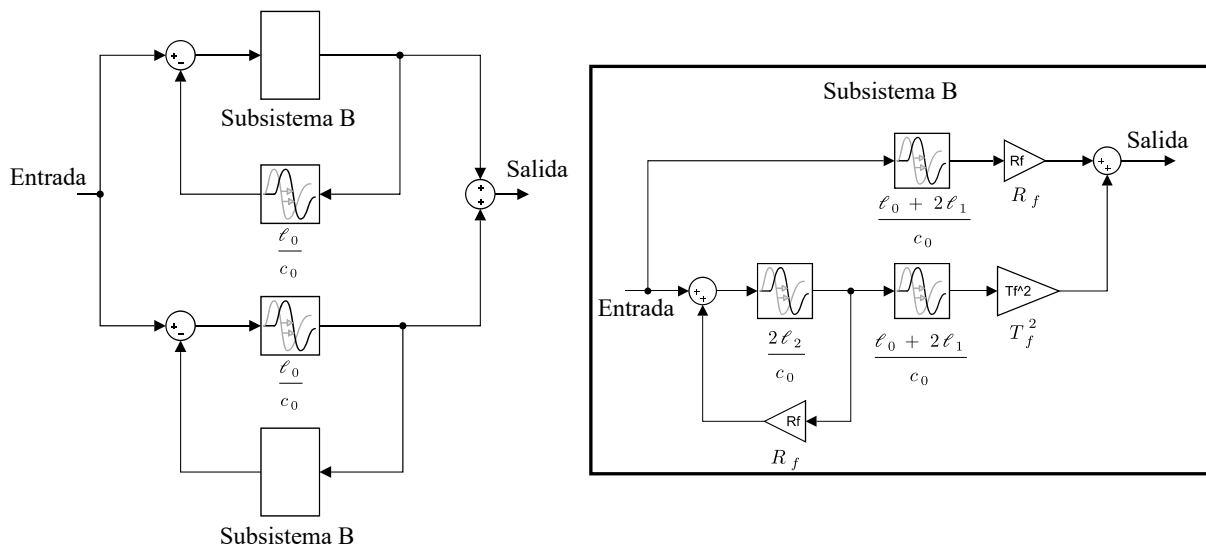


Figura 2.9: Diagrama a bloques del simulador de la función de transferencia  $G_1$  en Simulink

|  |   |   |
|--|---|---|
| Aire   | $c_0 = 343$ [m/s]                                 | $\rho_0 = 1.21$ [kg/m <sup>3</sup> ]              |
| $\eta = 1.81 \times 10^{-5}$ [N-s/m <sup>2</sup> ] | $\delta_\nu = 1.2715 \times 10^{-10}$ [s]         | $\tau = 20$ [°C]                                  |
| $\ell_0 = 0.35$ [m]                                | $\ell_1 = 3.00$ [m]                               | $\ell_2 = 1.50$ [m]                               |
| $a_1^0 = -1.020 \times 10^{-3}$ [s]                | $a_1^1 = -8.746 \times 10^{-3}$ [s]               | $a_1^2 = -4.373 \times 10^{-3}$ [s]               |
| $a_2^0 = 0.648 \times 10^{-13}$ [s <sup>2</sup> ]  | $a_2^1 = 5.560 \times 10^{-13}$ [s <sup>2</sup> ] | $a_2^2 = 2.780 \times 10^{-13}$ [s <sup>2</sup> ] |
| Fuga   | $R_l = -1/3$                                      | $T_l = 2/3$                                       |
| Bloqueo  | $R_b = 4/5$                                       | $T_b = 1/5$                                       |

Tabla 2.3: Parámetros para detección de fallas

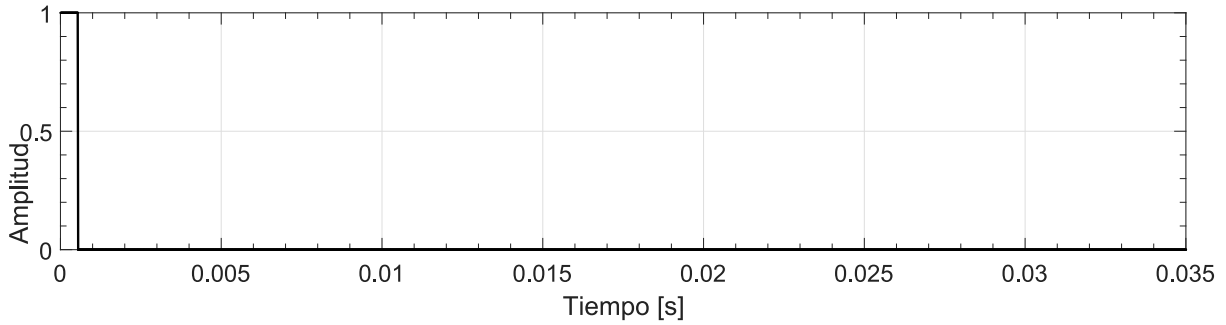
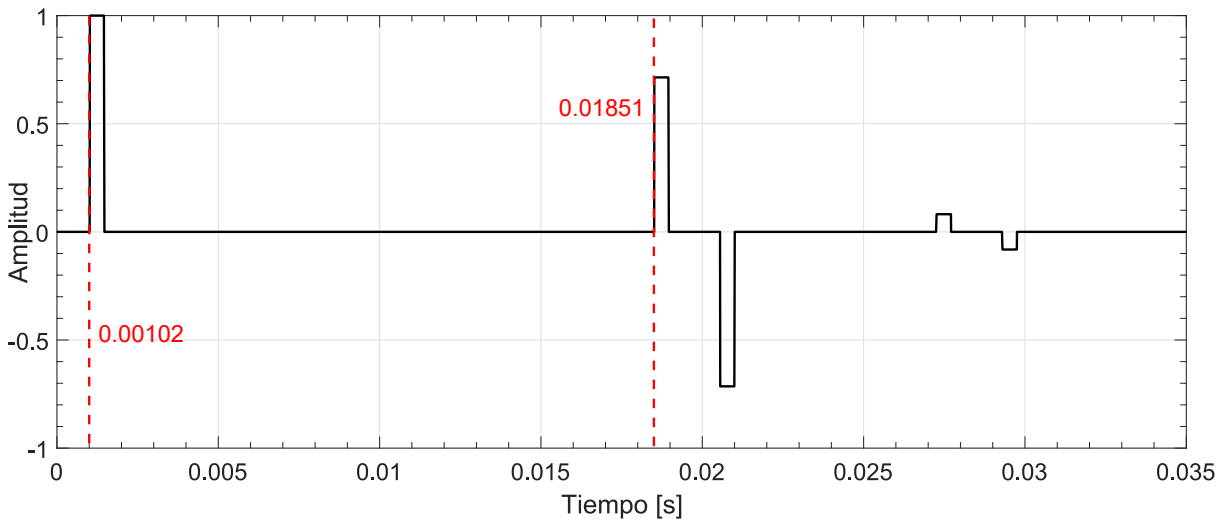


Figura 2.10: Señal de excitación, pulso cuadrado, para el sistema con los parámetros de la Tabla 2.3


 Figura 2.11: Respuesta para el pulso cuadrado en un bloqueo con  $\ell_0 = 0.35$  [m],  $\ell_1 = 3.00$  [m] y  $c_0 = 343$  [m/s]

## 2.4. Patrón de propagación antes fallas usando grafos

Recientemente Peralta y Verde (2021) han propuesto usar la teoría de grafos para analizar el estado de onda de presión en el punto de observación de la falla y los extremos del tubo a partir del modelo  $G_1$ . El grafo orientado permite obtener la transferencia específica de la fuente de excitación al micrófono a través de los nodos asociados a la falla. Una ventaja del grafo orientado es que no requiere asumir valores numéricos del sistema para obtener conclusiones sobre su comportamiento Bollobas (2013).

El punto de partida para la caracterización de las trayectorias de la señal es el grafo orientado que se muestra en la Figura 2.13. El nodo  $v_8$  corresponde a la fuente de excitación en  $z = 0$ . El nodo  $v_9$  representa la presión en el punto de observación y la señal en dicho punto llega viajando ya sea en sentido positivo desde el nodo  $v_6$  o desde el nodo  $v_7$  en sentido negativo. Los nodos  $\{v_1, v_2, v_4, v_5\}$  están asociados al punto de falla y se observa claramente que la transmitancia  $R_f$  determina la forma en que la señal regresa hacia el micrófono pasando por  $v_5$  y  $v_7$  y viajando en sentido negativo. El nodo  $v_3$  corresponde a la presión en el extremo inferior del tubo  $z = L$  y que también retorna a al nodo pasando por  $v_5$  y  $v_2$ .

La descripción de las trayectorias posibles de la señal para la identificación de las fallas a partir del grafo orientado se presentan en la Tabla 2.4. En dicha tabla se supone por simplicidad que  $\tilde{\gamma} = s$ . De los hechos presentados en la tabla sobre las trayectorias como consecuencia de la falla en el tubo se pueden

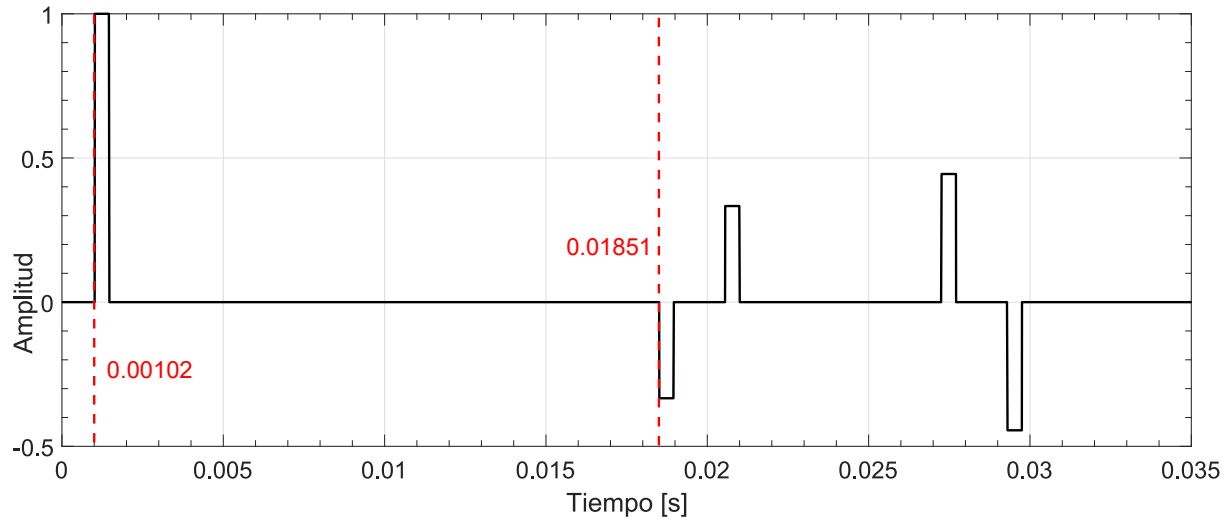


Figura 2.12: Respuesta para el pulso cuadrado en una fuga con  $\ell_0 = 0.35$  [m],  $\ell_1 = 3.00$  [m] y  $c_0 = 343$  [m/s]

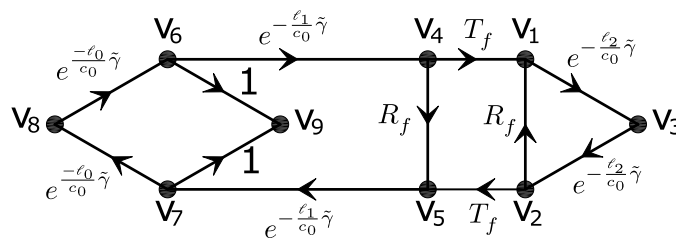


Figura 2.13: Grafo orientado de la propagación de las señales en el sistema  $G_1$

extraer propiedades importantes de la función de transferencia  $G_1$  para determinar la posición y magnitud de ésta.

En resumen las propiedades útiles para la detección de las fallas de la respuesta al impulso del sistema se reducen a:

- La onda incidente se manifiesta en el micrófono al tiempo

$$t_1 = \frac{\ell_0}{c_0}.$$

- La transmitancia de la trayectoria del nodo  $v_8$  a  $v_9$  viajando a través de los nodos  $v_4$  y  $v_5$ , asociados a la falla, está dada por

$$e^{-\frac{\ell_0}{c_0} \tilde{\gamma}} \times e^{-\frac{\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \times R_f \times e^{-\frac{\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}} \quad \text{o equivalentemente} \quad R_f e^{-\frac{\ell_0 + 2\ell_1}{c_0} \tilde{\gamma}}. \quad (2.54)$$

- El instante de tiempo en que se manifiesta el segundo pulso en el micrófono corresponde con el tiempo que le toma a la señal en viajar desde  $z_0$  hasta la falla y que se refleja llegando nuevamente al micrófono. Es decir, el pulso se manifiesta en

$$\tau_f = t_1 + 2t_2 = \frac{\ell_0 + 2\ell_1}{c_0}. \quad (2.55)$$

|  |  |
|--|--|
| <p>Hecho 1. La señal <math>P(0)</math> generada en el nodo <math>v_8</math> se propaga a través del segmento de tubo de longitud <math>\ell_0</math> a una velocidad <math>c_0</math> llegando al nodo <math>v_6</math> y <math>v_9</math> en un tiempo <math>t_1</math>. El tiempo de arribo depende de la función de transferencia <math>e^{\frac{-\ell_0}{c_0}\gamma}</math> y por tanto <math>t_1 = \ell_0/c_0</math></p>                |  |
| <p>Hecho 2. Al llegar la señal de manera simultánea a los nodos <math>\{v_6, v_9\}</math>, esta se manifiesta en el micrófono.</p>   |  |
| <p>Hecho 3. La señal continúa su propagación por el segmento del ducto intacto de longitud <math>\ell_1</math> y tarda en llegar al punto de falla en un tiempo <math>t_2 = \ell_0/c_0</math> dado que la transmitancia en dicho tramo es <math>e^{\frac{-\ell_1}{c_0}\gamma}</math>. Por tanto, el tiempo total del recorrido de la señal hasta llegar a la falla es <math>t_1 + t_2</math>.</p>  |  |
| <p>Hecho 4. Al llegar la señal al lugar de la falla, es decir en el grafo la señal llegar a los nodos <math>\{v_1, v_2, v_4, v_5\}</math>, la señal se divide en una parte reflejada y una transmitida. La parte reflejada se atenúa de acuerdo a la transmitancia entre los nodos <math>v_4</math> y <math>v_5</math>, con un factor <math>R_f</math>. Dado que este proceso no involucra ninguna dinámica ocurre de forma instantánea.</p> |  |
| <p>Hecho 5. La señal al pasar por el nodo <math>v_5</math> continúa viajando una longitud <math>\ell_1</math> en sentido negativo de <math>z</math> hacia el node <math>v_7</math>. Este recorrido se realiza en un tiempo <math>t_3 = \ell_0/c_0</math> sin ninguna alteración de su magnitud.</p>  |  |
| <p>Hecho 6. Una vez que la señal llega a <math>v_7</math> y de manera simultánea a <math>v_9</math>, ésta se manifiesta en el punto de observación como la señal <math>P(0)</math> pero atenuada en función del factor de atenuación <math>R_f</math>. Así que el tiempo total del recorrido de la señal desde el inicio de la excitación hasta que se manifiesta el efecto de la falla en el micrófono es <math>t_1 + t_2 + t_3</math>.</p> |  |

 Tabla 2.4: Resultados de la propagación de la señal inyectada en el nodo  $v_8$ 

- La distancia  $\ell_1$  se puede obtener dado que se conocen la velocidad del sonido  $c_0$  y la posición del micrófono  $\ell_0$ . Además, determinar en términos de la distancia  $z = 0$  el valor exacto en el que se encuentra la falla usando

$$z_r = \ell_0 + \ell_1. \quad (2.56)$$

- A partir de la magnitud de la primera reflexión se puede conocer el coeficiente de reflexión  $R_f$  y por tanto las características de la falla. Si  $A_0$  es la amplitud de la señal de excitación y  $A_1$  es la

magnitud del segundo pulso incidente el valor estimado de  $R_f$  es:

$$\text{Para un orificio: } R_f = -\frac{A_1}{A_0} \qquad \text{Para un bloqueo: } R_f = \frac{A_1}{A_0}.$$

Si se consideran señales de excitación normalizadas, el coeficiente se obtiene directamente de

$$\text{Para un orificio: } R_f = -A_1 \qquad \text{Para un bloqueo: } R_f = A_1.$$

Cabe hacer notar que como la señal de excitación puede ser inyectada en un tiempo diferente de cero, se puede calcular la distancia total de la falla a partir de la presencia del primer impulso asumiendo  $\ell_0 = 0$ .

