

Maestría en Ciencias e Ingeniería de Materiales

**ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES
ACÚSTICOS EN MATERIALES SÓLIDOS
USANDO ONDAS ACÚSTICAS GAUSSIANAS-
SINUSOIDALES**

Tesis para obtener el grado de maestría

Presenta:
ROSNELY CRUZ CECILIO

Asesor:
Dr. ERNESTO RODRIGO VÁZQUEZ CERÓN

Junio 19, 2018

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo y patrocinio brindado para la realización de este trabajo de investigación.

Agradezco especialmente a mi asesor de tesis, el Dr. Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón, por ser un excelente guía de tesis, además de contribuir directamente en la formación tanto teórica como experimental del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros y amigos de laboratorio, Armando Ortega León y Jorge Omar Chávez Gómez, por su ayuda y paciencia tanto en la familiarización de la instrumentación implementada (Amplificadores de Potencia, Lock-In e Instrumentación, Generador de funciones y el Biopac), como en la comprensión del software MatLab.

Agradezco el apoyo de la Mtra. Laura Angélica Lancón Rivera por permitirme realizar las mediciones acústicas en la cámara semianecoica ubicada en el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico y por las asesorías brindadas en la construcción de los prototipos.

Infinitamente agradezco a mi familia (mis padres, mi hermano y mi esposa) por su apoyo incondicional en todos los aspectos que he emprendido a lo largo de mi vida personal y profesional.

Finalmente, agradezco a mis sinodales (Dra. Ma. Gabriela Báez Juárez, Dr. Juan Manuel Velázquez Arcos y Dra. Felicitas Morales Álvarez) por el tiempo que han dedicado para leer este trabajo.

Contenido

Resumen	7
1 Introducción.....	8
1.1 Introducción General	8
1.2 Justificación	11
1.3 Hipótesis	12
1.4 Objetivos.....	12
1.4.1 Objetivo general	12
1.4.2 Objetivos específicos.....	12
2 Conceptos fundamentales del sonido	13
3 Antecedentes y Estado del Arte.....	20
4 Metodología I: Tubo de impedancia corto	31
4.1 Definición de parámetros físicos del tubo de impedancia corto con una cámara acústica	31
4.2 Instrumentación y equipo para el tubo de impedancia corto con una cámara acústica	37
4.3 Señal Sinusoidal de Frecuencia Variable (Chirp).....	40
4.4 Obtención de la Respuesta Acústica en el Dominio de la Frecuencia.....	42
4.5 Función de Transferencia de 2 Micrófonos	44
4.6 Coeficientes Acústicos (Reflexión, Absorción y Transmisión).....	49
5 Resultados I: Tubo de impedancia corto	55
5.1 Tubo de impedancia corto con una cámara acústica.....	55
5.2 Tubo de impedancia corto con dos cámaras acústicas.....	61
6 Metodología II: Tubo de impedancia largo	70
6.1 Definición de parámetros físicos del tubo de impedancia largo	70
6.2 Señal Gaussiana-Sinusoidal	74
6.3 Análisis en Estado Estacionario.....	78
6.4 Factor de atenuación	82
6.5 Coeficientes Acústicos (Reflexión, Absorción y Transmisión).....	90
7 Resultados II: Tubo de impedancia largo	91
7.1 Coeficientes Acústicos.....	91
8 Discusión de resultados	98
9 Conclusiones.....	103
Apéndice A.....	104

Conversión de señales analógicas y digitales, Biopac-MP150	104
Apéndice B.	106
Correlación de señales	106
Apéndice C.	110
Correlación de señales en el tubo de impedancia largo.....	110
Apéndice D.	112
Construcción de un tubo de impedancia con una cámara acústica.....	112
10 Referencias	115

Resumen

Se construyó un tubo de impedancia corto (0.6 m), para generar ondas acústicas Sinusoidales de frecuencia variable que impacten un material sólido. El registro y procesamiento de dichas ondas determinará la respuesta acústica en el dominio de la frecuencia de cuatro materiales sólidos: Espuma de Poliuretano (material de referencia), Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa, con el propósito de clasificarlos como material reflejante, absorbente o de alta transmisión. La metodología para caracterizar acústicamente materiales sólidos se basa en un tubo de impedancia, sin embargo, presenta comportamientos no deseados generados por la superposición de las ondas acústicas.

De aquí que este trabajo de investigación consideró un tubo de impedancia relativamente largo (8 m), mediante el uso de ondas acústicas Gaussianas-Sinusoidales de amplitud variable y frecuencia específica para determinar la respuesta acústica a través del análisis en el estado estacionario. De esta forma se eliminaron los efectos acústicos no deseados y se obtuvieron los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión del material. Los resultados experimentales obtenidos fueron comparados para describir las ventajas y desventajas que presenta un tubo largo con respecto al corto.

1 Introducción

1.1 Introducción General

El desarrollo tecnológico en la creación de diversos materiales ha permitido encontrar distintas aplicaciones en ingeniería. Sin embargo, una de las características que pocas veces es tomada en cuenta, son las propiedades acústicas de los materiales sólidos.

Hoy en día, el conocer la respuesta acústica de los materiales se ha convertido en una necesidad, en el área de ingeniería y acústica arquitectónica, para lograr el acondicionamiento acústico y disminuir la contaminación sonora. Las grandes ciudades se caracterizan por tener fuentes de ruido en diversas zonas y horarios, que en la mayoría de los casos son ocasionadas por una mala planeación urbana y, por otro lado, por un crecimiento desmedido de la población, que busca oportunidades de trabajo en zonas urbanas, generando con ello fuentes de ruido ocasionadas por el tráfico vehicular, empresas, negocios, escuelas, centros de diversión, etc.

En algunos países existen normas de ruido para el tráfico, fijando los niveles máximos de sonido a automóviles y motocicletas. Así, algunas instancias del gobierno regulan, monitorean y atienden las quejas de los ciudadanos para cumplir las normas que contribuyen en la reducción de la contaminación acústica. En este sentido, la industria de la construcción está obligada a tomar en cuenta el impacto del ruido, ya que se ha convertido en un problema de salud que afecta a las personas.

Se han realizado diversos estudios en los cuales se ha determinado que si estos niveles de ruido sobrepasan los 60 dB puede afectar el rendimiento del individuo y por consecuencia

su calidad de vida [1,2]. De aquí que es importante contar con una metodología para determinar las propiedades acústicas de materiales sólidos que contribuyan a un condicionamiento acústico.

El método experimental más conocido para determinar las propiedades acústicas de un material de prueba es el tubo de impedancia (o de Kundt). Este método en particular es utilizado para caracterizar muestras pequeñas de materiales sólidos. El método consta de manera general de un tubo liso y rígido, que se utiliza como guía de onda. En un extremo del tubo se tiene una bocina, la cual genera una onda acústica, mientras que el otro extremo se encuentra cerrado. Un material de prueba se coloca en el extremo cerrado. Dos micrófonos, colocados sobre la pared interna del tubo, son utilizados para registrar las señales acústicas generadas y propagadas a lo largo del tubo. Después de que la onda acústica impacta el material de prueba, las señales registradas por los micrófonos son procesadas para conocer su coeficiente de absorción y reflexión, puesto que este tubo cuenta solo con una cámara acústica [3-5].

La determinación del coeficiente de absorción en función del coeficiente de reflexión se lleva a cabo implementado el método de la Función de Transferencia (FT) para dos micrófonos (la cual se detalla en la sección 4.5). De esta manera se comparan las presiones acústicas registradas, en función de la frecuencia, para dos diferentes posiciones. Este diseño presenta una cámara acústica, la cual considera al coeficiente de transmisión cero.

No obstante, debido a la relativa longitud corta del tubo de impedancia, la superposición de las ondas acústicas dentro del tubo genera comportamientos no deseados ocasionados por la potencia en la señal acústica, lo que conlleva a oscilaciones en el comportamiento de los

coeficientes acústicos y en algunos casos amplitudes fuera del rango normalizado. De aquí que, la instrumentación y el procesamiento de señales se vuelven una parte fundamental para llevar a cabo el adecuado registro evitando saturación y al mismo tiempo compensando la atenuación de la onda propagada.

La investigación desarrollada en este trabajo involucra el diseño y construcción de un tubo de impedancia relativamente corto con una cámara acústica para definir los parámetros y los modos de operación de la instrumentación. La metodología se extiende para el diseño y construcción de un tubo corto, el cual considera dos cámaras acústicas para conocer el coeficiente de absorción en función del coeficiente de reflexión y de transmisión, utilizando una señal Sinusoidal que presentan amplitudes constantes, pero variación de frecuencia en un determinado tiempo (se detalla en la sección 4).

El manejo del equipo y los parámetros utilizados en la generación y registro de señales acústicas serán utilizados para el diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de tubo de impedancia largo (con dos cámaras acústicas), empleado para caracterizar materiales de prueba, mediante el uso de señales acústicas Gaussianas-Sinusoidales.

La construcción de un tubo de impedancia relativamente largo, con un diámetro pequeño, consiste en abarcar un rango de frecuencia de los 600 Hz a los 8 kHz, así como evitar el traslape de las ondas acústicas generadas y determinar el efecto de implementar un tipo de onda modulada en amplitud que previene los efectos no deseados en los coeficientes acústicos para cuatro diferentes materiales de prueba.

1.2 Justificación

El desarrollo de esta investigación se enfoca en diseñar y construir dos tubos de impedancia, uno corto de aproximadamente de 0.60 m de largo el cual implemente ondas acústicas Sinusoidales (ondas estacionarias) y otro largo, que presenta una longitud de 8 m implementando ondas Gaussianas-Sinusoidales. La medición del coeficiente de absorción en función del coeficiente de reflexión y de transmisión contribuyen en la generación de una base de datos de los coeficientes acústicos y así clasificarlos como reflejantes, absorbentes o de alta transmisión del sonido.

La implementación de ondas acústicas en un tubo de impedancia relativamente largo a diferente frecuencia modulada en amplitud, Gaussianas-Sinusoidales, evitarán el traslape en el registro de las ondas y facilitarán el análisis en el estado estacionario para caracterizar la respuesta acústica de cuatro materiales sólidos de prueba reduciendo efectos no deseados en el dominio de la frecuencia.

1.3 Hipótesis

El uso de un tubo de impedancia largo, en el cual se propagan ondas acústicas Gaussianas-Sinusoidales, reducirá los efectos resonantes no deseados en la caracterización acústicas en materiales sólidos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Estimar los coeficientes acústicos en materiales sólidos mediante el uso de ondas acústicas Gaussianas-Sinusoidales.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un tubo de impedancia corto (0.6 m) y largo (8.0 m).
- Caracterizar la Espuma de Poliuretano (material de referencia), Madera Balsa y Acrílico en el dominio de la frecuencia, con ambos tubos de impedancia.
- Contrastar los resultados experimentales de ambos tubos de impedancia y determinar ventajas y desventajas.

2 Conceptos fundamentales del sonido

Este capítulo describe los conceptos fundamentales de una onda acústica, así como su clasificación y sus propiedades, los cuales son retomados para describir los parámetros en la metodología experimental cuando una onda acústica se propaga a lo largo de un tubo cilíndrico, rígido y de diámetro uniforme.

La acústica es una rama de la física que estudia los fenómenos sonoros, es decir, analiza las vibraciones de partículas en la materia considerando su generación, propagación y recepción en forma de energía.

Las vibraciones, generadas por fuentes sonoras, son pequeños desplazamientos que presentan las partículas en un medio. Una onda se caracteriza por la trayectoria de las vibraciones de partículas que se generan en un medio, ya sea, líquido, sólido o gaseoso. Cuando una onda se propaga, causa una variación de energía en el medio y por ello, se dice que la onda transmite energía [6].

Una forma de ejemplificar este movimiento se observa en la Figura 2.1, donde se toma como referencia una onda Sinusoidal. Esta onda en función del tiempo presenta una periodicidad (T), la cual es un conjunto mínimo de valores de x que corresponden a un ciclo, por ejemplo son los valores que existen entre dos crestas consecutivas (máximos) o dos valles consecutivo (mínimos). Sin embargo, si la onda Sinusoidal está en función de la distancia, se obtiene una longitud de onda (λ), la cual es la distancia que recorre entre dos crestas consecutivas o dos valles consecutivos, esta se propaga con en un instante de tiempo ($t > 0$), la cual viaja a una velocidad constante (v) con una sola frecuencia (f). Estas son

las características que definen el comportamiento de la propagación de una onda Sinusoidal a través de un medio, como el aire por ejemplo.

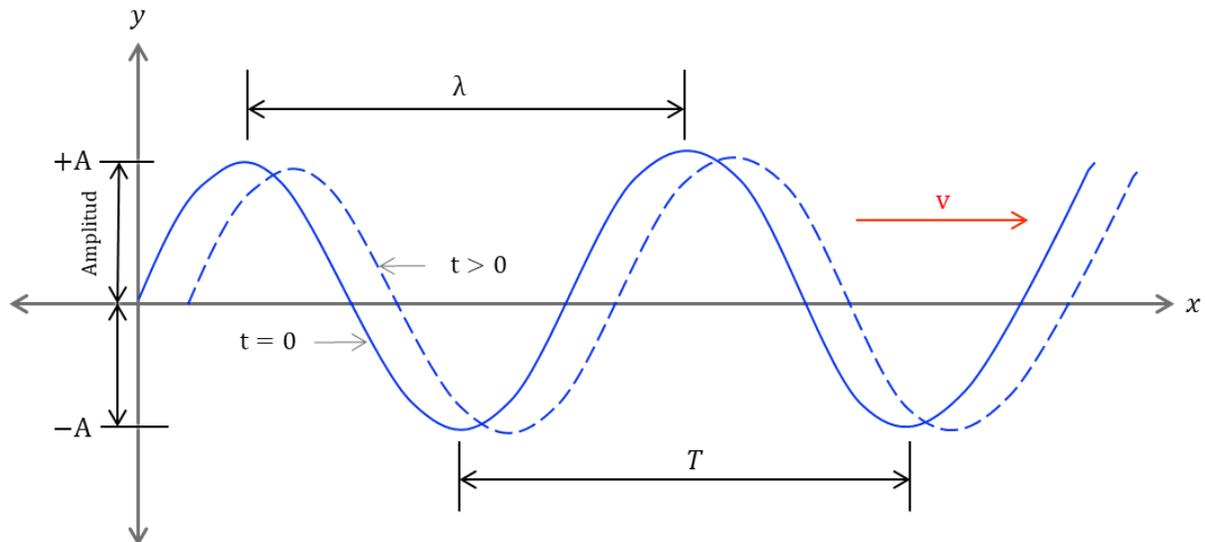


Figura 2.1. Representación esquemática de la propagación de onda en función del tiempo.

La velocidad de onda se define como el producto de la frecuencia y la longitud de onda, dado como:

$$v = f \lambda \quad (2.1)$$

Sin embargo, para determinar la velocidad de propagación de la onda, esta depende del medio por el cual se propague, ya sea, líquido, sólido o gaseoso.

$$v_{\text{sólido}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.2)$$

$$v_{\text{líquido}} = \sqrt{\frac{Q}{\rho}} \quad (2.3)$$

$$v_{gaseoso} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2.4)$$

Donde E , es el módulo de elasticidad, ρ , es la densidad del material, Q , es el módulo de compresibilidad, γ , coeficiente de dilatación adiabática, P , presión del gas [7].

Existen distintos tipos de onda, y su clasificación se basa en la dirección, periodicidad, tipo y medio de propagación de la onda.

Según su propagación:

- Ondas lineales: son aquellas ondas que viajan en una única dirección, como las ondas de luz.
- Ondas no lineales: son aquellas ondas que viajan en direcciones diferentes simultáneamente, como las ondas sísmicas.

Según el medio en el que se propagan:

- Ondas electromagnéticas: este tipo de ondas no necesita de un medio físico para propagarse, ya que son producidas por un campo eléctrico, como los rayos x, la luz visible, los rayos UV, entre otros.
- Ondas gravitacionales: estas ondas se propagan en el vacío y estas son perturbaciones que viajan a la velocidad de la luz ($\cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) y alteran la geometría espacio-temporal.
- Ondas mecánicas: este tipo de onda se propaga en un medio físico, ya sea, sólido, líquido o gaseoso, estas ondas son producidas por la perturbación del medio generando vibraciones de partículas, como las olas del mar.

Según su dirección:

- Ondas longitudinales: para este tipo de ondas, las partículas del medio se desplazan paralelamente a la dirección en que se propaga la onda, por ejemplo: cuando una bocina produce sonido, las partículas del aire viajan en la misma dirección que el sonido.
- Ondas transversales: para este tipo de ondas, las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección en que se propaga la onda, por ejemplo: cuando una hoja toca el agua, las partículas del agua viajan en dirección perpendicular a la hoja.

Según su periodicidad:

- Ondas periódicas: son perturbaciones producidas por ciclos repetitivos, como las ondas de radio.
- Ondas no periódicas: son perturbaciones producidas de manera aislada y si las perturbaciones se llegan a dar de forma continua sus cualidades son distintas.

Este trabajo se basa en el uso de ondas acústicas, comúnmente referidas como ondas sonoras. La onda acústica produce perturbaciones en las partículas del aire, las cuales se propagan en la misma dirección que fue generada la onda. No obstante, las partículas presentan choques elásticos entre sí, viajando ahora en sentido opuesto o igual a la propagación de la onda, generando diferencias de presión sonora en el medio, es decir, se forman zonas con mayor y menor cantidad de partículas de aire, como se muestra en la Figura 2.2, donde se aprecia que este tipo de ondas sonoras son del tipo mecánica, longitudinal y periódica [8].

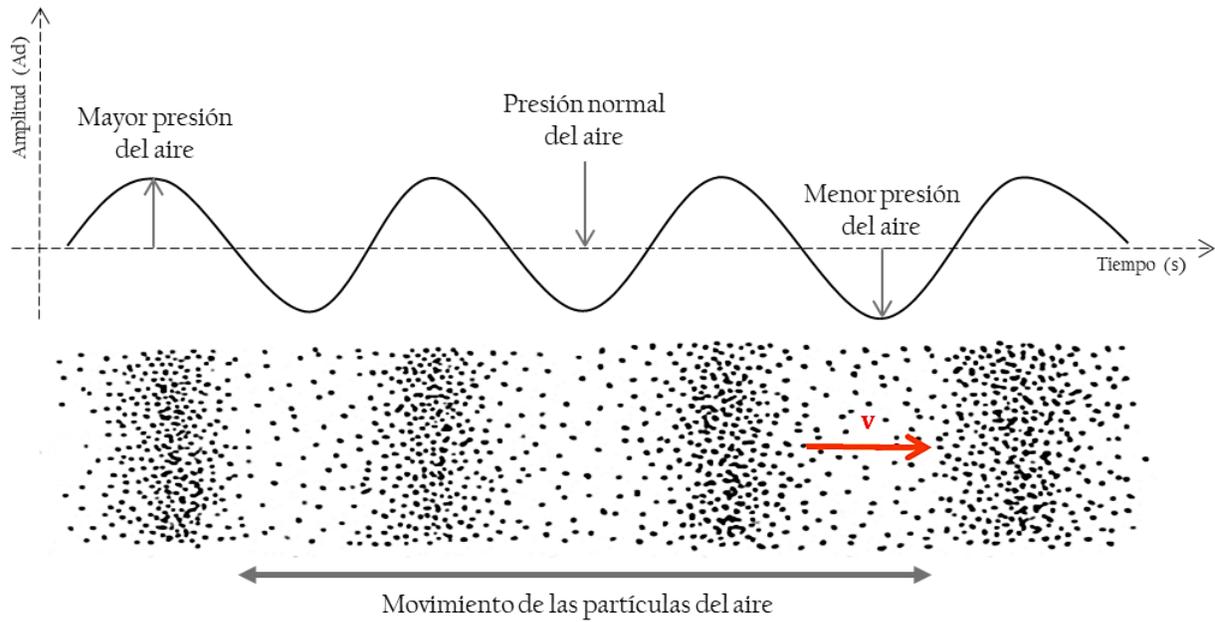


Figura 2.2. Representación de la propagación del sonido mediante el movimiento de las partículas del aire.

Retomando la ecuación (2.4), la cual describe la velocidad en el medio de propagación de un gas y considerando la densidad del aire, es posible determinar la velocidad del sonido en función de la temperatura, como:

$$v_{aire} = (331.4 + 0.6T) \text{ m/s} \quad (2.5)$$

Donde T , es la temperatura en Celsius, tomando como referencia a la temperatura ambiente, de 20 °C, entonces la velocidad del sonido corresponde a:

$$v_{aire} = c = 343.4 \text{ m/s}$$

Considerando la frecuencia que porta una onda acústica se puede clasificar en tres tipos: ondas sonoras infrasónicas (<20 Hz), ondas sonoras audibles (20 Hz-20 kHz) y ondas sonoras ultrasónicas (>20 kHz).

En este trabajo de investigación se usarán ondas sonoras en el rango audible [9] y el principio de análisis se basa en la respuesta lineal de un sistema, el cual determina la respuesta de un sistema $Y[n]$, cuando una señal de entrada $X[n]$ interactúa con el sistema $h[n]$, como se representa en el siguiente diagrama, Figura 2.3.

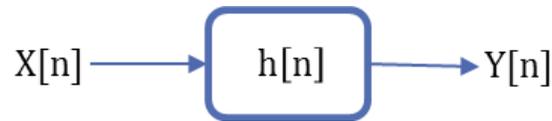


Figura 2.3. Diagrama de la respuesta lineal de un sistema.

Este principio es utilizado para obtener de manera indirecta las propiedades acústicas en materiales sólidos, es decir, es posible determinar las ondas reflejadas, transmitidas y absorbidas, las cuales son generadas por una onda acústica incidente sobre la superficie del material y de las cuales se determinan los coeficientes acústicos.

Una forma de ejemplificar este principio es mediante una representación esquemática, Figura 2.4, en la cual se hace incidir una onda acústica sobre un material de prueba, una parte de esta onda es reflejada y la otra parte es refractada. La onda refractada se propaga a lo largo del material y se puede atenuar en él, a esta onda se le llama onda absorbida. Sin embargo, si la onda refractada sale del material se le conoce como onda transmitida. Estas son las características que presenta una onda acústica incidente sobre la superficie de un material sólido [9].

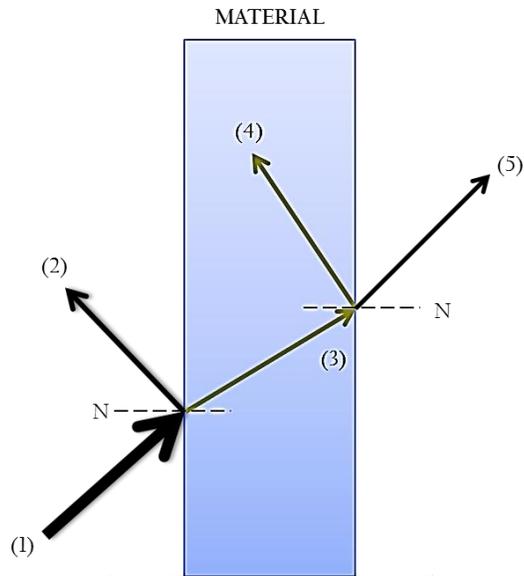


Figura 2.4. Representación esquemática de las ondas acústicas: (1) incidente, (2) reflejada, (3) refractada, (4) absorbida y (5) transmitida en un material de prueba.

Cabe mencionar que cada material presentará mayor o menor amplitud de onda reflejada, absorbida o transmitida, dependiendo de sus propiedades intrínsecas. Cuantificar la presión de cada onda, en función, de la frecuencia, es la base fundamental de este trabajo de investigación para conocer sus coeficientes acústicos de un material sólido.

La caracterización acústica de un material sólido contribuye en el estudio y acondicionamiento acústico en diferentes recintos dependiendo de las diferentes fuentes de ruido.

3 Antecedentes y Estado del Arte

Este capítulo describe el desarrollo de una de las metodologías más usadas para la caracterización acústica de materiales sólidos. Los diferentes resultados obtenidos en los diversos diseños del tubo de impedancia establecieron las bases para definir una norma.

Existen dos métodos para determinar las propiedades acústicas de un material sólido. El primer método es la cámara reverberante, Figura 3.1, el cual consiste en colocar una fuente sonora y un micrófono dentro de una cámara con propiedades altamente reflejantes. Para conocer el coeficiente de absorción de un material de prueba, se realizan un par de mediciones, la primera consiste en generar, mediante una bocina, una onda acústica con cierta intensidad y contenido en frecuencia. El micrófono registra el nivel de presión acústico generado por las reflexiones en las paredes, piso y techo de la cámara reverberante. La segunda medición se realiza de la misma forma, pero se coloca un material de prueba dentro de la cámara y nuevamente el micrófono registra las reflexiones. Posteriormente se lleva a cabo una comparación entre ambas señales para obtener el coeficiente de absorción acústico del material.

El inconveniente de este método es que requiere de un espacio relativamente grande para instalar dicha cámara, no obstante, este método permite caracterizar muestras grandes e incluso arreglos estructurales.



Figura 3.1. Cámara reverberante

El segundo método más común, es el tubo de impedancia, el cual no requiere de un espacio grande y tampoco de una instrumentación robusta para caracterizar muestras pequeñas de un material sólido. Este método consta de una bocina, un tubo liso, rígido y cerrado que se utiliza como guía de onda. El material de prueba se coloca en uno de los extremos del tubo y en el otro extremo se acopla la bocina. Dos micrófonos son colocados sobre la pared interna del tubo para registrar las señales acústicas producidas. Una representación esquemática de este método se observa en la Figura 3.2.

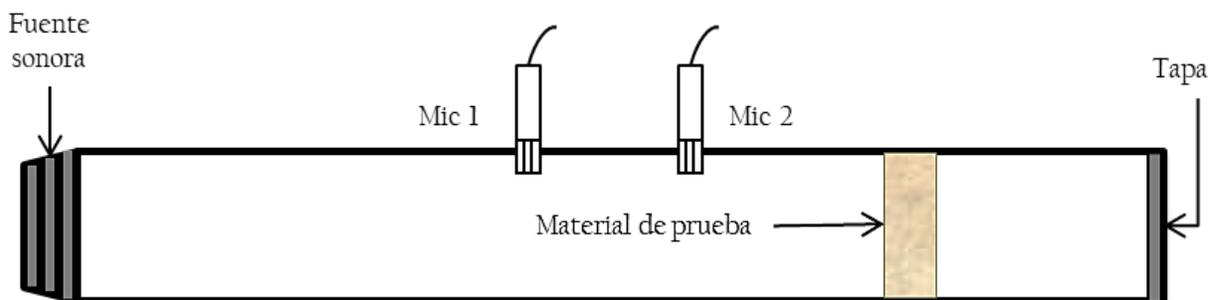


Figura 3.2. Componentes del Tubo de impedancia.

El método del tubo de impedancia fue un invento del físico alemán August Kundt, con el cual determinó la velocidad del sonido en diferentes gases, cabe mencionar que para este método se implementan ondas acústicas Sinusoidales [3].

A partir de 1866 el tubo de Kundt, ha sido tomado como referencia en diversas investigaciones que han contribuido en la innovación de este método para determinar las propiedades acústicas de materiales sólidos de prueba, por ello todos los antecedentes que se exponen en este trabajo utilizaron siempre ondas Sinusoidales, abarcando un ancho de banda hasta los 3 kHz.

Scott, R.A. utilizó el tubo de impedancia para determinar las propiedades de un material poroso [10]. En este caso, en uno de los extremos del tubo se coloca una fuente sonora, mientras que, el otro extremo del tubo queda totalmente abierto evitando reflexiones de onda y en su interior contiene el material de prueba, Figura 3.3. Un micrófono se introduce longitudinalmente en el material para desplazarlo a lo largo de este. El espesor del material es relativamente grande en comparación al micrófono. El desplazamiento del micrófono es para evaluar la presión sonora dentro del material. A partir de esta experimentación Scott determinó la constante de propagación sonora de un material poroso (Γ) mediante la relación de presión sonora que registra el micrófono en función de la distancia, a lo largo del material de prueba. Este modelo propuesto por Scott presenta inconvenientes, ya que el espesor del material debe ser igual a la longitud del tubo rígido y solo aplica para ciertos materiales porosos, además de que se considera como una prueba invasiva, y por consiguiente perturba la estructura del material de prueba.

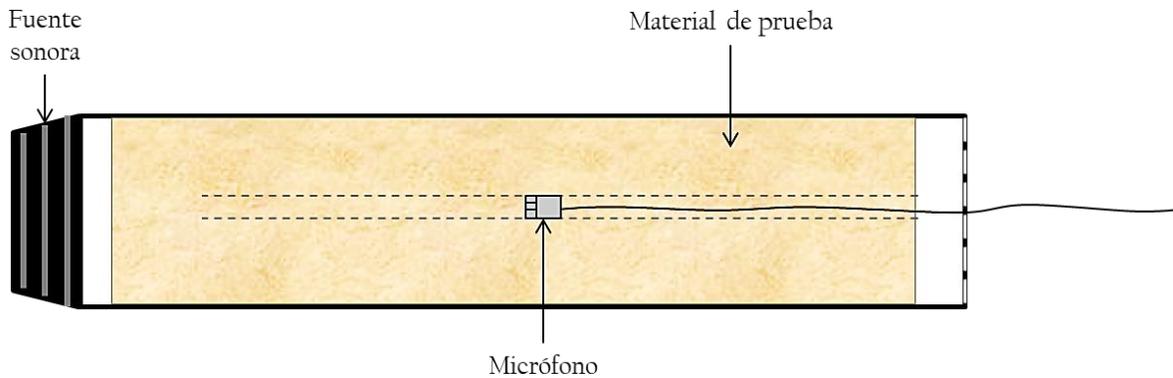


Figura 3.3. Tubo de impedancia diseñado por Scott [10].

Ferrero y Sacerdote propusieron un método comúnmente conocido como “dos espesores” [11]. Este consiste en usar un tubo de impedancia idéntico al de Scott, sin embargo, con este nuevo método solo se realizan dos mediciones para conocer la impedancia acústica superficial de un material de prueba. La primera medición se elabora con una muestra de espesor específico, mientras que la segunda medición se realiza con una muestra que presenta el doble del espesor de la primera. Destacando que las dos muestras son del mismo material (poroso) y que las mediciones solo se realizan a una única frecuencia.

Delany y Bazley, llevaron a cabo un trabajo de investigación para determinar dos propiedades acústicas características y representativas de un material sólido de prueba: el coeficiente de reflexión y absorción [12]. Dichos autores propusieron un modelo matemático para conocer la constante de propagación y la impedancia característica complejas, a partir de conocer la resistencia específica al flujo del material de prueba, la densidad y velocidad del sonido en el aire, y la frecuencia deseada. Este modelo les permitió conocer los coeficientes de reflexión y absorción de materiales fibrosos. La Figura 3.4 muestra los resultados obtenidos teóricamente de un material fibroso, en donde se observa que ambos coeficientes acústicos son recíprocos.

