

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO DE IMPEDANCIA BASADO EN LA  
NORMA ISO 10534-2:2001 PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE  
ABSORCIÓN ACÚSTICA PARA MATERIALES AISLANTES.**

**DIEGO JAVIER CRIADO PALLARES**

**WILBER FRANCO CASTILLEJO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA**

**FLORIDABLANCA**

**2019**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO DE IMPEDANCIA BASADO EN LA  
NORMA ISO 10534-2:2001 PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE  
ABSORCIÓN ACÚSTICA PARA MATERIALES AISLANTES.**

**DIEGO JAVIER CRIADO PALLARES**

**WILBER FRANCO CASTILLEJO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**DOCENTE**

**ROLANDO ENRIQUE GUZMÁN LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA**

**FLORIDABLANCA**

**2019**

---

**Firma del director.**

Rolando Enrique Guzmán López

---

**Firma de los estudiantes.**

Diego Javier Criado Pallares

ID: 000220781

diego.criado@upb.edu.co

Wilber Franco Castillejo

ID: 000221320

wilber.franco@upb.edu.co

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado.

---

Firma del jurado.

---

Firma del jurado.

Bucaramanga, 18 de marzo de 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Le damos gracias a Dios por las bendiciones que nos ha dado y a nuestros padres y familiares que nos han apoyado durante nuestro proceso académico.

A nuestro director de proyecto, el ingeniero Rolando Guzmán por el acompañamiento durante la elaboración del trabajo de grado.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO General .....	15
1.2 OBJETIVOS Específicos .....	15
2. MARCO TEÓRICO .....	16
2.1 MATERIALES COMPUESTOS .....	17
2.1.1 Materiales Aislantes.....	17
2.2 ACÚSTICA .....	18
2.2.1 Impedancia acústica.....	18
2.2.2 Admitancia acústica.....	18
2.2.3 El sonido.....	18
2.2.3.1 Generación y propagación del sonido.....	19
2.2.4 Generadores de señal .....	20
2.2.4.1 Ruido blanco.....	20
2.2.4.2 Ruido rosa .....	21
2.2.4.3 Ruido marrón .....	22
2.2.5 Reflexión.....	23
2.2.5.1 Reflexión regular.....	23
2.2.5.2 Reflexión irregular.....	23
2.3 ONDAS MECÁNICAS .....	23

2.3.1 Onda transversal.....	24
2.3.2 Onda longitudinal.....	24
2.3.2 Longitud de onda.....	24
2.4 TUBO DE IMPEDANCIA .....	24
2.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	25
3. METODOLOGÍA.....	26
3.1 FUNDAMENTOS.....	26
3.2 EQUIPO QUE COMPONE EL TUBO DE IMPEDANCIA.....	27
3.2.1 El tubo de impedancia .....	28
3.2.2 Micrófonos .....	28
3.2.3 Porta Muestras.....	30
3.2.4 Altavoz .....	30
3.2.5 Equipo del procesado de señal.....	31
3.2.6 Generador de Señal.....	31
3.3. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA.....	31
3.3.1 Especificación del plano de referencia.....	31
3.3.2 Determinación de la velocidad del sonido, la longitud de onda y la impedancia característica. ....	32
3.3.3. Rango de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia. ....	33
3.3.4 Selección de la amplitud de señal.....	34
3.3.5 Corrección por desajuste de los micrófonos. ....	34
3.3.6 Determinación de la función de transferencia entre las dos ubicaciones. ....	37

3.3.7 Determinación del coeficiente de reflexión. ....	38
3.3.8 Determinación del coeficiente de absorción acústica .....	40
3.3.9 determinación de la impedancia acústica específica. ....	40
4. PARÁMETROS DE DISEÑO .....	41
4.1 Elementos empleados .....	41
4.2 Determinación del rango de frecuencia .....	44
4.3 Verificación de los requisitos de instrumentación.....	46
4.4 Montaje de prueba.....	48
4.5. Elaboración de la muestra.....	49
4.5.1 Troqueladora.....	49
4.5.2 Muestra de ensayo .....	50
5. Análisis de resultado .....	52
5.1 Construcción del tubo.....	52
5.2 Análisis de resultado del coeficiente de absorción .....	53
5.3 Comparación con datos reportados en la literatura .....	57
6. conclusiones .....	59
7. REFERENCIAS .....	61