## 2.5. Simulación con datos de excitación reales

El objetivo de esta sección es analizar el comportamiento del modelo desarrollado con una señal más real que el impulso. A continuación se presentan las simulaciones obtenidas con una fuente acústica generada emulando el comportamiento de una bocina.

Las simulaciones de las Figuras 2.10 - 2.12 muestran las respuestas registradas para el caso de una onda de excitación cuadrada. Como se mostró en la sección anterior, estas respuestas han permitido caracterizar el patrón de la presión en el punto de registro y los tiempos de retardo necesarios para la localización de una falla, así como la relación entre amplitudes definidas por  $R_f$ . Una ventaja del modelo matemático y simulador desarrollado es que permiten estudiar el comportamiento del sistema ante fuentes de excitación arbitrarias.

Se sabe que la respuesta del un altavoz tiene una dinámica propia y que ésta depende de parámetros específicos (Leach et al., 1979). Aunque en este trabajo no se pretende desarrollar el modelo matemático del altavoz, se hicieron mediciones reales del comportamiento de una bocina ante distintas fuentes digitales de entrada acoplado al ducto con el punto de registro correspondiente. En particular, para estudiar la respuesta del modelo del dispositivo se considero la señal de presión

$$P(0, t) = A_p (\text{sinc}[\omega(t - \varphi) + \Delta_c] - \text{sinc}[\omega(t - \varphi) - \Delta_c]) \theta(t - t_\theta) \quad (2.57)$$

que incluye los efectos de acoplamiento entre el tubo y el altavoz con  $\text{sinc}(\phi) = \sin(\phi)/\phi$ . Esta función tiene tres flancos principales que emulan el comportamiento de un altavoz ante una señal cuadrada en donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la función sinc,  $A_p$  es el coeficiente de amplitud,  $\varphi$  es el corrimiento en el tiempo,  $\Delta_c$  es la distancia entre el flanco y  $\theta(t - t_\theta)$  es la función de Heaviside, que determina el tiempo inicio de la maniobra. Para emular la fuente se usaron los parámetros de la Tabla 2.5 y la Figura 2.14 muestra la evolución de la presión en el punto de registro.

|              |                 |                   |                      |                  |
|--------------|-----------------|-------------------|----------------------|------------------|
| $A_p = 1.12$ | $\omega = 5200$ | $\varphi = 0.001$ | $t_\theta = 0.00055$ | $\Delta_c = 1.3$ |
|--------------|-----------------|-------------------|----------------------|------------------|

Tabla 2.5: Parámetros de la señal emuladora de una bocina

Las respuestas del simulador de fallas ante un bloqueo y un orificio se muestran en las Figuras 2.15 y 2.16 respectivamente. Los parámetros de simulación para las fallas y el dispositivo son las mismas que las usadas para el impulso, mostradas en la Tabla 2.3. Comparando el comportamiento de la onda de presión para las dos fallas con el caso de un impulso se observa que los tiempos en que se registran los máximos de



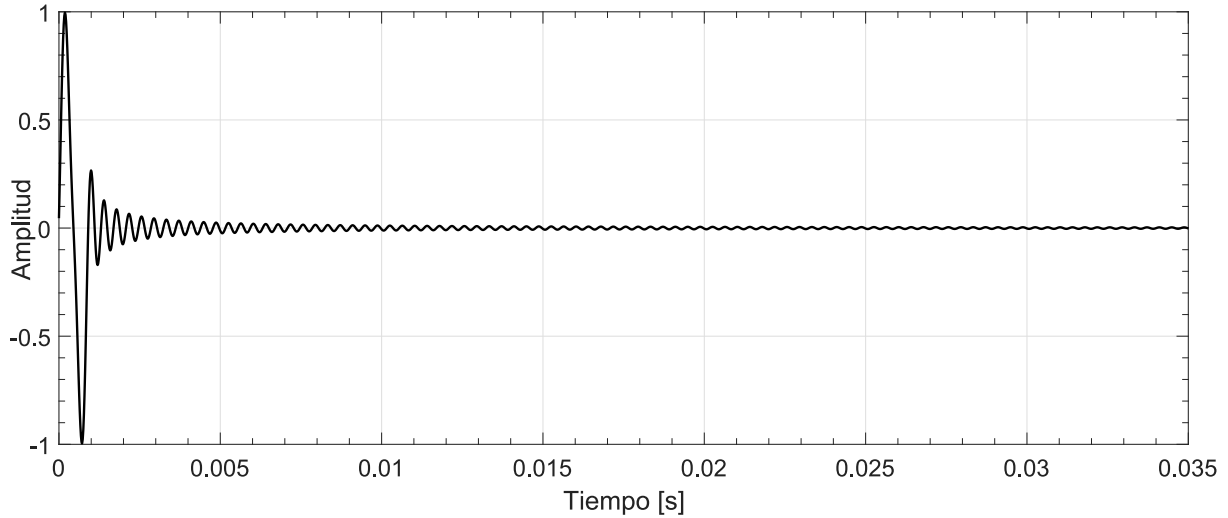


Figura 2.14: Señal de excitación usada en el sistema simulado con los parámetros de la Tabla 2.3

la segunda onda son de aproximadamente  $\tau_f = 0.01851$  [s] en ambos casos. La estimación de la distancia del micrófono hasta la falla resulta entonces

$$\ell_1 = \frac{c_0 \tau_f - \ell_0}{2} = 2.9994[m].$$

Es decir, a partir de la respuesta del sistema con la señal emulada del altavoz, se identifican los tiempos de propagación de las ondas reflejadas y por tanto se tiene la posibilidad de calcular la posición de la falla que genera la reflexión. Sin embargo, se observa de la figura que el método es sensible a la estimación del tiempo en que ocurre el máximo de la onda reflejada. La frecuencia de la onda es elegida en base al altavoz seleccionado, mientras exista la distancia suficiente entre la bocina y el micrófono no existe cambio sustancial en la respuesta del dispositivo.

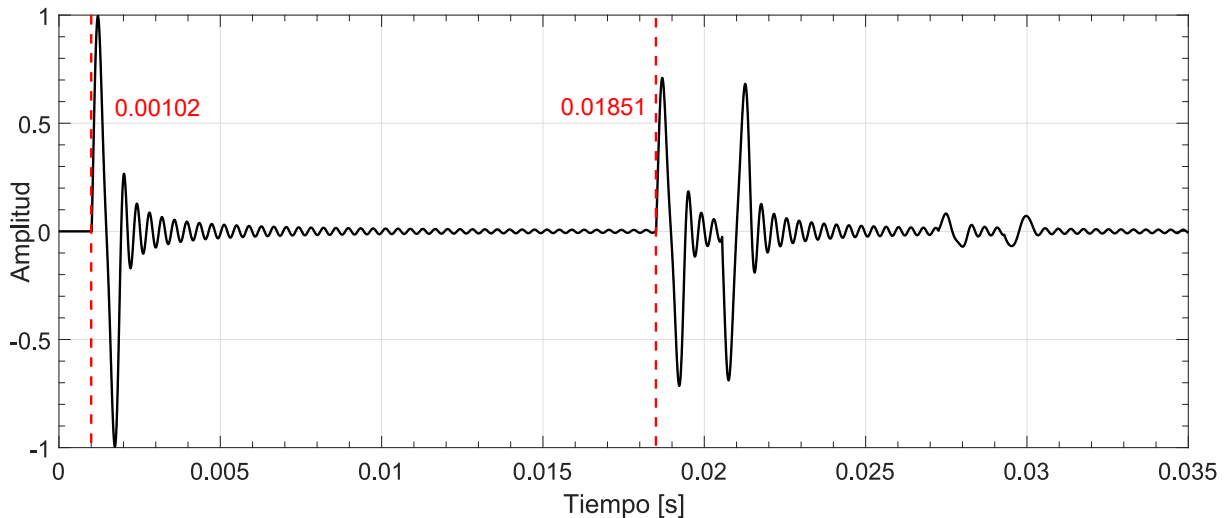


Figura 2.15: Respuesta ante el bloqueo con una estimación de  $\tau_f = 0.01906$  [s] y los parámetros de la Tabla 2.3 y

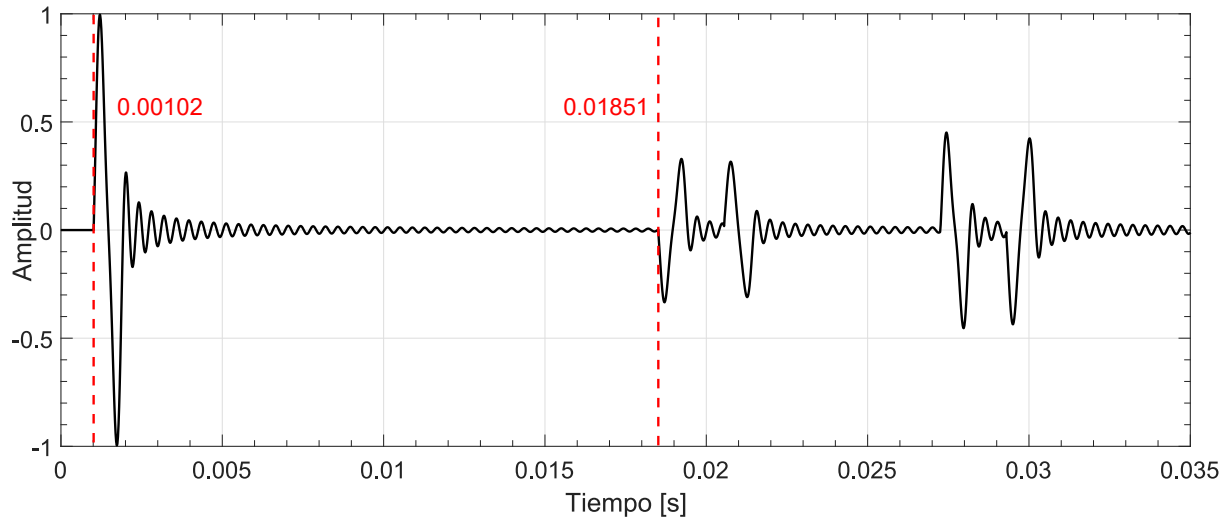


Figura 2.16: Respuesta ante el orificio con una estimación de  $\tau_f = 0.01906$  [m] y los parámetros de la Tabla 2.3

En conclusión, este capítulo presentó las bases teóricas del presente trabajo y ha permitido definir las especificaciones del dispositivo que se desea diseñar y construir. En particular el patrón de fallas obtenido está permitiendo ver alcances y dificultades para la aplicación de la metodología de inyección de una fuente acústica para la detección de fallas en ductos, tarea del grupo de investigación del Instituto de Ingeniería. (Peralta y Verde, 2021)

## Capítulo 3

# Diseño y Construcción del diagnosticador acústico

En este capítulo se describe el diseño y construcción del dispositivo diagnosticador de fallas. En primer lugar, se definen las características de los componentes utilizados, se detalla el montaje del sistema y se presentan las especificaciones de los equipos de medición, del actuador y aspectos relacionados con las necesidades del experimento. Además, se enlista el instrumental utilizado para las pruebas y se establecen las limitaciones de cada una de las partes constituyentes.

En segundo lugar, se presenta el tema de la generación de las señales acústicas que se pueden inyectar en el dispositivo; la importancia de ello es que, independientemente del montaje mecánico de la fuente acústica, de los instrumentos de medición y del tipo de falla bajo prueba, la fuente de excitación juega un papel muy importante en la viabilidad del diagnosticador. Se propone una campana de Gauss como fuente de excitación ya que el sistema responde sin generar demasiadas reflexiones en el micrófono y permita identificar en el punto donde se coloca el micrófono la reflexión provocada por las fallas.

Con objeto de lograr sistematizar los experimentos se propone generar la fuente de excitación con un experimento aleatorio repetido de manera tal que se pudieran registrarse eventos independientes en el micrófono y procesar las características de dichas respuestas en un contexto estadístico. Así que se presenta el procesamiento propuesto para la manipulación de las respuestas. Obviamente para cada tipo de fuente de excitación, se requieren técnicas de procesamiento específicas. Se trata la cuestión del software utilizado en cada una de las etapas, así como lo relacionado a la capacidad de procesamiento computacional.

Se hace notar que el contenido de este capítulo estuvo fuertemente afectado por las restricciones impuestas en la UNAM provocadas por la pandemia. Pero se trató de validar el diseño con pruebas en simulación considerando lo que se tenía disponible en el laboratorio y en casa.

### 3.1. Construcción física

El esquema general de dispositivo acústico propuesto se muestra en la Figura 3.1 y a continuación se describen las características más relevantes de los elementos.