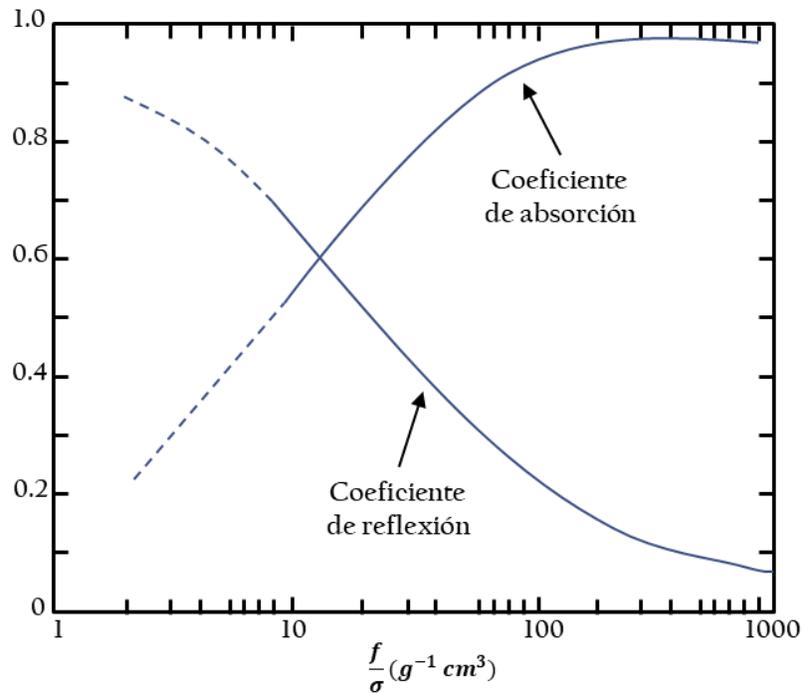


Figura 3.4. Comportamiento de absorción y reflexión determinado por Delany y Bazley [12].

Bies y Hansen usaron el parámetro de la resistencia al flujo de materiales porosos para caracterizarlos acústicamente [13]. Este parámetro fue determinado mediante un dispositivo que ellos diseñaron y construyeron, ver Figura 3.5. Dicho aparato consta de: un portamuestras (1), donde se coloca el material de prueba (2) sin sufrir deformaciones, un anillo (3) para evitar fugas y sellar correctamente el tubo (4). La presión en la parte superior del tubo se mide con un barómetro (11) y un manómetro digital (12) a través de un tubo conector (5). El aire a presión se introduce en el tubo por la garganta cónica (10). A través de una válvula (6), el medidor del flujo de aire (7) proporciona el flujo constante indicado por el manómetro (8). La presión del aire se mantiene constante con el uso del regulador de presión (9). Teniendo un material fibroso como prueba.

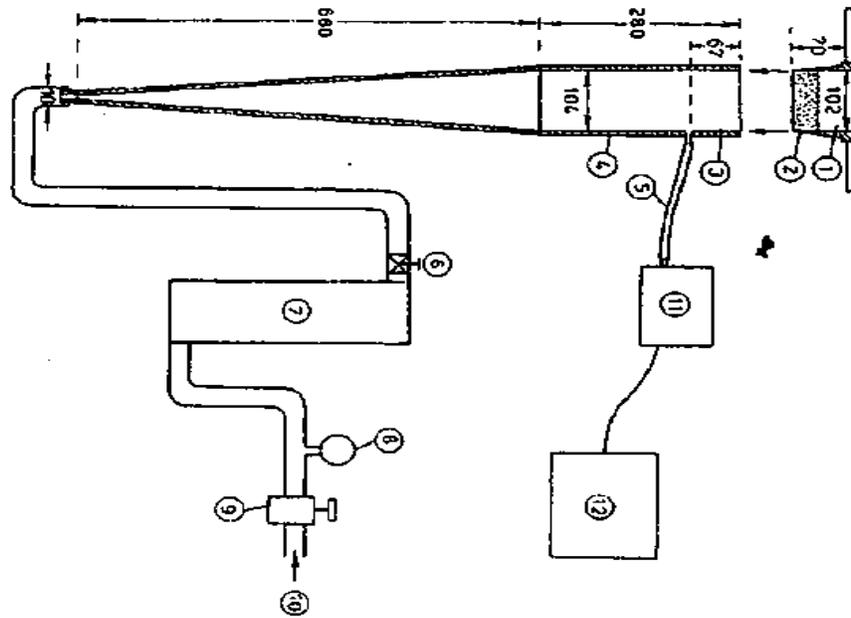


Figura 3.5. Instrumento de medición de la resistencia al flujo de Bies y Hansen [13].

Con el trabajo de investigación de Bies y Hansen, se demostró que a partir de la resistividad al flujo se puede describir la propagación del sonido. De esta manera propusieron tres importantes aplicaciones para el comportamiento acústico del material poroso: 1) control del campo sonoro en un recinto, 2) mejora de las pérdidas a través de tuberías y paredes, y 3) la atenuación de la propagación del sonido en tubos [13].

Ingard y Dear a mediados de los 80's calcularon experimentalmente la resistencia al flujo de materiales sólidos [14]. El método que implementaron fue un tubo de impedancia, el cual diseñó Kundt. Sin embargo, en lugar de colocar los dos micrófonos antes del material, se colocó un micrófono antes y después del material de prueba. Este arreglo experimental

permite registrar las señales acústicas antes y después del material, mientras que, al final del tubo se tiene una terminación rígida, como se visualiza en la Figura 3.6.

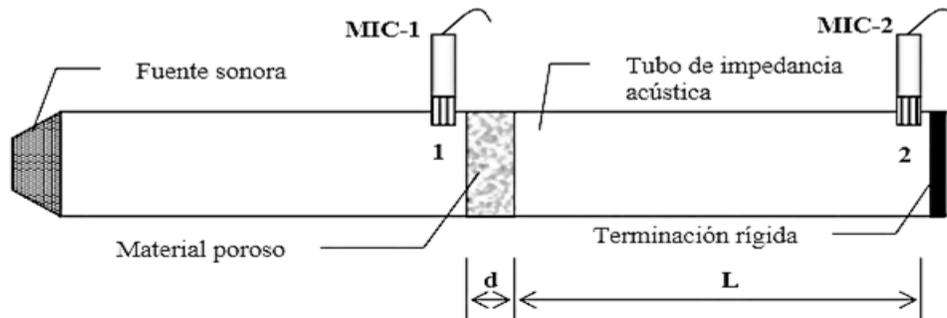


Figura 3.6. Instrumento de medición de la resistencia al flujo de Ingrad y Dear [14].

Utsuno y Tanaka usaron el método del tubo de impedancia de Ingard y Dear para conocer la impedancia superficial del material poroso [15]. Los resultados obtenidos cubrieron un rango más amplio de frecuencias y no solo una frecuencia, como ocurría con el método de los dos espesores expuesto por Ferrero y Sacerdote [11].

Bordone y Sacerdote utilizaron el método de la Función de Transferencia para determinar la impedancia superficial del material de prueba [16]. La metodología implementada se basó en el tubo de Kundt. Este método comenzó a tener importancia por la relativa facilidad de utilizar una instrumentación menos robusta, y una técnica no invasiva, para determinar diversas propiedades del material de prueba. Mostrando mejores resultados que los reportados por Ferrero y Sacerdote [11], puesto que, los errores sistemáticos reducen hasta un 50%, además de que presenta un margen de error menor, ya que, los micrófonos están situados en la superficie del tubo, a diferencia del modelo de Ferrero solo utiliza un micrófono y este se encuentra dentro del material, como se describió en la Figura 3.3. Otra

ventaja que presenta este nuevo método, es que, se puede caracterizar muestras más pequeñas y no del tamaño del largo del tubo.

Ren y Jacobsen calcularon la resistencia y la reactancia al flujo para materiales porosos, mediante la Función de Transferencia [17]. El método que implementaron fue el tubo de impedancia (Ingard y Dear) con dos micrófonos, uno de ellos situado antes de la muestra y el otro después. La Función de Transferencia fue utilizada para descomponer el campo sonoro en ondas incidentes y reflejadas, de esta forma se determina la resistencia y reactancia de materiales porosos.

Cummings y Beadle, utilizaron el tubo de impedancia (Ingard y Dear) y la Función de Transferencia (Ren y Jacobsen) para realizar la primera caracterización acústica de la Espuma de Poliuretano [18]. La caracterización de este material generó aplicaciones, ya que se trata de una espuma plástica que en los 90's tuvo gran atención por su aplicación en aislamiento y acondicionamiento acústico en recintos. En esta investigación dedujeron un modelo matemático a partir de la densidad y la resistividad al flujo de dicho material, el único inconveniente de este modelo consiste en emplear materiales porosos y cubrir un ancho de banda desde 1 kHz hasta los 4 kHz.

Song y Bolton determinaron la impedancia acústica (es la resistencia que opone el material de prueba a las ondas que se propagan dentro de este) y la constante de propagación (esta expresa el incremento del ciclo de la onda acústica por unidad de distancia), empleando dos tubos de impedancia diferentes [17]. El primer tubo de impedancia usado fue el de Kundt, mientras que el segundo tubo consistió de cuatro micrófonos, el primer par de micrófonos colocados antes del material y el segundo par después del material), cabe mencionar que las

mediciones fueron realizadas en una cámara anecoica [19]. Este trabajo ha sido relevante para el estudio acústico de los materiales porosos, puesto que los resultados obtenidos dieron paso a la generación de la Norma ISO 10534-2 para la fabricación de un tubo de impedancia estándar (Kundt).

Suhanek y Jambrosic obtuvieron el coeficiente de absorción y reflexión para dos materiales en específico, lana mineral y espuma [20]. Ellos implementaron dos métodos con el tubo de impedancia: para el primero de ellos utilizaron dos micrófonos colocados antes del material de prueba y enseguida del material cerraron el tubo con un material altamente rígido, esto con la finalidad de obtener la relación de las ondas estacionarias que se generan dentro del tubo y anular la transmisión del sonido, para obtener los coeficientes de absorción y reflexión del material de prueba. Cabe mencionar que las ondas estacionarias son originadas por la superposición de las ondas Sinusoidales que presentan misma amplitud, dirección y frecuencia, pero con sentido contrario. Por otro lado, el segundo método implementa el mismo tubo de impedancia con los dos micrófonos, pero usa la Función de Transferencia, el cual descompone el campo sonoro identificando las señales de los micrófonos y así poder obtener el coeficiente de reflexión y absorción. Sin embargo, Suhanek y Jambrosic afirman que las mediciones obtenidas mediante la Función de Transferencia proporcionan resultados más rápidos y presentan mejor exactitud con respecto al método de las ondas estacionarias, también especifican que, la Función de Transferencia alcanza un ancho de banda de hasta 3000 Hz, mientras que con las ondas estacionarias solo trabaja hasta los 500 Hz. La Función de Transferencia se detalla en la sección 4.

Salissou y Panneton aplicaron dos métodos con el tubo de impedancia diseñado por Song y Bolton [19], con cuatro micrófonos, para obtener los coeficientes de reflexión y absorción para materiales porosos homogéneos y no homogéneos [21]. El primer método es la incidencia normal, la cual se basa en generar la matriz de la Función de Transferencia y el segundo método es la descomposición del campo sonoro a partir de ondas estacionarias.

Song y Moreno emplearon dos métodos para la obtención del coeficiente de absorción, la Función de Transferencia y el Deflectómetro Óptico Schieren [22]. Con estos métodos adquirieron las presiones sonoras del material de prueba, estudiando las respuestas acústicas hasta los 5 kHz. Los resultados obtenidos por los dos métodos fueron similares, para los coeficientes de absorción en este rango de frecuencias.

Salissou y Panneton realizaron una compilación de varios métodos para conocer la impedancia acústica, el coeficiente de reflexión y absorción de un material de prueba, ocupando un tubo de impedancia con dos, tres y cuatro micrófonos (diseños de Kundt [3], Suhanek y Jambrosic [20], Song y Bolton [19]), de igual manera resaltan el método mejorado de Iwase [23]. En esta compilación, para cada método se puede obtener la impedancia superficial característica del material de prueba. De la misma forma se expone el comportamiento acústico para bajas frecuencia de hasta 1000 Hz [23].

El estudio del coeficiente de absorción se ha determinado por diversos métodos, los cuales involucran diferentes condiciones experimentales para el diseño y construcción del tubo de impedancia. Por lo que se han establecido normas para la construcción de este tubo y obtener el coeficiente de absorción y reflexión [24–26].

Este trabajo de investigación hace referencia a dichas normas ASTM e ISO [24–26] para el diseño y la construcción de dos tubos de impedancia, uno corto de 0.60 m y otro largo de 8.0 m, en base a los métodos de los cuatro micrófonos [19] y al de dos micrófonos [14] para determinar los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión de la Espuma de Poliuretano (material de referencia), Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa, cubriendo un ancho de banda de los 600 Hz hasta los 8 kHz.

4 Metodología I: Tubo de impedancia corto

Este capítulo describe los parámetros establecidos en las normas para la caracterización acústica de materiales sólidos, los cuales son utilizados en el diseño y construcción de un tubo de impedancia con una y dos cámaras acústicas. La instrumentación y equipo usados para determinar los coeficientes acústicos se basa en el uso de la Función de Transferencia en función del tiempo.

4.1 Definición de parámetros físicos del tubo de impedancia corto con una cámara acústica

El diseño del prototipo experimental consiste en un tubo rígido y liso que sirve como guía de onda para la propagación de una onda acústica generada por una fuente sonora, la cual se coloca en uno de los extremos del tubo, mientras que en el otro extremo se coloca un material de prueba seguido de una terminación rígida. Este diseño representa una cámara acústica, en la cual se lleva a cabo la generación y registro de las ondas acústicas. En dicha cámara se coloca un par de micrófonos, al borde del diámetro interior del tubo y cercanos al material de prueba, para registrar las ondas acústicas que se propagan entre la fuente sonora y el material de prueba. Un diagrama esquemático de este prototipo experimental se muestra en la Figura 4.1.

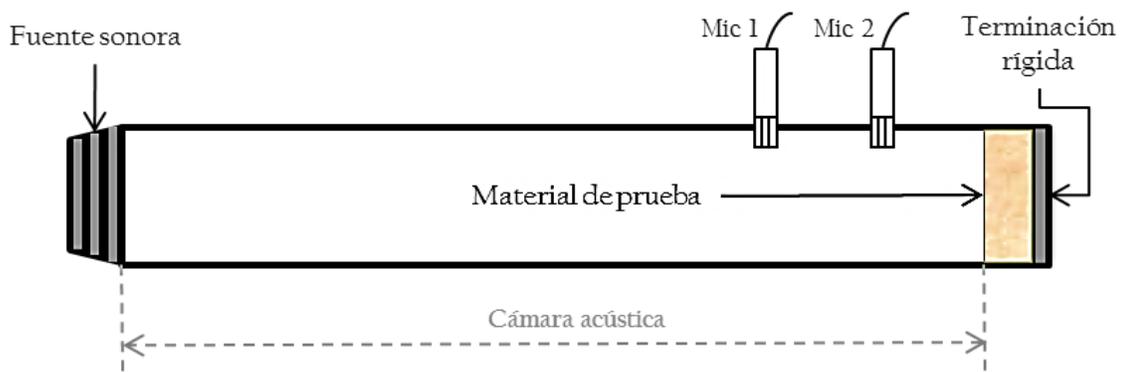


Figura 4.1. Diagrama esquemático de un tubo de impedancia corto con una cámara acústica.

Debido a que se trata de un tubo cerrado, Rayleigh propuso una relación entre la longitud de onda λ y el radio del tubo r , la cual define a la longitud de onda como 3.413 veces el radio interno del tubo, o bien es 1.7065 veces el diámetro interno del tubo [27].

$$\lambda = 3.413 r = 1.7065 d \quad (4.1)$$

Por otro lado, la longitud de onda se define como la relación que existe entre la velocidad del sonido c y la frecuencia f [28].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.2)$$

Empleando las ecuaciones (4.1) y (4.2), se determina la frecuencia máxima en la onda acústica generada en la cámara acústica del tubo de impedancia cerrado.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{1.7065d}$$

$$f = \frac{1}{1.7065} \frac{c}{d} = 0.5865 \frac{c}{d} \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) forma parte de las normas ASTM E1050-12 e ISO 10534-2 para la fabricación de un tubo de impedancia [24–26].

Bodén y Ábom diseñaron un sistema numérico para calcular los errores relativos originados por las vibraciones de las ondas sonoras dentro de un tubo de impedancia de Kundt. Utilizaron dos micrófonos colocados a lo largo del tubo para registrar las vibraciones de las ondas sonoras [29]. Determinaron el número de oscilación que presenta una onda por

unidad de longitud, a este número de oscilaciones se le conoce como número de onda, k el cual está dado por la siguiente expresión:

$$k = \frac{\pi}{2s} \quad (4.4)$$

donde el parámetro s representa la distancia de separación entre los dos micrófonos. Con ello, determinaron la Función de Transferencia de los dos micrófonos a diferentes distancias y encontraron dos errores significativos del 1% en magnitud y 0.5° (0.01rad) en fase [29]. Por lo que, restringieron los valores del número de onda k , dada mediante la siguiente expresión.

$$0.1\pi < ks < 0.8\pi \quad (4.5)$$

El intervalo del número de onda establece la frecuencia máxima y mínima de la onda acústica propagada a lo largo del tubo de impedancia, estas frecuencias consideran la separación entre los dos micrófonos. Este ancho de banda se puede conocer matemáticamente a partir de las ecuaciones (4.2) y (4.5), retomando que $k\lambda = 2\pi$ [28].

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2\pi/k} = \frac{kc}{2\pi} = \frac{ks}{2\pi}$$

$$f = \frac{ksc}{2\pi s} \quad (4.6)$$

$$f_{max} = \frac{ksc}{2\pi s} = \frac{0.1c}{2\pi s} \quad (4.7)$$

$$f_{min} = \frac{ksc}{2\pi s} = \frac{0.8c}{2\pi s} \quad (4.8)$$

Estas ecuaciones se tomaron como referencia para definir los parámetros físicos en la construcción de un tubo de impedancia corto con una cámara acústica, tomados de las normas ASTM E1050-08 e ISO 10534-2, [24–26].

Para la construcción del primer prototipo experimental se utilizó un tubo de PVC comercial, el cual presenta un diámetro interno de 0.0127 m, un diámetro externo de 0.016 m y una longitud de 0.060 m, también se emplea una bocina (JBL-2426H) para la generación de las ondas acústicas, con una respuesta en frecuencia desde los 600 Hz hasta los 20 kHz.

Considerando la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente, 343 *m/s*, se procede a determinar la frecuencia máxima y la longitud de onda a partir de las ecuaciones (4.2) y (4.3) respectivamente.

$$\lambda = \frac{343 \text{ m/s}}{600 \text{ Hz}} \cong 0.573 \text{ m}$$

$$f_{\text{máx}} = 0.586 \frac{343 \text{ m/s}}{0.012 \text{ m}} \cong 16 \text{ kHz}$$

La norma ASTM C384-04 establece que “al menos tres cuartas partes de la longitud de onda debe ser menor a la diferencia que existe entre la longitud del tubo de impedancia y su diámetro interno” [24].

$$\frac{3}{4}\lambda < l - d \tag{4.9}$$

Tomando en cuenta los parámetros del prototipo, se valida la condición establecida por la norma ASTM C384-04.

$$0.42 \text{ m} < 0.588 \text{ m}$$

Con ello, se procede a calcular la distancia de separación, “s”, entre los centros de los dos micrófonos, los cuales se colocan al borde del diámetro interno de la cámara acústica. Dicha distancia está definida por la ecuación (4.10), la cual se toma como referencia de la norma ASTM E1050-12, [25].

$$s = \frac{0.8 c}{2f_{\text{máx}}} \quad (4.10)$$

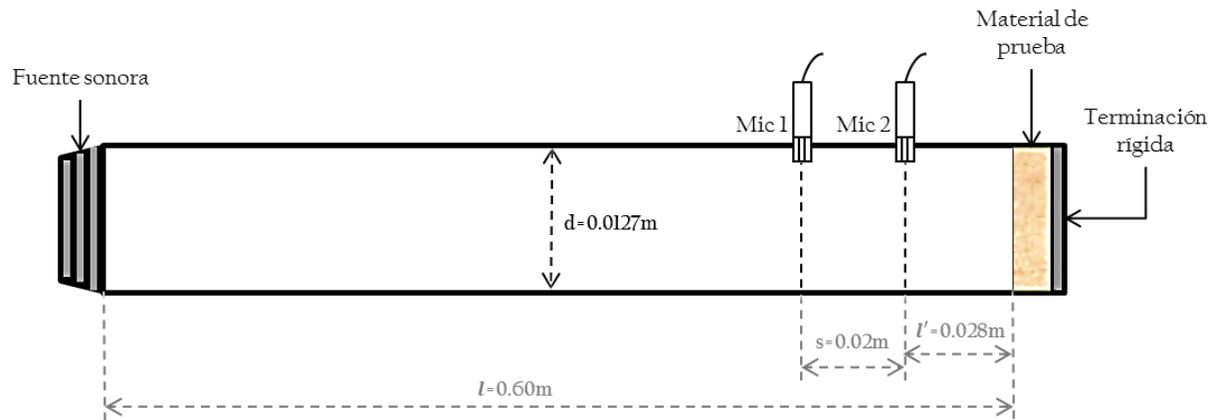
Antes de determinar la distancia de separación entre los micrófonos, es necesario definir la frecuencia máxima a implementar, la cual es de 8 kHz, ya que, esta frecuencia se encuentra dentro de lo calculado con la ecuación (4.3). Una vez fijado el valor de la frecuencia máxima se procede a determinar la distancia de separación entre los micrófonos.

$$s = \frac{0.8 (343 \text{ m/s})}{2 (8 \text{ kHz})} = 0.02 \text{ m}$$

Posteriormente se determina la posición en la que deben ser colocados los micrófonos a lo largo de la cámara acústica. Retomando que “entre el material y el micrófono más cercano a él debe haber una distancia l' de al menos dos veces el diámetro interno del tubo de impedancia” [3]. Se tiene entonces que:

$$l' = 2d \quad (4.11)$$

Los parámetros obtenidos a partir de las condiciones establecidas por las normas y por el tubo de PVC a implementar, fueron utilizados para la construcción del tubo de impedancia corto con una cámara acústica, como se visualiza en la Figura 4.2a.



(a)



(b)

Figura 4.2. Diseño (a) y construcción (b) del primer prototipo del tubo de impedancia corto, basado en la norma [24–26].

4.2 Instrumentación y equipo para el tubo de impedancia corto con una cámara acústica

Para la generación de la onda acústica se utiliza una bocina (JBL-2426H), la cual presenta un ancho de banda de 600 Hz hasta los 20 kHz y una impedancia de entrada de 8 ohms. Esta fue acoplada al tubo de PVC, mediante un cople reductor con pendiente de 45 grados, elaborado de resina.

Un generador de funciones (Tektronix AFG3022B) se usa para crear una señal eléctrica de baja potencia y con frecuencia variable en función del tiempo. Mientras que, un amplificador de potencia (Nady Audio, XA-900) se utiliza para incrementar la potencia de la señal eléctrica, regulando la ganancia del amplificador de 0 a 32dB. El registro de las señales acústicas se realiza a través de dos micrófonos (JLI-B6022AP), los cuales presentan un ancho de banda de los 200 Hz hasta los 16 kHz, siendo omnidireccional.

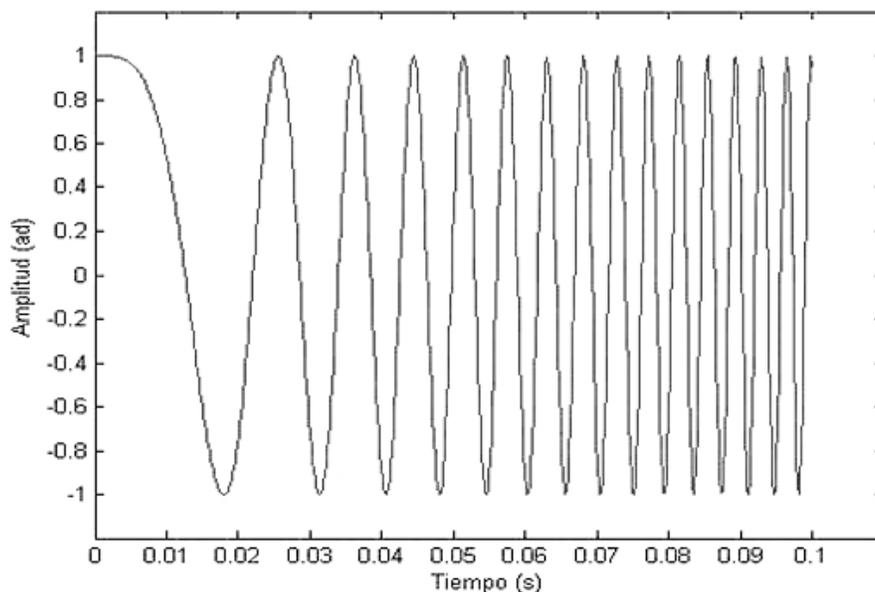


Figura 4.3. Diagrama de la señal eléctrica con amplitud constante y frecuencia variable.

Un amplificador de instrumentación se utiliza para incrementar la relación señal-ruido cuando se fija la máxima ganancia del amplificador de potencia, con el objetivo de mantener un adecuado nivel de presión sonora en el registro de las señales en los micrófonos, evitando saturación. En la Figura 4.4 se aprecia el diagrama esquemático de un amplificador de instrumentación, INA 122P. Este diseño se implementó para cada micrófono durante el registro de las señales acústicas [31].

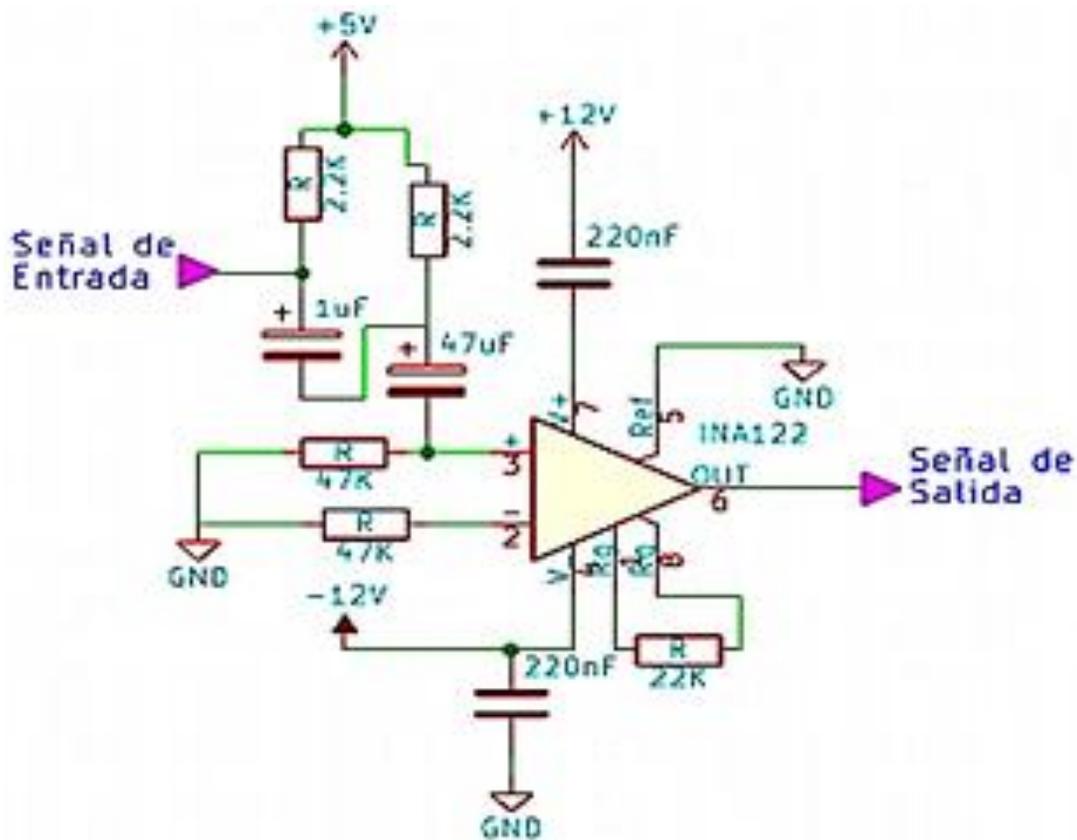


Figura 4.4. Diagrama del amplificador de instrumentación INA 122P.

Un Amplificador Lock-In (SR-85) se usó para obtener la respuesta en frecuencia entre la señal de referencia y la señal registrada por cada micrófono. Debido a que solo se cuenta

con un Amplificador Lock-In, este procedimiento se realizó para cada micrófono colocado a lo largo de la cámara acústica.

El diagrama esquemático del montaje experimental del tubo de impedancia corto, se muestra en la Figura 4.5.

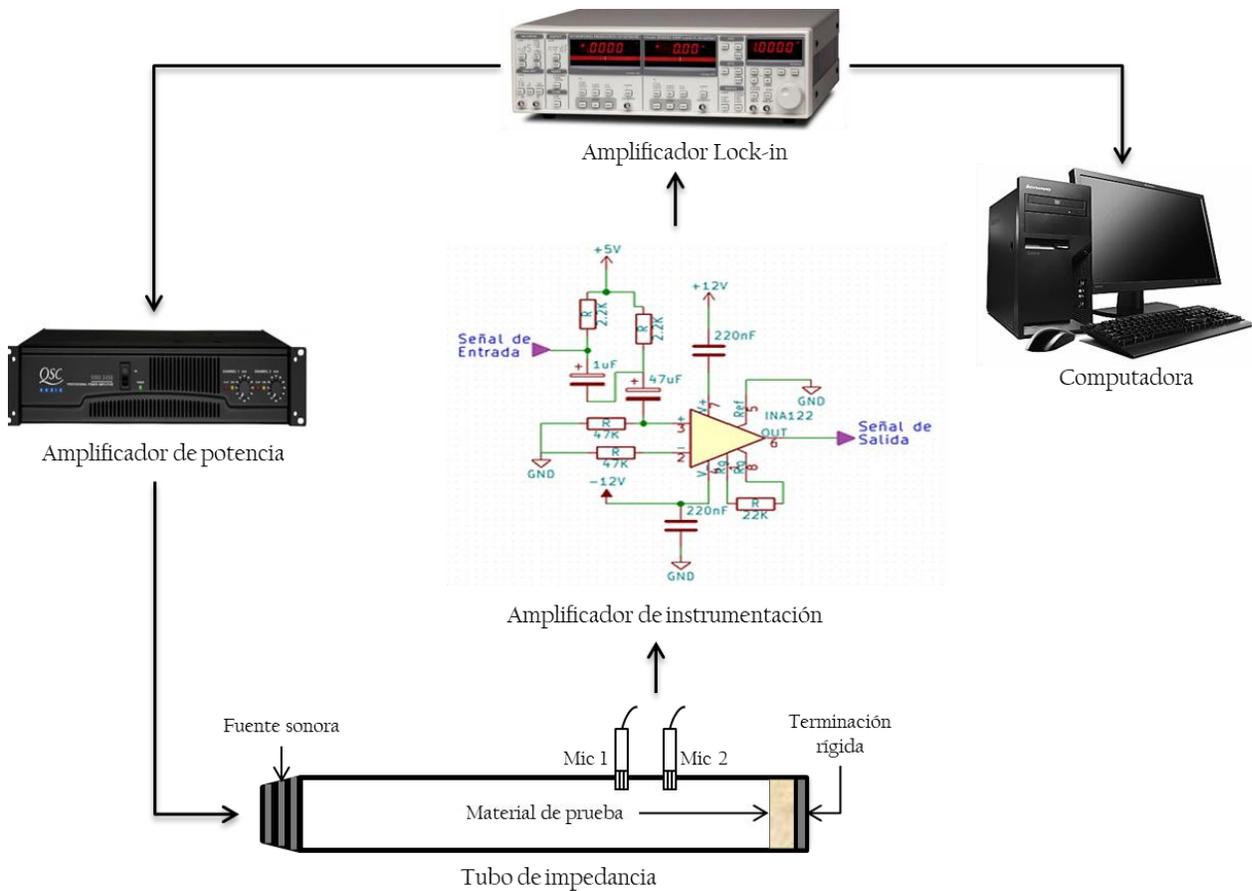


Figura 4.5. Montaje experimental del tubo de impedancia corto.