## ILUSTRACIONES

<b>ILUSTRACIÓN 1. ZONA DE COMPRESIÓN Y DILATACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE AIRE EN LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA.....</b>	<b>19</b>
<b>ILUSTRACIÓN 2. REPRESENTACIÓN DE FRECUENCIA DE UN RUIDO EN ESCALA LINEAL .....</b>	<b>20</b>
<b>ILUSTRACIÓN 3. REPRESENTACIÓN FRECUENCIAL DE UN RUIDO ROSA EN BANDAS DE OCTAVAS .....</b>	<b>21</b>
<b>ILUSTRACIÓN 4. REPRESENTACIÓN FRECUENCIAL EN ESCALA LINEAL (IZQUIERDA) Y LOGARÍTMICA (DERECHA) DE UN RUIDO MARRÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>ILUSTRACIÓN 5. COMPONENTES QUE HACEN PARTE DEL EQUIPO.....</b>	<b>27</b>
<b>ILUSTRACIÓN 6. POSICIÓN DE LOS MICRÓFONOS .....</b>	<b>30</b>
<b>ILUSTRACIÓN 7. MICRÓFONO .....</b>	<b>32</b>
<b>ILUSTRACIÓN 8. CONFIGURACIÓN PREDETERMINADA.....</b>	<b>35</b>
<b>ILUSTRACIÓN 9. CONFIGURACIÓN PREDETERMINADA.....</b>	<b>36</b>
<b>ILUSTRACIÓN 10. MICRÓFONO .....</b>	<b>42</b>
<b>ILUSTRACIÓN 11. ALTAVOZ .....</b>	<b>43</b>
<b>ILUSTRACIÓN 12. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....</b>	<b>43</b>
<b>ILUSTRACIÓN 13. MONTURA TUBO DE IMPEDANCIA .....</b>	<b>44</b>
<b>ILUSTRACIÓN 14. CONFIGURACIÓN DEL MONTAJE. ....</b>	<b>48</b>
<b>ILUSTRACIÓN 15. TROQUELADORA.....</b>	<b>49</b>
<b>ILUSTRACIÓN 16. ESPÉCIMEN DE PRUEBA.....</b>	<b>50</b>
<b>ILUSTRACIÓN 17. ACOUPLE DEL PORTAMUESTRA. ....</b>	<b>51</b>

## GLOSARIO

**ABSORBENTE ACÚSTICO:** Dispositivo o medio con absorción acústica notable.

**ABSORCIÓN ACÚSTICA:** Acción y efecto de absorber energía de un campo acústico por el medio de propagación, por dispositivos, objetos y obstáculos o por las superficies límites del campo acústico.

**ADMITANCIA:** Inversa de la impedancia de una naturaleza especificada (UNE 21302-801:2001).

**ADMITANCIA ACÚSTICA:** inversa a la impedancia acústica (UNE 21302-801:2001).

**ALTAVOZ:** Transductor que permite obtener oscilaciones acústicas a partir de señales eléctricas y diseñado para radiar energía acústica al espacio circundante (UNE 21301-801:2001). El término *altavoz* se aplica tanto al altavoz propiamente dicho, como al altavoz montado en una caja acústica.

**BANDA DE OCTAVA:** Intervalo o banda de frecuencia en la que el cociente entre las frecuencias límite superior e inferior es igual al cociente de octava elevado a un tercio (UNE EN 61260:1997).

**CÁMARA REVERBERANTE:** Recinto aislado del ruido exterior, con superficies internas muy reflectantes de tal manera que se consiga un tiempo de reverberación elevado en un amplio margen de frecuencias y especialmente diseñado para conseguir en su interior un campo acústico suficientemente difuso (UNE-EN ISO 354:2004). Las cámaras reverberantes se utilizan en particular para la medida de los coeficientes de absorción de materiales y de la potencia acústica de las fuentes sonoras.

**IMPEDANCIA:** A una frecuencia determinada, cociente entre una magnitud de campo dinámico (tal como fuerza o presión acústica) y una magnitud de campo cinemático (y tal como velocidad de una partícula), o cociente entre una tensión y una corriente (UNE 21302-801:2001).

**IMPEDANCIA ACÚSTICA:** En una superficie especificada, cociente entre la presión acústica y el flujo de velocidad a través de dicha superficie (UNE 82100-7: 1996). Generalmente es una magnitud compleja, con parte real e imaginaria.

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO DE IMPEDANCIA BASADO EN LA NORMA ISO 10534-2:2001 PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA PARA MATERIALES AISLANTES.

**AUTOR(ES):** DIEGO JAVIER CRIADO PALLARES  
WILBER FRANCO CASTILLEJO

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** ROLANDO ENRIQUE GUZMÁN LÓPEZ

### RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de grado es diseñar y construir un tubo de impedancia acústica para determinar el valor del coeficiente de absorción acústica de materiales aislantes, según la norma UNE-ISO 10534-2:2001 "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia". En primera instancia se estudiaron los fundamentos teóricos relacionados con los parámetros de diseño y posteriormente se aplicaron en la construcción del tubo de impedancia acústica, el cual fue construido con los materiales disponibles en el mercado industrial de la ciudad de Bucaramanga. Como segunda instancia, se procedió a seguir los pasos de la norma UNE-ISO 10534-2-2001, para el cálculo del coeficiente de absorción acústica del material de prueba, por el método de la función de transferencia. Se instaló el tubo de impedancia en el laboratorio de vibraciones de la universidad, para realizar las pruebas de funcionamiento y posteriormente el análisis digital con los softwares para el cálculo del coeficiente de absorción acústica del material de prueba.