1. **Ducto sin fuga.** Es un tramo de ducto con corte transversal redondo y uniforme por el que se propaga la onda acústica entre el punto de observación de la presión a través del micrófono, la falla a identificar y un tramo después de la falla hasta el material de atenuación asociado a la condición de frontera. El tubo está clasificado comercialmente con el nombre de *PVC hidráulico de 3 pulgadas*

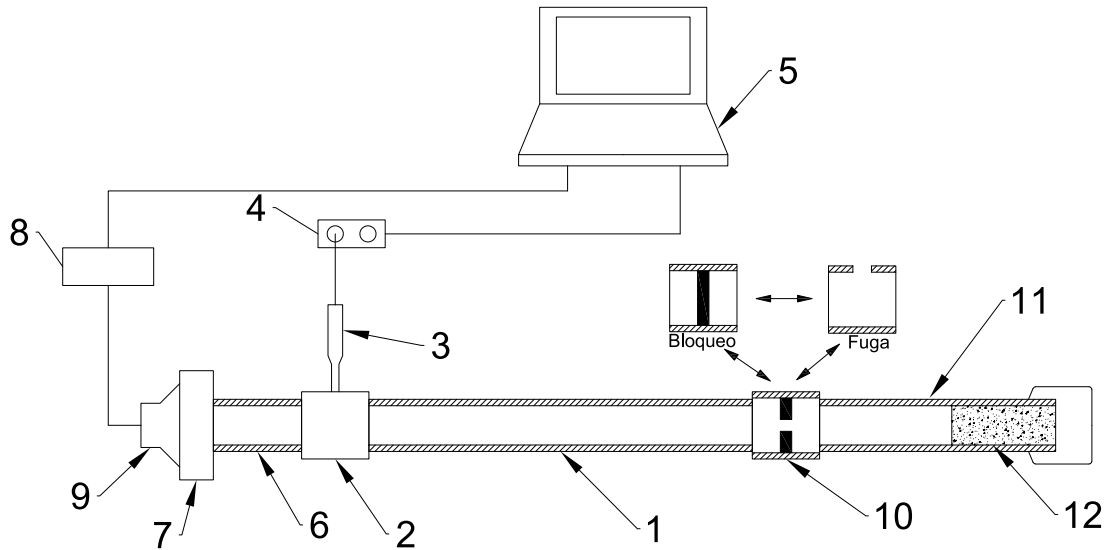


Figura 3.1: Integración del dispositivo

- *cédula 40*. Las dimensiones estándar (ASTM D1785) de este tubo son las siguientes: diámetro interno promedio: 0.077 [m], diámetro externo: 0.089 [m], Longitud:  $\ell_1 = 3$  [m], ancho de pared mínimo:  $5.48 \times 10^{-3}$  [m]. El diámetro del tubo fue seleccionado por ser similar al de la tubería del laboratorio de detección de fallas del Instituto de Ingeniería.

2. **Soporte de micrófono.** Se trata de una junta de PVC del mismo estándar del tubo utilizado. Esta pieza cuenta con una perforación lateral con diámetro igual a la sonda del micrófono para asegurar su ensamble y cierre hermético. Este elemento permite acoplar tubos de 3 pulgadas a cada lado. El micrófono de medición se ubica en posición perpendicular al largo del tubo y a la dirección en la que se propagan las ondas. Las uniones de este tipo son imperfectas pero su presencia es inevitable y se requeriría instrumental extra para medir el impacto del conjunto micrófono - soporte de micrófono.
3. **Micrófono.** Dependiendo de la configuración de la prueba que se realice, se utilizan uno o dos micrófonos simultáneamente. Se trata de micrófonos de medición de condensador. Las características principales que los hacen ideales para la aplicación del diagnosticador son: La alta sensibilidad gracias a su principio de funcionamiento comparados con los micrófonos dinámicos (Eargle, 2005). La omnidireccionalidad, es decir, siempre que se considere el mismo frente de la recepción, no se presenta cambio de amplitud debido a la dirección de la onda. Y además están diseñados para tener una respuesta en frecuencia relativamente plana. Esta propiedad se muestra para cada instrumento en la hoja de datos y en el certificado de calibración del fabricante de las Figuras 3.2 y 3.3. Sin embargo, una desventaja de este instrumento es que, debido a su principio de funcionamiento, requiere de una fuente de alimentación externa de voltaje de 48 [V]. Para tal fin se utilizó una fuente *Phantom Power* proporcionada por una interfaz de audio. En este trabajo se usaron los micrófonos *Behringer ECM8000* y *DBX RTA-M*.
4. **Interfaz de audio.** Este dispositivo digital sirve para acoplar el micrófono con el sistema de adquisición de datos. En particular se seleccionó la interfaz *Behringer UMC202HD*. Sus principales características son. La opción de alimentar los micrófonos con la fuente de poder *Phantom Power* de 48 [V] requeridos y de disponer de dos canales simultáneos de grabación. Esto permite mayor

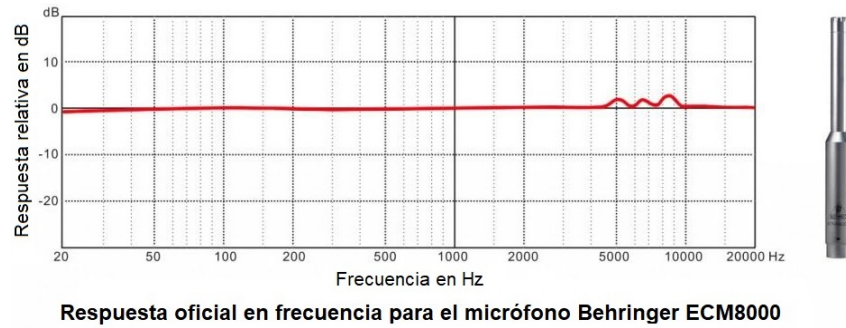


Figura 3.2: Respuesta en frecuencia para el micrófono de medición Behringer ECM8000

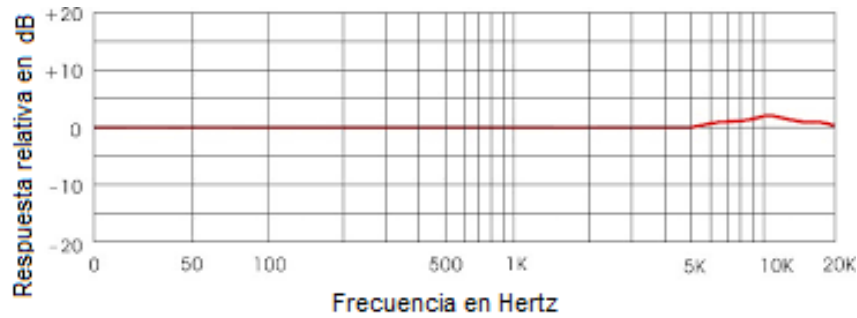


Figura 3.3: Respuesta en frecuencia para el micrófono de medición DBX RTA-M

versatilidad para aplicar diversos esquemas de prueba y además los ajustes de ganancia son independiente para cada canal. Otra propiedad útil es la de poder monitorear de manera directa en tiempo real las señales captadas por los micrófonos. En cuanto a la conversión analógica digital de la señal del micrófono que se almacena en la computadora, está se realiza vía USB y permite seleccionar la frecuencia de muestreo hasta con un valor máximo de 192 [kHz]. Resumiendo, se trata de un dispositivo *plug and play* y es compatible con los sistemas operativos más comunes y también con la mayoría de los softwares disponibles comercialmente para la edición de audio.

5. **Computadora.** Es el centro de procesamiento del sistema experimental, se encarga de las tareas de generación de señal y adquisición de datos. La detección e identificación no se realizó en tiempo real, por lo tanto, la capacidad de cómputo exigida a este componente se limita a la capacidad de capturar las muestras enviadas por la interfaz de audio. Para ello se considera que se tiene un sistema operativo y un software de grabación y/o edición de audio, todo lo cual, requiere de una cantidad estimada de recursos del procesador. Para las pruebas realizadas se usó una computadora portátil con procesador *Intel Core i7-4700MQ CPU @ 2.4 GHz* de 64 bits y memoria RAM de 8 [GB] con el sistema operativo *Windows 10*. La adquisición de datos se realiza con el software de grabación de audio *Audacity*. Debido a la frecuencia de muestreo (192 [kHz]) y al uso de repeticiones en la emisión y detección se obtiene una enorme cantidad de datos guardados. La computadora que realiza el procesamiento debe ser capaz de manejar y procesar en un tiempo razonable las colecciones de datos almacenados en forma de pistas de audio o vectores (Smith, 2003).
6. **Extensión entre el altavoz y el micrófono.** Este un segmento de ducto que conecta el soporte de altavoz con el soporte de micrófono. La distancia entre ambos es de  $\ell_0 = 0.35$  [m] desde que se genera la onda hasta que pasa por primera vez por el punto de observación. Este recorrido inicial

tiene el fin de eliminar las reflexiones perpendiculares a la dirección de propagación, es decir, se tratar de aplanar la onda.

7. **Soporte de altavoz.** Se utiliza para sujetar y fijar el altavoz de excitación en su lugar de operación. Es un conjunto de brida y brida ciega de PVC correspondiente al mismo estándar del tubo, asegurado con pernos y tuercas de acero. Si bien el conjunto está ensamblado de manera ajustada y firme, no está sellado herméticamente.
8. **Amplificador de potencia.** Este componente tiene como función amplificar la señal digital de baja potencia generada por la computadora a través de su salida de audio y la transforma en una señal eléctrica capaz de ser reproducida por el altavoz con la potencia necesaria para viajar a lo largo del tubo. Este aparato tiene su propia dinámica de respuesta y se escoge en función a su ancho de banda. La potencia entregada es un factor importante para evitar sobrecargas y no debe ser mayor a la potencia del altavoz. Se utilizó un amplificador de clase T de alta fidelidad *Pyle PFA200* de 60 [W].
9. **Altavoz.** El elemento de excitación del dispositivo. Debe ser capaz de proporcionar una respuesta fiel de la señal eléctrica entregada por el amplificador de potencia. La respuesta del componente depende tanto de la dinámica del amplificador como la del conjunto imán-membrana en el que se basa el funcionamiento de este actuador. Si se pretende una propagación plana a lo largo del ducto, como es el caso de este trabajo, la longitud de onda permitida para la señal generada debe tener un mínimo valor permitido, ello para evitar reflexiones transversales. Se trabajó con un altavoz de agudos (*tweeter*) *Pyle PDBT28* con cono de 0.0254 [m], una potencia máxima de señal pulsante de 300 [W] y un marco de sujeción de 0.127 [m]. La elección de este altavoz se debe a su tamaño compacto e ideal para el montaje, el ancho de banda de la respuesta y su alta potencia. Este componente tiene frecuencias mínima y máxima de respuesta de 2 [kHz] y 20 [kHz] respectivamente con una sensibilidad de 104 [dB]
10. **Soporte para falla de prueba.** En este accesorio se coloca la muestra de la falla que se pretende identificar. Se trata de una junta de PVC del mismo estándar del ducto en la que se agrega material ya sea el bloqueo o se perfora lateralmente emular un orificio con el objetivo de generar una discontinuidad en el medio por el que se propaga la señal acústica. Este es un elemento intercambiable ya que se deben probar bloqueos y fugas, la muestra está fija en cada una de las juntas, las cuales se colocan según se requiere. Este trabajo se centra en la fuga como falla, para las pruebas realizadas se considera principalmente la respuesta acústica ante una perforación transversal redonda con un diámetro de media pulgada, 0.0127 [m]. La respuesta es comparada con una señal de referencia que corresponde a un caso sin falla.
11. **Extensión de ducto para amortiguación.** Es un segmento de ducto con las mismas características que el ducto principal sin fuga colocado después de la falla. La función de este segmento es el de extender la propagación de la onda más allá del punto de daño y evitar que la reflexión debida al final del tubo interfiera con la reflexión debida a la falla. La longitud de este segmento para el presente trabajo es de  $\ell_2 = 1.5$  [m].
12. **Material de atenuación.** Una cantidad de material con un coeficiente de absorción elevado. Se busca que la energía de la señal incidente sea disipada antes de llegar al extremo final del tubo ( $z = L$ ) y, con ello, eliminar reflexiones en la dirección negativa de  $z$ . Este objetivo se cumple de manera parcial ya que el coeficiente de absorción depende de las frecuencias que componen la

señal incidente, provocando que existan algunos reflejos de la señal. Se usaron paneles cuadrados de espuma acústica. La geometría del material de atenuación también es importante, en general se busca que el choque de la onda sea en superficies irregulares y altamente absorbentes por lo que la espuma se puede usar distribuida en diferentes tamaños Fuchs (2013).

## 3.2. Caracterización experimental de la señal de excitación

La generación de la onda de excitación del dispositivo es un aspecto fundamental para la obtención de resultados confiables. En esta sección se presentan los criterios de selección para la señal de entrada en tres pasos. Primero, se caracteriza el altavoz mediante su respuesta en frecuencia y en tiempo. Al obtener las características del altavoz, el segundo paso es seleccionar la forma de onda ideal para la aplicación al dispositivo. Finalmente, después de seleccionar la forma de la onda, se determina la ganancia aplicada a la señal para el registro de la respuesta de la presión  $p(z_0, t)$ .

### Datos experimentales del altavoz

La segmentación del espectro audible permite usar altavoces optimizados para funcionar mejor en cada rango de frecuencia: graves, medios y agudos (Dickason, 2006; Hill, 2019). Debe notarse que el espectro audible para el ser humano tiene un rango de entre 20 [Hz] a 20 [kHz] mientras que el altavoz de agudos (*tweeter*) seleccionado tiene un comportamiento típico para esta clase de dispositivos, en particular, su respuesta en frecuencia está dada para el rango de 2 [kHz] a 20 [kHz] que se muestra en la Figura 3.4. Debe mencionarse que no es necesario que la onda emitida se encuentre en el rango audible, pero la selección de la bocina resulta más vérsatil debido a la mayor oferta en el mercado.

El desarrollo del modelo de propagación desarrollado en el Capítulo 2 caracteriza la respuesta del sistema ante señales arbitrarias, sin embargo, la forma de la señal fuente  $p(0, t)$  debe ser generada por la respuesta del altavoz. Para caracterizar el altavoz en el dominio del tiempo se realizaron mediciones usando una señal cuadrada de 0.003 [s] de duración como entrada. La respuesta de la bocina acoplada al dispositivo detector en ausencia de falla se presenta en la Figura 3.5. Se observa de la respuesta en el punto de observación dos fenómenos. Cuando la señal de excitación es constante la respuesta del sistema presenta oscilaciones. Además, el altavoz intenta seguir los frentes de subida y bajada de la señal de excitación.

Como conclusión de la respuesta del dispositivo al pulso de duración 0.003 [s], se estudiaron varias fuentes de sonido que permitieran tener una respuesta patrón más simple de identificar que con el pulso.