La metodología experimental consiste en usar un amplificador Lock-In para generar una señal Sinusoidal de frecuencia variable (Chirp), la cual se hace pasar por un amplificador de potencia. De esta manera, la potencia de señal eléctrica se incrementa antes de ser enviada a la bocina, la cual producirá las ondas acústicas que se propagarán a lo largo de la

cámara acústica, en una sola dirección, para impactar al material de prueba que está colocado en uno de los extremos de la cámara. Dos micrófonos colocados en la cámara acústica registrarán las señales acústicas producidas dentro de esta. El amplificador Lock-In, a su vez, mide la respuesta acústica del material en el dominio de la frecuencia, comparando la señal registrada por el micrófono y la señal de referencia (Chirp).

Las señales registradas por los micrófonos en el dominio de la frecuencia son utilizadas para determinar la Función de Transferencia [19]. Un programa lleva a cabo el procesamiento de señales y la obtención los coeficientes acústicos, reflexión y absorción, del material de prueba.

Cabe resaltar que, para la correcta implementación de esta metodología, el valor de la ganancia de la señal acústica debe ser cuidadosamente seleccionada a través del amplificador de potencia para evitar saturación de señal en los micrófonos. Por otro lado, si la amplitud de la ganancia en la señal acústica es demasiado pequeña no será posible determinar la respuesta acústica del material de prueba. Este inconveniente se vuelve más significativo en función de un incremento de la frecuencia en la señal acústica. La relación de ganancia entre el amplificador de potencia y el generador de funciones se determina a prueba y error, analizando la respuesta obtenida en pantalla por el Amplificador Lock-In.

4.3 Señal Sinusoidal de Frecuencia Variable (Chirp)

Una onda Sinusoidal tiene características específicas de amplitud, frecuencia, fase y longitud de onda. Estos parámetros son significativos para la propagación de la onda dentro del tubo de impedancia.

La expresión general de la presión acústica de una onda Sinusoidal propagándose longitudinalmente está dada como:

$$p(x, t) = \hat{P} \sin(kx + \omega t - \varphi) \quad (4.12)$$

Donde \hat{P} es la amplitud pico, x es la posición longitudinal de propagación, k es el número de onda, $k = 2\pi/\lambda$, ω es la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$) y φ es la fase inicial de la señal Sinusoidal.

Considerando que una señal es generada por un tiempo relativamente largo y debido a la longitud corta de la cámara acústica, la señal registrada por los micrófonos corresponde a una onda estacionaria formada por la superposición de ondas, incidentes y reflejadas, después de impactar a un material de prueba.

El análisis del estado estacionario a través de una señal Sinusoidal acústica que varía su frecuencia en el dominio del tiempo permite cuantificar los parámetros acústicos de un material de prueba. Un ejemplo de este tipo de señal es aquella referida como una señal Chirp. Este tipo de señal es una onda Sinusoidal de amplitud constante y frecuencia variable, con cierta duración temporal. Esta señal contiene una frecuencia inicial y final que es generada en un intervalo de tiempo, como se observa en la Figura 4.6.

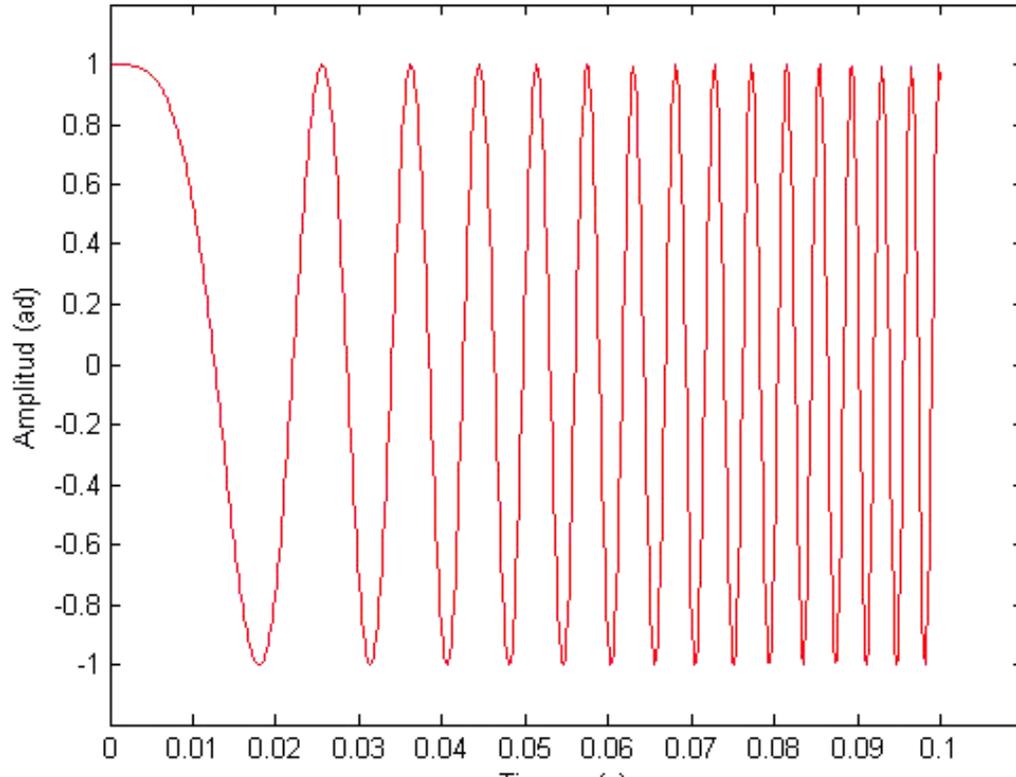


Figura 4.6. Señal Sinusoidal con amplitud constante.

Este tipo de señal se usa para esta primera parte experimental considerando el diseño de un tubo de impedancia corto y abarcando un ancho de banda que cubre los 600 Hz a los 8 kHz.

4.4 Obtención de la Respuesta Acústica en el Dominio de la Frecuencia

El Amplificador Lock-In (ALI) es un instrumento el cual permite obtener la respuesta acústica en el dominio de la frecuencia a partir de la comparación de una señal de interés y una de referencia.

El funcionamiento del ALI consiste en detectar y amplificar la señal de entrada registrada por uno de los micrófonos, para después procesar la señal mediante un filtrado (filtro pasa-banda) centrado en una frecuencia de referencia. El ALI tiene una herramienta interna

llamada variador, el cual permite compensar las diferencias de fase que se pudieran presentar en la señal de entrada, una vez compensada la señal se procede a enviarla a la Detección Sensible de la Fase (DSF). La DSF extrae los componentes de la señal registrada por el micrófono y de referencia a una frecuencia en específico. Cabe resaltar que la señal de referencia es generada internamente por el mismo instrumento y es utilizada para generar la señal acústica.

Se realiza un Procesamiento Digital de Señales (DSP), el cual realiza el producto de las dos señales (interés y referencia), para después pasar a un filtrado pasa-bajas. Este filtro elimina los componentes de la señal alterna obtenida del DSF para garantizar una señal de salida continua, Figura 4.7. De esta manera se obtiene la respuesta acústica (amplitud, frecuencia y fase) de la señal de interés en el dominio de la frecuencia [32].

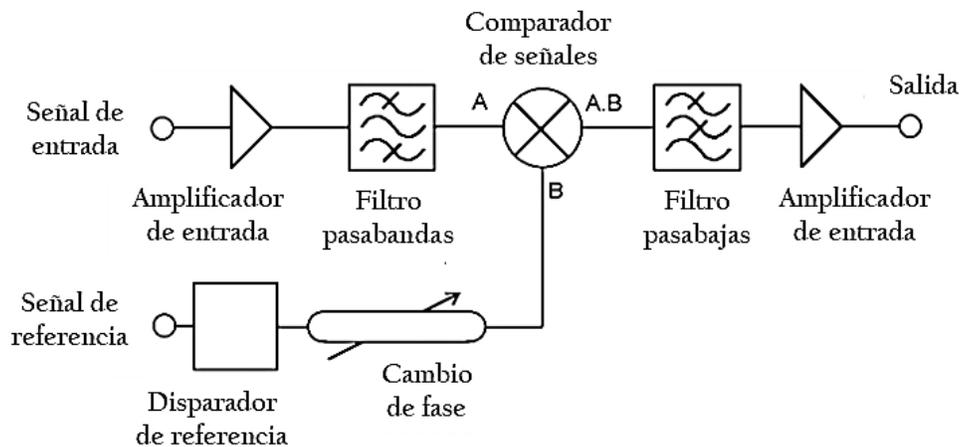


Figura 4.7. Diagrama a bloques del funcionamiento del ALI.

El funcionamiento del ALI se puede definir como la función de autocorrelación, puesto que este instrumento detecta señales débiles envueltas totalmente en ruido y se puede describir matemáticamente como:

$$R(nT, \Delta) = \frac{ab}{nT} \int_0^{nT} \text{Sin}(\omega t) \text{Sin}(\omega t + \Delta) dt \quad (4.13)$$

Donde n es el número de periodos, T es el periodo, ω es la frecuencia de referencia, a es la señal de referencia, b es la señal de interés y Δ , desfaseamiento de la señal de referencia.

4.5 Función de Transferencia de 2 Micrófonos

La Función de Transferencia entre dos micrófonos se utiliza en el tubo de impedancia corto, Figura 4.8, con la finalidad de obtener los coeficientes de absorción α y reflexión R de un material de prueba. Para este diseño, se considera nulo al coeficiente de transmisión, ya que el material se sitúa en el extremo cerrado del tubo [21,23,33].

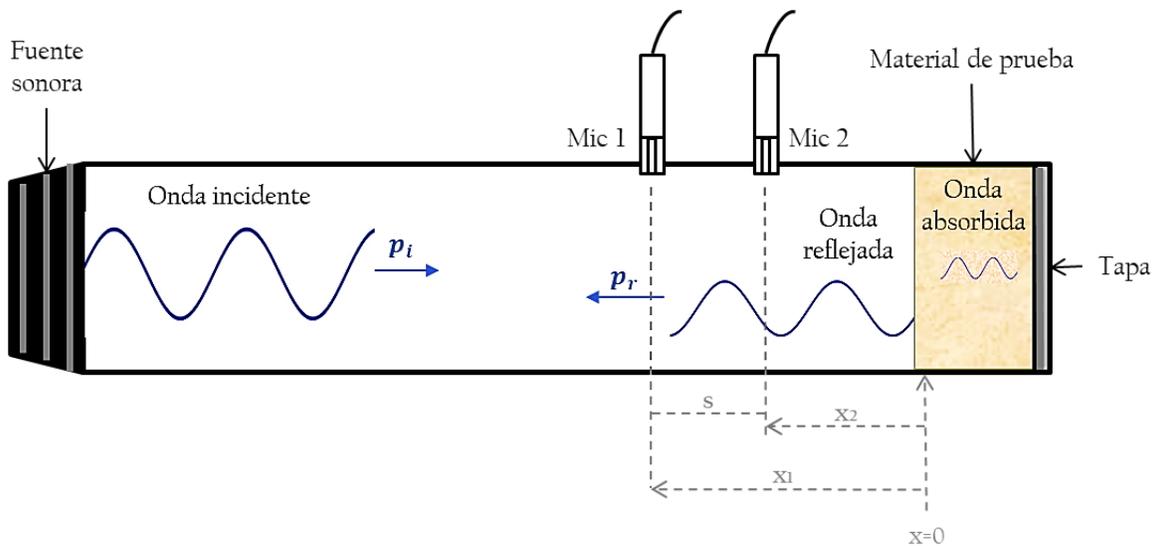


Figura 4.8. Diagrama esquemático del tubo de impedancia corto.

De esta manera, con el tubo de impedancia de una cámara acústica se puede conocer el coeficiente de absorción del material en función del coeficiente de reflexión, el cual se expresa matemáticamente como [34]:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (4.14)$$

Donde el coeficiente de reflexión R , se define como la razón del valor absoluto de las amplitudes de la presión reflejada P_r e incidente P_i .

$$|R| = \left| \frac{\hat{P}_r}{\hat{P}_i} \right| \quad (4.15)$$

Las expresiones que representan tanto las ondas incidente y reflejada están dadas como:

$$p_i = \hat{P}_i e^{j(-kx+\omega t)} \quad (4.16)$$

$$p_r = \hat{P}_r e^{j(kx+\omega t)} \quad (4.17)$$

Donde \hat{P}_i , \hat{P}_r son las magnitudes de las ondas, incidente y reflejada, respectivamente, k es el número de onda definido como $k = 2\pi f$, x es la distancia, ω es la frecuencia en la que fue generada la señal, t es el tiempo.

En el arreglo experimental, los micrófonos registran la superposición de las ondas generadas en la cámara acústica, respecto a la posición donde se encuentran estos. Por lo que, el registro de cada micrófono se describe matemáticamente como:

$$P_1 = \hat{P}_i e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1} \quad (4.18)$$

$$P_2 = \hat{P}_l e^{-jkx_2} + \hat{P}_r e^{jkx_2} \quad (4.19)$$

Donde P_1 y P_2 representan la superposición de las ondas que registra el micrófono 1 y 2, en las posiciones x_1 y x_2 , respectivamente.

Para determinar el coeficiente de reflexión se implementa una ecuación equivalente, la cual emplea las Funciones de Transferencia, esta ecuación se describe a continuación, [24–26]:

$$|R| = \left| \frac{\hat{P}_r}{\hat{P}_l} \right| = \left| \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} \right| \quad (4.20)$$

Donde H_{12} es la Función de Transferencia de la relación de los dos micrófonos, H_I es la Función de Transferencia de la onda incidente y H_R es la Función de Transferencia de la onda reflejada.

Sin embargo, la Función de Transferencia se define como la relación de las presiones sonoras registradas por dos micrófonos, es decir:

$$H_{ij} = \frac{P_j}{P_i} \quad (4.21)$$

Donde P_i , P_j son las presiones sonoras que registran los micrófonos, $i = 1, 2, 3, \dots, j$; en nuestro caso $i = 1$ y $j = 2$.

Considerando el tubo de impedancia corto, Figura 4.7 y retomando la definición de la Función de Transferencia, se define la Función de Transferencia del micrófono 2 con respecto al 1 como:

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\hat{P}_l e^{-jkx_2} + \hat{P}_r e^{jkx_2}}{\hat{P}_l e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1}} \quad (4.22)$$

Por otra parte, se obtiene la Función de Tránsito para la señal incidente H_I y reflejada H_R , sin embargo, como la señal incidente y reflejada son registradas al mismo tiempo por cada micrófono a una distancia determinada de separación, estas funciones se describen como:

$$H_I = \frac{P_I(x_2)}{P_I(x_1)} = \frac{\hat{P}_l e^{-jkx_2}}{\hat{P}_l e^{-jkx_1}} \quad (4.23)$$

$$H_R = \frac{P_R(x_2)}{P_R(x_1)} = \frac{\hat{P}_r e^{jkx_2}}{\hat{P}_r e^{jkx_1}} \quad (4.24)$$

Las ecuaciones (4.22), (4.23) y (4.24), se sustituyen en la ecuación (4.20) para tener que:

$$\begin{aligned} \left| \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} \right| &= \left| \frac{\frac{\hat{P}_l e^{-jkx_2} + \hat{P}_r e^{jkx_2}}{\hat{P}_l e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1}} - \frac{\hat{P}_l e^{-jkx_2}}{\hat{P}_l e^{-jkx_1}}}{\frac{\hat{P}_r e^{jkx_2}}{\hat{P}_r e^{jkx_1}} - \frac{\hat{P}_l e^{-jkx_2} + \hat{P}_r e^{jkx_2}}{\hat{P}_l e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1}}} \right| \\ &= \left| \frac{\frac{\hat{P}_r e^{jkx_2} \hat{P}_l e^{-jkx_1} - \hat{P}_r e^{jkx_1} \hat{P}_l e^{-jkx_2}}{(\hat{P}_l e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1}) \hat{P}_l e^{jkx_1}}}{\frac{\hat{P}_r e^{jkx_2} \hat{P}_l e^{-jkx_1} - \hat{P}_r e^{jkx_1} \hat{P}_l e^{-jkx_2}}{\hat{P}_r e^{-jkx_1} (\hat{P}_l e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1})}} \right| \\ &= \left| \frac{(\hat{P}_r e^{jkx_2} \hat{P}_l e^{-jkx_1} - \hat{P}_r e^{jkx_1} \hat{P}_l e^{-jkx_2}) \hat{P}_r e^{-jkx_1} (\hat{P}_l e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1})}{(\hat{P}_r e^{jkx_2} \hat{P}_l e^{-jkx_1} - \hat{P}_r e^{jkx_1} \hat{P}_l e^{-jkx_2}) (\hat{P}_l e^{-jkx_1} + \hat{P}_r e^{jkx_1}) \hat{P}_l e^{jkx_1}} \right| \\ &= \left| \frac{\hat{P}_r e^{-jkx_1}}{\hat{P}_l e^{jkx_1}} \right| = \left| \frac{\hat{P}_r}{\hat{P}_l} e^{-2jkx_1} \right| = |R| \end{aligned}$$

Implementando la ecuación (4.20) se determina el coeficiente de reflexión, no obstante, se debe tener una compensación de desfaseamiento, debido a que se toma como referencia la posición del micrófono 1. Retomando la Figura 4.9, la compensación se dice que es $2x_1$, debido a que la onda viaja desde la posición del primer micrófono, x_1 , y se propaga hasta impactar el material de prueba, una vez que impacto se genera una onda reflejada, la cual se propaga desde la superficie de material hasta la posición del primer micrófono. Es por ello que, el coeficiente de reflexión se describe como la ecuación (4.25).

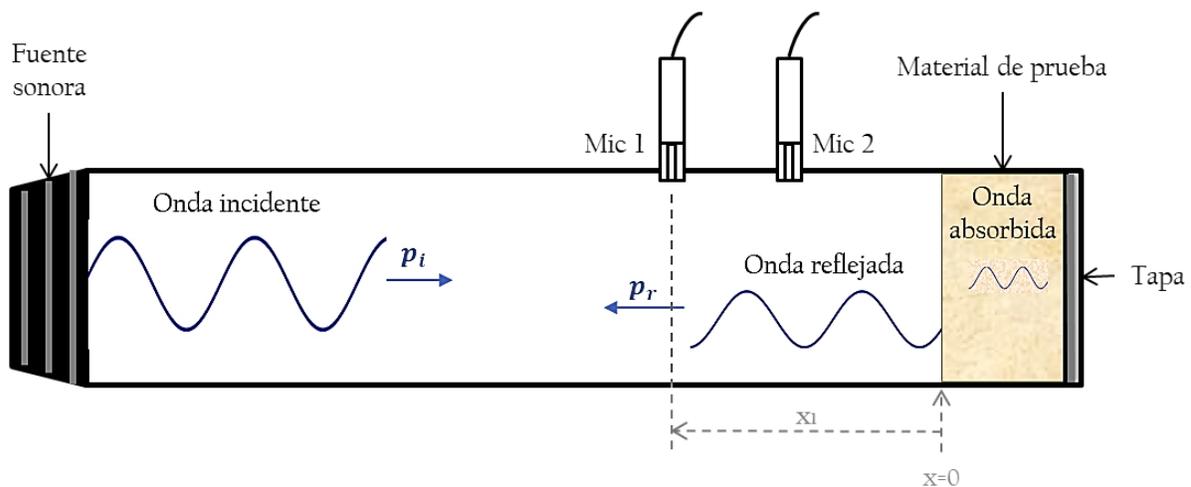


Figura 4.9. Diagrama esquemático del tubo de impedancia corta de una cámara acústica.

$$|R| = \left| \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} (e^{2jkx_1}) \right| \quad (4.25)$$

Una vez calculado el coeficiente de reflexión se puede conocer el coeficiente de absorción del material de prueba a partir de la ecuación (4.14).

4.6 Coeficientes Acústicos (Reflexión, Absorción y Transmisión)

Para determinar los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión de un material de prueba, es necesario construir un tubo de impedancia corto con dos cámaras acústicas unidas a través de un portamuestras.

El propósito de utilizar un portamuestras es para sostener un material de prueba sin que sufra deformaciones y que al mismo tiempo permita el acople de las dos cámaras acústicas del tubo de impedancia corto, como se aprecia en la Figura 4.10

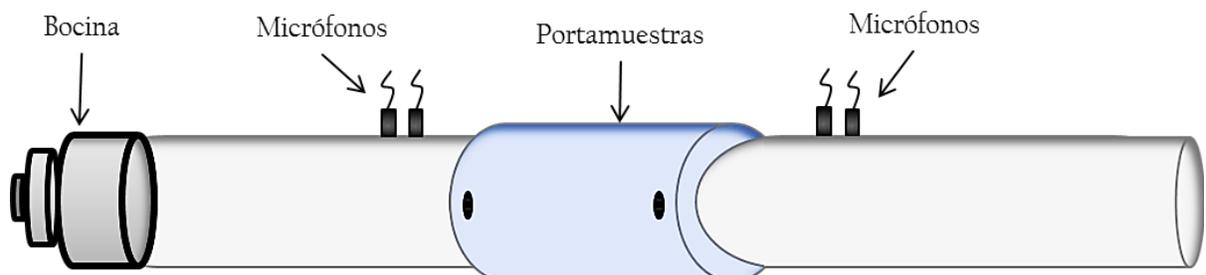
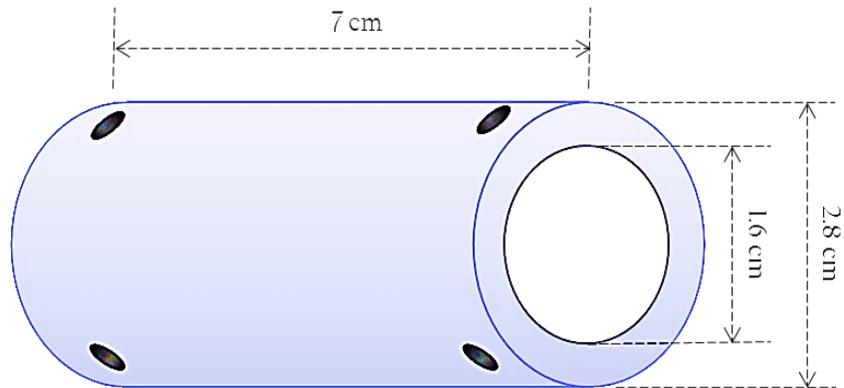


Figura 4.10. Diseño del portamuestras acoplado en el tubo de impedancia corto con dos cámaras acústicas.

Los parámetros para la construcción de las dos cámaras acústicas son los mismos que se definieron en la sección 4.1. Se utiliza el mismo tipo de tubo de Policloruro de Vinilo (PVC) comercial.

El portamuestras fue construido de un material altamente rígido y liso (Nylamid), con el propósito de mantener, en la medida posible una guía de onda con un diámetro interno uniforme. El portamuestras construido presenta un diámetro interno de 0.016 m y un diámetro externo de 0.028 m con una longitud de 0.07 m. Esta longitud permite la caracterización de materiales sólidos de hasta 0.035 m de espesor.



(a)



(b)

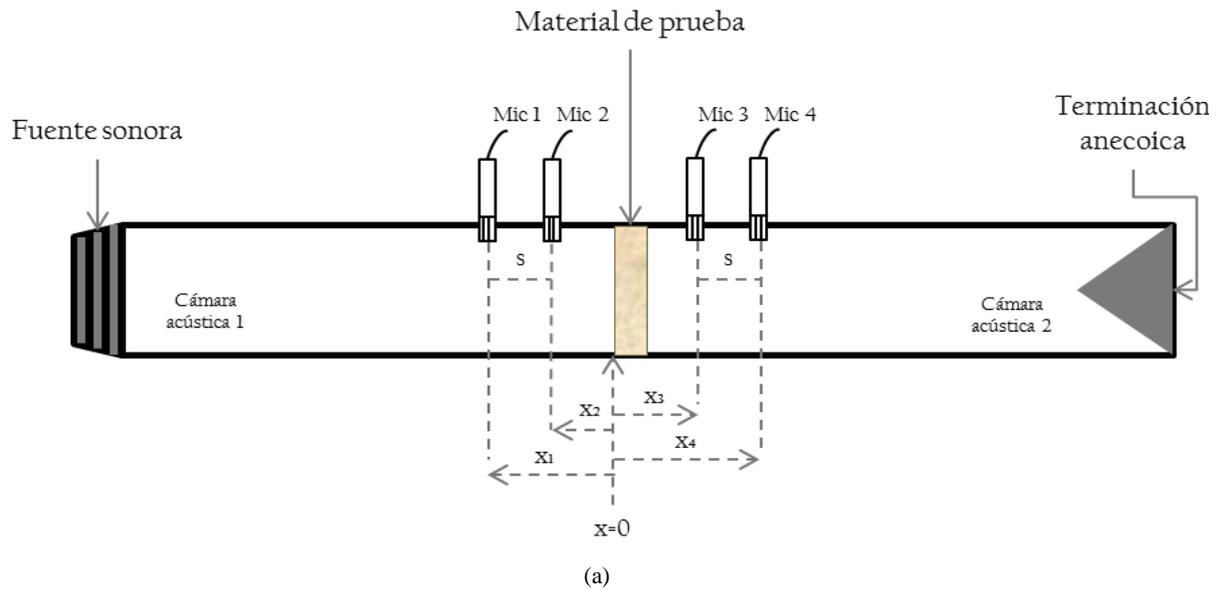
Figura 4.11. Diseño (a) y construcción (b) del portamuestras para el tubo de impedancia corto.

Cabe resaltar que el portamuestras debe estar bien acoplado por sus extremos a ambos tubos de PVC, con el fin de evitar fugas de sonido que alteren la medición, para ello se colocaron tres sujetadores (tornillos) en cada extremo.

Este arreglo cuenta con dos cámaras acústicas, y en cada una se colocan dos micrófonos.

El análisis para determinar la distancia que existe entre los micrófonos y el material de prueba es el mismo que se implementó para una cámara acústica con dos micrófonos en la

sección 4.1. El diseño y construcción de este tubo de impedancia corto se aprecia en la Figura 4.12, el cual presenta una terminación anecoica al final de la segunda cámara acústica, para absorber los rebotes de las ondas transmitidas y reflejadas.





(b)

Figura 4.12. Diseño (a) y construcción (b) del tubo de impedancia corto con dos cámaras acústicas, las cuales están acopladas por el portamuestras.

La Figura 4.13 muestra el montaje experimental del tubo de impedancia corto con dos cámaras acústicas.

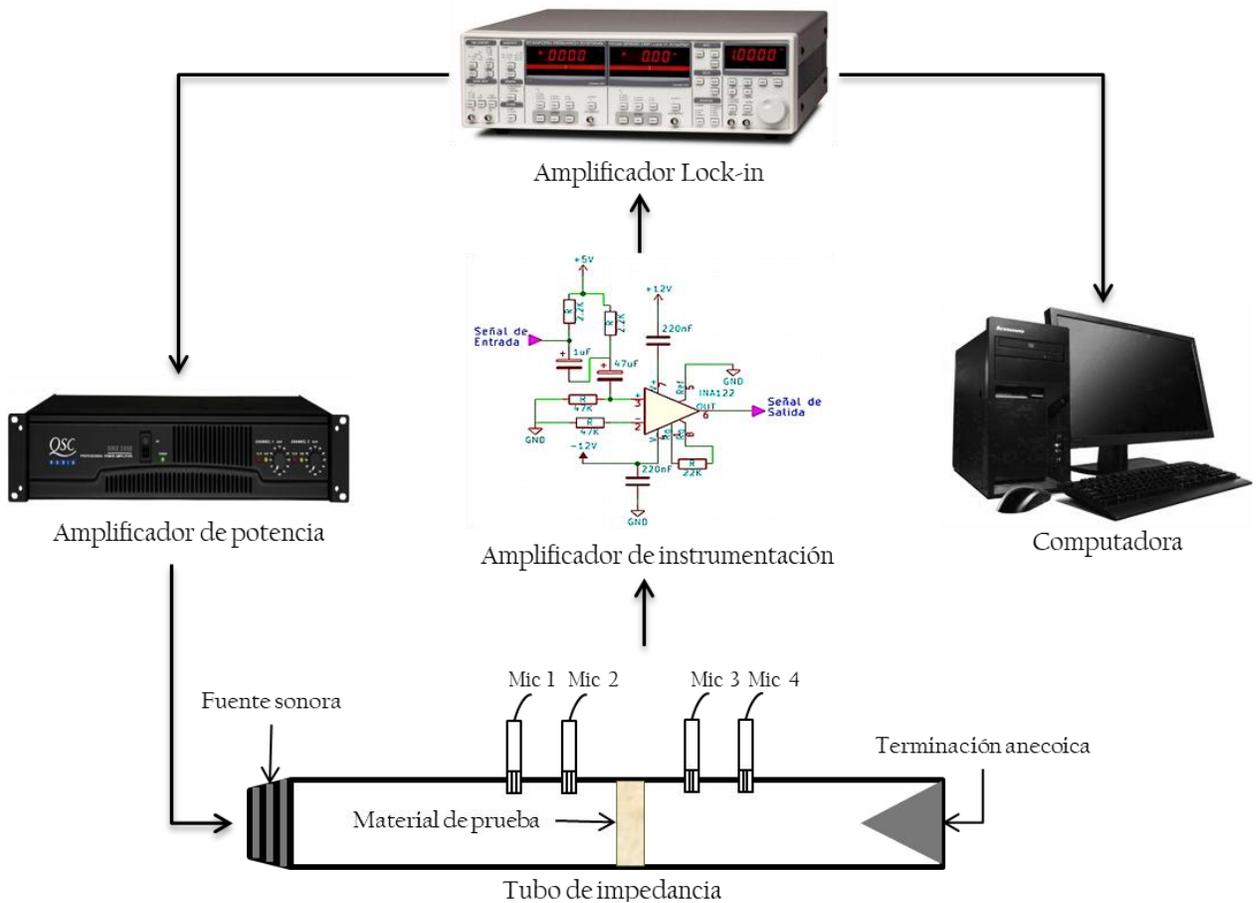


Figura 4.13. Montaje experimental del tubo de impedancia corto.

Para el registro de las señales acústicas y la obtención de la Función de Transferencia en ambas cámaras se implementó la metodología descrita en la sección 4.1 y 4.5, respectivamente.

El análisis para determinar el coeficiente de transmisión de un material de prueba se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$|T| = \left| \frac{H_{34} - H_1}{H_T + H_{34}} (e^{2jkx_4}) \right| \quad (4.26)$$

Donde H_I y H_T , son Funciones de Trasterencia para la señal incidente y transmitida del material de prueba, H_{34} es la Función de Transferencia de la superposición de las señales registradas en la segunda cámara acústica.

Una vez obtenidos el coeficiente de reflexión y transmisión se puede conocer el coeficiente de absorción [34].

$$\alpha = 1 - |R|^2 - |T|^2 \quad (4.27)$$

Un programa fue elaborado para procesar las señales acústicas registradas por los micrófonos y obtener los coeficientes de reflexión, transmisión y absorción de un material de prueba.

5 Resultados I: Tubo de impedancia corto

Este capítulo muestra los resultados obtenidos con el tubo de impedancia corto de una y dos cámaras acústicas. El coeficiente de absorción para una cámara acústica fue comparado con un tubo de impedancia normalizado, mientras que el coeficiente de absorción con el tubo de impedancia de dos cámaras acústicas fue comparado con los resultados reportados en la literatura para un material de referencia, Espuma de Poliuretano.

5.1 Tubo de impedancia corto con una cámara acústica

Después de llevar a cabo la implementación de la instrumentación descrita en la Figura 4.4, se procedió a realizar la primera medición, sin material de prueba, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.2, el cual considera un tubo de impedancia de una sola cámara acústica. Los parámetros de operación de los amplificadores de potencia y Lock-In, para el tubo de impedancia corto, se describen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Definición de los parámetros de operación.

INSTRUMENTOS	PARÁMETROS
Amplificador de potencia, NADY AUDIO XA-900	Ganancia: 3 dB
Amplificador Lock-In, SR-850	Sensitividad: 1 V Constante de tiempo: 300 ms Filtro dB: 24 Sample Rate: 8 Hz Scan Length: 100 s Sine Output: 132 ms Barrido interno: 10-8000 Hz Ref. Phase: 0.00 grados

La Figura 5.1 muestra las curvas de los coeficientes de reflexión y absorción, abarcando un ancho de banda desde los 600 Hz hasta los 8 kHz. La primera gráfica en la parte superior,

representa el coeficiente de reflexión determinado con la ecuación (4.25). La forma de la curva muestra que la respuesta en magnitud, en función de la frecuencia, es relativamente alta debido a que no existe material al final de la cámara acústica que absorba el sonido. Sin embargo, existe una disminución de amplitud en la frecuencia de 2 kHz y 7.6 kHz. Este comportamiento probablemente se deba a un efecto de resonancia debido al mismo sistema y por la ganancia establecida en el amplificador de potencia. La segunda gráfica en la parte inferior, representa el coeficiente de absorción determinado por la ecuación (4.14).

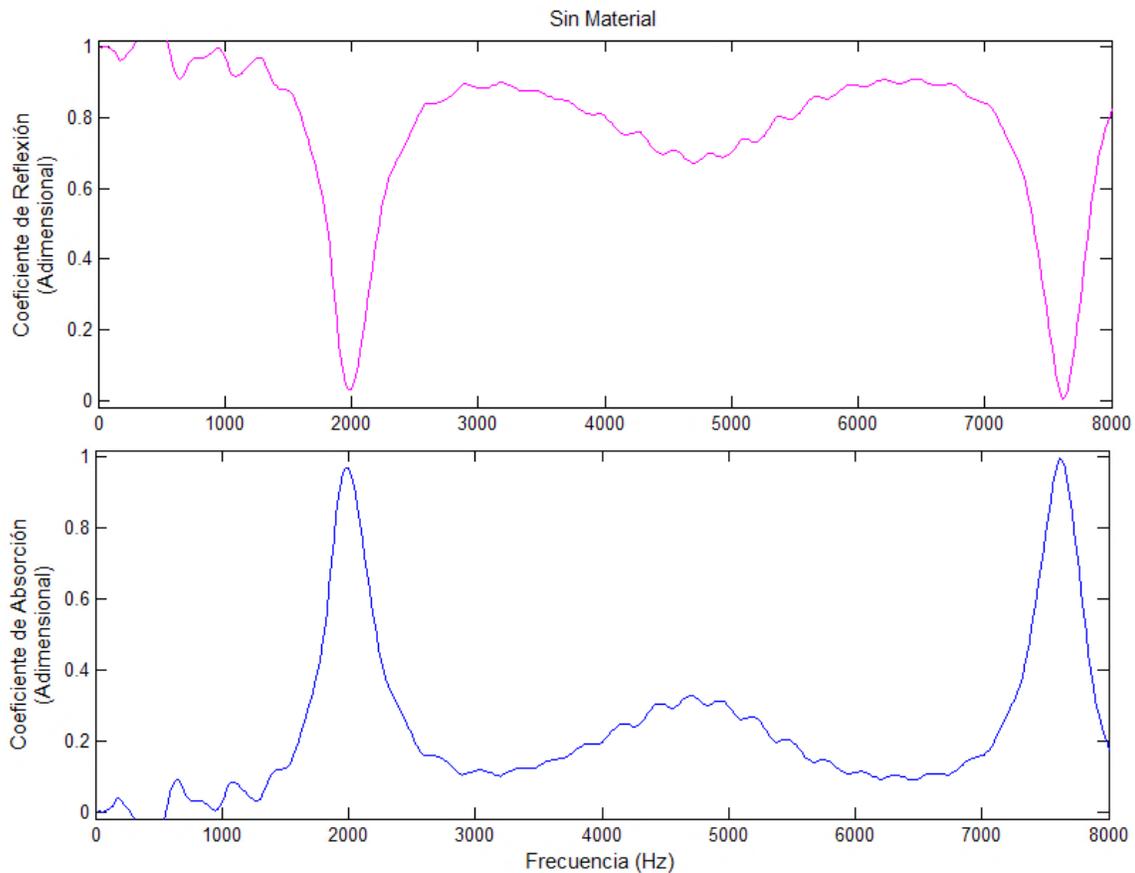


Figura 5.1. Curvas de los coeficientes del tubo de impedancia sin material.

Se realizó la primera medición con un material de prueba, que corresponde a la Espuma de Poliuretano, con espesor de 0.015 m, Figura 5.2.



Figura 5.2 Espuma de Poliuretano con 0.015 m de espesor.

Las respuestas en magnitud de los coeficientes de reflexión y absorción de este material de prueba, se visualizan en la Figura 5.3. La curva del coeficiente de reflexión muestra una disminución de magnitud para las frecuencias altas, es decir, el material refleja con mayor intensidad el sonido a bajas frecuencias. El recíproco de este comportamiento se aprecia en la curva del coeficiente de absorción, donde este coeficiente incrementa en función de la frecuencia.

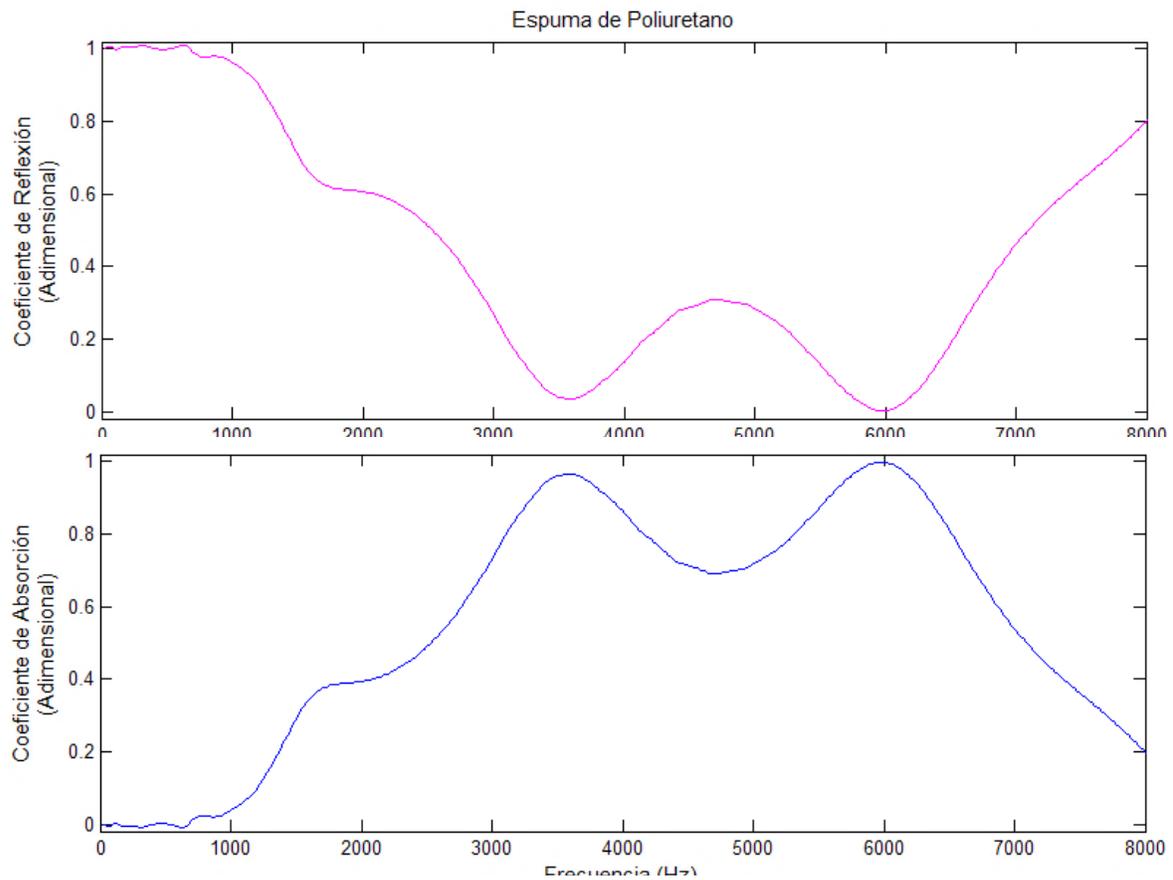


Figura 5.3. Curvas de los coeficientes acústicos de la Espuma de Poliuretano (0.015 m de espesor).

Esta primera fase permitió involucrarse con la instrumentación y operación del equipo para el registro de las señales y establecer el factor de ganancia en el amplificador de potencia y de instrumentación para evitar saturación en el registro de las señales.

Para tener un parámetro de referencia de los resultados obtenidos con este primer prototipo experimental, se consideró un tubo de impedancia diseñado y construido en el Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico (LADAC), de la División de Ciencias y Artes para el Diseño, de la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, el cual además cuenta con una cámara semianecoica.

Dicho tubo de impedancia normalizado presenta una longitud de 0.9 m, 0.0381 m de diámetro interno y una distancia de separación entre los micrófonos de 0.026 m, como se aprecia en la Figura 5.4.

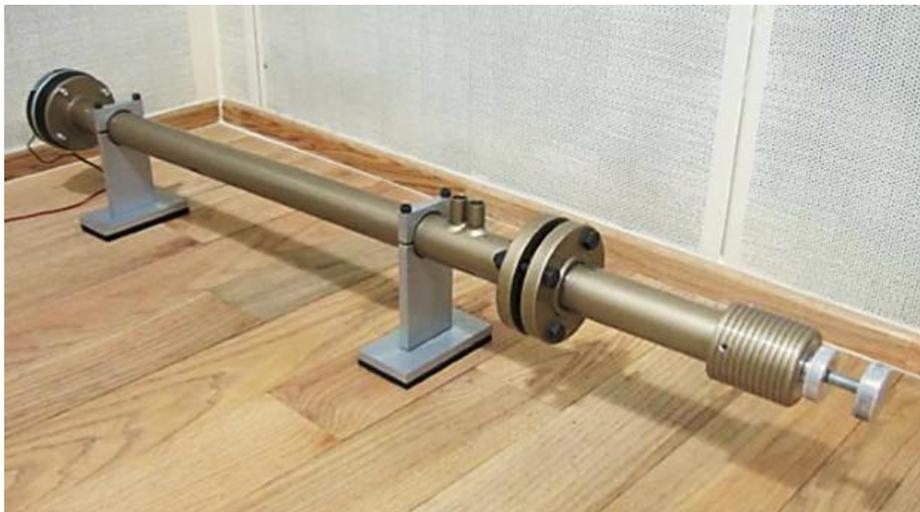


Figura 5.4. Tubo de impedancia normalizado [3].

Los resultados reportados del coeficiente de absorción para la Espuma de Poliuretano con espesor de 0.015 m se aprecian en la Figura 5.5, donde se observa la respuesta en magnitud del coeficiente de absorción incrementa en función de la frecuencia [3].

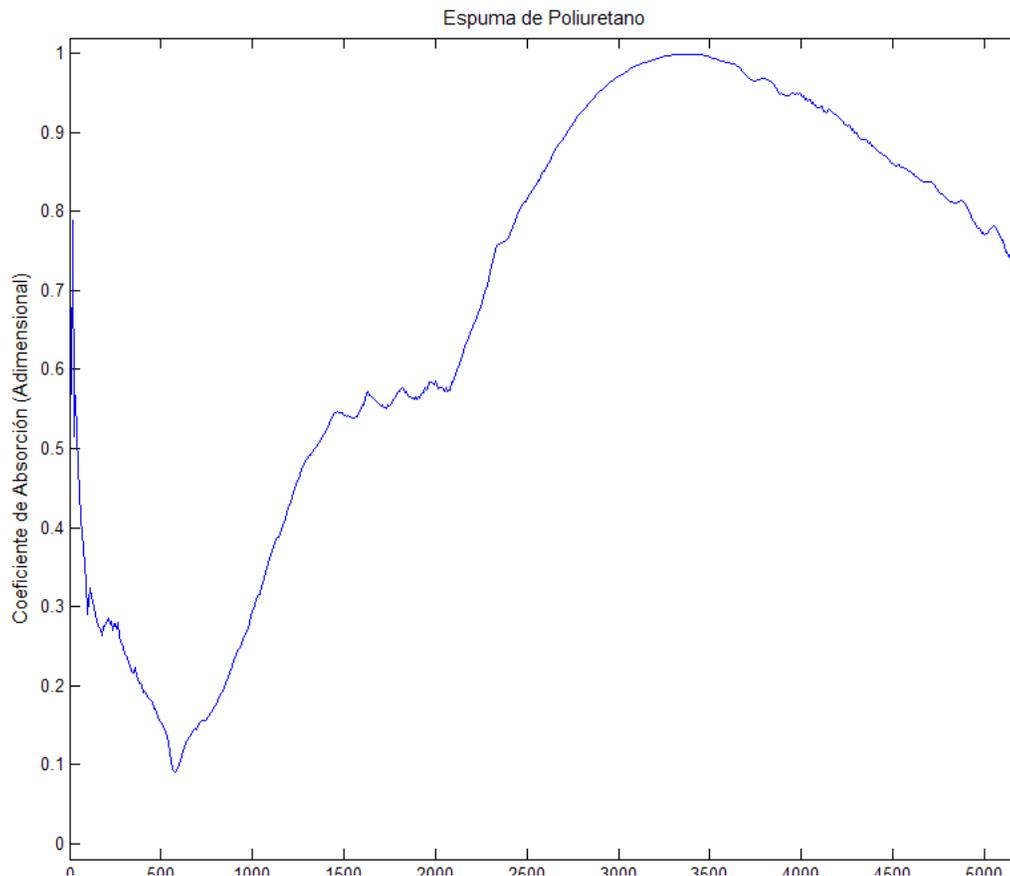


Figura 5.5. Curva de absorción de la Espuma de Poliuretano con el tubo de impedancia normalizado [3].

Cabe resaltar que el diseño y la instrumentación utilizados en el tubo de impedancia normalizado cubre un rango de frecuencias desde los 50 Hz hasta los 5 kHz, además de que se utilizan materiales de prueba con mayor diámetro.

Para llevar a cabo una comparación con el tubo de impedancia normalizado del laboratorio LADAC, se procedió a caracterizar la Espuma de Poliuretano con el prototipo experimental propuesto en este trabajo de investigación instalado en la cámara semianecoica.

La Figura 5.6 muestra los resultados obtenidos con ambos tubos de impedancia, los cuales se caracterizan por tener una cámara acústica. Las curvas presentan un comportamiento similar en el dominio de la frecuencia y las diferencias se deben principalmente al tipo de instrumentación implementada en cada tubo de impedancia.

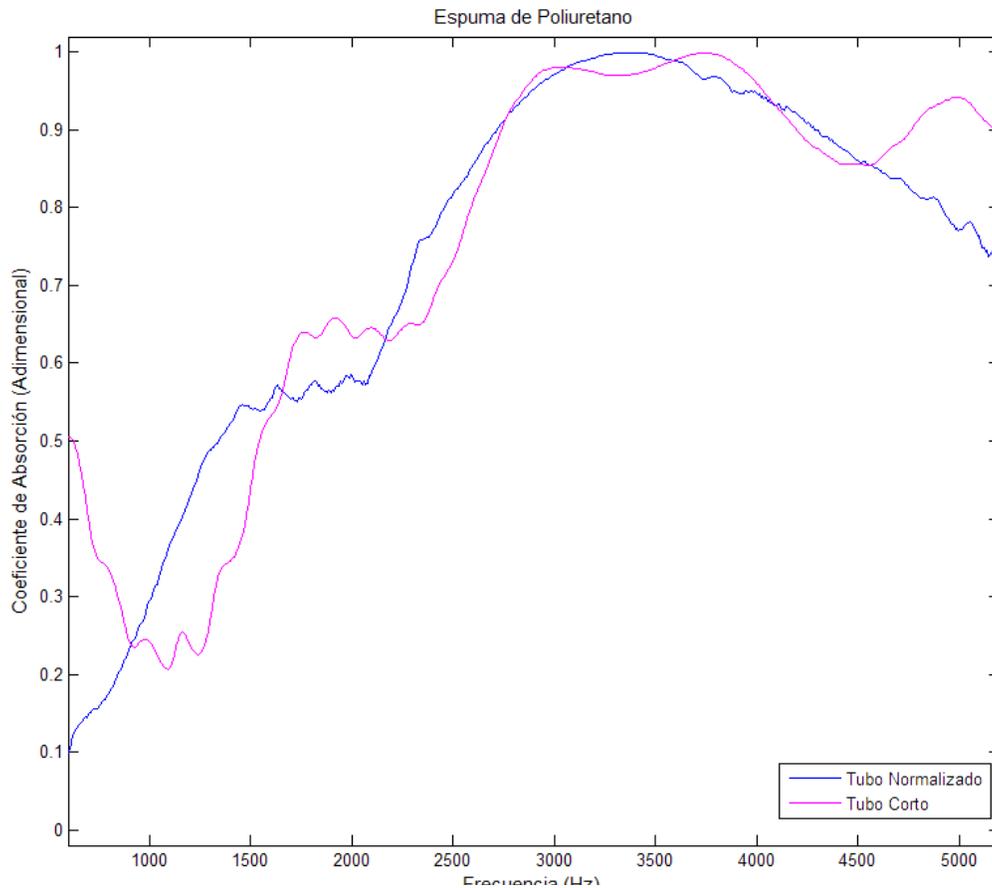


Figura 5.6. Curvas del coeficiente de absorción de la Espuma de Poliuretano, obtenidas con los tubos de impedancia: normalizado y corto.

Cabe resaltar que el coeficiente de absorción obtenido en ambos tubos depende únicamente del coeficiente de reflexión, debido al extremo cerrado del tubo donde se coloca el material de prueba.

5.2 Tubo de impedancia corto con dos cámaras acústicas

Con la finalidad de contar con un prototipo experimental que determine los tres coeficientes acústicos de un material de prueba sólido, se consideró añadir una segunda cámara acústica como la descrita en la sección 4.6.

La puesta en marcha de un tubo de impedancia corto, con dos cámaras acústicas y cuatro micrófonos, se basó en la metodología descrita en la sección 4.6, después de la elección adecuada de los parámetros en la instrumentación y equipo, se realizó un barrido de frecuencia desde los 600 Hz hasta los 8 kHz.

El material de prueba fue colocado a la mitad del portamuestras de manera vertical, conformando un tipo de pared entre las dos cámaras acústicas, este procedimiento se lleva a cabo, de manera cuidadosa, procurando evitar la deformación del material, como se aprecia en la Figura 5.7.

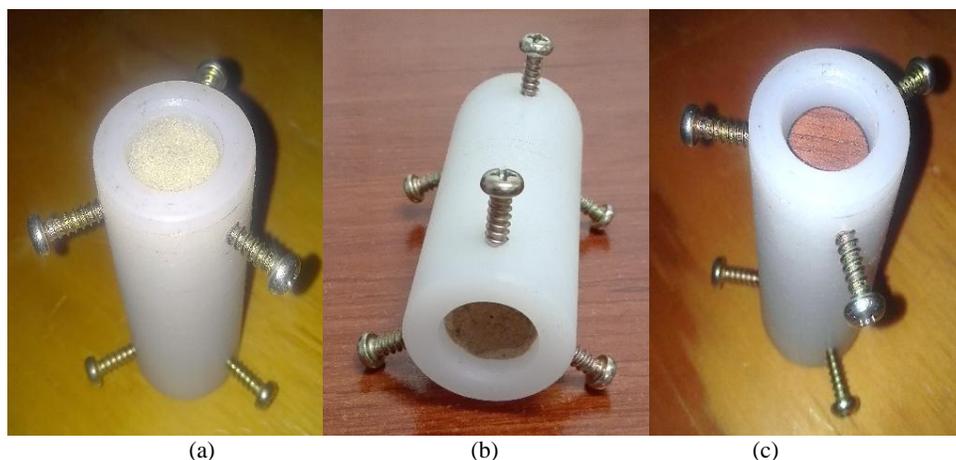


Figura 5.7. Acoplamiento del material de prueba: Espuma de Poliuretano (a), Cartón Comprimido (b), Madera Balsa (c) en el portamuestras.

Las muestras fueron cortadas con una máquina de láser, Universal Laser System (PLS6.150D), para garantizar la uniformidad de las dimensiones de las muestras con respecto al diámetro interno del portamuestras, dichas muestras fueron: Espuma de Poliuretano, Cartón Comprimido, Madera Balsa y Acrílico.

El primer material de prueba fue la Espuma de Poliuretano. Este material se tomó como referencia, a partir de que se conocen sus coeficientes de absorción [35]. Se realizaron dos pruebas con dicho material, la primera fue con una muestra que presenta un espesor de 0.015 m y la segunda con 0.035 m de espesor.

La Figura 5.8 muestra los coeficientes de reflexión y transmisión, en función de la frecuencia, para la Espuma de Poliuretano. Los coeficientes fueron determinados implementando la metodología descrita en la sección 4.6 y las ecuaciones (4.25) y (4.26), respectivamente. La magnitud del coeficiente de reflexión en función de la frecuencia es mayor para las bajas frecuencias que para las altas. Sin embargo, se incrementa muy ligeramente en un intervalo de frecuencia alrededor de los 5 kHz. Por otro lado, la magnitud del coeficiente de transmisión, presenta una magnitud pequeña y uniforme a lo largo de todo el ancho de banda, lo cual indica que el sonido que pasa a la segunda cámara es de magnitud muy pequeña. Conociendo que es un material poroso y a partir del comportamiento de los coeficientes acústicos, se puede inferir que es un material absorbente.

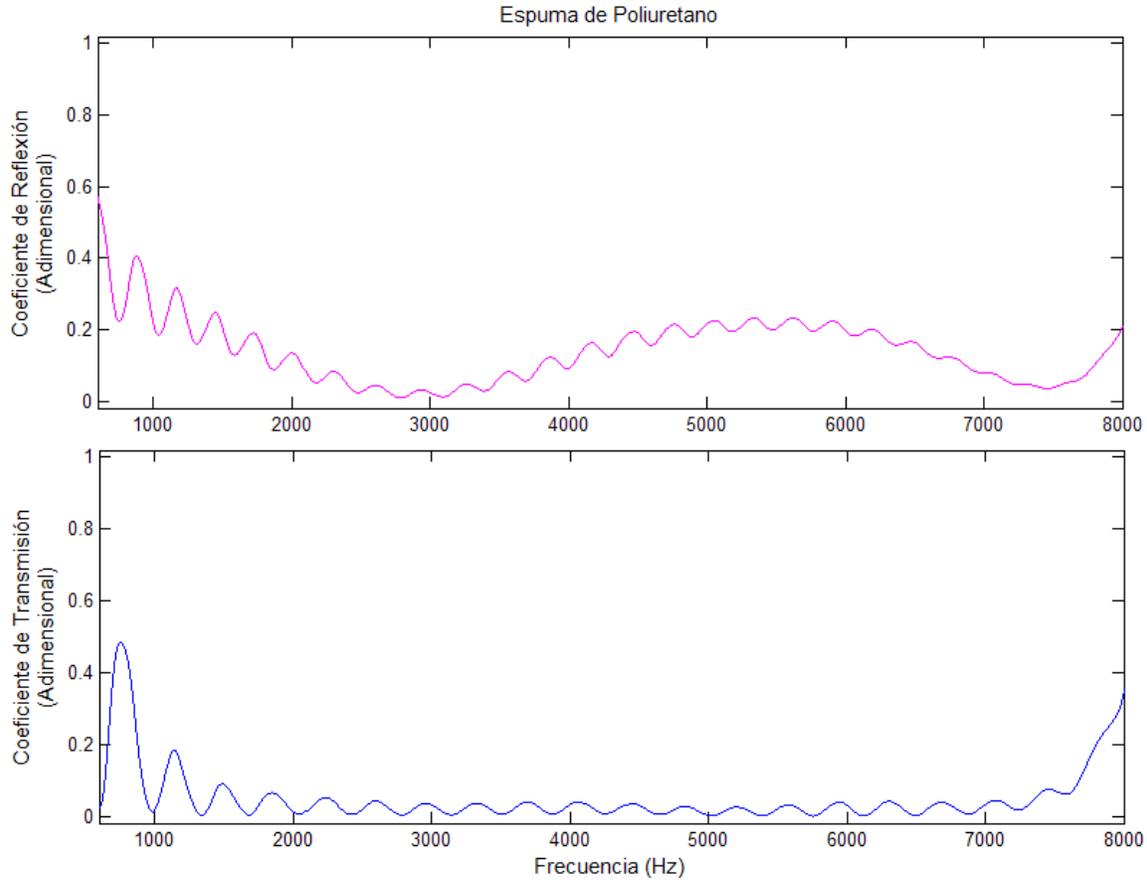


Figura 5.8. Coeficiente de Reflexión y Transmisión de la Espuma de Poliuretano con un espesor de 0.015 m.

Ambas respuestas en frecuencia, reflexión y transmisión, son utilizadas para determinar el coeficiente de absorción en el dominio de la frecuencia, ecuación (4.27). La Figura 5.9 muestra la respuesta en magnitud de la Espuma de Poliuretano, la cual fue comparada con los valores reportados en la literatura [35]. Estos valores de referencia corresponden a frecuencias específicas y son superpuestos en la Figura 5.9, utilizando un asterisco de color azul (*) como marcador, para comparar con los obtenidos en el proceso experimental.

Contrastando los resultados obtenidos en el experimento y los tres valores dados por la literatura, se observa una aproximación adecuada.

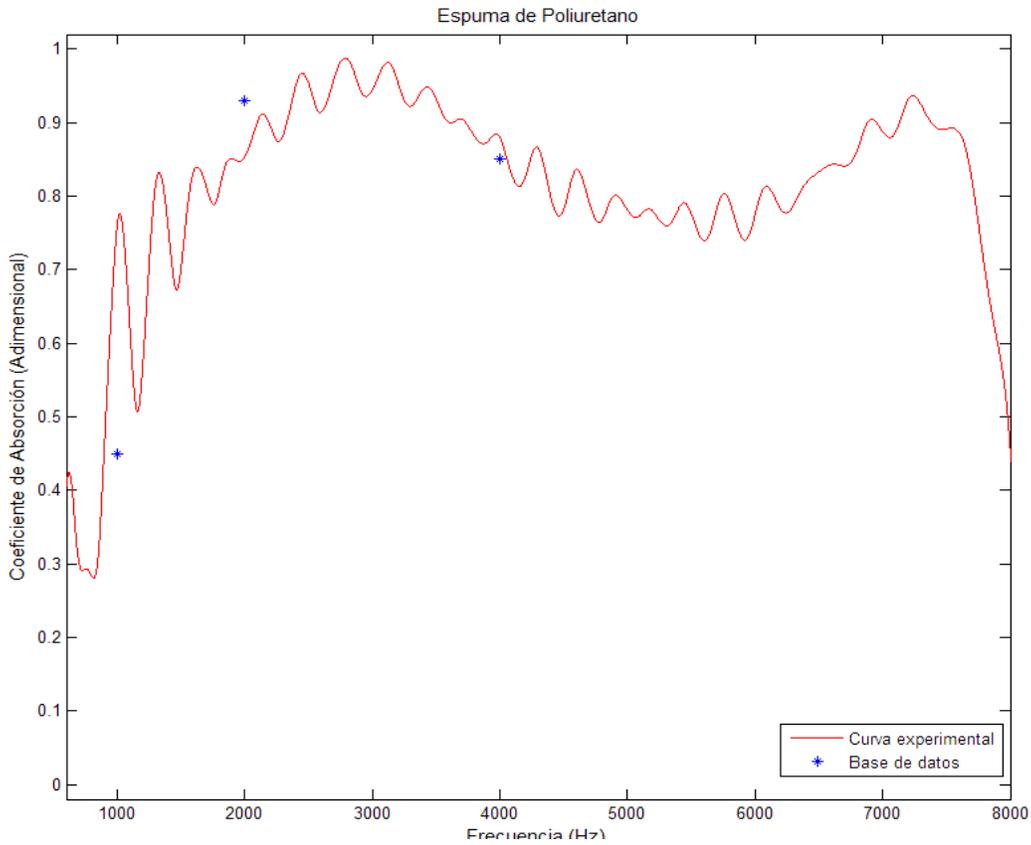


Figura 5.9. Comparación del coeficiente de absorción obtenida por la Función de Transferencia y de tres valores obtenidos de una base de datos para 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz [34].

Se realizó una segunda prueba con el mismo material, pero con diferente espesor, 0.035 m. Al igual que la primera prueba se obtuvieron primero los coeficientes de reflexión y transmisión, los cuales están en la Figura 5.10. En la curva del coeficiente de reflexión se aprecia un comportamiento más uniforme y menos oscilante en comparación al espesor de 0.015 m (Figura 5.8). El coeficiente de transmisión presenta un comportamiento muy similar al material de espesor de 0.015 m.