### Selección de la forma de onda

A partir de los experimentos realizados con la fuente sonora en forma de pulso, se consideró conveniente generar una señal con pendientes suavizadas tratando de evitar reflexiones en el tubo en condiciones nominales y además poder determinar el tiempo de inicio y final de la señal acústica. Además, se desea usar una señal de corta duración y suave (en sentido matemático) para poder tener un pulso en el micrófono. Así que se propone generar la función exponencial en la computadora

$$V(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \Phi e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.1)$$

con un valor de  $\sigma = 0.1 \times 10^{-3}$  y de  $\tau = 0.3 \times 10^{-3}$  [s],  $\Phi$  es una ganancia, en este caso se busca la amplitud unitaria por lo que  $\Phi = \sqrt{2\pi}$ . Así a través del valor de  $\tau$  se puede elegir el tiempo en que la señal excita al sistema. Para la selección de  $\sigma$  se consideró una señal de corta duración de aproximadamente

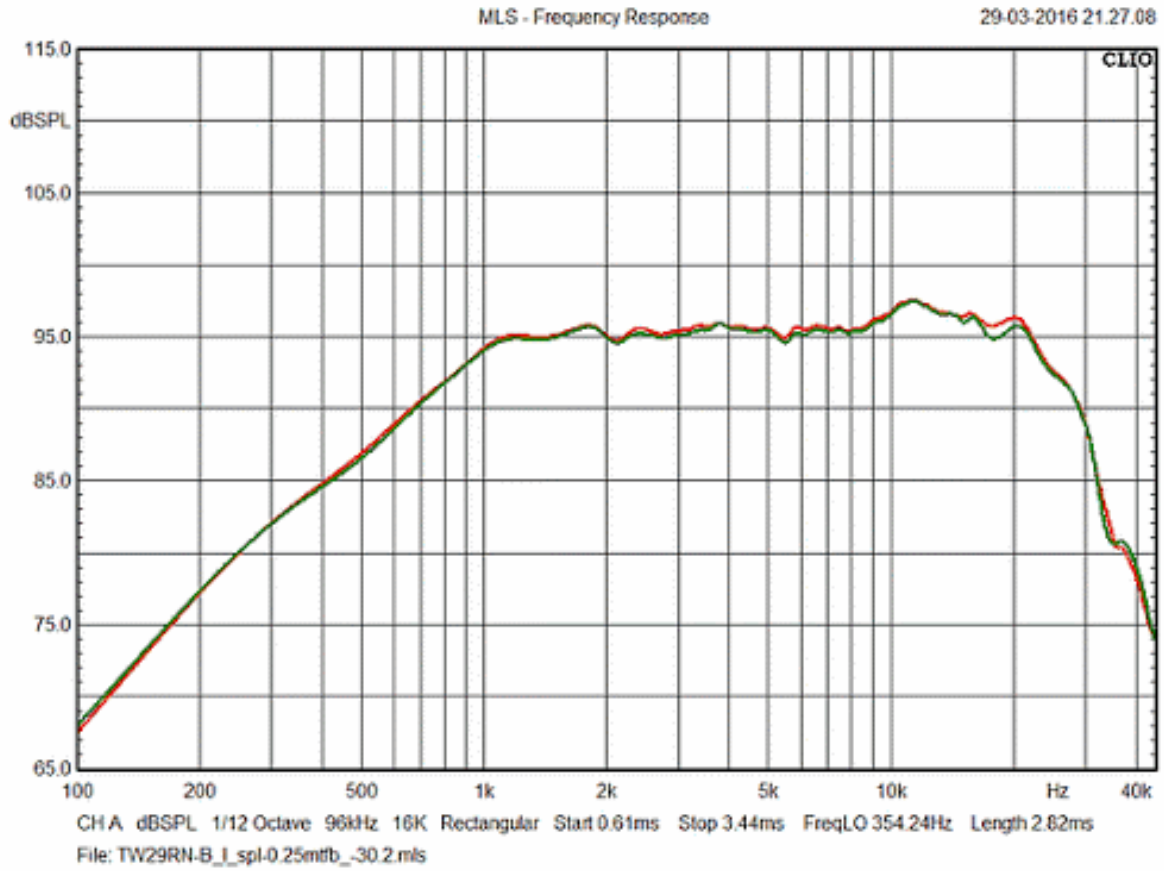


Figura 3.4: Respuesta en frecuencia típica para un altavoz de agudos (tweeter audio driver) similar a la usada en las pruebas de laboratorio

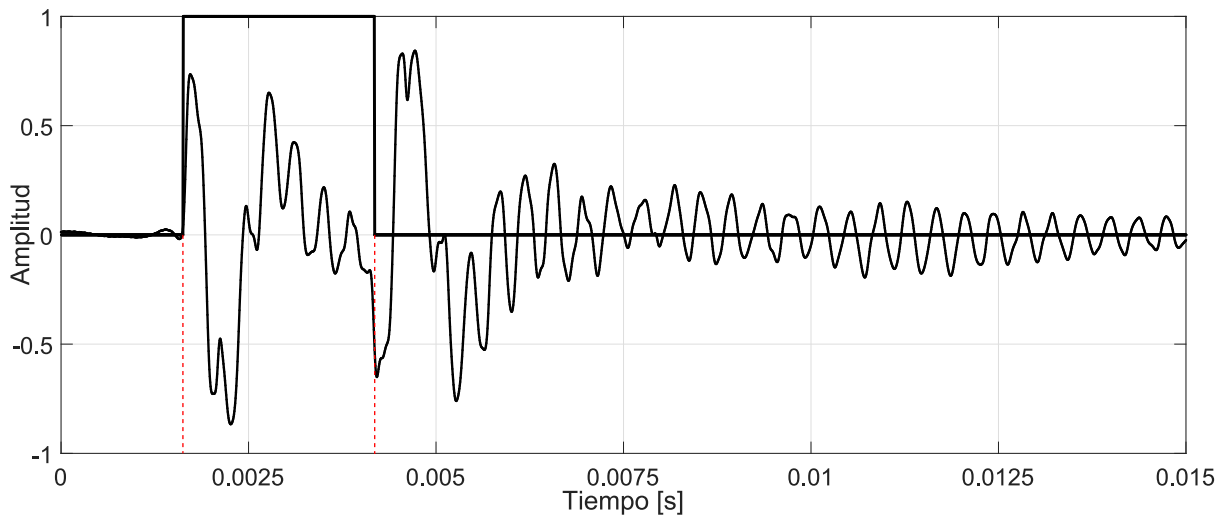


Figura 3.5: Señal cuadrada de entrada y la respuesta del altavoz integrado al dispositivo



0.5 [ms]. La Figura 3.6 muestra en la parte superior (a) la evolución de la señal emitida por la bocina y en la parte inferior (b) la evolución de la presión acústica registrada a una distancia de 0.35 [m] de la bocina. Se observa que el sistema responde con tres ondas reflejadas y después la señal se atenúa fuertemente. Cabe mencionar que no fue posible usar esta señal en condiciones de falla en el dispositivo experimental pero se menciona por su importancia teórica.

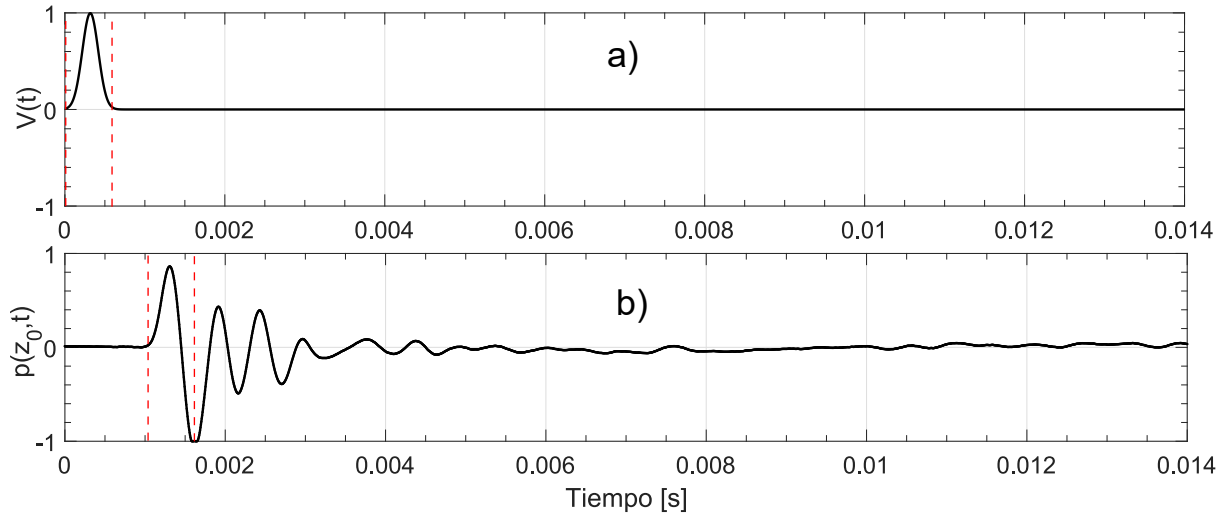


Figura 3.6: a) Evolución de la fuente de excitación de la señal generada en la computadora 3.1 y b) Evolución de la presión del dispositivo a 0.35 [m] de la bocina

### Amplitud

Como en todo sistema físico, la fuente generadora debe de ser una magnitud tal que haga que el dispositivo opere en una región lineal y el micrófono también opere también en un punto de operación lineal. En el caso del dispositivo se tienen dos grados de libertad en cuanto a los factores de amplificación que son los amplificadores de la bocina y del micrófono.

Para la ganancia del micrófono el límite inferior está determinado por la cantidad de ruido ambiental presente, es decir existe un mínimo valor con el cual no puede distinguirse las señales del ducto y el ruido. El máximo valor de la ganancia para este componente está limitado por el nivel de saturación de los componentes de la grabación.

Es notable la presencia de saturación en el registro de la Figura 3.7, esto es indeseable, pero debe tolerarse ya que la atención recae principalmente en la señal reflejada. Una ganancia correctamente seleccionada puede lograr que ambas ondas, tanto la incidente como la reflejada sean registradas en su totalidad pero, en el caso de la detección, donde la posición de la falla es desconocida, se ha seleccionado una ganancia en la que son prioritarias las características de la onda reflejada y, sobre todo, el tiempo de ocurrencia del paso de la reflexión por el punto de observación. Para la selección de ganancia del amplificador del altavoz se debe seleccionar una buena relación de señal a ruido. Como la primera reflexión es la que brinda información sobre la posición de la falla, se trató de maximizar la señal generada para identificar fácilmente el perfil de la falla en el punto de registro.

La Figura 3.7 compara dos señales obtenidas con dos factores de ganancia. Puede observarse que con una alta ganancia en el micrófono la presencia de ruido aumenta por lo que hay que establecer un compromiso entre la señal y el ruido.

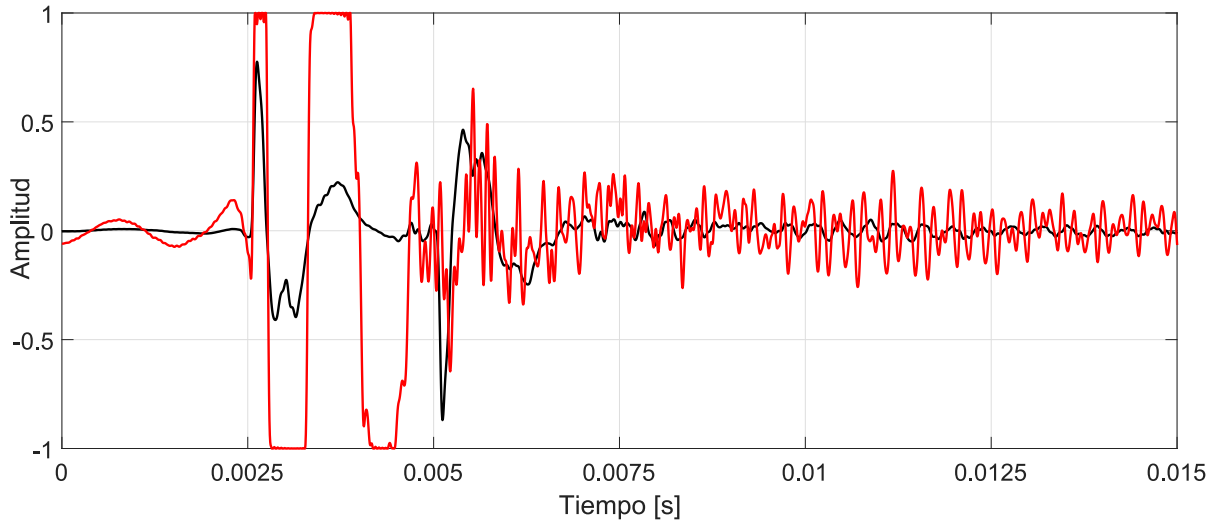


Figura 3.7: Respuesta del dispositivo con la misma forma de la señal de excitación pero con dos distintos factor de amplificación de la señal

### 3.3. Estimación automática del patrón de fuga

La presencia de ruido ambiental en el laboratorio y las condiciones poco robustas en cuanto al aislamiento del tubo, afectan la confiabilidad de los experimentos. Por tal motivo se propone sistematizar la generación de la respuesta del tubo de forma automática

Así se consideró una serie de treinta experimentos independientes realizados con la misma fuente acústica  $V(t)$ . Es decir se generó y se activó la bocina con la misma señal de excitación con un periodo  $T = 5$  [s]

$$V_p(t) = \sum_{k=0}^{30} V(t + kT)$$

El periodo  $T$  fue seleccionado considerando que la respuesta a la excitación en dicho intervalo de tiempo estaba lo suficientemente atenuada en el tubo, como para considerar cada respuesta un evento independiente. La respuesta del sistema ante los eventos independientes se registro de forma automática obteniendo la serie de tiempo en el micrófono.

$$P_p(z_0, t) = \sum_{k=0}^{30} P(t + kT)$$

La Figura 3.8 muestra un ejemplo de las señales registradas por el dispositivo, la Figura 3.9 muestra la evolución de la media de la respuesta estimada del dispositivo ante una falla dada por

$$\bar{P}(z_0, \tau) = \frac{1}{30} \sum_{k=0}^{30} P_p(z_0, t + kT) \text{ para } 0 \leq \tau < T.$$

Es decir, se grafica el patrón promedio para una falla. En este caso el tiempo en que se manifiesta la falla en el promedio patrón es aproximadamente de  $t = 0.01855$  [s]. De manera equivalente, corresponde a la señal registrada un tiempo  $0.01753$  [s] después de que la señal de excitación se manifiesta en el micrófono. Se hace notar que en este caso el factor de amplificación del micrófono satura el convertidor A/D de la computadora, pero permite identificar la señal provocada por la falla al tiempo  $\tau_f$ .