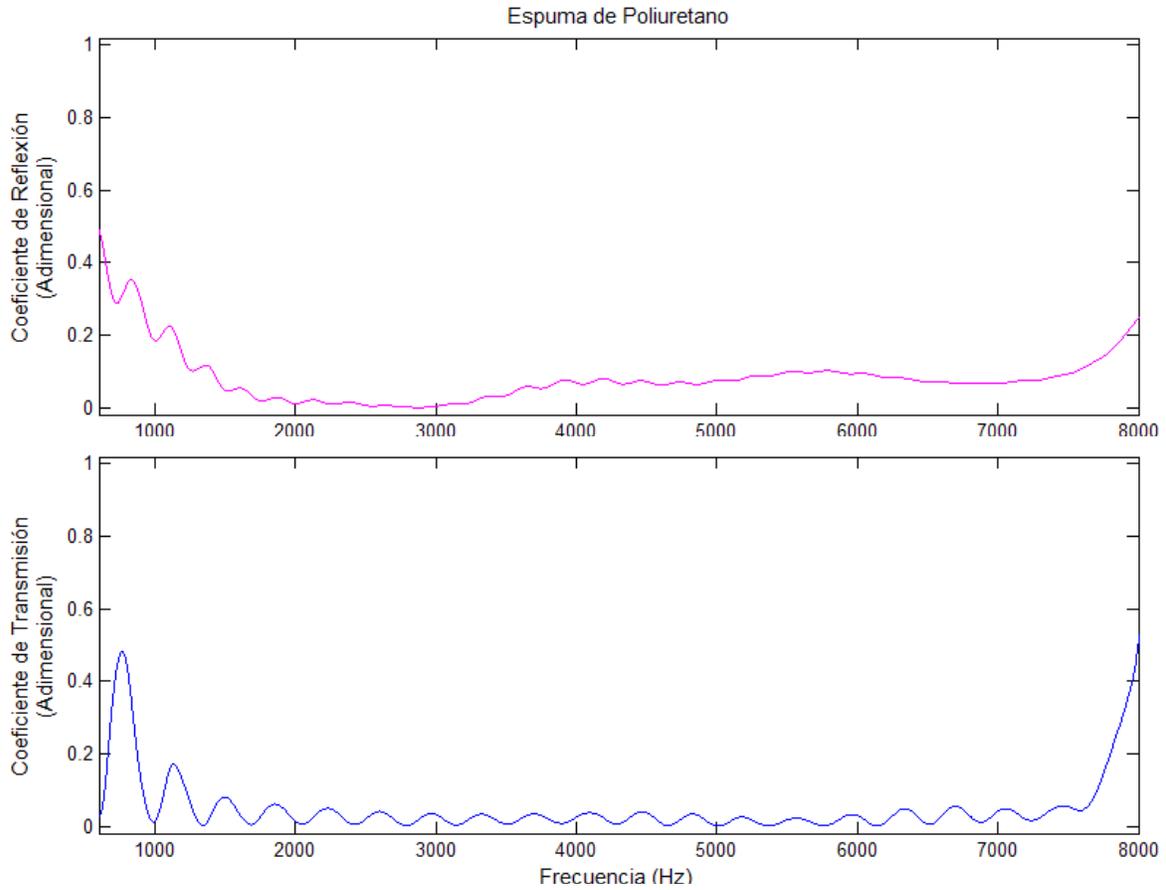


Figura 5.10. Coeficiente de Reflexión y Transmisión de la Espuma de Poliuretano con un espesor de 0.035 m.

La Figura 5.11 representa el coeficiente de absorción obtenida a partir de los coeficientes de reflexión y absorción del material de prueba. Al igual que en el caso anterior se sobreponen los valores reportados en la literatura, los cuales se identifican con un asterisco de color azul (*) [35].

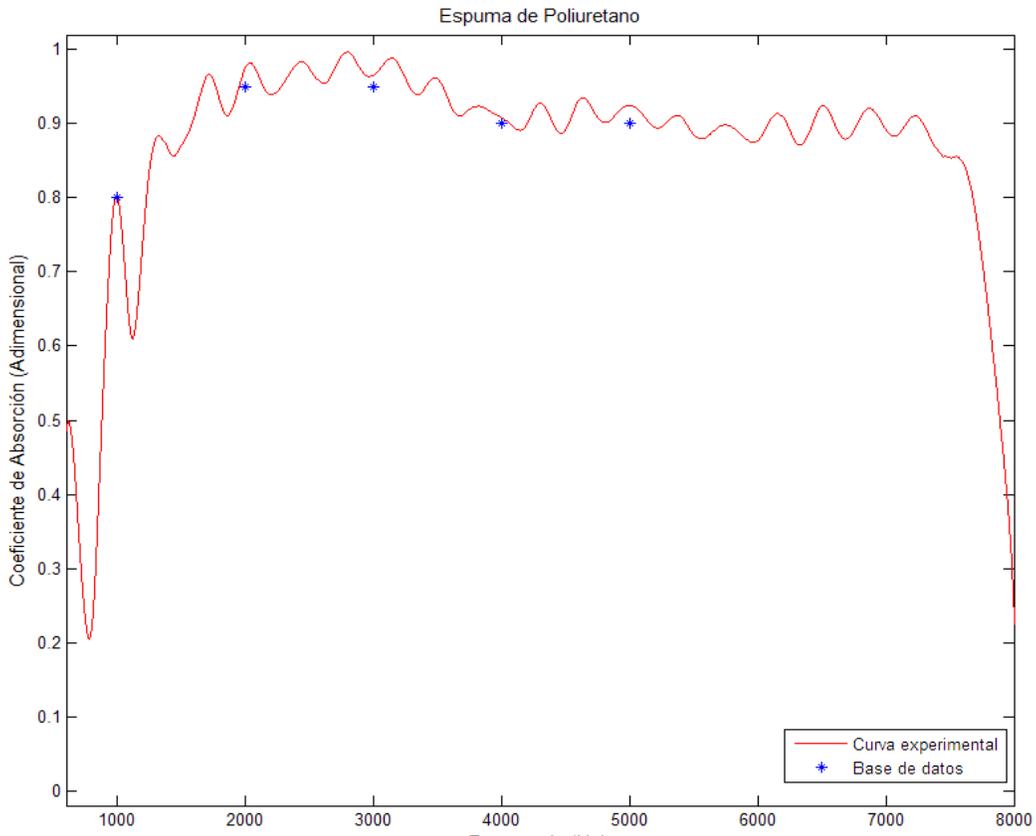


Figura 5.11. Comparación de la curva de coeficiente de absorción obtenida por la Función de Transferencia y tres valores calculados para 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz y 5 kHz, según la base de datos [34].

Puesto que, el contraste de la curva obtenida experimentalmente y los valores ya reportados son muy similares, se procedió a realizar la caracterización acústica para otros materiales de prueba: Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa, con espesores de 0.003 m, 0.003 m y 0.004 m, respectivamente.



Figura 5.12. Foto de los materiales que se emplearon: Cartón Comprimido, Madera Balsa y Acrílico.

El acrílico siendo un material sumamente rígido, se espera que sea un material totalmente reflejante, es decir, que sus coeficientes de absorción y de transmisión sean casi nulos. La Figura 5.13 muestra las curvas de los tres coeficientes acústicos, en la cual se observa que la curva de reflexión presenta una magnitud por arriba del valor de 0.5. Por otra parte, su curva de transmisión presenta una magnitud casi nula, mientras que el coeficiente de absorción es muy bajo.

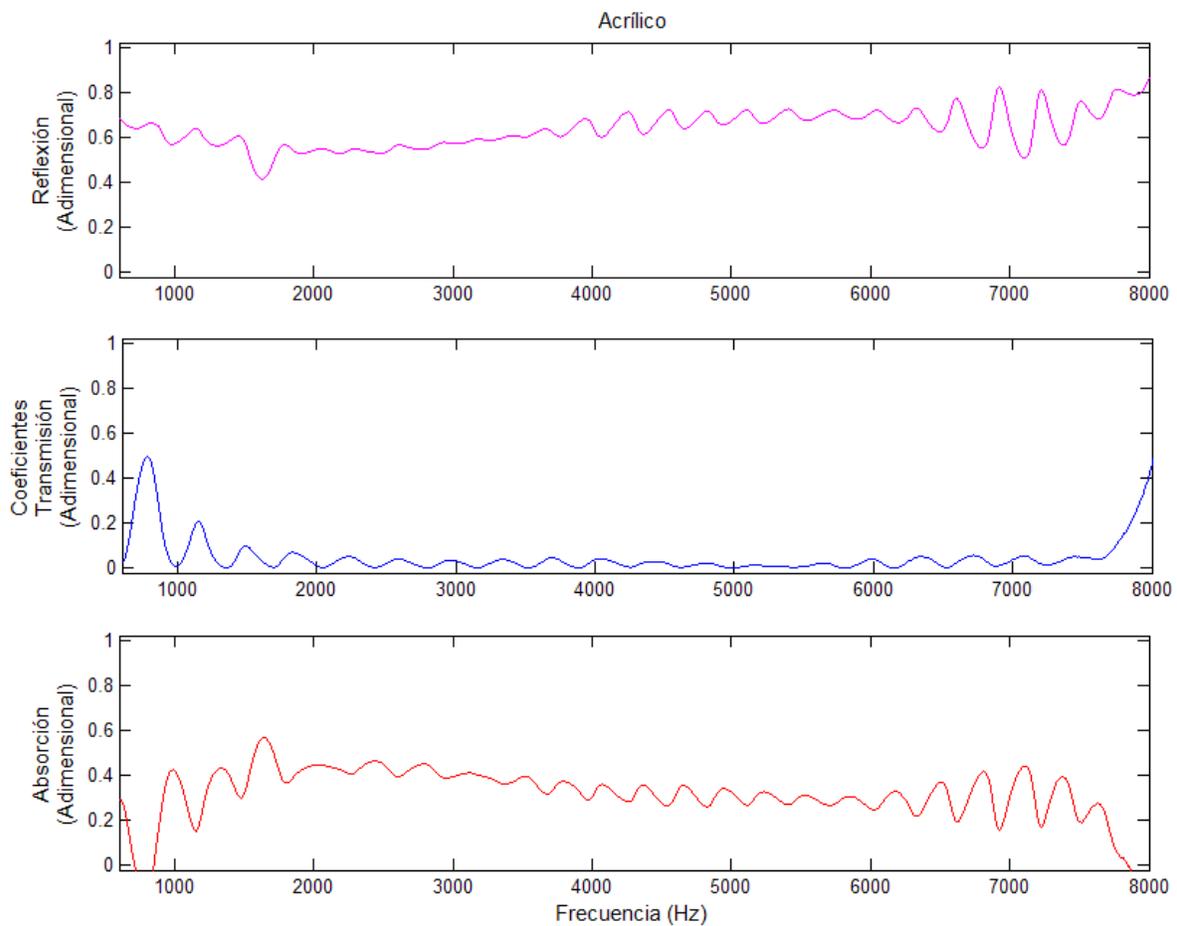


Figura 5.13. Curvas de los coeficientes acústicos del Acrílico con espesor de 0.003 m.

Teniendo al Cartón Comprimido como material de prueba, lo que se espera obtener es poca reflexión de sonido, alta absorción y nula transmisión, puesto que, se trata de un material no tan rígido como el acrílico, pero con poca porosidad. A pesar de que se considera como

material rígido, al observar los coeficientes acústicos exhibidos en la Figura 5.14, se aprecia que el coeficiente de transmisión es casi nulo, no obstante, cuando el sonido impacta el material, la mayor parte del sonido se refleja, esto se observa en el coeficiente de reflexión. Mientras que el coeficiente de absorción es mediano.

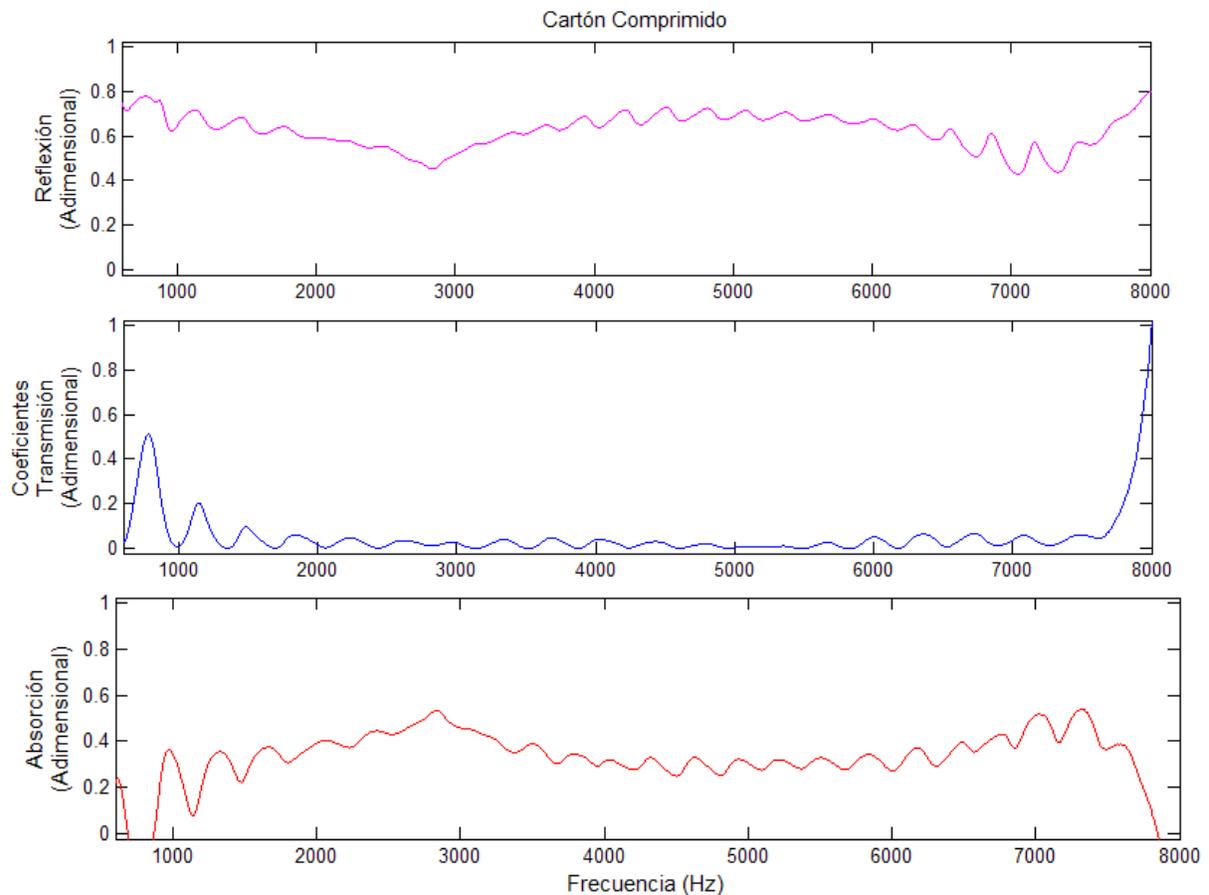


Figura 5.14. Curvas de los coeficientes acústicos del Cartón comprimido con espesor de 0.003 m.

La Madera balsa es un material rígido, presenta muy baja elasticidad según su dirección de deformación, este material es un excelente absorbente de humedad, por ello se espera que este material no transmita sonido y que absorba la mayor parte del ruido. La Figura 5.15 muestra sus coeficientes acústicos, aquí se observa que el coeficiente de transmisión es casi nulo como se había previsto, pero el coeficiente de reflexión describe que la mayor parte

del sonido es reflejado mientras que la otra parte es absorbida, sucede lo contrario a lo que se esperaba. No obstante, este material presenta un comportamiento similar al Cartón Comprimido, ya que son materiales reflejantes.

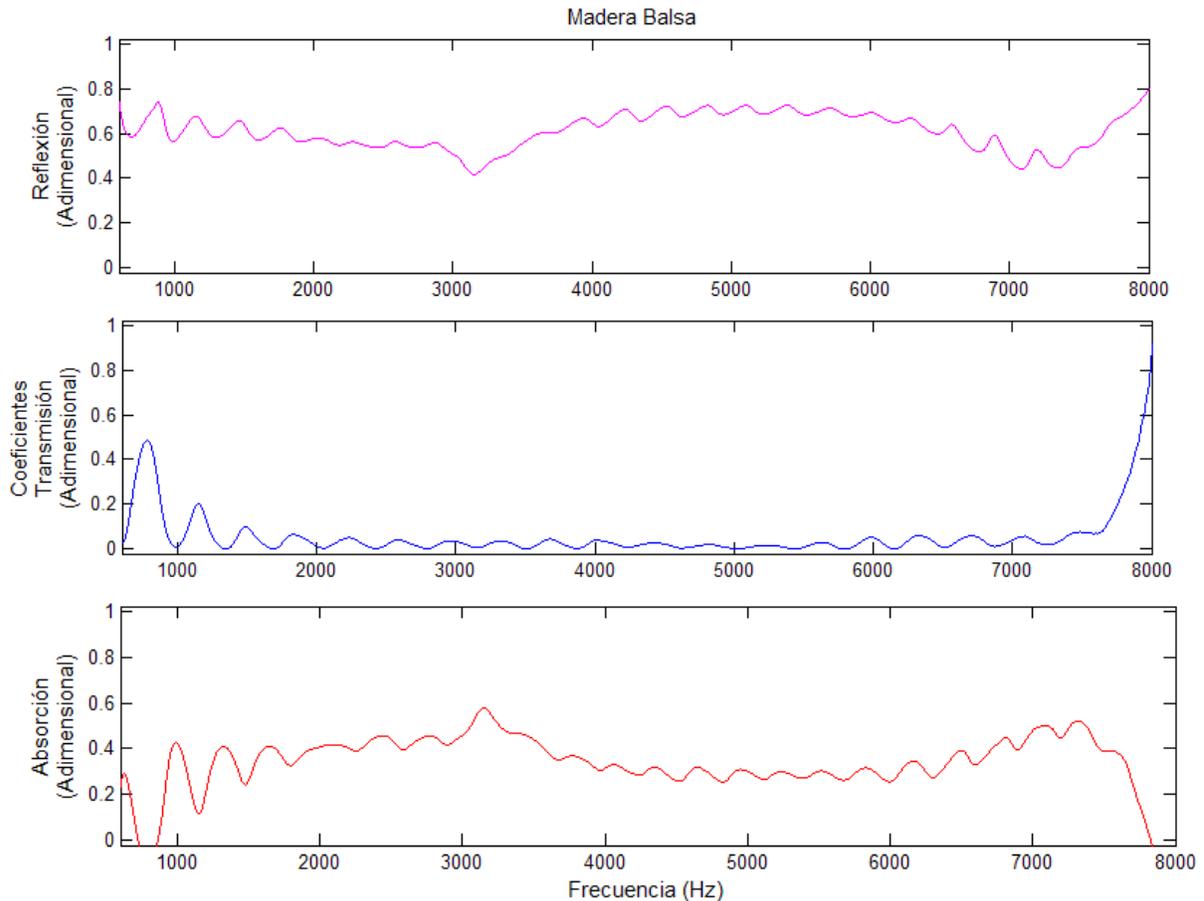


Figura 5.15. Curvas de los coeficientes acústicos de la Madera Balsa con espesor de 0.004 m.

La metodología implementada en esta parte del proyecto permite determinar las propiedades acústicas de los materiales sólidos, extendiendo la metodología en otra cámara. Es importante mencionar que es necesario tener condiciones apropiadas para eliminar factores de ruido externo, así como establecer una ganancia adecuada en la bocina para evitar saturación y efectos resonantes.

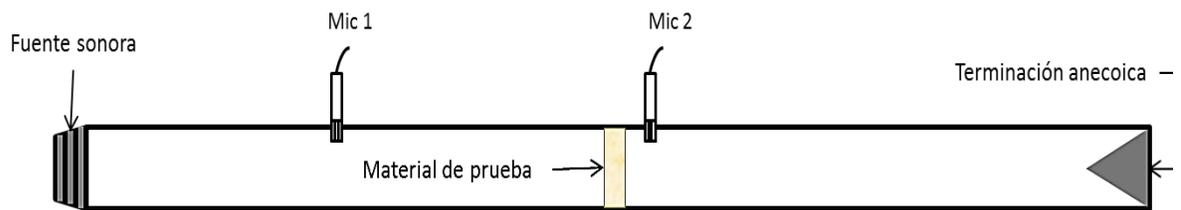
6 Metodología II: Tubo de impedancia largo

Este capítulo describe la metodología y la instrumentación implementada para un tubo de impedancia largo con dos cámaras acústicas, el cual tiene por objetivo evitar el traslape de las ondas acústicas generadas en el experimento. La metodología implementada permite obtener la respuesta en magnitud de los coeficientes acústicos a partir del procesamiento y análisis en el dominio del tiempo, considerando ondas acústicas de cierta frecuencia y moduladas en amplitud, las cuales son utilizadas para llevar a cabo un análisis en el estado estacionario.

6.1 Definición de parámetros físicos del tubo de impedancia largo

En esta sección se plantea el diseño y la construcción de un tubo de impedancia relativamente largo, con el propósito de obtener el coeficiente de reflexión a una frecuencia específica, evitando la superposición de la señal acústica generada por la bocina. Para ello, se hace uso de una señal de amplitud modulada y frecuencia específica, la cual se describe más adelante.

Al igual que en el primer prototipo, se utilizó un tubo de PVC comercial, con un diámetro interno de 0.0127 m, un diámetro externo de 0.016 m y una longitud de 8.0 m para diseñar y construir el prototipo experimental, como se muestra en la Figura 6.1.



a)



b)

Figura 6.1. Diseño (a) y construcción (b) del tubo de impedancia largo.

El diseño de este prototipo presenta dos cámaras acústicas, unidas a través de un portamuestras y una terminación cerrada anecoica. A diferencia del tubo de impedancia corto de dos cámaras acústicas, este cuenta con un solo micrófono en cada cámara. El primer micrófono se colocó a la mitad de distancia entre la bocina y el material de prueba, 4 metros. La finalidad del tubo largo consiste en que el micrófono, colocado en la primera cámara acústica, registre la onda acústica incidente antes de que la onda acústica reflejada

se genere. El segundo micrófono es colocado enseguida del material de prueba para registrar la onda transmitida.

Para determinar los coeficientes acústicos se utilizó una señal acústica con una frecuencia en específico y amplitud modulada, la cual será referida a lo largo del capítulo como onda acústica Gaussiana- Sinusoidal, Figura 6.2.

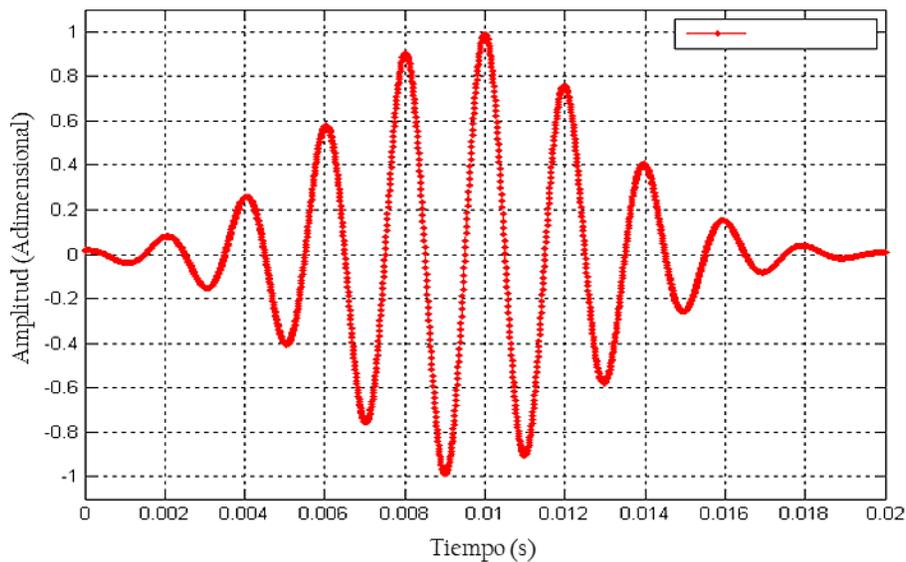


Figura 6.2. Representación gráfica de una onda acústica Gaussiana-Sinusoidal a 500 Hz.

La forma de onda acústica inicia con amplitudes bajas alcanzando una amplitud máxima unitaria y termina con amplitudes bajas. La modulación en amplitud elimina los efectos transitorios en la bocina, los cuales generan frecuencias no deseadas. Se cuenta con un programa que genera una base de datos, con la forma de la onda Gaussiana- Sinusoidal a diferentes frecuencias específicas para cubrir un ancho de banda desde los 600 Hz hasta los 8 kHz.

El diagrama esquemático del montaje experimental para el tubo de impedancia largo se muestra en la Figura 6.3.

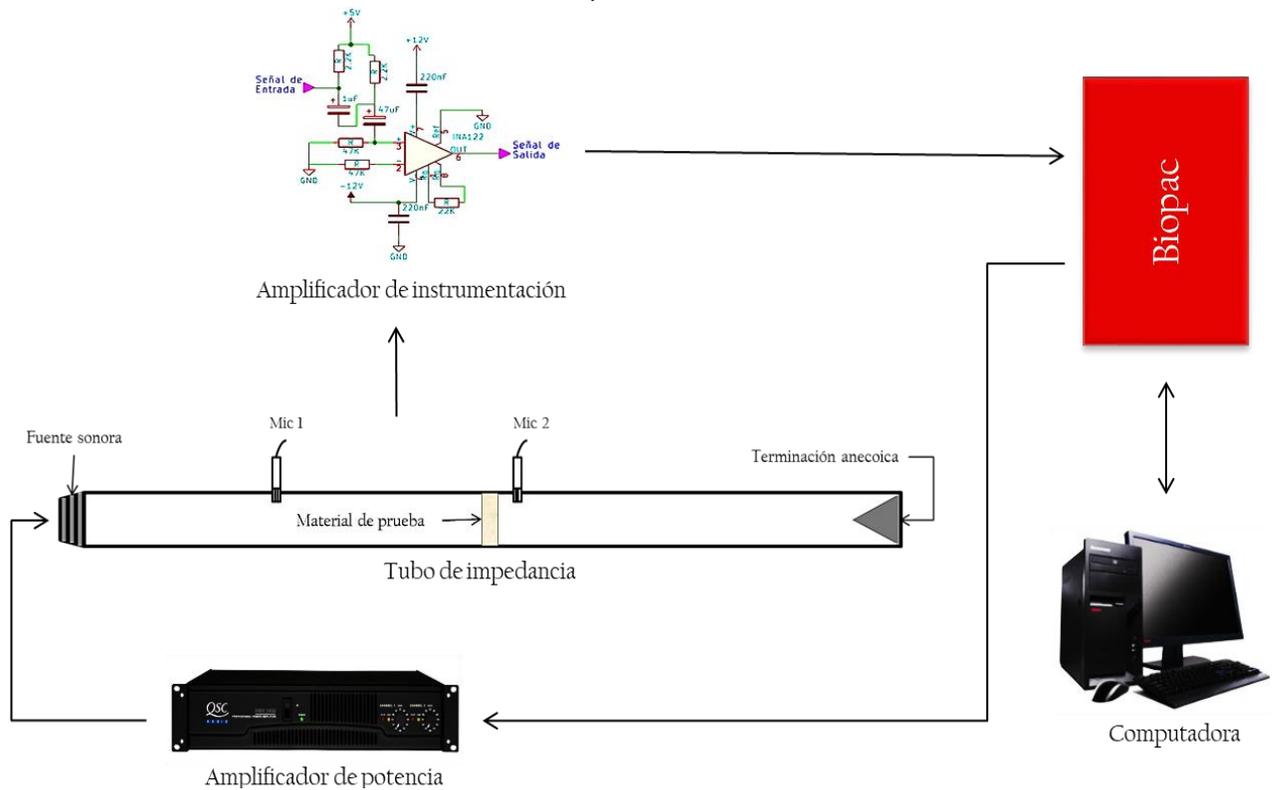


Figura 6.3. Diagrama experimental del tubo de impedancia largo.

La metodología experimental, consiste en enviar las señales Gaussianas-Sinusoidales a una bocina a través de una Tarjeta de Adquisición de Datos, Biopac-MP150, la cual se usa para realizar la conversión digital-analógica de las señales acústicas. La señal pasa por un amplificador de potencia antes de hacerla llegar a la bocina. Los dos micrófonos colocados en cada cámara acústica registran las señales con respecto al material de prueba. Estas pasan por un amplificador de instrumentación para mejorar la relación señal a ruido, en seguida son enviadas al Biopac para realizar la conversión analógica-digital, las cuales son almacenadas en una computadora.

El procesamiento de cada señal consiste en un filtrado antes de generar un análisis en el estado estacionario para determinar la respuesta acústica en el dominio de la frecuencia. Posteriormente se determinan los coeficientes acústicos del material de prueba.

La desventaja de este diseño radica en que las ondas acústicas registradas se atenúan a lo largo del tubo, por ello, es necesario compensar las pérdidas en amplitud a lo largo del tubo. De aquí que, parte del trabajo experimental consistió en diseñar e implementar una metodología para determinar el factor de atenuación a lo largo del tubo en función de la distancia y la frecuencia. Cada una de estas etapas son descritas con mayor detalle en las siguientes secciones.

6.2 Señal Gaussiana-Sinusoidal

Para generar la base de datos de las señales digitales correspondientes a la forma de la onda Gaussiana-Sinusoidal se multiplica una onda Gaussiana con una Sinusoidal, Figura 6.4. La frecuencia de interés la define la señal Sinusoidal y la Gaussiana modula la amplitud. Se consideró un intervalo entre cada frecuencia de 50 Hz a lo largo del ancho de banda seleccionado, de 600 Hz a 8 kHz. Un programa desarrollado genera la base de datos con 160 señales acústicas.

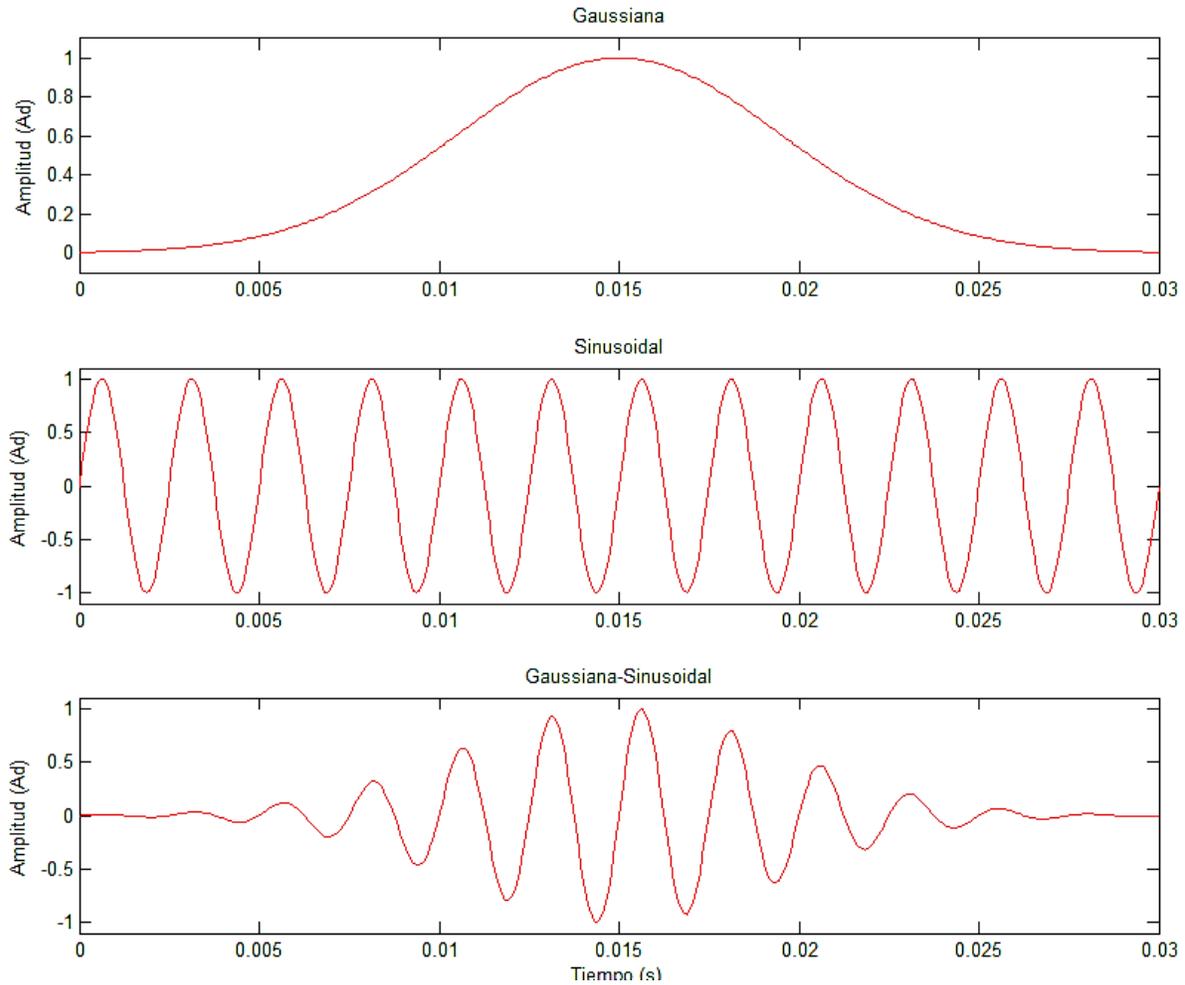


Figura 6.4. Señal Gaussiana-Sinusoidal a 500 Hz.