Resumiendo, el procedimiento automático para la estimación del patrón de la respuesta ante la señal acústica periódica se reduce a:

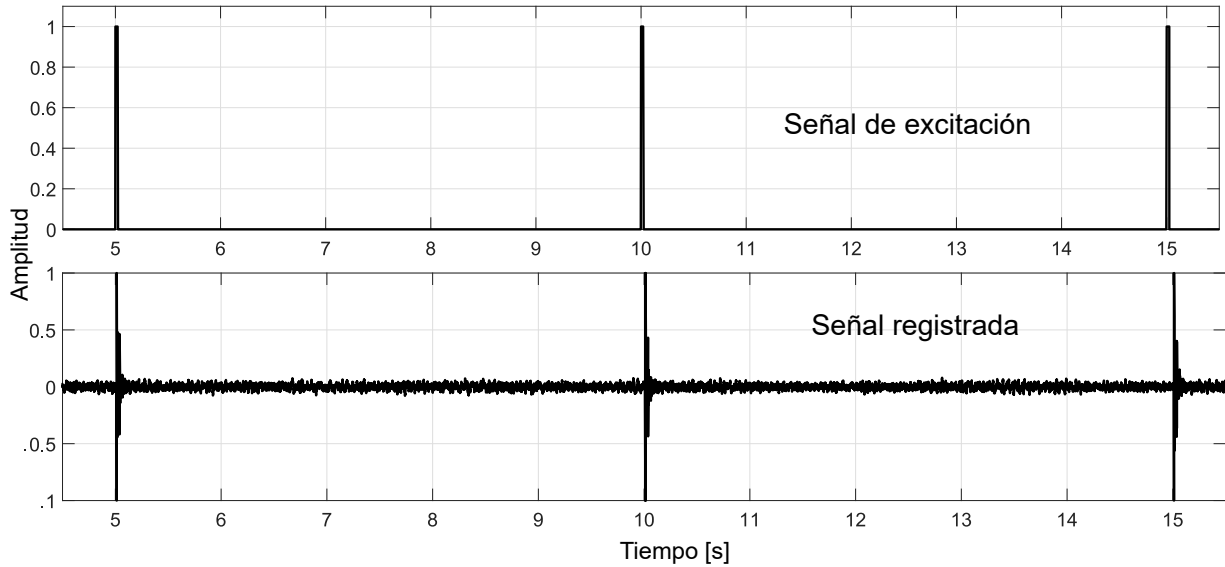


Figura 3.8: Registro de entrada y salida del dispositivo

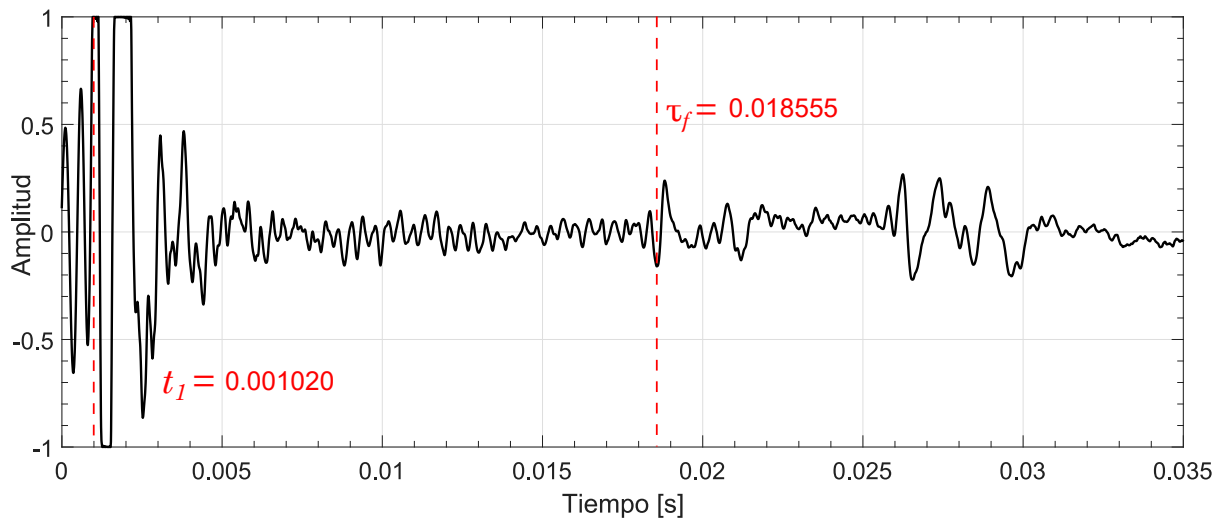


Figura 3.9: Respuesta experimental con un conjunto de experimentos independientes

1. Generar la señal periódica en la computadora  $V_p(t)$  con periodo  $T > 5$
2. Excitar con la señal  $V_p(t)$  la bocina y simultáneamente grabar la serie de tiempo de la respuesta del sistema
3. Procesar la señal periódica registrada considerando la periodicidad de la señal de excitación obteniendo treinta eventos independientes de la respuesta del sistema
4. Estimar el valor medio de todos los eventos independiente.
5. Graficar el valor estimado de las respuestas y estimar el tiempo  $\tau_f$ . (Mandel, 1964).

### Grabación

Para procesar las señales se uso el software *Audacity* que permite grabar y editar dos pistas de sonido simultáneas independientes. Como micrófono principal se usó en todas las pruebas el *Behringer ECM8000* y como micrófono secundario el *DBX RTA-M*. Todas las grabaciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 192 [kHz], el número de muestras entre cada señal de excitación fue 959827. Se hace notar que debido al compromiso del factor de ganancia para la detección de los efectos de las fallas, las ondas emitidas por la bocina presentaron una saturación. Se realizaron pruebas con un factor menor de amplificación pero en caso los patrones de los efectos de las fallas de una amplitud muy pequeña.

## Capítulo 4

# Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con el dispositivo de detección. Cada prueba se realiza con el fin de comprobar propiedades particulares del dispositivo y verificar el cumplimiento de las suposiciones establecidas. El capítulo se compone de dos secciones principales, la primera, enfocada a la comprobación experimental de los parámetros del dispositivo y la segunda, a las pruebas de validación del modelo.

### 4.1. Medición de los parámetros del dispositivo

Esta sección presenta dos experimentos de determinación de parámetros en el dispositivo. El primer experimento, *Atenuación de ondas perturbadoras ajenas a la falla* asegura la capacidad del dispositivo de atenuar ondas que se reflejan debido a la longitud total del dispositivo, particularmente, reflejos originados por el final del tubo. El segundo experimento, *Estimación de la velocidad de propagación de la onda* confirma el tiempo de recorrido de la onda.

#### 4.1.1. Atenuación de ondas

Para obtener mediciones confiables es importante la pureza de las señales registradas. El ruido puede ser acústico o electromagnético y es captado por los instrumentos de medición. Para disminuir la presencia de ruido se tienen métodos físicos y de procesamiento de señal. Algunos métodos comunes son el uso de un laboratorio aislado, aislamiento de partes del dispositivo o del instrumental, incremento de la relación señal-ruido y filtrado de la señal registrada.

Existe una fuente de interferencia que puede afectar la calidad de las mediciones y que es inherente a la construcción del dispositivo: las señales reflejadas debidas al final del tubo. Como el tubo es de longitud finita, en el extremo final se generan reflexiones. Las reflexiones indeseadas no se eliminan al dejar el extremo del tubo abierto o cerrado ya que, como se menciona en la Sección 2.2.2 ambas condiciones producen ondas reflejadas.

Una solución práctica para este problema es hacer que el tubo se comporte como un tubo de longitud infinita. La forma de lograr esto es introducir cerca del final del tubo un material con un alto coeficiente de absorción, es preferible que se utilicen distintos tipos de material y que se distribuyan en una variedad de tamaños y formas para lograr atenuar distintas componentes de frecuencia. Si bien no se produce una absorción perfecta, esta técnica permite que las reflexiones se atenúen lo suficiente en cada reflexión sucesiva.

En el dispositivo también se presentan ondas reflejadas del lado del altavoz, es decir, desde el extremo inicial del tubo en  $z = 0$ , estos son más difíciles de eliminar y se pueden mejorar las mediciones con una cámara anecoica y con técnicas activas de atenuación con el altavoz (Sharp y Campbell, 1997).

La utilización del material con alto coeficiente de absorción ofrece buenos resultados. En este experimento se usó *poliuretano* de alta densidad, un material específicamente producido para la atenuación acústica (Gao et al., 2016). La Figura 4.1 muestra los resultados de un experimento con el objetivo principal de verificar la eliminación de señales reflejadas indeseadas en el extremo final.

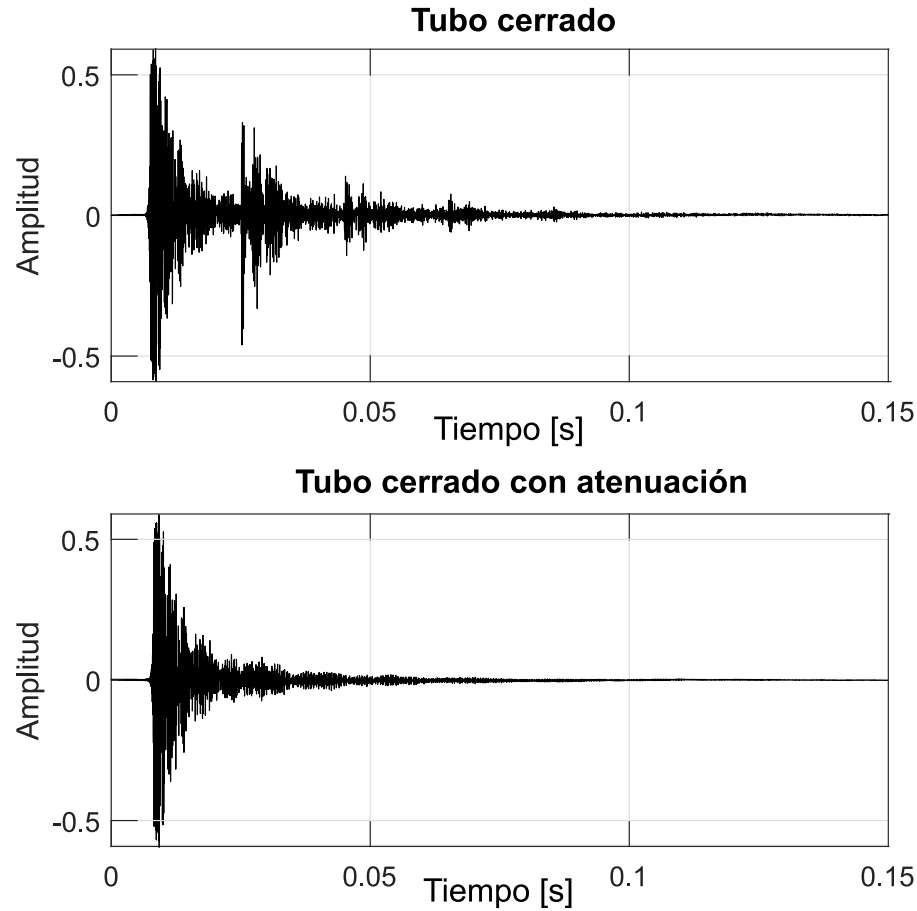


Figura 4.1: Respuesta comparativa de atenuación al final del tubo de pruebas

La figura 4.1 a) muestra la señal medida para el tubo sin material de absorción acústica, el tubo está cerrado con una tapa sólida de PVC. Como esta prueba se realiza sin falla y para evitar reflexiones debidas a las uniones de PVC, solo se utilizan dos tramos de longitud  $\ell_0 = 0.35$  [m] y  $\ell_1 = 3.00$  [m]. Se observa que las reflexiones aparecen por pares, la primera reflexión se debe al extremo en  $z = L = 3.35$  [m] y la segunda al extremo en  $z = 0$ .

$$c_0(\tau_f - t_1) = \ell_1 \quad \ell_1 = 5.848 \pm 0.172 \text{ [m]}. \quad (4.1)$$

La Ecuación 4.1 expresa

$$\text{velocidad} \times \text{tiempo} = \text{distancia}.$$

En este caso particular la velocidad del sonido se representa por  $c_0$  y el tiempo es la diferencia del tiempo

final, cuando se registra la onda reflejada  $\tau_f$ , y el tiempo inicial en que se registra la onda incidente  $t_1$ ;  $\ell_1$  representa la distancia total recorrida.

Las reflexiones subsecuentes corresponden a recorridos totales de 6.7 [m], 12.7 [m], 13.4 [m] y 19.4 [m], desde el instante en que se registra la primera señal. Las diferencias de distancia de 0.7 [m] corresponden a la distancia (recorrida de ida y vuelta) existente entre el inicio del tubo y el punto de registro, el cual es de 0.35 [m], esto se debe al hecho de que cada reflejo registrado parece presentar dos máximos (o mínimos) locales muy cercanos en el tiempo. Debido a la ausencia de un material que atenúe la señal se da un repetido recorrido de ida y vuelta de la onda dentro del tubo hasta que las pérdidas debidas a los choques contra la pared y la membrana del altavoz disipen totalmente la señal.

La Figura 4.1 b) muestra la señal registrada con el material de atenuación colocado entre  $z = 3.15$  [m] y  $z = 3.35$  [m], dando una distancia de recorrido total entre el micrófono y el extremo final de 2.8 [m].

En esta prueba no se puede lograr la completa atenuación de los reflejos de la onda, los cuales, sin embargo, son de una amplitud baja y se superponen con el remanente de la respuesta del aire en el punto de observación o bien se confunden con el ruido ambiental. Comparando ambas gráficas se puede considerar que, en el caso del sistema con atenuación, la onda pasa y no se presentan reflejos considerables, tal como se podría esperar de un tubo de longitud infinita.

#### 4.1.2. Estimación de la velocidad de propagación de la onda

Para esta prueba experimental se cuenta con un tubo con longitud total  $\ell_0 + \ell_1 = 3.35$  [m], que corresponde a un recorrido máximo de ida y vuelta en  $\ell_1$  de 6 [m]. Debido a consideraciones prácticas en el montaje del tubo y con la finalidad de mantener la precisión en esta prueba, no se utiliza todo el largo de ducto sino que se limita  $\ell_{1max} = 2.5$  [m]. La extensión de  $\ell_0 = 0.35$  [m] entre el altavoz y el punto de observación tampoco es utilizada en este caso. El recorrido máximo total de onda es de  $2\ell_{1max} = 5$  [m]. Aquí se consideran dos puntos importantes para la localización e identificación de una discontinuidad en el ducto bajo prueba:

1. Se toman los mismos puntos de referencia en las gráficas de cada señal, tales como puntos máximos, mínimos o cruce por cero, se puede comprobar que el intervalo entre una onda incidente y otra reflejada coincide con las predicciones teóricas en cuanto al recorrido a determinada velocidad del sonido.
2. Por la relación de amplitudes entre las ondas incidentes y reflejadas se puede conocer el coeficiente de reflexión en la falla.

En cuanto al primer punto, si se trata de una señal reflejada, el tiempo medido entre la onda incidente y su reflejo debe corresponder con el valor dado por la Ecuación (2.55), en donde  $t_1$  representa el instante en el que se registra la señal incidente,  $t_2$  es el instante en el que se registra la señal reflejada,  $z_0$  es la posición del micrófono en el tubo respecto al extremo inicial,  $z_1$  es la posición de la discontinuidad con respecto a la misma referencia del extremo del tubo,  $c_0$  es la velocidad del sonido.

Para estas pruebas se conoce la distancia que existe entre el punto de medición (dónde se coloca el micrófono) y el punto de discontinuidad o falla. También se asume que  $c_0$  es de 343 [m/s] (Blackstock, 2000).

$$z_1 - z_0 = \ell_1 = \frac{1}{2}c_0(t_2 - t_1) \quad (4.2)$$

En (4.2) se asume que se desconoce la distancia exacta de  $\ell_1 = z_1 - z_0$ , se conoce  $z_0$  porque es el punto donde se sitúa el micrófono, pero el segundo punto, la posición de la falla, es desconocido. En este

caso, se mide el intervalo entre las señales en su punto de referencia, lo cual da un valor  $\Delta t = t_2 - t_1$ . La constante  $c_0$  es conocida.

La prueba realizada en esta sección establece cuantitativamente la atenuación de una señal impulso. Este tipo de señal tiene distintas componentes de frecuencia en comparación con una señal sinusoidal pura y, por lo tanto, una vez que se tiene el impulso a inyectar, las componentes de frecuencia pueden determinarse con una transformada rápida de Fourier. En este caso la prueba mide el impulso incidente y su reflexión usando distintas distancias para el micrófono.

La Figura 4.2 muestra cinco señales que corresponden a cinco distancias entre el micrófono (móvil) y el extremo final del tubo 3 [m] (fijo), este extremo está sellado con una tapa de PVC que provoca una reflexión de la misma fase que la señal incidente que se debe a la relativa alta densidad del material, comparada con el aire. En la gráfica, las distancias ( $\ell_1$ ) entre el micrófono y el bloqueo total son: azul, 0.5 [m]; naranja, 1.0 [m]; amarillo, 1.5 [m]; morado, 2.0 [m] y verde, 2.5 [m].

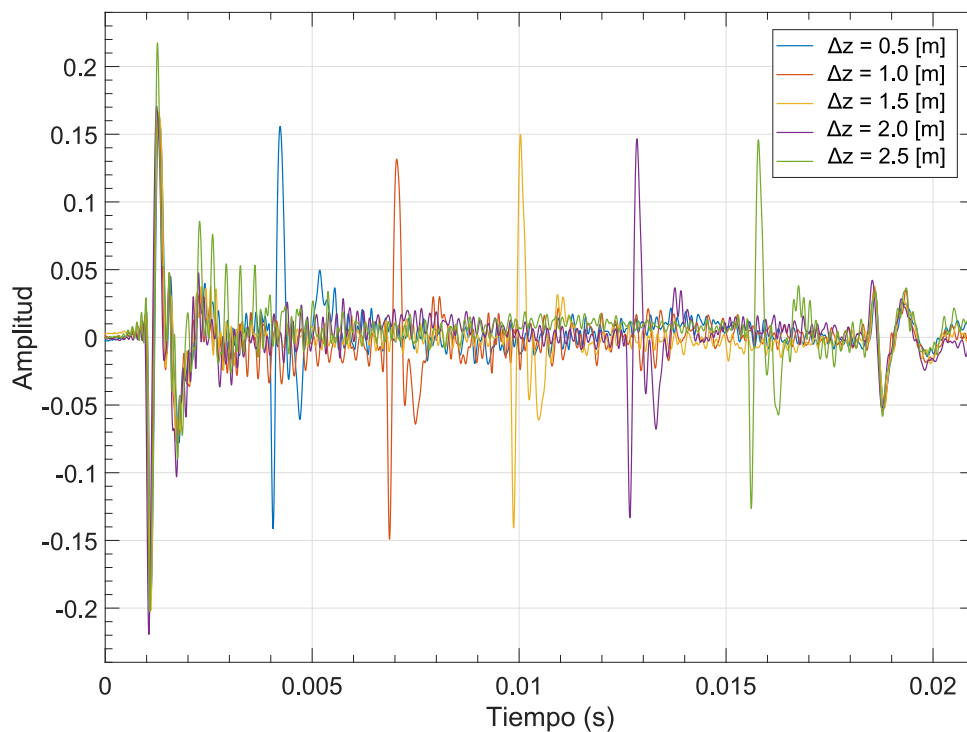


Figura 4.2: Retrasos para diferentes distancias  $\ell_1$

Como se mencionó, debido al bloqueo, las señales incidente y reflejada tienen la misma fase, por lo que se pueden tomar puntos de referencia similares en cada una de ellas, aquí se toman los mínimos locales, estos se convierten en los puntos de referencia tanto para evaluar los tiempos registrados, como para las amplitudes.

Independientemente de los valores numéricos registrados en las grabaciones, es importante mencionar un conjunto de propiedades cualitativas de las señales.

- Todas las señales presentan una región con valores cercanos a cero antes de la aparición del pulso en 0.001 [s]. Aunque esta región corresponde a un estado de reposo en el aire que llena el tubo, se presenta variación entre las distintas señales. La variación se debe al ruido ambiental y es aleatorio. De cualquier modo, el conjunto de datos recogidos en múltiples repeticiones de esta prueba aseguró



que este ruido está acotado en amplitud por  $\pm 0.01$  en el eje vertical con escala normalizada.

- Entre 0 y 0.001 [s] se aprecia un rizo acotado en amplitud por  $[-0.01, 0.03]$ , el acotamiento no es simétrico ya que el ruido agrega una componente de desplazamiento vertical u *offset* en la que se monta la señal. Este rizo no debe confundirse con ruido ya que se trata del inicio de la señal o *pre-ringing*, en todas las pruebas la respuesta del sistema es la misma para esta sección la cual corresponde al inicio de la señal que tiene un desarrollo gradual a diferencia de la señal escalón u onda cuadrada.
- Aunque para cada prueba la distancia en el dispositivo es reajustada, la respuesta de la onda incidente medida en el micrófono es la misma para todas, este hecho posibilita que cada registro pueda recorrerse en el tiempo y ajustarse con el objetivo de que la onda incidente de cada una de las mediciones se superponga y todas se sincronicen. Las principales características de todas las señales son las mismas en el segmento entre 0.005 [s] y 0.007 [s]
- Todas las señales tienen la misma fase, las características más notorias son la aparición, primero de un flanco negativo seguido de uno positivo.
- Las ondas reflejadas presentan la misma respuesta, independientemente de la distancia hasta el bloqueo. Es posible superponer todos los reflejos para que la distancia variante dependa de la diferencia entre señales incidentes, en otras palabras, sincronizar los reflejos. Por cuestiones de claridad, es mejor sincronizar las señales incidentes.
- Nótese el intervalo entre 0.018 [s] y 0.020 [s], todas las señales vuelven a coincidir, eso se debe a que en ese momento todas las ondas han recorrido el tubo completamente de ida y vuelta una vez y ahora se mide el segundo recorrido. Esto es congruente con las mediciones en el experimento anterior, en el que el recorrido es de 6 [m], si se usa como referencia el inicio del flanco de bajada en ambas señales se tiene  $c_0(0.018 - 0.001) = 5.831$  [m] que es un valor que coincide en un 97 % con los 6 [m] del ducto
- Del mismo modo, los reflejos de la onda son congruentes con las distancias establecidas, si se usan estos segmentos de señal, es decir, el segundo reflejo, se obtienen los mismos datos numéricos en cuanto a la posición del bloqueo.
- Finalmente, el aire en el tubo requiere de un tiempo para regresar a su estado de reposo. Se puede considerar en reposo después de al menos 0.01 [s]. Si se respeta este mínimo de tiempo entre dos señales emitidas para el caso del tubo con amortiguación, se puede considerar que la onda no será modificada por algún remanente debida a la respuesta del medio.

La tabla 4.1 recoge los datos mostrados en la figura 4.2. Se representan la posición en la que se coloca el micrófono ( $z_0$ ), la posición fija en la que se encuentra el bloqueo ( $z_1$ ), la diferencia de estos dos valores en cada caso ( $\ell_1$ ), el tiempo calculado o estimado de recorrido ( $\Delta t_{calc}$ ), el tiempo de recorrido registrado experimentalmente ( $\Delta t_{exp}$ ) y el error porcentual entre el valor teórico y el registrado. Este último dato representa el tiempo que le ha tomado a la onda hacer el recorrido de ida y vuelta entre el micrófono y el bloqueo.

Se evalúa el error porcentual en las medidas de diferencia de tiempo, para ello se calcula el tiempo esperado teóricamente en el que una onda recorre cada una de las distancias  $\Delta t_{calc} = 2\ell_1/c_0$ , con ese valor se compara el error siguiendo (4.3)

|          | $z_0$ [m] | $z_1$ [m] | $\ell_1$ [m] | $2t_1$ [ms] | $2t_{1exp}$ [ms] | error porcentual [%] |
|----------|-----------|-----------|--------------|-------------|------------------|----------------------|
| Prueba 1 | 2.5       | 3.0       | 0.5          | 2.9154      | 2.9427           | 0.93                 |
| Prueba 2 | 2.0       | 3.0       | 1.0          | 5.8309      | 5.7915           | 0.67                 |
| Prueba 3 | 1.5       | 3.0       | 1.5          | 8.7463      | 8.7705           | 0.27                 |
| Prueba 4 | 1.0       | 3.0       | 2.0          | 11.6618     | 11.6245          | 0.32                 |
| Prueba 5 | 0.5       | 3.0       | 2.5          | 14.5772     | 14.5315          | 0.31                 |

Tabla 4.1: Resultados experimentales para la prueba con el micrófono en distintas posiciones en relación al bloqueo

$$\text{error porcentual} = \left| \frac{\Delta t_{exp}}{\Delta t_{calc}} - 1 \right| \times 100 \quad (4.3)$$

En cada una de las pruebas se obtuvo un error porcentual menor al 1% en el valor de tiempo esperado teóricamente. Recuérdese que lo que se busca es conocer la posición de la posible falla a lo largo del tubo, tal posición se calcula indirectamente con las medidas de tiempo como las mostradas en la tabla 4.1. Con las pruebas realizadas se puede asegurar que la localización de la falla también tiene un error acotado que depende de la discrepancia de los tiempos de recorrido medido y teórico.

El error porcentual empieza en un valor cercano al 1% y desciende a medida que se incrementa la distancia. Esto se debe a que mientras mayor sea el tiempo de recorrido las pequeñas diferencias en la medición impactan menos en el error porcentual. Tómese como ejemplo la prueba 5 del Cuadro 4.1. Incluso con un error del 5% en el tiempo la posición de la distancia solo está 0.12 [m] errado.

Con los valores de tiempo obtenidos en el experimento se puede estimar ( $\ell_{1est}$ ) la distancia entre el micrófono y el bloqueo. Compárese con los valores de la configuración del experimento  $\ell_1$ .

|          | $\ell_1$ conocido [m] | $\ell_{1estimado}$ [m] |
|----------|-----------------------|------------------------|
| Prueba 1 | 0.500                 | 0.504                  |
| Prueba 2 | 1.000                 | 0.993                  |
| Prueba 3 | 1.500                 | 1.504                  |
| Prueba 4 | 2.000                 | 1.993                  |
| Prueba 5 | 2.500                 | 2.492                  |

Tabla 4.2: Valores exactos de la configuración experimental *versus* estimación basada en los tiempos de recorrido de la señal

Si se toma en cuenta la aplicación industrial del método propuesto en este trabajo, resulta evidente que la precisión para localizar una posible falla es de gran relevancia. En cuanto a la precisión y exactitud del prototipo, el recorrido máximo en esta prueba es de 5 [m] con un error en el valor de la distancia de 0.008 [m], (8 mm), una discrepancia de esa magnitud es despreciable. En un ducto real, incluso un error de 1 [m] es aceptable para el operario encargado del mantenimiento o reparación.

## 4.2. Sensibilidad del dispositivo a uniones del tubo

En la Sección 4.1 se mostraron experimentos realizados para la estimación de los parámetros del dispositivo de pruebas. En esta sección se muestran los resultados principales de la detección de fallas. el primer experimento *Detección del elemento de unión sin falla* muestra la sensibilidad de la técnica de reflectometría al detectar cambios pequeños en el diámetro de un tubo como es el caso de una unión. El segundo experimento *Detección de una perforación de 0.012 [m]* ofrece un resultado en donde una perforación pequeña es detectada. Finalmente se comparan los resultados obtenidos entre el ducto con falla y el ducto sano y se genera una señal de diferencia.

### 4.2.1. Condición normal sin falla

El objetivo de este experimento es detectar discontinuidades en el tubo debidas a los puntos de unión entre dos segmentos, las uniones se logran con piezas de PVC intercambiables. Las uniones intercambiables pueden tener distintas características como perforaciones, bloqueos parciales y bloqueos totales, de este modo se introducen las fallas en el sistema. Las pruebas muestran que incluso la unión simple de dos segmentos puede detectarse ya que se introducen pequeñas variaciones en las paredes del ducto. En este caso la unión del segmento principal del tubo y la extensión amortiguadora se encuentra sin falla. La señal inyectada es la señal  $\sin(t)/t$ . La Figura 4.3 muestra el resultado de esta prueba.