Cada señal está conformada por 2000 muestras y una frecuencia de muestreo de 100 kHz para tener un tiempo de duración de 0.02 segundos para cada señal Gaussiana- Sinusoidal.

Con la finalidad de instrumentar el proceso de generación y registro de cada una de las señales adquiridas en la parte experimental se procedió a integrar trenes de pulsos, referido como una ráfaga acústica. De esta manera, la primera ráfaga está conformada por 20 señales tomadas de la base de datos, abarcando un ancho de banda de 1 kHz. El arreglo

consiste en concatenar cada una de las señales generadas separadas por un lapso de tiempo de 0.3 segundos.

Este intervalo de tiempo entre cada señal Gaussiana- Sinusoidal genera un tiempo en el registro de las señales para que se atenúen las reflexiones que no son de interés para el cálculo de los coeficientes acústicos, a lo largo de cada cámara, antes de que se genere la siguiente señal Gaussiana- Sinusoidal.

La Figura 6.5 muestra la primera ráfaga acústica, la cual cubre un intervalo de frecuencia de los 50 Hz hasta 1 kHz teniendo un incremento de 50 Hz, entre cada señal. La ráfaga inicia con una forma de onda en la cual no hay variación de voltaje, durante 0.3 segundos, seguida de la primera señal Gaussiana- Sinusoidal de 50 Hz, la cual dura 0.02 segundos. Después se tiene otro lapso de tiempo de 0.3 segundos en la cual no hay variación en la forma de onda, antes de la segunda señal Gaussiana- Sinusoidal de 100 Hz y así sucesivamente hasta finalizar con la señal de 800 Hz.

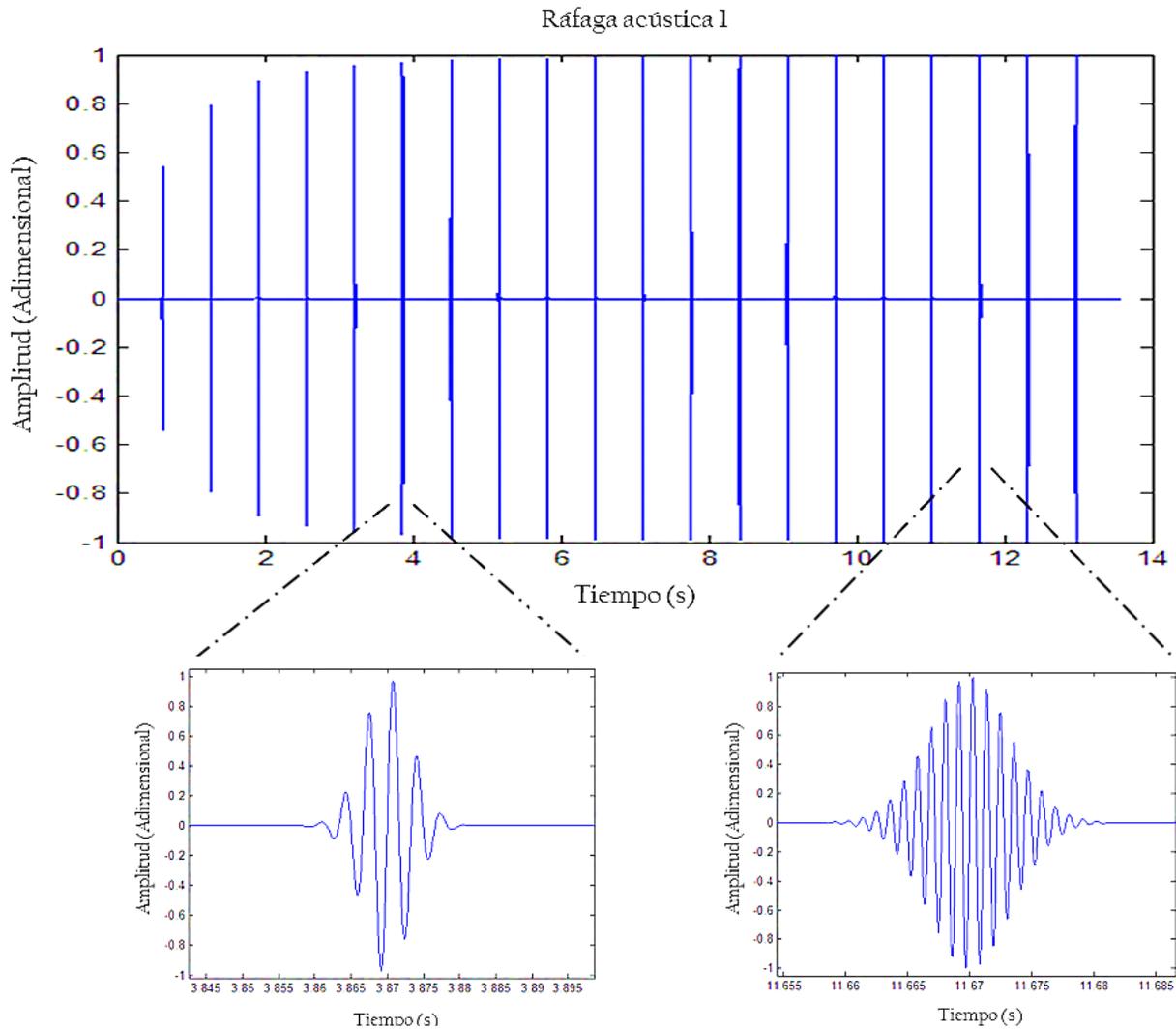


Figura 6.5. Representación gráfica de la primera ráfaga acústica, donde se amplifican dos señales acústicas de 300 Hz y 900 Hz, respectivamente.

La segunda ráfaga acústica inicia desde los 1.05 kHz hasta los 2 kHz, la tercera ráfaga acústica abarca un ancho de banda desde los 2.05 hasta los 3 kHz y así sucesivamente hasta llegar a los 8k Hz, completando un total de 8 ráfagas.

6.3 Análisis en Estado Estacionario

Para determinar los coeficientes acústicos de un material de prueba en el dominio de la frecuencia, se realiza un análisis en estado estacionario a partir de las ondas Gaussianas-Sinusoidales registradas por los micrófonos. Este procedimiento matemático se lleva a cabo mediante un procesamiento digital de señales, utilizando el software MatLab.

Retomando que el micrófono colocado en la primera cámara acústica del tubo de impedancia largo registra la señal incidente y reflejada para cada señal Gaussiana-Sinusoidal, Figura 6.6, se establecen las condiciones en el diseño experimental para identificar la onda incidente y reflejada para cada una de las frecuencias generadas.

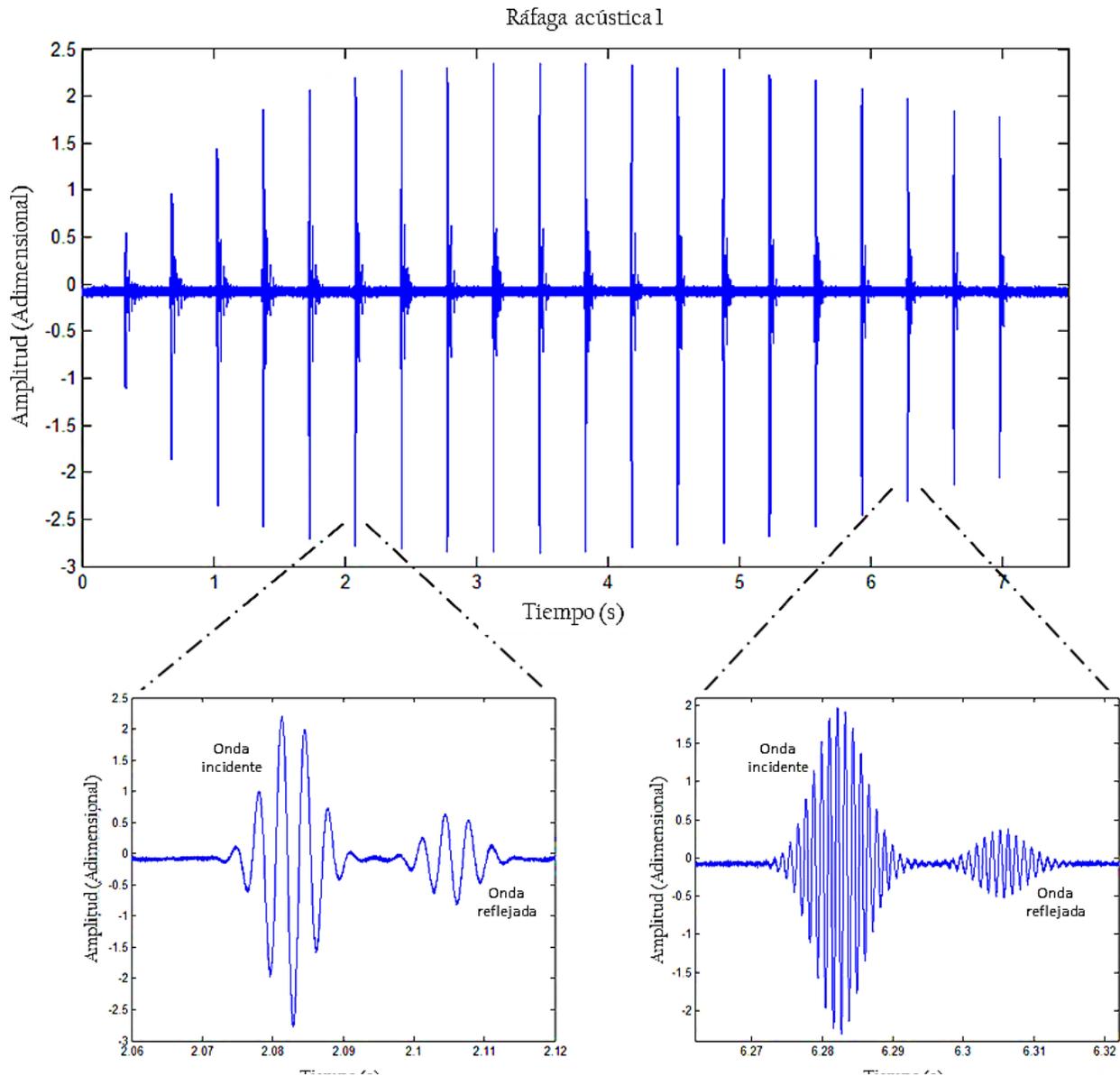


Figura 6.6. Esquema de la propagación y atenuación de una onda acústica.

El tiempo de la señal incidente y reflejada para cada señal Gaussiana- Sinusoidal generada es una constante que se determina a partir de los registros experimentales. Con ellos se procede a organizar la información registrada, construyendo una matriz con la señal incidente y reflejada de cada frecuencia generada. En este caso, cada renglón de la matriz representa una frecuencia en específico de la señal incidente y reflejada.

Este mismo procedimiento se realiza para las señales registradas en el segundo micrófono, con la diferencia de que cada renglón representa la señal transmitida a diferente frecuencia.

La finalidad de construir esta matriz, es para implementar un proceso de filtrado de las señales experimentales mediante la técnica de correlación cruzada, antes de proceder con el análisis. Este proceso de filtrado involucra las señales experimentales y las señales de la base de datos generada. El proceso de filtrado se describe en el apéndice B.

Después de filtrar las señales, el siguiente paso consiste en normalizar cada una de las señales filtradas respecto a la señal incidente, ya que ésta se considera como la señal de referencia. Posteriormente se selecciona una región de la señal de interés alrededor de las amplitudes máximas tanto en la onda incidente como en la onda reflejada. Esta parte de la señal seleccionada es la que se considera con las características de una señal en estado estacionario. El intervalo utilizado es de 1024 muestras, 512 muestras a la derecha y a la izquierda, a partir de la amplitud máxima de cada señal.

Posteriormente se implementa un programa para determinar la amplitud y fase para cada una de las señales incidentes y reflejadas. Los valores determinados se grafican en función de la frecuencia, los cuales representan la respuesta en magnitud de las ondas incidentes y reflejadas del material de prueba. El diagrama esquemático de este procesamiento de señales se describe en la Figura 6.7.

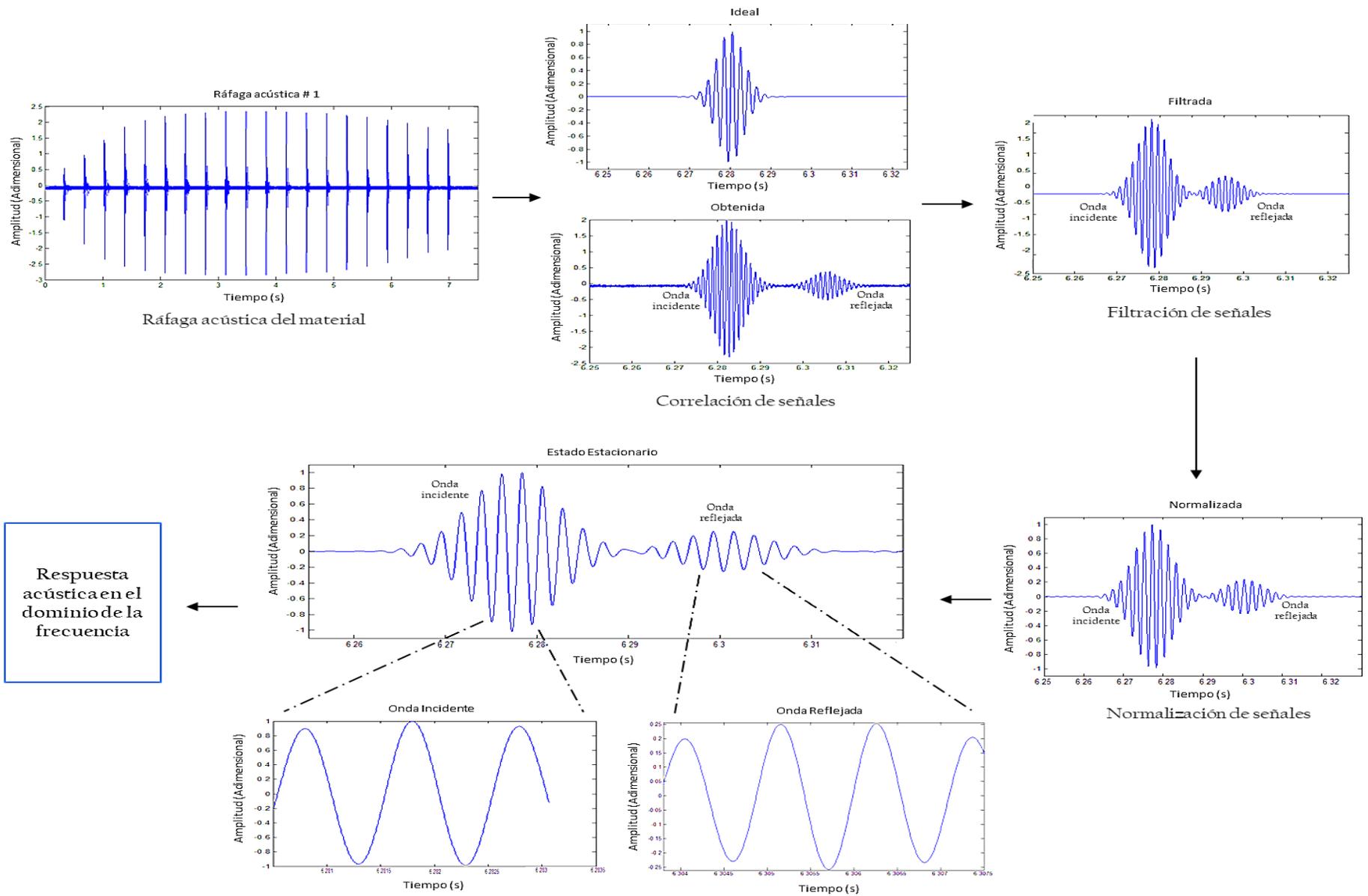


Figura 6.7. Representación gráfica del filtrado de la primera ráfaga.

El proceso de la Figura 6.7 se realiza para cada una de las ráfagas registradas. No obstante, este mismo análisis se implementa para las señales registradas por el micrófono colocado en la segunda cámara acústica, el cual registra la respuesta en amplitud de las ondas transmitidas.

Antes de calcular los coeficientes acústicos del material de prueba es necesario considerar el factor de atenuación a lo largo del tubo, tomando en consideración el punto de registro de la onda acústica. Este procedimiento se describe en la siguiente sección.

6.4 Factor de atenuación

La propagación de una onda acústica requiere de un medio, el cual define la velocidad de propagación y el factor de atenuación en la presión de onda acústica en función de la distancia y frecuencia. En este caso, se tiene una velocidad constante de 343 m/s al interior del tubo, considerando que el aire se encuentra a temperatura ambiente. Por otro lado, el factor de atenuación depende de la frecuencia que porta la onda y de la distancia recorrida, tomando como referencia los puntos donde se registra.

Para establecer la metodología que se implementó en este trabajo en la determinación del factor de atenuación, se retoma el caso de un tubo de impedancia con una cámara acústica, Figura 6.8, donde se tiene un tubo largo finito en el cual uno de sus extremos está cerrado y en el otro se coloca una bocina. En este esquema se muestra el efecto de la amplitud que presentan las ondas incidente y reflejada para una frecuencia en específico, es decir, la amplitud de la onda incidente, generada por la bocina, va disminuyendo conforme se

propaga a lo largo del tubo. Cuando esta onda impacta la parte final de la cámara se genera una onda reflejada, con la misma frecuencia, la cual se propaga en dirección contraria y su amplitud decrece en función de la distancia. Esta pérdida de amplitud en la presión de onda acústica se refiere como el factor de atenuación.

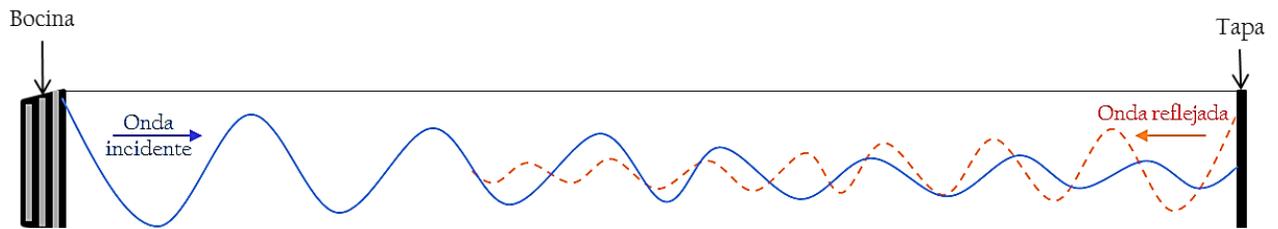


Figura 6.8. Esquema de la propagación y atenuación de una onda acústica.

Matemáticamente, el comportamiento que representa la atenuación de la onda acústica, se puede tratar como la multiplicación entre una señal Exponencial (Γ) y una Sinusoidal (P). La primera señal se genera al producir la onda acústica por la bocina y la segunda es el factor de atenuación de amplitud de la onda al propagarse a lo largo del tubo, Figura 6.9.

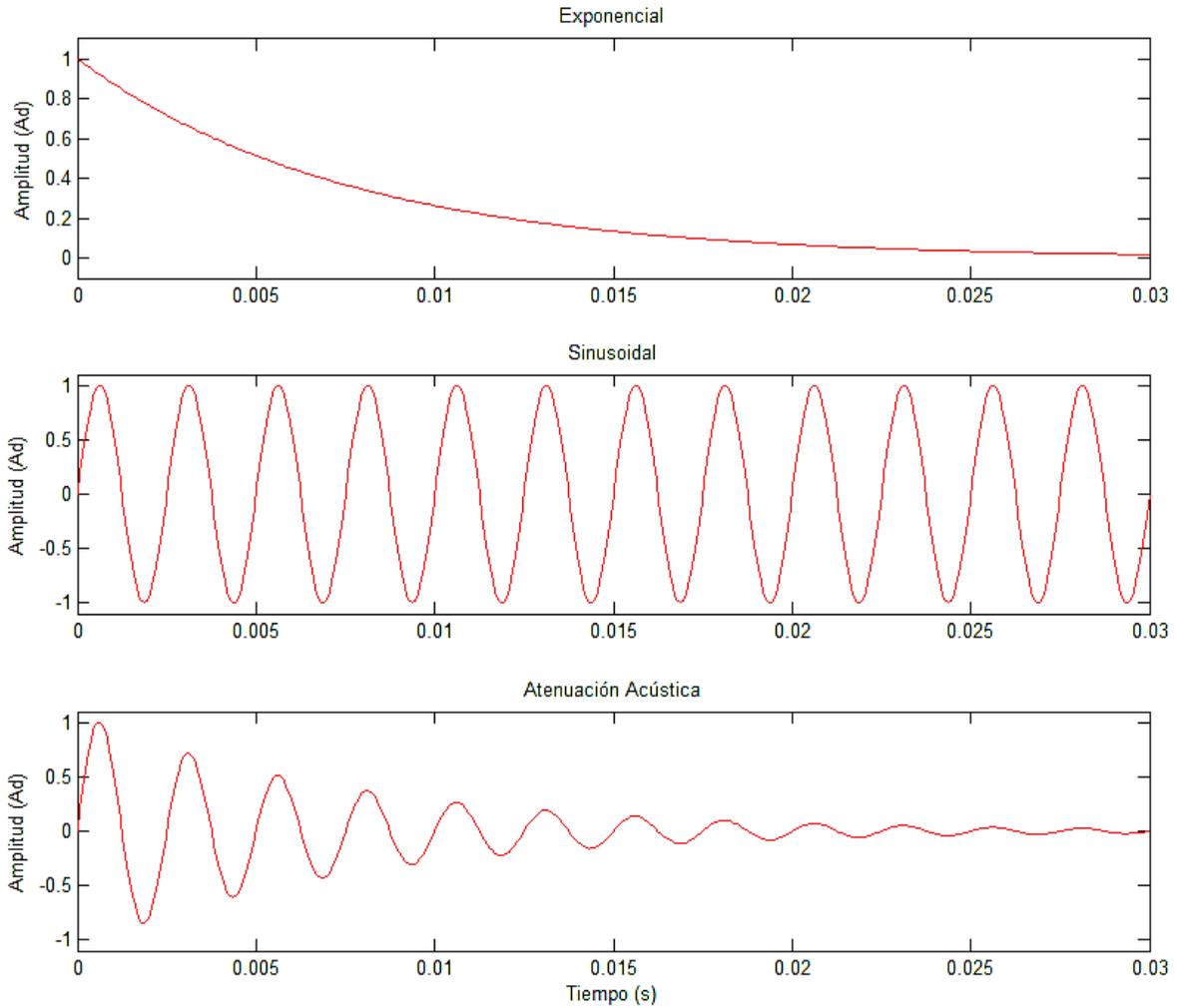


Figura 6.9. Representación gráfica de la atenuación acústica dentro del tubo.

La expresión matemáticamente que representa este comportamiento, se describe como:

$$p = P\Gamma \quad (6.1)$$

Donde la amplitud de la presión acústica atenuada, registrada por el micrófono, se representa por el parámetro p . La amplitud de la onda acústica sin atenuación, que representa la respuesta acústica de material de prueba, está dada por el parámetro P . El factor de atenuación a lo largo del tubo se representa por Γ .

El factor de atenuación, a su vez, está definido como:

$$\Gamma(l, \omega) = e^{-\alpha l} \quad (6.2)$$

donde

$$\alpha(\omega) = a + bj \quad (6.3)$$

Los parámetros a y b , representan la amplitud y la fase del factor de atenuación de la distancia (l) y de la frecuencia (ω).

La ecuación que representa el registro del micrófono en la cámara acústica queda como:

$$p(l, \omega) = P e^{-a(\omega)l} e^{-jb(\omega)l} \quad (6.4)$$

Retomando el esquema del montaje experimental del tubo de impedancia largo, Figura 6.1, se tienen tres posiciones de interés en la atenuación de onda, los cuales corresponden a la onda incidente, reflejada y transmitida, cuando se tiene un material de prueba, como se aprecia en la Figura 6.10.

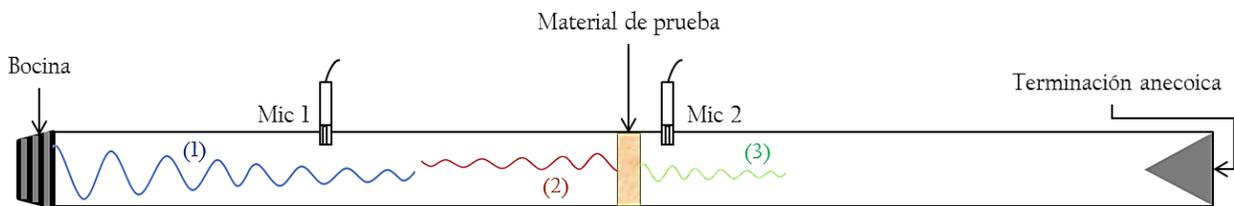


Figura 6.10. Esquema de las atenuaciones de onda en el tubo de impedancia largo teniendo un material de prueba.

Como se observa en la Figura anterior, el micrófono colocado en la primera cámara registra la señal incidente y reflejada a la mitad de la distancia entre la bocina y el material de prueba. Esta posición es la que se toma como referencia en el experimento para determinar la distancia a considerar del factor de atenuación. En el diseño experimental, la onda incidente recorre 4 metros antes de impactar el material de prueba. El mismo micrófono registra la señal de onda reflejada, la cual recorre la misma distancia, pero en dirección contraria. Por lo que la onda reflejada sufre un factor de atenuación de 8 m. Mientras que el factor de atenuación de la onda transmitida es de 4 m, debido a que el micrófono colocado en la segunda cámara acústica se encuentra inmediatamente después del material de prueba.

Para determinar los factores de atenuación del tubo de impedancia largo, es necesario considerar las tres posiciones, tomando una como referencia. De esta manera se determina el factor de atenuación a 4 y 8 metros, para distintas frecuencias que porta la onda. Para ello, se utiliza el tubo de impedancia largo sin material de prueba y con la diferencia de que se coloca un tercer micrófono cerca de la bocina, Figura 6.11.

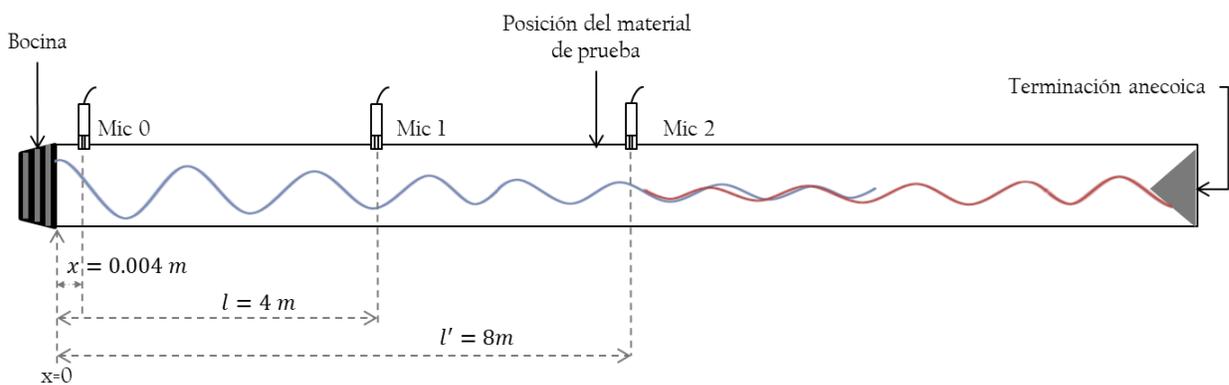


Figura 6.11. Diagrama de atenuación de una onda acústica cuando no se tiene un material de prueba.

La relación que existe entre las posiciones 0 y 1 permiten conocer el factor de atenuación de la onda, cuando esta se propaga a 4 metros. Este factor se corrobora con la relación que existe entre las posiciones 1 y 2, ya que también permiten conocer el factor de atenuación a 4 m. La relación entre las posiciones 0 y 2, permite conocer el factor de atenuación de 8 m.

La metodología descrita en la sección 6.1 fue implementada para generar y registrar las señales acústicas. La metodología descrita en la sección 6.3 fue puesta en marcha para determinar el factor de atenuación en función de la frecuencia, una vez que se determina la amplitud del estado estacionario para cada señal Gaussiana- Sinusoidal. Cabe resaltar que para determinar el factor de atenuación no se utiliza un material de prueba, por lo que los registros no se caracterizan por una onda reflejada.

Los factores de atenuación calculados se aprecian en la Figura 6.12, donde se aprecia que el factor de atenuación para 8 m decae rápidamente en amplitud en comparación al factor de 4 m y es evidente, ya que la onda acústica se propaga a una distancia mayor a los 4 metros.

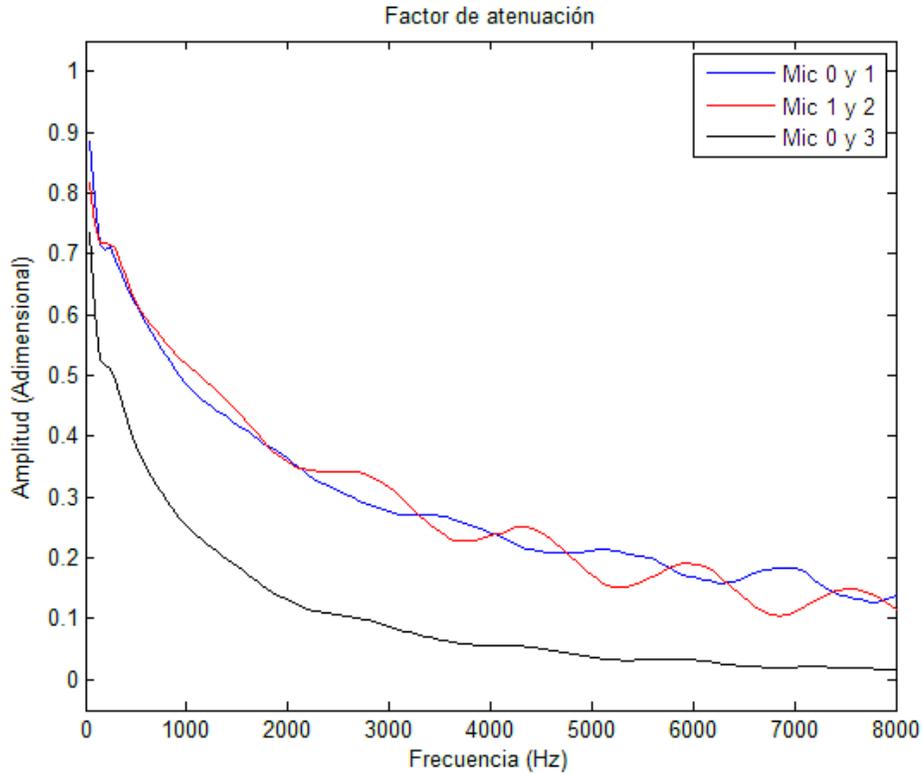


Figura 6.12. Representación gráfica de los factores de atenuación para 4 y 8 metros.