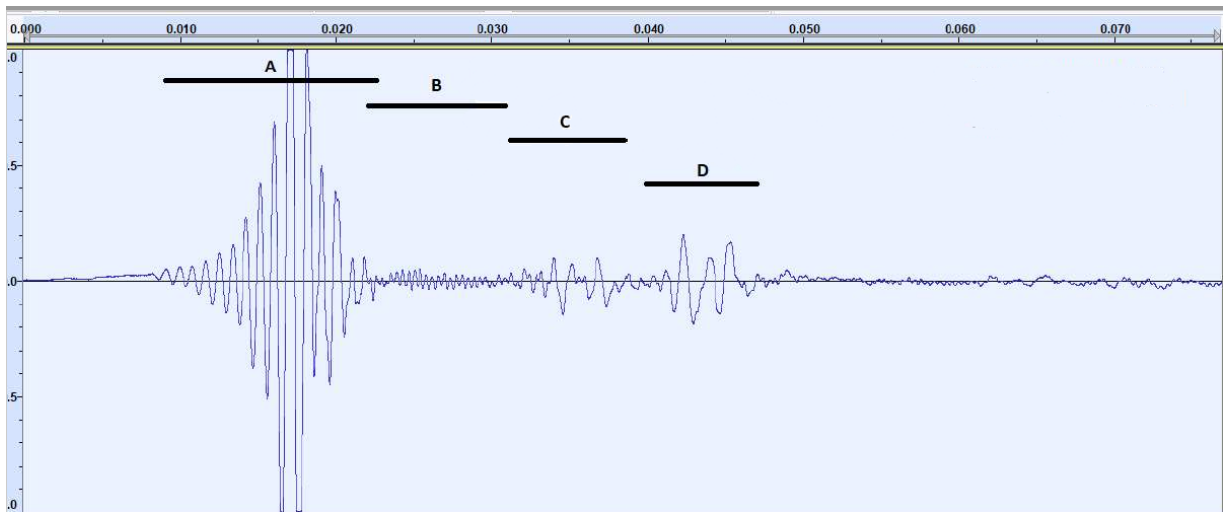


Figura 4.3: Distintas partes de la señal registrada

Algunas características notables de la Figura 4.3 son las siguientes:

- La onda incidente no inicia abruptamente, presenta las características de la señal de excitación, por ello se toma como referencia en el tiempo el punto medio de la señal que corresponde con la máxima amplitud. Esto ocurre en el punto medio del segmento *A*.
- Después del estado del reposo (con una pequeña componente de ruido ambiental), aparecen tres segmentos en el registro de la señal bien delimitados, el primero entre 0.01 y 0.022 [s] (segmento *A*), el segundo entre 0.032 y 0.04 [s] (segmento *C*) y el tercero entre 0.042 y 0.048 [s] (segmento *D*).
- Entre cada uno de estos segmentos aparece la respuesta del medio y vibraciones remanentes con amplitudes relativamente pequeñas (segmento *B*).

- La segunda onda reflejada tiene mayor amplitud que la primera.

Como se dijo, tomando como punto medio de cada pulso registrado se obtienen los siguientes valores:  $t_1 = 0.017427$ ,  $t_2 = 0.035031$  y  $t_3 = 0.043698$ . Haciendo los cálculos correspondientes para la determinación de las distancias, se tiene  $\ell_1 = 3.019$  [m] y  $\ell_1 + \ell_2 = 4.505$  [m]. El punto de unión entre el tubo principal y la extensión amortiguadora se encuentra a 3 [m] del punto de registro y el extremo final de la extensión amortiguadora está a 4.5 [m] del punto de observación. Las mediciones corresponden con las posiciones de estos accesorios.

La segunda reflexión es más aparente que la primera debido a que es originada por un obstáculo mucho mayor: un bloqueo total. La amplitud de esta segunda reflexión puede ser incluso mayor si se elimina el segmento con material absorbente. En cambio, el accesorio ubicado a 3 [m] del micrófono representa una variación en el diámetro del tubo principal. Recuérdese que en esta unión no se ha introducido ninguna falla y por lo tanto, el hecho de que una variación tan pequeña ocasionada por un punto de unión pueda ser detectada se considera un resultado positivo.

#### 4.2.2. Condición de Orificio de 0.012 [m]

En esta sección se presenta el resultado más importante de este trabajo: La detección de una falla inducida que, a diferencia de la sección 4.2.1, puede ser detectada independientemente de la geometría del tubo.

La característica específica de esta prueba es la presencia y ausencia de una fuga en el tubo. La fuga se simula usando punto de unión entre el tubo principal ( $\ell_1$ ) y el tubo de la extensión de amortiguamiento ( $\ell_2$ ). La fuga es una perforación situada exactamente en el medio y con un diámetro de 0.012 [m]. En la práctica se trata de un orificio de  $\frac{1}{2}$  [in] realizado con una broca estándar de esa medida.

El procedimiento para la realización de la prueba el siguiente:

1. Se coloca un cople sin perforación en el dispositivo con el fin de tener una referencia sobre la cual se comparan otros resultados.
2. Se realiza el procesamiento de señal.
3. Se intercambia el cople sano por el que presenta la perforación de 0.012 [m].
4. Se realiza el procesamiento para esta señal.

Al final se obtienen dos señales únicas en las que, como resultado del promedio, el ruido se ha minimizado. La figura 4.4 muestra las señales obtenidas de las 30 repeticiones. En la figura 4.5 se ve el resultado del promedio. Debe notarse que las características del pulso y de la respuesta del aire una vez perturbado son uniformes en cada una de las repeticiones. Esto es importante ya que eliminan la posibilidad de que la diferencia entre las gráficas de la señal sin falla o con falla se deba a ruido o a variaciones del experimento.

Una vez establecido que las gráficas mostradas en la figura 4.6 son el resultado de la respuesta acústica de las condiciones particulares del tubo se pueden comparar ambas señales. En la figura 4.6 se puede ver la superposición de ambas señales. La línea **azul** representa la respuesta acústica cuando el dispositivo no presenta la fuga. La línea **roja** es el resultado del sistema con fuga. La gráfica azul tiene las mismas características que se vieron en la sección 4.2.1, es decir, los reflejos debidos al cople sano y al final del tubo, en términos generales, a la geometría del ducto sano. Por otro lado, si se comparan ambas gráficas se concluye que, si bien, ambas presentan indicios de la geometría del ducto, la señal roja empieza a diferenciarse de la gráfica azul una vez que el reflejo debido al cople (sano o con falla) es registrado.

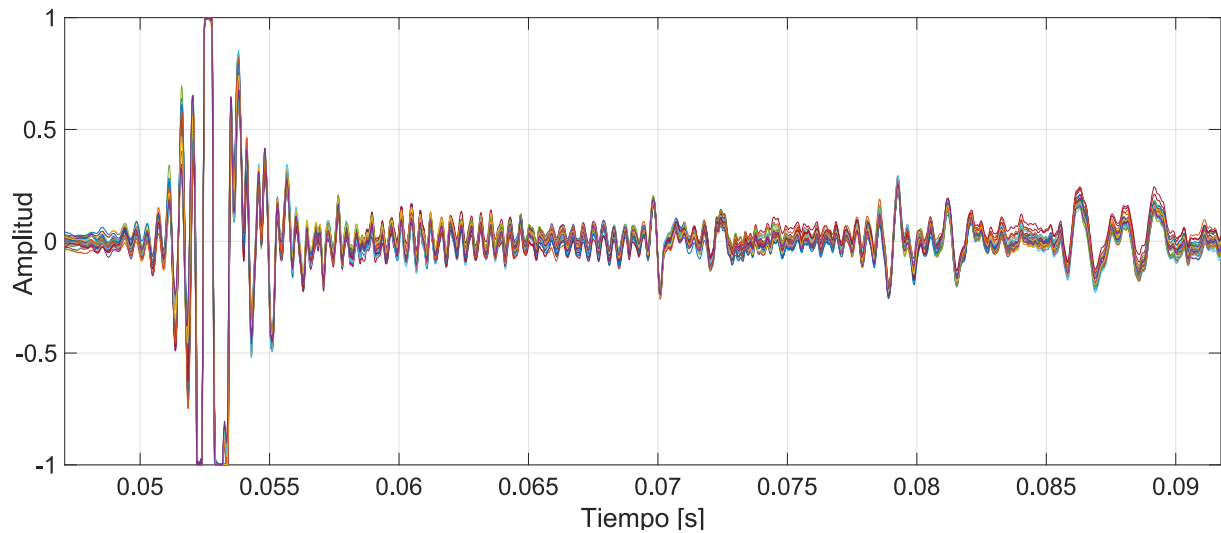


Figura 4.4: 30 repeticiones de la respuesta a un mismo pulso

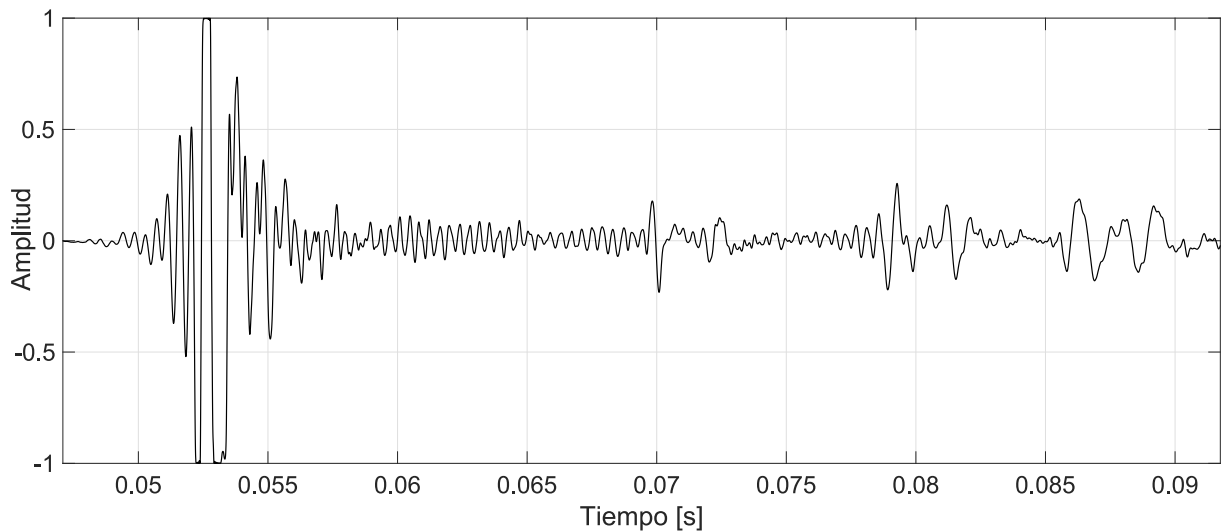


Figura 4.5: Señal promediada de 30 registros

Desde 0.075 hasta 0.120 [s] se puede ver el detalle en el desarrollo de cada una de las señales acústicas. De 0.075 a 0.097 [s] los registros son casi idénticos, existiendo solo diferencias puntuales en ciertos máximos o mínimos debidos a que el ruido no es eliminado totalmente, sino solo minimizado por el promedio.

A partir de 0.097 [s] las señales empiezan a tener diferencias entre ellas. Las amplitudes debidas al ducto con falla nunca alcanzan los niveles que presenta el ducto sano. Esto es coincidente con lo establecido en el Capítulo 2 ya que la fuga permite que la energía de la onda se transmita hacia afuera del sistema con más facilidad que en el caso del ducto sin fuga. En cuanto a la fase, el cople sin orificio presenta una ampliación-reducción del diámetro del tubo, mientras que el cople con fuga presenta un comportamiento semejante al de una ampliación del diámetro.

El hecho de que parte de la energía de la onda se transmita al exterior del sistema es precisamente lo que provoca que el registro de las señales reflejadas sea distinto en ambos casos.

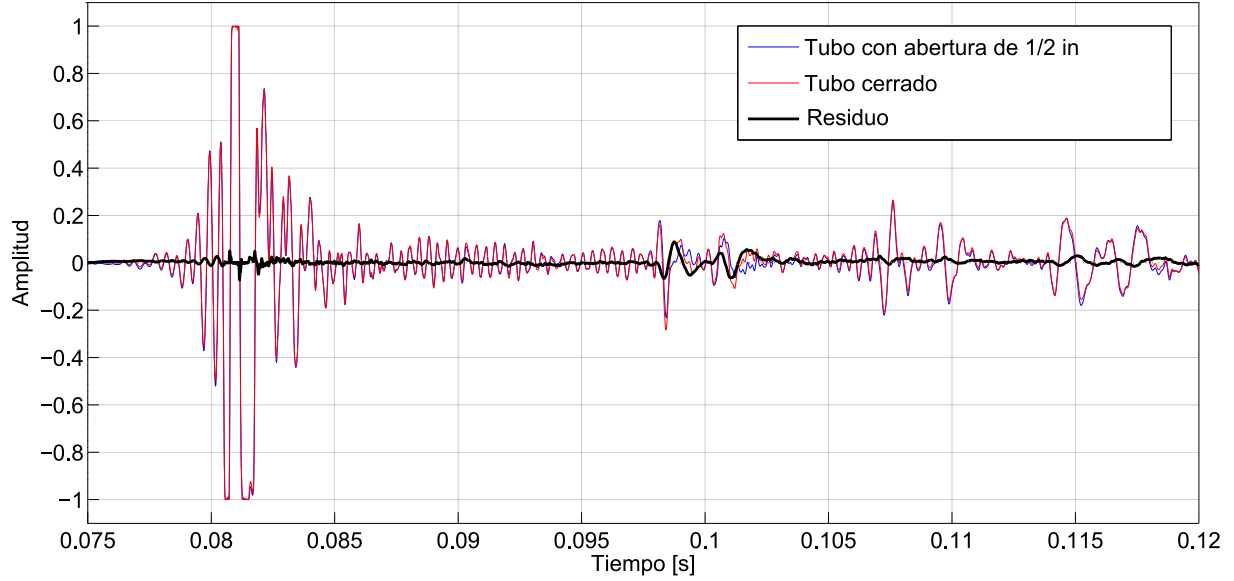


Figura 4.6: Diferencia entre las señales (orificio abierto y cerrado)

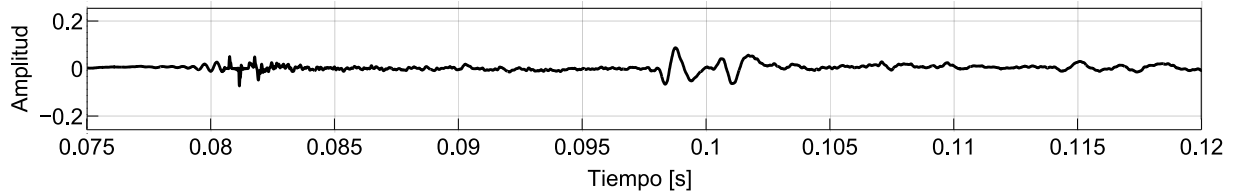


Figura 4.7: Residuo generado por la resta de señales

#### 4.2.3. Generación de residuo para un orificio de 0.012 [m]

Las gráficas mostradas en la sección 4.2.2 se enfocan específicamente al aspecto cualitativo del experimento, sin embargo, el objetivo es determinar el efecto que produce una falla en la medición realizada. Para ello se debe recurrir a técnicas que aseguren que no se presentan falsos positivos o que se ignoren discontinuidades que realmente ocurren en el sistema.

Una forma de obtener datos más precisos del comportamiento de la falla es por medio de la generación de un residuo. En este caso lo que se busca es obtener una señal que pueda ser despojada de toda la información no esencial para la característica buscada. En esta subsección el residuo es generado por medio de una resta de la señal patrón ( $P_p$ ) y la señal de la respuesta del sistema con falla ( $P_f$ ).

$$R(z_0, t) = P_p(z_0, t) - P_f(z_0, t) \quad (4.4)$$

Ya que las señales registradas de ambas pruebas ante el impulso y la respuesta del medio son similares desde el inicio de la prueba hasta el punto en el que aparece la discontinuidad o falla, se espera que el residuo generado tenga valores cercanos a cero desde 0.075 [s] hasta 0.097 [s]. En el instante 0.097 [s] en que aparece el reflejo provocado con el cople se puede ver que el residuo comienza a adquirir valores más grandes.