Una vez determinado los factores de atenuación para 8 m y 4 m se proceden a compensar la presión de las ondas de la onda reflejada y transmitida, respectivamente, cuando éstas son generadas por el material dentro del tubo.

Retomando la ecuación (6.4) la presión acústica compensada de la onda reflejada P_r , para una distancia de 8 m en la primera cámara, Figura 6.13, se expresa como como:

$$P_r = \frac{p_r}{e^{-\alpha 2l}} \quad (6.5)$$

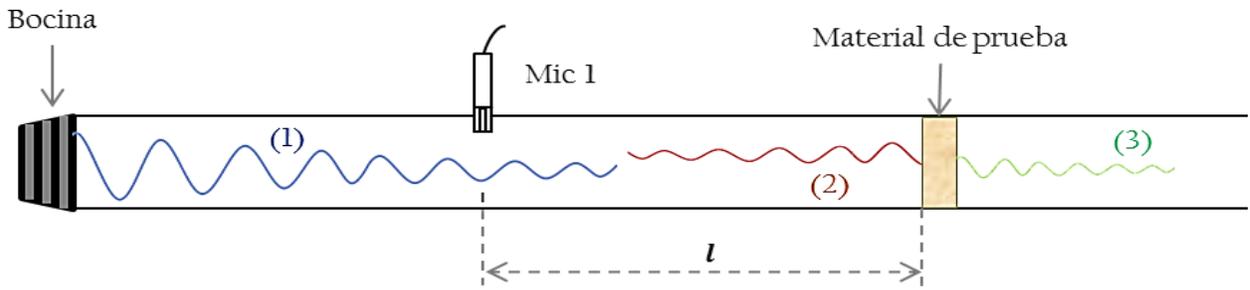


Figura 6.13. Diagrama del primer factor de atenuación, onda incidente (1), onda reflejada (2) y onda transmitida (3).

La presión acústica compensada de la onda transmitida P_t , para una distancia de 4 m en la segunda cámara, Figura 6.14, se expresa como:

$$P_t = \frac{p_t}{e^{-\alpha l}} \quad (6.6)$$

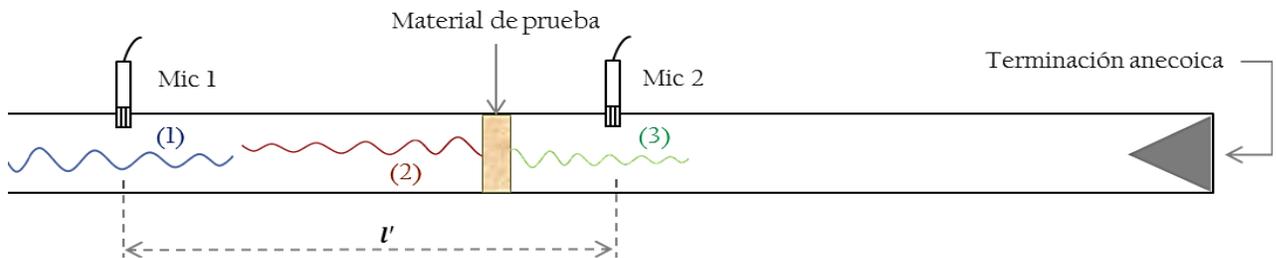


Figura 6.14. Diagrama del segundo factor de atenuación, onda incidente (1), onda reflejada (2) y onda transmitida (3).

Con las respuestas acústicas de las ondas reflejadas y transmitidas ya compensadas, se procede a determinar los coeficientes acústicos del material de prueba.

6.5 Coeficientes Acústicos (Reflexión, Absorción y Transmisión)

Con la metodología descrita a lo largo de esta sección 6, se puede determinar el coeficiente de reflexión y transmisión del material de prueba, con las siguientes expresiones:

$$|R| = \left| \frac{P_r}{P_i} \right| \quad (6.7)$$

$$|T| = \left| \frac{P_t}{P_i} \right| \quad (6.8)$$

Donde P_r y P_t , son las respuestas acústicas de reflexión y transmisión, respectivamente, P_i , es la respuesta acústica incidente.

Una vez obtenidos el coeficiente de reflexión y transmisión se puede conocer el coeficiente de absorción, de la misma forma que se expuso en la sección 4.5, en la ecuación (4.27).

$$\alpha = 1 - |R|^2 - |T|^2 \quad (4.27)$$

7 Resultados II: Tubo de impedancia largo

Este capítulo muestra los resultados obtenidos con el tubo de impedancia largo para cuatro materiales sólidos de prueba. Estos muestran la respuesta en magnitud de los coeficientes de reflexión, transmisión y absorción. El comportamiento de las curvas permite clasificar al material de prueba para frecuencias específicas.

7.1 Coeficientes Acústicos

La puesta en marcha del tubo de impedancia largo, el cual está constituido por dos cámaras acústicas, dos micrófonos y una terminación anecoica, se basó en la metodología descrita en la sección 6.1. la ganancia del amplificador de potencia fue cuidadosamente seleccionada para evitar saturación en el registro de las señales acústicas y se procedió a realizar un barrido desde los 600 Hz hasta los 8 kHz, mediante el uso de las ráfagas acústicas. El análisis en el estado estacionario y el factor de atenuación fueron implementados para el procesamiento de las señales registradas.

Al igual que en el tubo corto, las muestras fueron colocadas de manera cuidadosa en el portamuestras, evitando la deformación de la misma y la fuga del sonido. El primer material de prueba caracterizado fue la Espuma de Poliuretano. Se realizaron dos pruebas con este material de prueba. La primera fue con una muestra que presenta un espesor de 0.015 m y la segunda con 0.035 m de espesor.

La Figura 7.1 muestra los coeficientes acústicos en el dominio de la frecuencia para la Espuma de Poliuretano, cabe mencionar que después de procesar los datos, se determinaron los coeficientes de reflexión y transmisión a partir de las ecuaciones (6.7) y (6.8), respectivamente para posteriormente obtener el coeficiente de absorción, ecuación (4.27).

La curva del coeficiente de reflexión presenta un comportamiento casi nulo caracterizado por una uniformidad en magnitud desde los 600 Hz hasta los 5.2 kHz, mientras que a partir de esta frecuencia y hasta los 8 kHz su magnitud se incrementa ligeramente. Sin embargo, la magnitud del coeficiente de transmisión, presenta un comportamiento decreciente en función de la frecuencia. Cabe mencionar que el coeficiente de absorción presenta un crecimiento en magnitud con respecto a la frecuencia, destacando que la Espuma de Poliuretano es un material absorbente a partir de los 3.5 kHz hasta los 8 kHz, mientras que a bajas frecuencias se comporta como un material de transmisión.

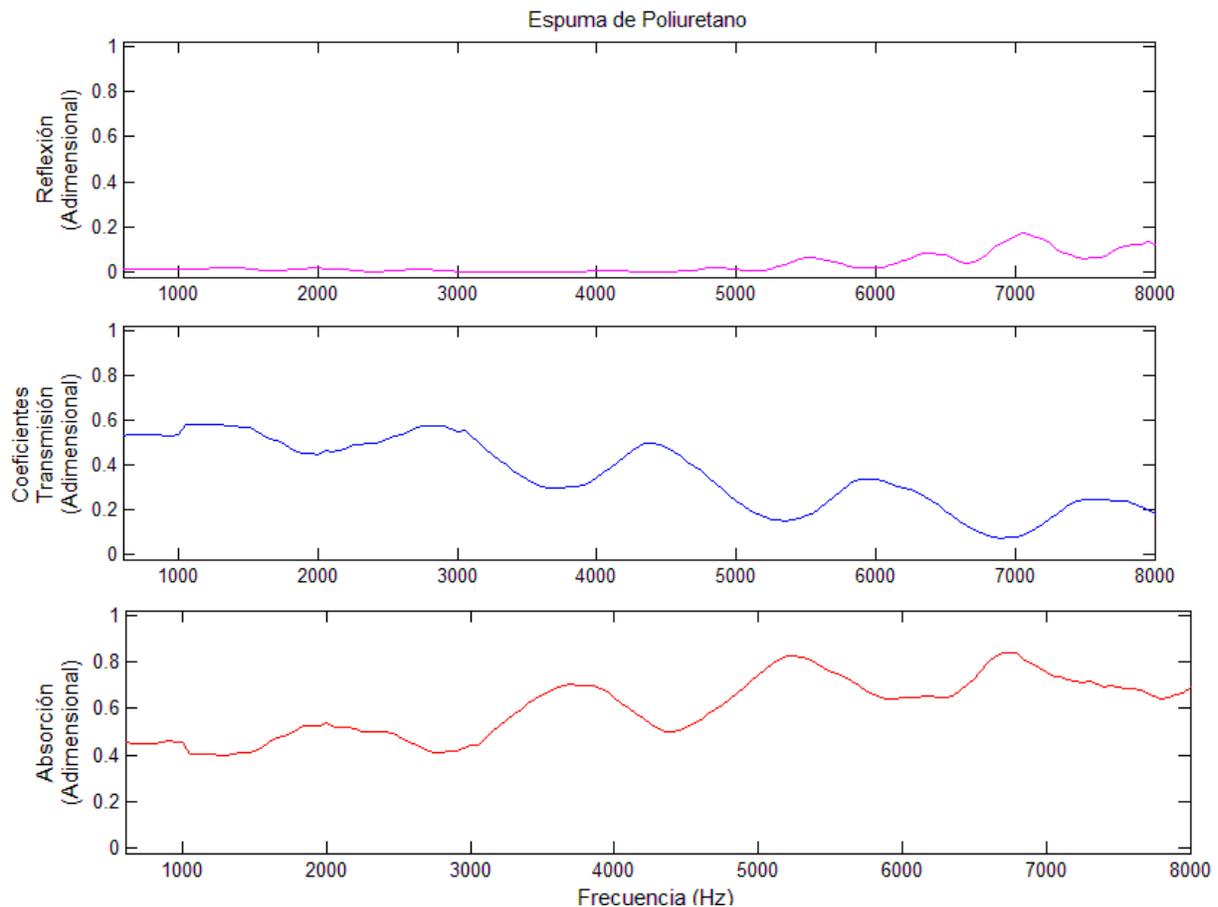


Figura 7.1. Curvas de los coeficientes acústicos de la Espuma de Poliuretano con espesor de 0.015 m.

La segunda caracterización que se realizó fue con el mismo material de referencia, Espuma de Poliuretano, pero con un espesor de 0.035 m, la Figura 7.2. El comportamiento de las curvas para los tres coeficientes acústicos más uniforme y menos oscilante en comparación a las curvas acústicas que presenta este material con un espesor de 0.015 m, Figura 7.1. No obstante, la curva de reflexión se puede considerar casi nula, a lo largo de casi todas las frecuencias. Mientras que la curva de transmisión presenta amplitudes pequeñas y estas van decreciendo en función de la frecuencia. Por otro lado, la curva del coeficiente de absorción describe que la Espuma de Poliuretano es un material absorbente. Este comportamiento se debe al espesor del material de prueba.

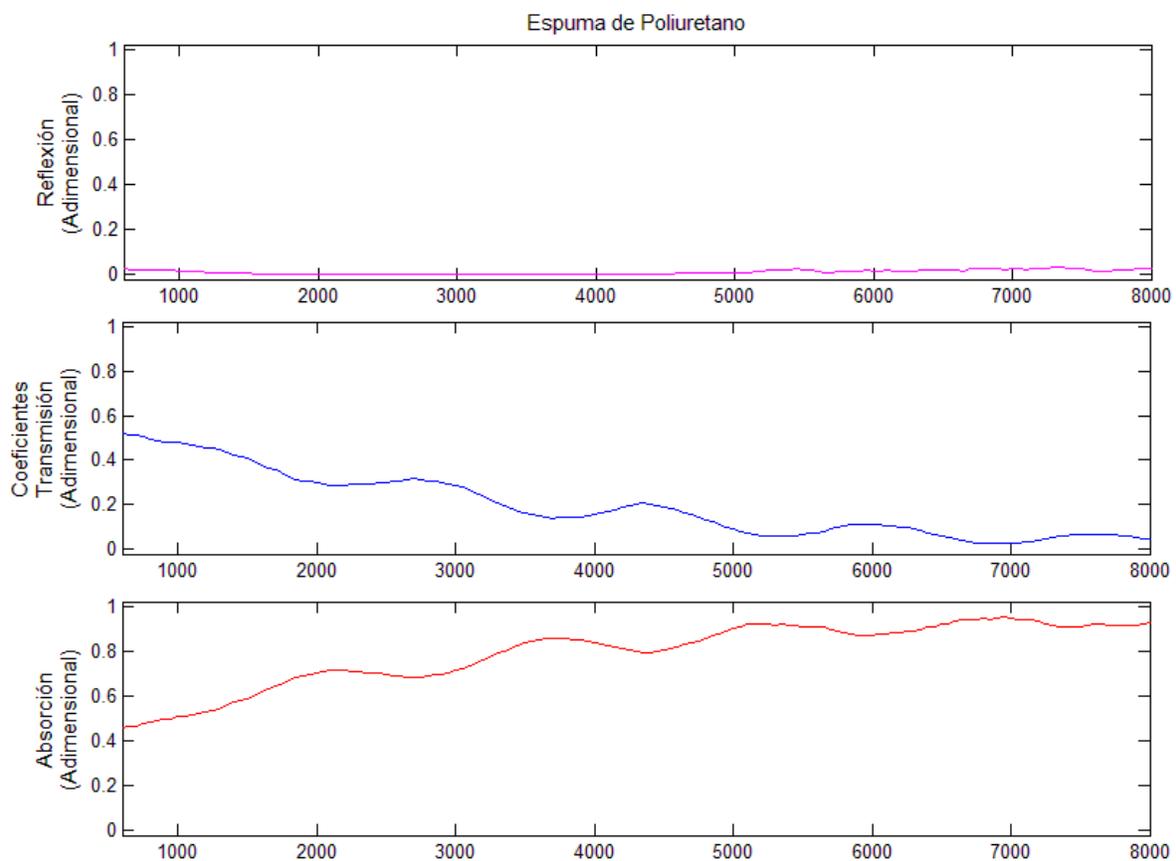


Figura 7.2. Curvas de los coeficientes acústicos de la Espuma de Poliuretano con espesor de 0.035 m.

Se procedió a caracterizar el Acrílico, el Cartón Comprimido y la Madera Balsa. Los primeros dos materiales presentan espesores de 0.003 m y el tercero un espesor de 0.004 m. A diferencia de la Espuma de Poliuretano, estos materiales presentan una porosidad menos visible.

En la Figura 7.3, se visualizan las curvas de los coeficientes acústicos del Acrílico, donde la curva de reflexión, muestra magnitudes superiores al valor de 0.5 a partir de los 2 kHz, lo cual significa que el Acrílico es un material reflejante. Sin embargo, presenta dos mínimos, los cuales abarcan intervalos de frecuencias de 4.2 a 4.8 kHz y de 5.8 a 6.3 kHz, respectivamente, por otro lado, tiene un máximo significativo a una frecuencia de 7 kHz. La curva de transmisión presenta magnitudes son muy pequeñas a lo largo de las frecuencias evaluadas. La curva de absorción se caracteriza por mantener magnitudes inferiores a 0.5 y por un ligero decrecimiento de magnitud en función de la frecuencia.

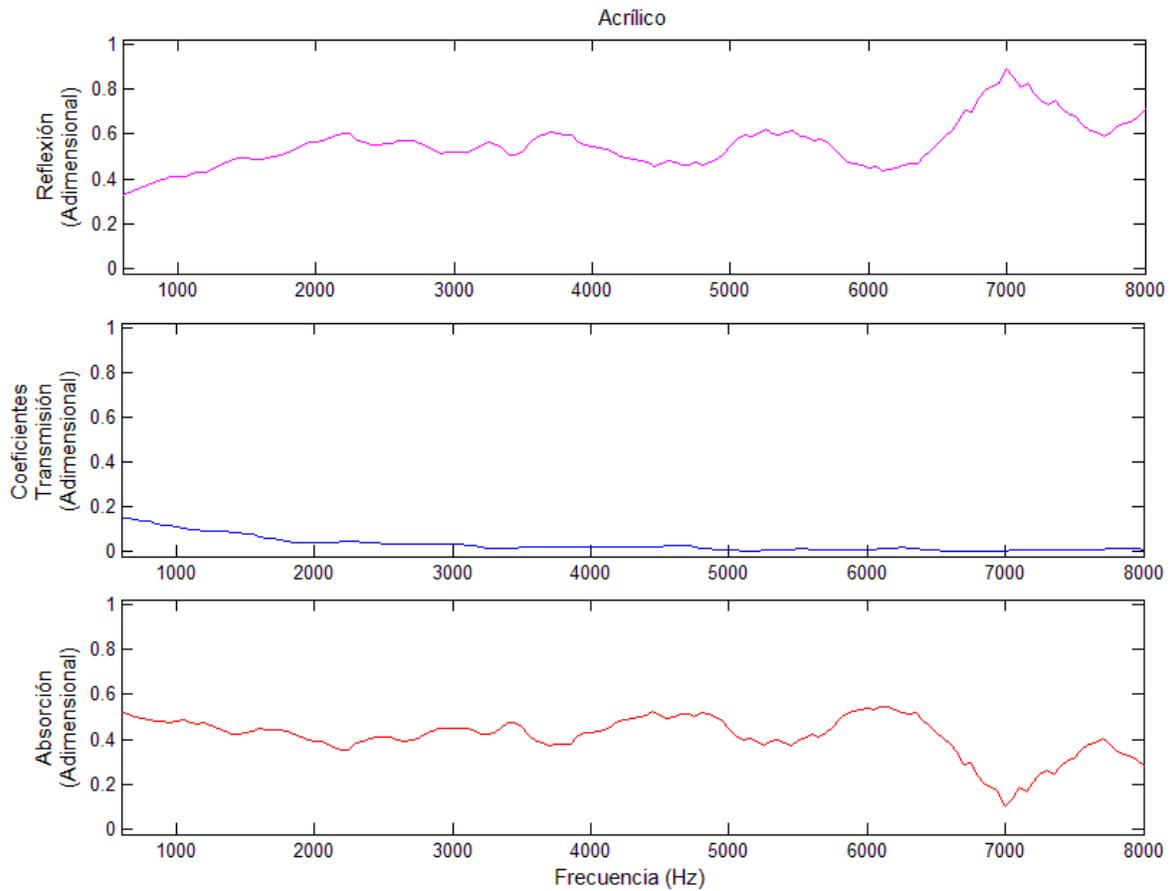


Figura 7.3. Curvas de los coeficientes acústicos del Acrílico con espesor de 0.003 m.

La Figura 7.4 muestra las curvas de los coeficientes acústicos del Cartón Comprimido, las cuales presentan un comportamiento similar al Acrílico, no obstante, presenta un efecto de resonancia en un intervalo de frecuencias el cual va de 6.8 a 7.2 kHz, ya que la curva rebasa el valor máximo del coeficiente de reflexión, 1. Los resultados obtenidos permiten considerar que este material es altamente reflejante y poco absorbente.

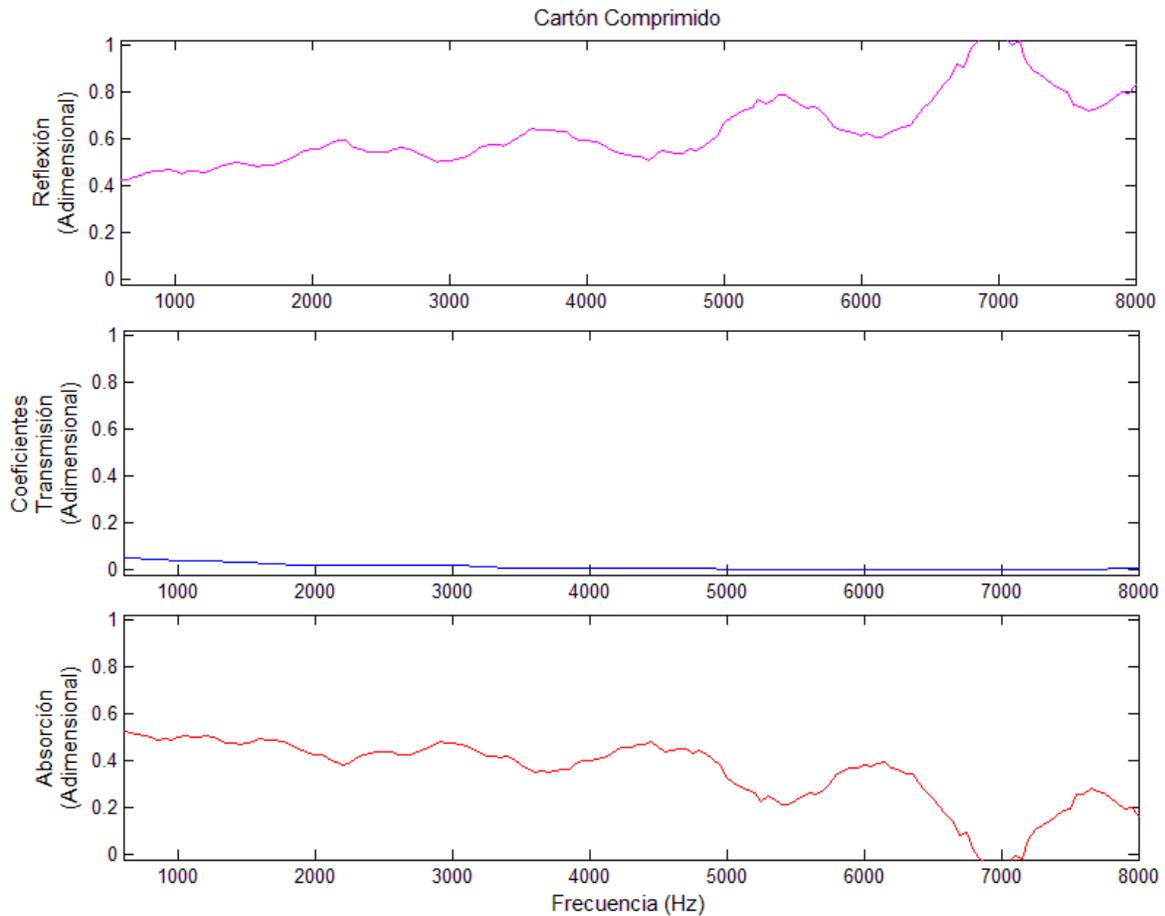


Figura 7.4. Curvas de los coeficientes acústicos del Cartón Comprimido con espesor de 0.003 m.

Por último, se caracterizó la Madera Balsa, en la Figura 7.5 se observan las curvas de sus coeficientes acústicos, la curva de transmisión, es semejante a los materiales anteriores, Acrílico y Cartón Comprimido, ya que no transmiten sonido. Sin embargo, este material puede ser reflejante o absorbente dependiendo de la frecuencia en la que se desee trabajar. Observando la curva de reflexión a partir de los 5 kHz hasta los 6.8 kHz, este material se considera reflejante, mientras que, observando la curva de absorción a bajas frecuencias y hasta los 4.8 kHz, la Madera Balsa se consideraría un material absorbente. Cabe mencionar que este material, al igual que el Cartón Comprimido, presenta en efecto resonante en el mismo intervalo de frecuencia.

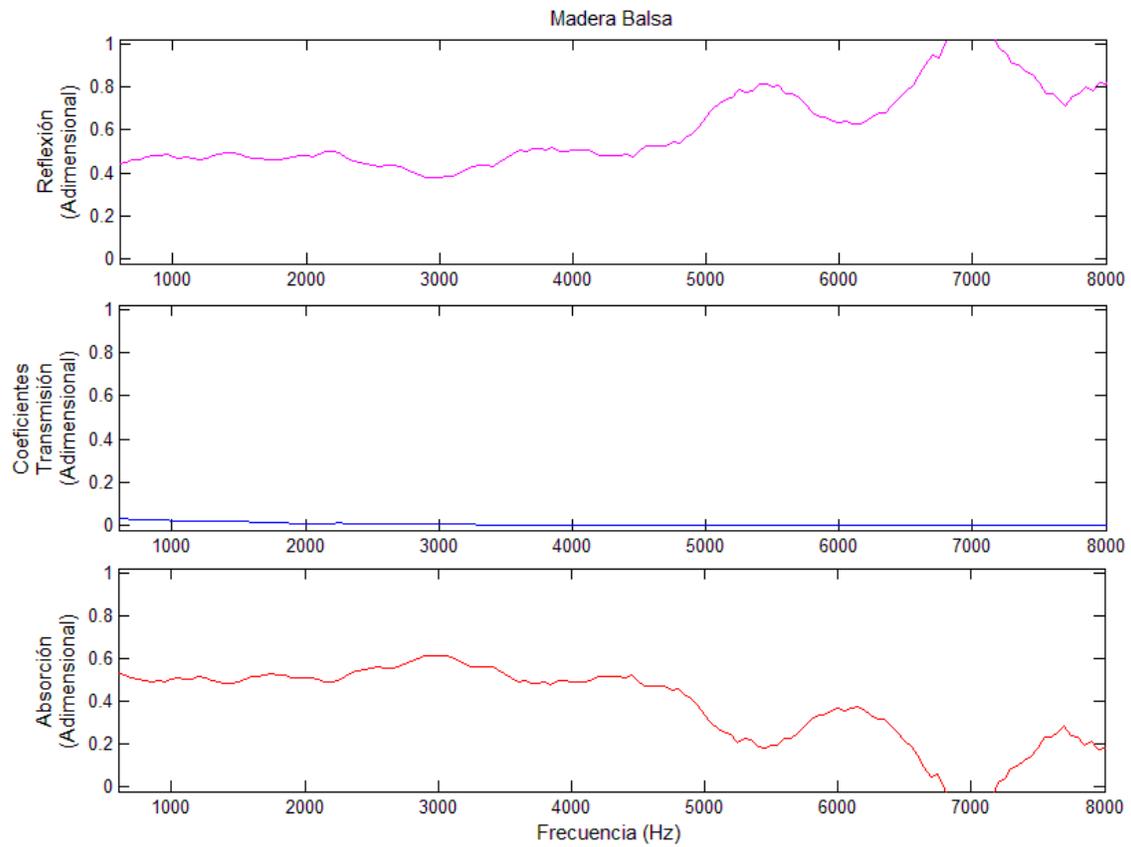


Figura 7.5. Curvas de los coeficientes acústicos de la Madera Balsa con espesor de 0.004 m.

La metodología implementada permite caracterizar acústicamente cualquier material sólido, hasta con un espesor de 0.035 m.

8 Discusión de resultados

Dos tubos de impedancia fueron diseñados y contruidos, uno corto y otro largo, para determinar los coeficientes acústicos de materiales sólidos, considerando los fundamentos teóricos de una onda acústica incidente al impactar sobre la superficie de un material. Los resultados en las magnitudes de los coeficientes acústicos en ambos tubos presentan diferencias relacionadas con la metodología implementada, pero representativas del tipo de material de prueba. Ambos prototipos cuantifican los coeficientes de reflexión, transmisión y absorción a lo largo de un ancho de banda de 600 Hz a 8 kHz.

La construcción de un tubo de impedancia corto de una sola cámara acústica estableció el ancho de banda en función de los parámetros físicos del tubo y de la instrumentación implementada. Se determinó el coeficiente de absorción de la Espuma de Poliuretano, la cual muestra una coincidencia con el resultado obtenido de un tubo de impedancia normalizado. En este primer prototipo experimental, el coeficiente de absorción depende únicamente del coeficiente de reflexión.

El uso de un portamuestras contribuyó para sujetar el material de prueba y acoplar dos cámaras acústicas, en las cuales se registraron las ondas incidentes, reflejadas y transmitidas. De esta manera se logró caracterizar un material de prueba con un espesor de hasta 0.035 m. Cabe mencionar que la flexibilidad en el diseño de ambos tubos de impedancia, permite cuantificar el coeficiente de absorción para una o dos cámaras acústicas. Es decir, este coeficiente puede ser determinado en función del coeficiente de reflexión (cuando se tiene una sola cámara acústica), o en función de los coeficientes de reflexión y transmisión (cuando se tienen dos cámaras acústicas).

Cuatro materiales de prueba (Acrílico, Cartón Comprimido, Madera Balsa y Espuma de Poliuretano) fueron utilizados en ambos tubos de impedancia. Tres de los materiales presentan una alta densidad comparada con la Espuma de Poliuretano. Con ello, se consideró un contraste en las propiedades acústicas, así como en el espesor del material.

La repetitividad de los coeficientes acústicos determinados fue validada para cada material en el respectivo prototipo. El comportamiento de los coeficientes acústicos obtenidos para cada material muestra diferencias cuando este presenta una densidad alta o baja. La Espuma de Poliuretano posee una densidad baja, por ello, tiene un comportamiento similar en los coeficientes de reflexión y absorción en ambos tubos, entre el rango de frecuencia de 1.5 kHz a 6.5 kHz, por lo que se considera como un material no reflejante y muy absorbente. Aunque cabe resaltar que, el coeficiente de transmisión determinado en ambos tubos presenta una diferencia. La magnitud del coeficiente de transmisión calculada con el tubo largo es mayor a la determinada en el tubo corto.

Los resultados obtenidos con la Espuma de Poliuretano en ambos tubos, muestran que al aumentar el espesor del material incrementa la magnitud del coeficiente de absorción, este comportamiento se debe al efecto de masa, es decir, entre mayor sea el espesor la Espuma de Poliuretano, este se vuelve más absorbente, pero menor reflejante y de transmisión.

Por lo que respecta, a los materiales con una densidad alta y un mismo espesor (Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa), el comportamiento de los coeficientes acústicos presenta pequeñas diferencias para el caso de estudio de un mismo tubo de impedancia. Comparando los coeficientes acústicos entre el tubo largo y corto se observa que, los

materiales son altamente reflejantes y transmiten poco. El coeficiente de absorción es relativamente bajo comparado con el de la Espuma de Poliuretano.

Una característica que predomina en los resultados del tubo corto es la oscilación en los tres coeficientes acústicos, mientras que en el tubo largo no estuvieron presentes.