El objetivo de la señal de referencia sin falla es dar un perfil de la imperfecta geometría del ducto, de este modo, una vez que se tiene la prueba con falla se puede asegurar que ciertas reflexiones no pertenecen a la falla. Evidentemente, tal como se maneja en la teoría de detección e identificación de fallas, el residuo

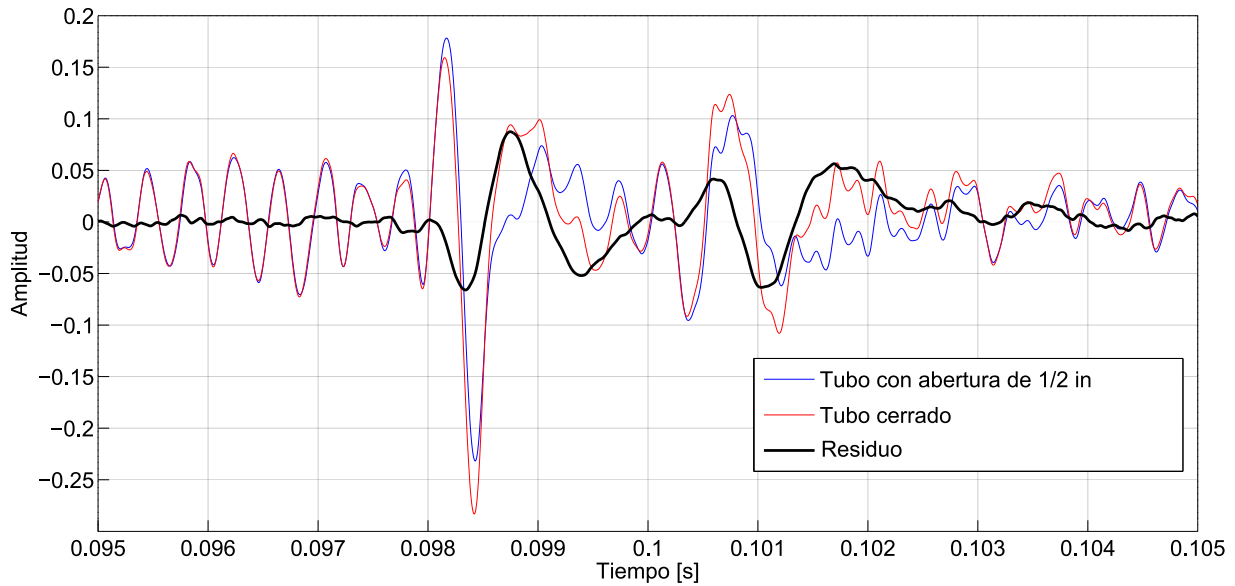


Figura 4.8: Orificio abierto y cerrado, (acercamiento al punto de interés)

puede usarse, en combinación con un umbral, como una señal que dispara una alarma cada vez que el umbral es cruzado. Los umbrales pueden incorporar un mayor grado de complejidad al hacerlos variables pero en este caso, un umbral fijo es perfectamente útil.

La alarma que se genera cuando el residuo cruza el umbral puede servir para múltiples tareas de monitoreo y mantenimiento. Si se tiene mejor conocimiento del perfil de ruido ambiental así como de la frecuencia de la respuesta natural del aire, se pueden aplicar técnicas de filtrado y procesamiento para hacer que la señal de residuo tenga una mejor calidad final.

Como se podría esperar, el residuo para diferentes tipos de fallas tiene características particulares. En este caso, la fase entre la señal de referencia y la señal con falla es la misma, al restarlas se obtiene un valor en particular. En el caso de un bloqueo, la señal de referencia y la señal con falla tienen fases invertidas. Esto genera un residuo de mayor amplitud. La cuestión de la identificación de la falla es importante ya que diferentes magnitudes pueden representar distinto tipo de falla o una variación en la magnitud en un mismo tipo de falla.

## Capítulo 5

# Conclusiones

En este trabajo se diseñó un dispositivo de detección que permite validar numérica y experimentalmente un modelo linealizado de dimensión infinita. Se aplicó el modelo de matrices de transferencia y, especialmente, se utilizaron las herramientas gráficas desarrolladas en Peralta y Verde (2021) para implementar el esquema de simulación para señales arbitrarias. Esta herramienta resultó particularmente útil para visualizar el modelo de retrasos basado en la reflexión de ondas.

La aplicación del modelo simulado permitió establecer un patrón de respuesta en la presencia de fallas con parámetros conocidos. Como en las condiciones normales de operación del dispositivo las fallas no son conocidas el modelo matemático y su simulador derivado puede usarse para ajustar los parámetros a partir de datos experimentales. En cuanto al modelo, debido al enfoque experimental de este trabajo, se utilizaron constantes físicas correspondientes al aire, esto marca una diferencia con el uso de valores arbitrarios en la etapa anterior del proyecto. Fue posible desprestigiar la componente de dispersión con base en su magnitud relativa respecto al término que representa el retardo puro (Tabla 2.10) y no simplemente como una suposición analítica. Como consecuencia, para este medio de propagación, la aproximación del sistema como retardos puros es válida de manera práctica. Una implicación de esto es que para otros medios, como gas natural, con parámetros semejantes los del aire (Speight, 2007) el modelo de retardos es igualmente válido.

En el aspecto experimental, un resultado importante es la capacidad del sistema para detectar los elementos constitutivos de la tubería, lo que está relacionado con la sensibilidad de la detección. Lejos de ser una desventaja, la alta sensibilidad permite confirmar la posición de los elementos que se asumen conocidos desde el diseño. Todo ello permite generar una medición como patrón para la comparación con el caso de falla (Sección 4.2). Se pudo generar un residuo que indica la diferencia entre el caso del tubo sin falla y con falla. De este modo la detección es independiente de los accesorios y uniones en el sistema. Esta ventaja, sin embargo, fue limitada ya que con cada unión o accesorio la onda incidente que recorre el sistema pierde energía. Cuando la señal de excitación es elegida correctamente es posible detectar la fase de la señal reflejada lo que, combinado con la relación de amplitud  $A_1/A_0$  y el tiempo medido  $\tau_f$ , el resultado es una completa caracterización de la falla en cuanto a su localización y características (tipo y tamaño).

Fue posible determinar áreas de mejora en la implementación. La principal es la automatización de la generación y procesamiento de las señales registradas así como de los algoritmos matemáticos que permitan programar las tareas de inspección de manera autónoma como parte del mantenimiento de una tubería. Los puntos automatizables serían la conexión y desconexión del dispositivo, el ajuste del tipo de señal, selección de la duración de las pruebas, entre otros. La meta última sería la implementación de un



sistema totalmente integrado y con capacidad de decisión en las tareas de monitoreo y mantenimiento. Otro posible cambio sería el uso de algoritmo de reconocimiento de señales, por ejemplo, análisis de Fourier o de Onduleta, con el objetivo de recopilar datos cualitativos de la falla. Se espera que con el uso de instrumental más sofisticado los resultados obtenidos hasta ahora sean mejorados. Se busca también que el desempeño general del dispositivo mejore considerablemente al incorporar un sistema embebido de procesamiento digital de señales (*DSP*) dedicado únicamente al procesamiento, lo que podría evitar retrasos del sistema operativo y al software. Finalmente, dos planteamientos en el detector llevarían esta técnica a un nivel de aplicación real. La primera es la detección de un flujo en movimiento y la segunda, el uso de un gas distinto del aire, preferiblemente gas natural. Estas dos propuestas en la aplicación implican un cambio en la configuración del dispositivo, pero representa un acercamiento al caso de una planta real.

# Referencias

- Adair, L. C. and Cook, R. L. (1973). Acoustic Properties of Rho-C Rubber and ABS in the Frequency Range 100 kHz-2 MHz. Technical Report 6, Bell Telephone Laboratories.
- AES Standards Committee (2012). AES Information Document for Acoustics - Plane-Wave Tubes - Design and Practice.
- Angulo y Barrera (2020). Texas freeze hits northern Mexico with \$ 2.7 billion blackout. *reuters.com*.
- Balázs, S., László, K., and Csercsik, D. (2020). The impact of Nord Stream 2 on the European gas market bargaining positions. *Energy Policy*.
- Biezma, M. V., Andrés, M. A., Agudo, D., and Briz, E. (2020). Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach. *Engineering Failure Analysis*, (110).
- Blackstock, D. (2000). *Fundamentals of Physical Acoustics*. A Wiley-Interscience publication. Wiley.
- Bollobas, B. (2013). *Modern Graph Theory*. Graduate Texts in Mathematics. Springer New York.
- Campos, L. M. (2007a). On 24 forms of the acoustic wave equation in vortical flows and dissipative media. *Applied Mechanics Reviews*, 60(1-6):291–315.
- Campos, L. M. (2007b). On 36 forms of the acoustic wave equation in potential flows and inhomogeneous media. *Applied Mechanics Reviews*, 60(1-6):149–171.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. Springer New York, 3 edition.
- Chen, C., Li, C., Reniers, G., and Yang, F. (2021). Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS. *Journal of Cleaner Production*, (279):1–12.
- Chu, J., Song, Y., Yang, L., Li, X., Yang, K., and Zhao, J. (2020). Experimental platform for blockage detection and investigation using propagation of pressure pulse waves in a pipeline. *Measurement*, (160):1–8.
- Cunha, S. (2012). Comparison and Analysis of Pipeline Failure Statistics. In *Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference*, Calgary. Alberta Canada. ASME, ASME.org.
- Datta y Sarkar (2016). A review on different pipeline fault detection methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, (41):97–106.
- Dickason, V. (2006). *The Loudspeaker Design Cookbook*. Audio Amateur Press, Peterborough, New Hampshire, seventh edition.

- Eargle, J. (2005). *The Microphone Book*. Focal Press by Elsevier, second edition.
- European Gas Pipeline Incident Data Group (2018). Gas Pipeline Incidents - 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016). Technical report, European Gas Pipeline Incident Data Group.
- Fahy, F. (2001). Impedance. In Fahy, F., editor, *Foundations of Engineering Acoustics*, pages 48 – 73. Academic Press, London.
- Fuchs, H. (2013). *Applied acoustics: Concepts, absorbers, and silencers for acoustical comfort and noise control: Alternative solutions - Innovative tools - Practical examples*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Fuchs, H. and Riehle, R. (1991). Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis. *Applied Acoustics*, (33):1–19.
- Gao, K., van Dommelen, J. A. W., and Geers, M. G. D. (2016). Microstructure characterization and homogenization of acoustic polyurethane foams: measurements and simulations. *International Journal of Solids and Structures*, 100–101:536–546.
- Geiger, G. (2014). Leak Detection and Locating - A Survey. Technical report, Pipeline Simulation Interest Group.
- Ginsberg, J. (2018). *Acoustics - A Textbook for Engineers and Physicists Volume II: Applications*, volume II. Springer International Publishing.
- He, P. (2000). Measurement of acoustic dispersion using both transmitted and reflected pulses. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(2).
- Hill, G. (2019). *Loudspeaker Modelling and Design: A Practical Introduction*. A Focal Press book. Routledge.
- Koruk, H. (2014). An assessment of the performance of impedance tube method. *Noise Control Engineering Journal*, 62(4):264–274.
- Leach, M., Schaffer, R., and Barnwell, T. (1979). Time-Domain Measurement of Loudspeaker Driver Parameters. *IEEE Transactions of Acoustic, Speech and Processing*, ASSP-27(6):734–739.
- Lu, H., Iseley, T., Behbahani, S., and Fu, L. (2020). Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 4(1):64–75.
- Magalotti, R., Zuccatti, C., and Pasini, P. (1999). Building a plane-wave tube: Experimental and theoretical aspects. *J. Audio Eng. Soc.*, 47(7/8):596–601.
- Mandel, J. (1964). *The Statistical Analysis of Experimental Data*. Dover Publications Inc., first edition.
- Melling, T. H. (1973). An impedance tube for precision measurement of acoustic impedance and insertion loss at high pressure levels. *Journal of Sound and Vibration*, 28:23–54.
- Meng, L., Yuxing, L., Wuchang, W., and Juntao, F. (2012). Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(1):90–102.
- Ogundare y Jaganathan (2020). Computational Acoustic Model for Non-intrusive Inspection of a Fluidic Channel. In *5th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems*.

- Oviedo, B. (2018). Respuesta Ondulatoria ante una Excitación Acústica en un ducto Presurizado. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Peralta, J., Verde, C., and Delgado, F. (2020). Wave propagation pattern in gas pipelines for fault location. pages 0–5.
- Peralta y Verde (2019). Propagation model and analysis of acoustic waves in pipelines for fault detection. *Congreso Nacional de Control Automático*.
- Peralta y Verde (2021). Acoustic propagation modelling by graphs for faults location in a pipeline. *No publicado*.
- Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (2021). Reported Serious Pipeline Incident 20 Year Trend. Technical report, U.S. Department of Transportation.
- Rentería, F. (2017). Caracterización de la matriz de transferencia de un ducto con múltiples fugas. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rojas y Verde (2020). Adaptive estimation of the hydraulic gradient for the location of multiple leaks in pipelines. *Control Engineering Practice*, 95.
- Sattar y Chaudhry (2008). Leak detection in pipelines by frequency response method. *Journal of Hydraulic Research*, 46(1):138–151.
- Sharp y Campbell (1997). Leak detection in pipes using acoustic pulse reflectometry. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(3):560–566.
- Shengli y Yongtu (2019). Exploring the temporal structure of time series data for hazardous liquid pipeline incidents based on complex network theory. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, (26):1–13.
- Smith, S. W. (2003). *Digital Signal Processing - A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes by Elsevier, first edition.
- Speight, J. G. (2007). *Natural Gas - A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- Verde, C. (2001). Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice*, 9:673–682.
- Vidal y Silva (2014). Acoustic Reflectometry for Blockage Detection in Pipeline, Ocean Engineering Department, Federal University of Rio de Janeiro, COPPE / UFRJ Cidade Universitária – Bloco C - Ilha do Fundão — 21945-970- Rio de Janeiro-RJ. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, pages 3916–3923.
- Yuan, F., Zeng, Y., Luo, R., and Khoo, B. C. (2020). Numerical and experimental study on the generation and propagation of negative wave in high-pressure gas pipeline leakage. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65(September 2019):104129.
- Yusoff y Hassan (2016). Classification of Blockage Acoustic Reflectometry in Pipeline Inspection Using Neural Network. 4(1):64–75.
- Zhang, T., Tan, Y., Zhang, X., and Zhao, J. (2015). A novel hybrid technique for leak detection and location in straight pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35:157–168.