Los resultados experimentales dependieron de varios factores que fueron cuidadosamente revisados antes de cada registro. Las conexiones que integran el sistema entre la bocina, el tubo de impedancia, el portamuestras e incluso la colocación de los micrófonos al interior del tubo deben estar bien acopladas y selladas, para evitar cambios de impedancia a lo largo de la propagación de la onda acústica. La instrumentación empleada para el acondicionamiento de la señal acústica registrada por el micrófono fue un factor fundamental para controlar la intensidad del registro de la señal acústica, la cual a su vez depende de un amplificador de potencia. Este factor obligó a revisar las presiones acústicas registradas por cada micrófono, a lo largo del ancho de banda, ya que para bajas frecuencias la amplitud de la señal acústica es relativamente mayor que a frecuencias altas. La ganancia establecida en los amplificadores de potencia e instrumentación evitó la saturación a bajas frecuencias, así como una adecuada relación señal a ruido para altas frecuencias. La correcta colocación del material de prueba en el portamuestras, apoyado por un corte preciso con láser, evitó deformación en la estructura del material. Otro de los factores fundamentales para la puesta en marcha de ambos prototipos fue el tener acceso a una cámara semianecoica, para mantener controlado el ruido ambiental y eléctrico.

El procesamiento de las señales acústicas para el tubo de impedancia corto se llevó a cabo en el dominio de la frecuencia. La función de transferencia utilizada para cuantificar el

coeficiente de absorción dependió principalmente de un amplificador Lock-In. Este instrumento además de generar la señal de referencia, llevó a cabo el registro y filtrado de las señales acústicas, así como determinar la diferencia de amplitud y fase entre la señal de referencia y la señal registrada por cada micrófono. Cabe resaltar que el proceso de registro es relativamente rápido, depende del tiempo de barrido de la señal de referencia, sin embargo, se tiene que realizar para cada uno de los cuatro micrófonos.

El procesamiento de las señales acústicas para el tubo de impedancia largo se llevó a cabo en el dominio del tiempo. La cuantificación de los coeficientes acústicos dependió de las señales acústicas registradas por la tarjeta de adquisición de datos, para cubrir un ancho de banda, un filtrado y un análisis en el estado estacionario. Los cuales contribuyeron para determinar la relación de la señal reflejada y transmitida respecto de la señal incidente. En este caso, se tuvo un control en los diversos parámetros involucrados como, el contenido de frecuencia a través de la construcción de ráfagas acústicas, el filtrado de las señales a través de la correlación cruzada entre la señal registrada y la señal de referencia, el análisis en el estado estacionario a través de la región seleccionada alrededor de cada máximo de las señales identificadas. Cabe resaltar que el registro de las señales, para los dos micrófonos utilizados en el tubo de impedancia largo, se lleva a cabo al mismo tiempo, aunque hay que considerar una serie de ráfagas para cubrir el ancho de banda. Por lo que, el tiempo empleado en el registro es muy similar al del tubo corto.

El tubo de impedancia corto utilizó una señal Sinusoidal de amplitud constante, la cual varía su frecuencia para cubrir un ancho de banda en un tiempo específico. La metodología empleada ocasiona en todo momento que la señal generada presente diversas reflexiones a lo largo del tubo, por consecuencia el registro de las ondas acústicas se identifica por la

superposición de ondas acústicas. De aquí que, el comportamiento de los coeficientes acústicos obtenidos se define por una oscilación a lo largo de la frecuencia. Por lo que respecta al tubo largo, se utilizan ondas Gaussianas-Sinusoidales de corta duración, las cuales son generadas consecutivamente, tomando en cuenta un tiempo de separación entre cada una de ellas, para que las señales reflejadas se atenúen, antes de generar la siguiente señal Gaussiana-Sinusoidal. De esta manera se evita el traslape de las ondas registradas y el comportamiento de los coeficientes acústicos determinados en función de la frecuencia, no se describe por una oscilación tan significativa como se presenta en el tubo corto. Por otro lado, es importante destacar que el uso de una señal modulada en amplitud, Gaussiana-Sinusoidal, evita transitorios en la onda acústica que afecten significativamente el análisis de la frecuencia específica.

El tubo corto se identifica por un traslape generado por las reflexiones en las cámaras acústicas, aunque en este caso no existe un factor de atenuación que afecte la magnitud de los coeficientes acústicos calculados. Sin embargo, el factor de atenuación en el tubo largo debe ser considerado para compensar la energía disipada de la onda acústica entre el micrófono y el material de prueba. La metodología implementada en este trabajo determina el factor de atenuación, el cual se obtiene en función de la frecuencia y la distancia. Este factor de atenuación debe ser calculado cada vez que la ganancia en el amplificador de potencia es ajustada.

9 Conclusiones

En este trabajo de investigación se diseñaron y construyeron dos tubos de impedancia, uno corto y otro largo, considerando los parámetros y normas necesarias para la puesta en marcha a través de la instrumentación, análisis y procesamiento de las señales registradas.

La medición del coeficiente de absorción en función del coeficiente de reflexión y transmisión, fueron determinados en un rango de 600 Hz a 8 kHz para cuatro materiales sólidos de prueba. A pesar de que en los resultados alcanzados en ambos prototipos se tienen diferencias en magnitud de los coeficientes, pero estos muestran un comportamiento similar en las propiedades de reflexión, transmisión y absorción.

El uso de la metodología mediante el análisis en el estado estacionario utilizando ondas acústicas moduladas en amplitud, Gaussianas-Sinusoidales, evitan la superposición de ondas y reducen los efectos oscilatorios en el comportamiento de los coeficientes acústicos.

La flexibilidad y el control de los parámetros en la metodología experimental realizada permiten analizar materiales sólidos hasta de 0.035 metros de espesor, bajo un acondicionamiento acústico, que reduce el ruido eléctrico y ambiental.

El trabajo de investigación a futuro consiste en mejorar el ancho de banda a bajas frecuencias, mediante un arreglo de bocinas, para caracterizar los materiales de prueba y optimizar el tiempo de registro de las señales registradas. Con todo lo anterior se pretende generar una base de datos de distintos materiales.

Apéndice A.

Conversión de señales analógicas y digitales, Biopac-MP150

La importancia de utilizar el Biopac es que, este instrumento permite convertir las señales analógicas a digitales y las digitales a analógicas. En este caso particular, el Biopac adquiere las señales Gaussianas-Sinusoidales enviadas de la base de datos, estas señales son digitales y son convertidas a analógicas, esta primera conversión que realiza el Biopac. El objetivo de que sean analógicas es, porque dos instrumentos importantes de la metodología puesta en marcha solo son compatibles con este tipo de señales. La bocina produce sonido siempre y cuando la señal que reciba sea analógica, por otro lado, los micrófonos son instrumentos esenciales para el registro de las señales acústicas y estos detectan señales continuas o mejor conocidas como analógicas.

Ya obtenidas las señales que registraron los micrófonos y amplificadas, estas son convertidas a digitales, y esta es la segunda conversión que realiza el Biopac. El objetivo de utilizar las señales digitales es que, se pueden guardar y procesar más fácilmente, así como también se pueden detectar y corregir los errores (ruido) mientras que, en las señales analógicas no se pueden corregir fácilmente los errores y mucho menos detectarlos.

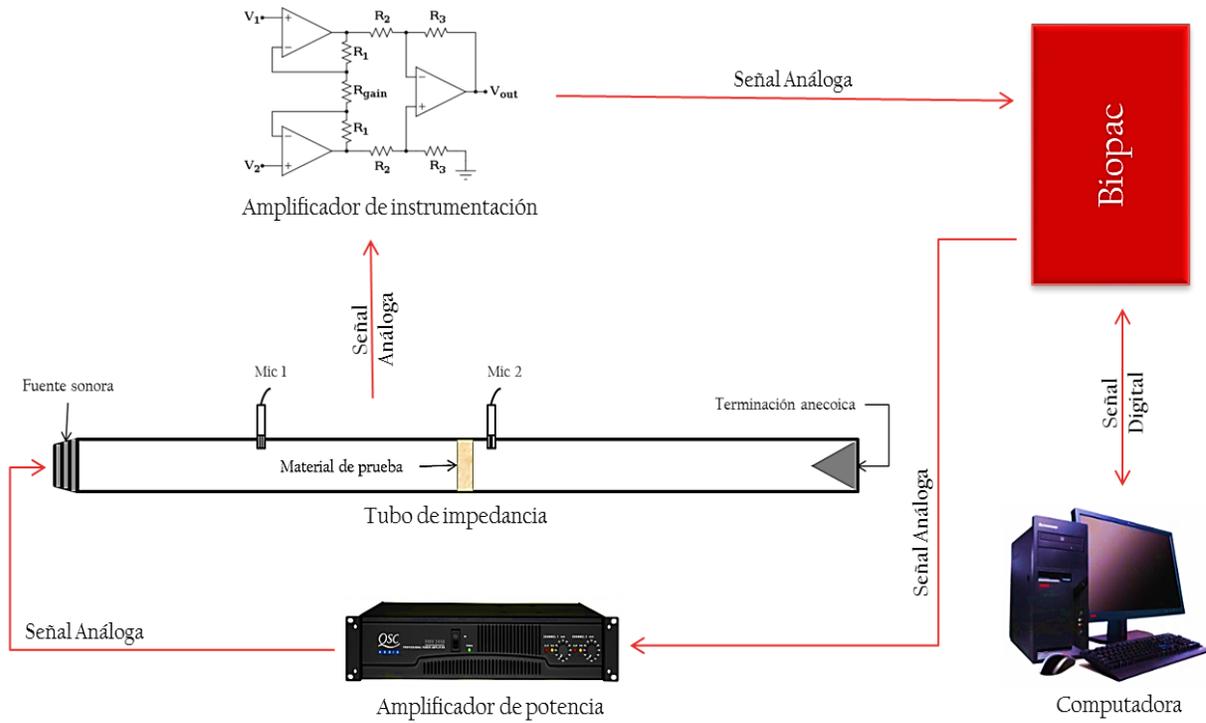


Figura A.1. Representación esquemática de las conversiones DA/AD.

Sin olvidar que la ventaja más representativa de las señales digitales es, que las grabaciones de sonido son de alta fidelidad y los errores generados por el ruido son reparables. Sin embargo, las señales analógicas son sensibles al ruido eléctrico y esto puede generar interferencias

Apéndice B.

Correlación de señales

Los sistemas lineales e invariantes en el tiempo (LTI) son sistemas bastante útiles para el procesamiento de señales. A continuación, se definirán algunos conceptos para comprender mejor que es un LTI y con ello obtener la correlación de señales.

Una señal en general, se define como la variación de una cantidad física, la cual se puede expresar matemáticamente y con esta expresión se puede obtener alguna información de la señal. Un sistema se define como un proceso capaz de recibir una señal y transformarla en otra, a estas señales se les conoce como señal de entrada ($x[n]$) y salida ($y[n]$), respectivamente.

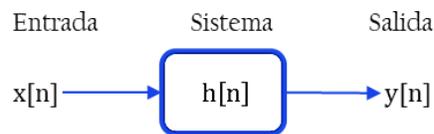


Figura B.1. Diagrama de un sistema y sus señales de entrada y salida.

Un sistema lineal, se dice que es aquel sistema que satisface las propiedades de proporcionalidad y aditividad, dando lugar al principio de superposición.

Se tiene la propiedad de proporcionalidad cuando, la señal de entrada a un sistema es multiplicada por un factor, y la señal de salida también esta multiplicada por el mismo factor, como se aprecia en la Figura B.2.

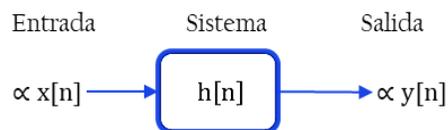


Figura B.2. Diagrama de la proporcionalidad de las señales, donde α es el factor.

Por otra parte, se tiene la propiedad de aditividad, la cual se puede adquirir de dos formas. La primera forma se da cuando se tienen dos o más señales de entrada, obteniendo las mismas señales de salida, sin embargo, la señal de salida resultante o final es la suma de todas las señales de salida, como se observa en la Figura B.3.

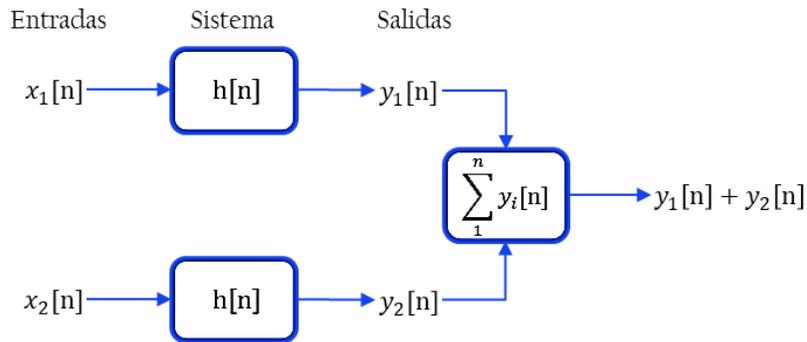


Figura B.3. Diagrama de la aditividad de las señales.

La segunda forma de obtener la propiedad de aditividad es cuando, la señal de entrada es la sumatoria de dos o más señales de entrada a un sistema y, por lo tanto, la señal de salida resultante es la suma de dos o más señales de salida, como se muestra en la Figura B.4.

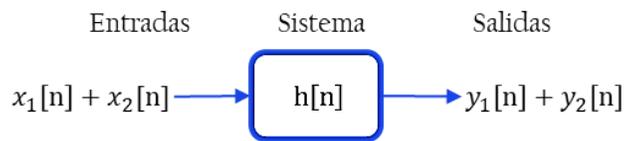


Figura B.4. Diagrama de la aditividad de las señales.

Se dice que un sistema es lineal, si cumple con el principio de superposición, es decir, que satisfaga la propiedad de proporcionalidad y aditividad a la par, como se aprecia en la Figura B.5.

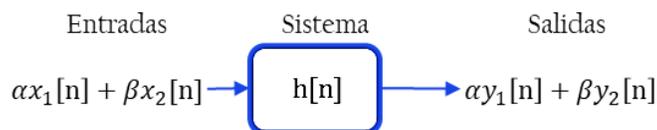


Figura B.5. Diagrama de un sistema lineal, mediante la superposición de las señales.

Un sistema invariante en el tiempo, se dice que es aquel sistema que no depende del tiempo, es decir, la señal de salida solo depende de los para metros de la señal de entrada, como se observa en la Figura B.6, [37]



Figura B.6. Diagrama de un sistema invariante en el tiempo.

De aquí que, un sistema lineal invariante en el tiempo (LTI), cumple con la propiedad de superposición e invarianza en el tiempo, la cual se describe en el diagrama de la Figura B.7.

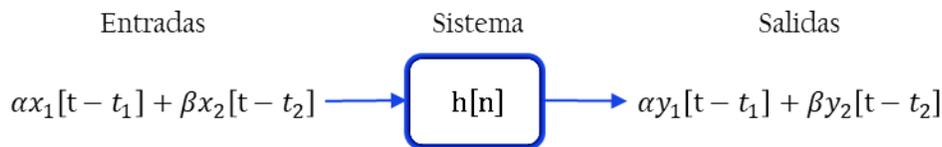


Figura B.7. Diagrama de un sistema lineal invariante en el tiempo.

Una característica importante de un sistema LTI es la convolución, la cual permite obtener la señal de salida del sistema $y(n)$, mediante la interacción de la señal de entrada $x(n)$ con la respuesta al impulso del sistema $h(n)$. La expresión matemática que representa la señal de salida, está dada como:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N_1+N_2-1} x(k) h(n-k) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (B.1)$$

Donde N_1, N_2 corresponden al número de muestras de la señal de entrada $x(k)$ y la respuesta del sistema $h(k)$, respectivamente. El parámetro $n - k$ representa la señal invertida y desplazada de la respuesta al impulso del sistema, la cual se superpone a la señal

de entrada $x(k)$. De esta manera se multiplican las señales y se obtiene la sumatoria para cada valor de n [37].

Este método es la base para implementar el proceso de la correlación de señales, la cual es la comparación de dos señales para apreciar su similitud entre estas, cabe resaltar que este proceso se utiliza también para filtrar las señales de ruido, tomando como referencia una señal ideal.

Dicha correlación se puede escribir matemáticamente como:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N_1+N_2-1} x(k) h(k-n) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (B.2)$$

Donde $k - n$ representa la señal desplazada de la respuesta del sistema.

Para este trabajo de investigación, se implementó la definición de correlación de señales con dos propósitos, el primero para determinar la similitud de las señales acústicas registradas por los dos micrófonos montados en el tubo de impedancia largo en condiciones experimentales. Y el segundo propósito es para filtrar las señales obtenidas por los micrófonos, haciendo una comparación entre estas señales y las señales ideales.

Apéndice C.

Correlación de señales en el tubo de impedancia largo

En la sección 6.2 de este trabajo, se mencionó que las ondas acústicas registradas por los micrófonos deben ser filtradas con respecto a las ondas acústicas generadas de la base de datos. Sin embargo, antes de realizar este análisis fue necesario determinar si los micrófonos registran una señal acústica al mismo tiempo y con los mismos parámetros físicos, con la finalidad de garantizar que los micrófonos respondan de la misma forma. El saber cómo es el comportamiento de los micrófonos es fundamental, ya que, estos a pesar de registrar las ondas acústicas propagadas dentro del tubo de impedancia, también pueden captar algunas señales de radio, por ejemplo, las de baja frecuencia.

Retomando el arreglo experimental definido en la Figura 6.11, el cual tiene 3 micrófonos, una terminación anecoica en el extremo cerrado del tubo, y una bocina en su otro extremo, cabe mencionar que, en este caso la bocina no genera ondas acústicas con el objetivo de que los micrófonos registren las señales acústicas (el ruido) que se encuentran dentro y fuera del tubo de impedancia largo, quedando así una metodología más sencilla.

Una vez almacenadas las señales que registraron cada micrófono de forma independiente, se procedió a realizar un procesamiento de señales, donde se obtuvo la correlación de señales entre los micrófonos 0-1, 1-2 y 0-2, los resultados de estas correlaciones se aprecian en la Figura C.1, donde la pendiente de color rojo y azul corresponden a la correlación de los micrófonos 0-1 y 1-2, respectivamente, mientras que la pendiente de color negro le corresponde a la correlación entre el micrófono 0-2.

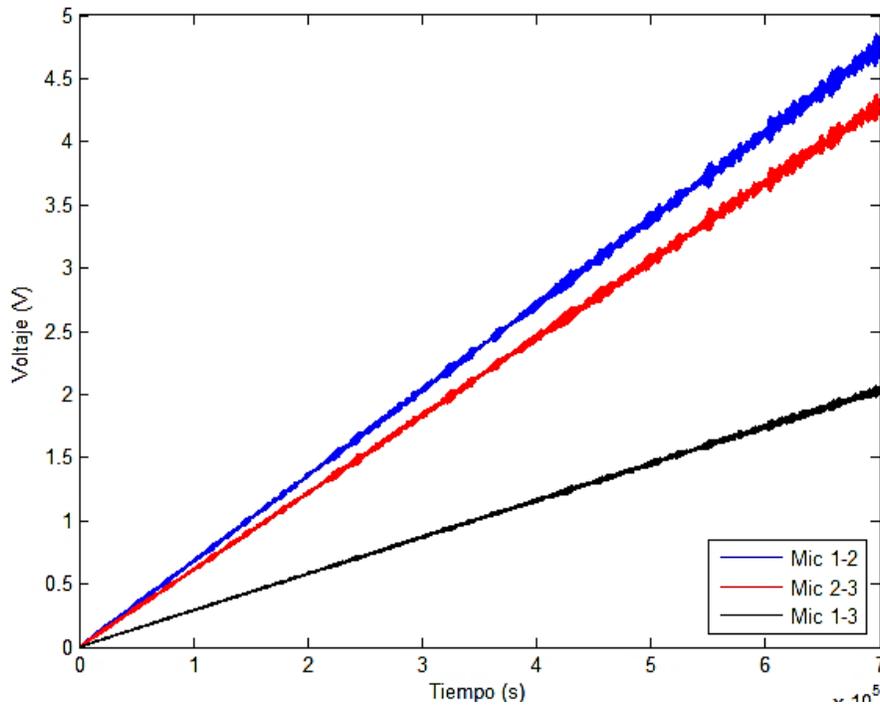


Figura C.1. Pendientes de las correlaciones de los micrófonos.

La relación entre micrófonos simboliza las distancias en las que se propaga una onda acústica o en este caso el ruido, es decir, la relación entre los micrófonos 0–1 y entre 1–2, les corresponde una distancia de 4 metros, con esto se puede decir que, las pendientes de ambas relaciones deben ser idénticas. Sin embargo, estas relaciones presentan pendientes de 33.6080° y 31.1152° , respectivamente, lo cual muestra diferencias de operación entre los tres micrófonos. Por otro, para la distancia de 8 metros presento una pendiente de 15.9817° , esto es debido a que, la distancia en la que se propaga el sonido es mayor.

Con todo lo mencionado, se puede decir que, los micrófonos operan de la misma forma proporcionando mediciones similares y por ello, se procede a realizar la caracterización de los materiales sólidos de prueba.

Apéndice D.

Construcción de un tubo de impedancia con una cámara acústica

Para el diseño y la construcción de un tubo de impedancia con una cámara acústica, se toman como referencia las siguientes normas: ASTM C384-04, ASTM E1050-08 e ISO 10534-2, las cuales permiten definir los parámetros físicos que debe presentar el tubo [24–26].

Las normas establecen que, el tubo debe ser totalmente liso, rígido y uno de sus extremos debe estar cerrado. La longitud de onda se define como 3.143 veces el radio interno del tubo, mientras que la frecuencia (f) de trabajo se define como la relación entre la velocidad del sonido (c) y la longitud de onda (λ) [27].

$$\lambda = 3.413r = 1.7065d \quad (D.1)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (D.2)$$

A partir de las ecuaciones (D.1) y (D.2) se puede determinar la frecuencia máxima en función de la velocidad del sonido y del diámetro interno del tubo.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{1.7065d} = 0.5865 \frac{c}{d} \quad (D.3)$$

La frecuencia mínima se define a partir de los parámetros de respuesta que presente la fuente sonora. No obstante, si se desea saber exactamente cuáles son los límites de frecuencia que puede trabajar el tubo de impedancia, se pueden obtener en función de la

distancia de separación de los micrófonos (s) y el número de onda (k), este presenta un intervalo de valores para establecer la frecuencia mínima y máxima.

$$0.1\pi < ks < 0.8\pi \quad (D.4)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2\pi/k} = \frac{kc}{2\pi} = \frac{kc}{2\pi} * \frac{s}{s} = \frac{ksc}{2\pi s} \quad (D.5)$$

$$f_{max} = \frac{ksc}{2\pi s} = \frac{0.1c}{2\pi s} \quad (D.6)$$

$$f_{min} = \frac{ksc}{2\pi s} = \frac{0.8c}{2\pi s} \quad (D.7)$$

La norma ASTM C384-04 establece que “al menos tres cuartas partes de la longitud de onda debe ser menor a la diferencia que existe entre la longitud del tubo de impedancia y su diámetro interno”, esto para que la onda acústica presente al menos un periodo como se ilustra en la Figura D.1 [24].

$$\frac{3}{4}\lambda < l - d \quad (D.4)$$

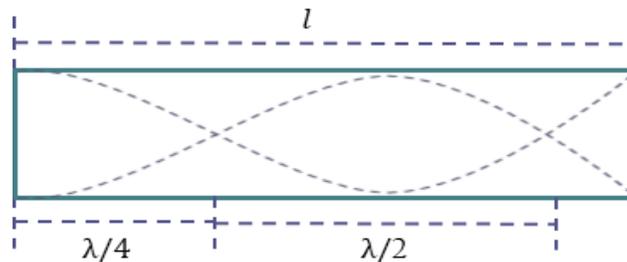


Figura D.1. Representación de una onda acústica, la cual tiene solo un ciclo.

Por otra parte, la norma ASTM E1050-08 permite calcular la distancia de separación (s) entre los centros de dos micrófonos, los cuales son colocados en la superficie del tubo de impedancia, esta norma también permite saber la distancia (l') que existe entre la superficie del material de prueba y el micrófono más cercano a él [25].

$$s = \frac{0.8 c}{2f_{m\acute{a}x}} \quad (D.5)$$

$$l' = 2d \quad (D.6)$$

Estos parámetros físicos, presentará un tubo de impedancia con una cámara acústica [25].

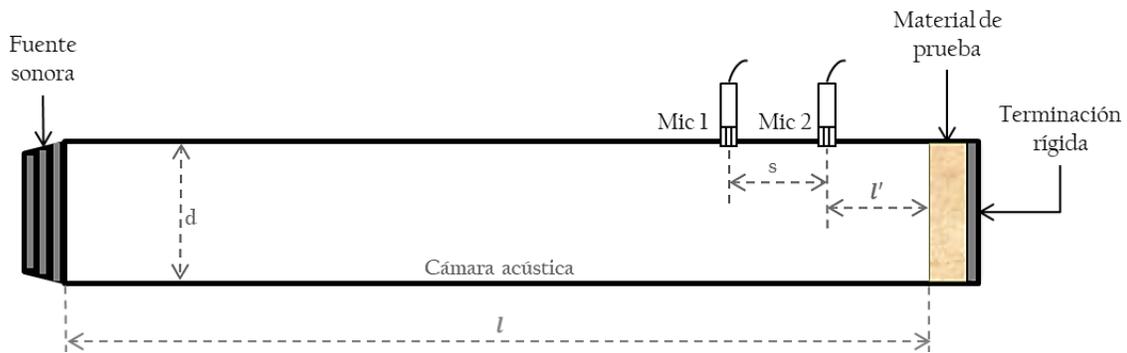


Figura D.2. Diseño de un tubo de impedancia con una cámara acústica.

Sin embargo, si se desea construir un tubo con dos cámaras acústicas se implementan los mismos parámetros (es el espejo de la primera cámara).

10 Referencias

1. Oshima, T., Ishizuka, T. and Kamijo, T. (2014). Three-dimensional urban acoustic simulations and scale-model measurements over real-life. *JASA Express Letters*, 4879672.
2. Molerón, M., Félix, S., Pagneux, V, and Richoux, O. (2013). Low frequency acoustic resonances in urban courtyards. *CrossMark*, 4836295.
3. Laura, L. (2012). Caracterización de la absorción sonora en modelos físicos a escala (Maestría en Diseño). Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, México, D.F.
4. Navacerrada, M.A., Díaz, C., Pedrero, A. y García, L.E. (2008). Acoustic properties of aluminium foams. *Materiales de construcción*, Vol. 58, ISSN: 0465-2746.
5. Catañeda, J.A. y González, H.A. (2004). Medición del coeficiente de absorción del sonido. *Scientia et Technica Año X, No.25, ISSN:0122-1701*.
6. Arnay, S.H. (2014). Estudio de la precisión de la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia. Master Universitario en Ingeniería Acústica de la Edificación y Medio Ambiente.
7. Estellés, D.R. (2007). Cap.1 Acústica física, México.
8. Hernández, Q.L. (2009). Analisis y diseño del tubo de impedancia bajo el método de función de transferencia (Tesis de pregrado en Comunicaciones y Electronica). IPN, ESIME, Méx. D.F.
9. Kinsler, L.E. (1992). Cap.5 Fundamentos de Acústica. México: Ed. Limuisa, Grupo Noriega Editores.
10. Scott, R.A. (1946). The Absorption of Sound in a Homogeneous Porous Medium. *Proceedings of the Physical Society* 58, 165-183.
11. Ferrero, M.A. and Sacerdote, G.G. (1951). Parameter of Sound Propagation in Granular Absorption Materials. *Acustic* 1, 135-142.
12. Delany, M.E. and Bazley, E.N. (1970). Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials. *Applied Acoustics* 3, 105-116.
13. Bies, D.A. and Hansen, C.H. (1980). Flow Resistance Information for Acoustical Design. *Applied Acoustic* 13, 357-391.
14. Ingard, K.U and Dear, T.A. (1985). Measurement of Acoustic Flow Resistance. *Journal of Sound and Vibration*, 103 (4), 567-572.
15. Utsuno, H. Tanaka, T., Fujikawa, T. and Seybert, A.F. (1989). Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials. *Journal Acoustic Society Am.*, 86, 637-643.
16. Bordone-Sacerdote, C. and Sacerdote, G.G. (1975). A Method for Measuring the Acoustic Impedance of Porous Materials. *Acustic* 34, 77-80.

17. Ren, M. and Jacobsen, F. (1993). A Method of Measuring the Dynamic Flow Resistance and Reactance of Porous Materials. *Applied Acoustics*, 39, 265-276.
18. Cummings, A. and Beadle, S.P. (1993). Acoustic Properties of Reticulated Plastic Foams. *Journal of Sound and Vibration*, 175 (1), 115-133.
19. Song, B.H. and Bolton, J.S. (2000). A Transfer-matrix Approach for Estimating the Characteristic Impedance and Wave Numbers of Limp and Rigid Porous Materials. *Journal Acoustic Soc. Am.*, 107(3), 1131-1151.
20. Suhanek, M., Jambrosic, K. and Horvat, M. (2008). A comparison of two methods for measuring the sound absorption coefficient using impedance tubes. *IEEE, 50th International Symposium ELMAR*, 321-324.
21. Salissou, Y. and Panneton, R. (2009). A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube. *Journal of the Acoustic Society of America*, 125 (4), 2083-2090.
22. Song, Q., Moreno, C., Liu, F. and Cattafesta, L. (2010). Quantitative schlieren measurements in a normal incidence acoustic impedance tube. *European Physical Journal Special Topics*, 182 (1), 113-124.
23. Salissou, Y. and Panneton, R. (2010). Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers. *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (5), 2868-2876.
24. ASTM C384-04(2016) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method.
(<https://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=Impedance%20tube&>)
25. ASTM E1050-08 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.
(<https://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=Impedance%20tube&>)
26. ISO 10534-2 Acoustics, determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, part 2: Transfer-function method.
(<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10534:-2:ed-1:v1:en>)
27. Rayleigh, B. y Strutt, J.W. (1896). Cap.XV Theory of sound, New York, USA.
Recuperado de:
<https://ia601406.us.archive.org/10/items/theoryofsound02raylrich/theoryofsound02raylrich.pdf>
28. Kinsler, L.E. (1992). Cap.2 Fundamentos de Acústica. México: Ed. Limuisa, Grupo Noriega Editores.
29. Bodén, H. and Äbom, M. (1986). Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts. *J. Acoust. Soc. A.* 79 (2), 541-549.

30. ASTM C384-04(2016) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method.
31. Datasheet del INA122P rescatada de internet: www.ti.com/lit/ds/symlink/ina122.pdf
32. Garduño, A., Rico, I., Ramírez, M.G. and Cabrera, A. (2011). Diseño y construcción de un amplificador lock-in usando interface gráfica. ROC&C2011-EL-30-PON132.
33. Pérez, R.S. (2000). Extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancia del centro de instrumentos, UNAM. Revista Mexicana de Física, 46(5), 478-484.
34. Feng, L. (2013). Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials. Journal Applied Acoustics, 74, 1480-1485.
35. Flores, M.D., Ferreyra, S.P., Cravero, G.A., Budde, L., Longoni, H.C., Ramos, O.A. y Tommasini, F.C. (2013). Base de datos de coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales. Asocioacion Argentina de Mécanica Computacional, Vol. XXXII, 2901-2908.
36. Pasqual, AM. y Lara, LT. (2017). Time-domain simulation of acoustic impedance tubes. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39 (1), 67-79.
37. Manual de la tarjeta de adquisición, Boipac MP150. Rescuperado de: <https://www.biopac.com/products/>
38. Sanjit, K.M. (2006). Digital Signal Processing. California, USA. Mc Graw Hill.
39. J. Deller, J.P. and Hansen, J. (1993). "Discrete Time Processing of Speech Signals". New York, Macmillan Publishing.