### PALABRAS CLAVE:

coeficiente de absorción, tubo de impedancia, función de transferencia.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN IMPEDANCE PIPE BASED ON ISO 10534-2: 2001 FOR THE DETERMINATION OF THE ACOUSTIC ABSORPTION COEFFICIENT FOR INSULATING MATERIALS.

**AUTHOR(S):** DIEGO JAVIER CRIADO PALLARES  
WILBER FRANCO CASTILLEJO

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** ROLANDO ENRIQUE GUZMÁN LÓPEZ

### **ABSTRACT**

The objective of the present degree is to design and build an acoustic impedance tube to determine the value of the coefficient of sound absorption of insulating materials, according to standard UNE-ISO 10534-2:2001 "determination of the coefficient of absorption acoustic and acoustic impedance in impedance tubes. Part 2: Method of transfer function". The theoretical bases of the design parameters were studied in the first instance and subsequently applied in the construction of acoustic impedance tube, which was built with the materials available in the industrial market of the City of Bucaramanga. As a second instance, proceeded to the steps of the standard UNE-ISO 10534-2-2001, stop the calculation of the sound absorption coefficient of the test material, by the method of transfer function. Impedance tube was installed in the laboratory of vibration of the University, to perform the operation and subsequently tests digital analysis with the software for the calculation of the coefficient of sound absorption of the test material.

### **KEYWORDS:**

absorption coefficient, impedance tube, transfer function

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## INTRODUCCIÓN

Conocer las propiedades acústicas de los materiales es de gran importancia en la actualidad debido al confort que presenta un material al absorber o aislar el ruido. Para caracterizar los materiales existen diversos métodos, pero uno de los más sencillos y prácticos a la hora de realizar dicho estudio es el de la norma BS EN ISO 10534-2-2001 parte 2: método de función de transferencia, donde se puede conocer el coeficiente de absorción  $\alpha$  para una onda que incide normal a la muestra de estudio.

En el presente trabajo se puede encontrar un breve repaso de conceptos básicos de la acústica, métodos a emplear para la construcción del tubo de impedancia y las ecuaciones que rigen el cálculo para hallar las propiedades acústicas. Así mismo, se generó una curva para ver el comportamiento acústico del material estudiado para validar el funcionamiento de tubo de impedancia comparándolo con otras gráficas encontradas en la literatura.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un tubo de impedancia basado en la norma ISO 10534-2:2001 para la determinación del coeficiente de absorción acústica de materiales aislantes.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar referencias bibliográficas en bases de datos reconocidas, **Indicador:** al menos 3 revistas indexadas, **resultado:** Marco teórico.
- Establecer una metodología de diseño para la construcción de un tubo de impedancia acústica, **Indicador:** norma ISO 10534-2:2001, **Resultado:** parámetros de diseño del equipo.
- Construir el tubo de impedancia acústica según los parámetros de diseño. **Indicador:** norma ISO 10534-2:2001, **Resultado:** Equipo de medición acústica para materiales aislantes.
- Determinar el coeficiente de absorción acústica de un material aislante, **Indicador:** Comparación con datos reportados en la literatura, **Resultado:** coeficiente de absorción acústica del material aislante seleccionado.

## 2. MARCO TEÓRICO

Entre los diferentes métodos existentes para medir el coeficiente de absorción de sonidos de algunos materiales, hay tres existentes que se han utilizado para hallar las propiedades, la cuales son: *el método de absorción de sonido en una sala de reverberación* de acuerdo a el método especificado en la norma ISO 354; Teniendo en cuenta que la reverberación es el fenómeno de reflexión acústica producido en un lugar, cuando el frente de onda (que tiene forma de circunferencia concéntrica) o campo directo, incide contra los elementos sólidos del lugar, es decir: techo, paredes y suelo; siendo de este modo el grupo de reflexiones el campo reverberante. Y *los métodos que se elaboran con un tubo de impedancia* que son la norma ISO 10534-1 y 10534-4:2001, que, aunque utilizan el mismo sistema para hallar las propiedades acústicas de los materiales (tubo de impedancia) sus técnicas de medición son diferentes. [1]

Respecto a la forma para hallar el coeficiente de absorción acústica por un tubo de impedancia, existen dos métodos a emplear para hallar el coeficiente de absorción acústica por un tubo de impedancia, tales como el método de rango de ondas estacionarias y el método de la función de transferencia; los cuales determinan el coeficiente de absorción para incidencia normal al material, pese a ejercer un procedimiento distinto respectivamente.

El método de función de transferencia, siendo un modelo matemático basado en un cociente relacionado la respuesta de un sistema y genera ondas planas emitidas por un altavoz que emite señales aleatorias o pseudo-aleatorias que incide en la muestra y la descomposición del campo de interferencia es lograda mediante dos micrófonos fijos localizados cerca de la muestra.

El método de ondas estacionarias emplea ondas sinusoidales que incide en la muestra y se refleja originando un sistema de ondas estacionarias en el tubo. Esto ocurre cuando la onda incidente y reflejada se superponen generando una onda que es media en sus puntos máximos y mínimos de presión.

El método de la cámara de reverberación requiere espacios muy grandes para realizar las medias lo cual, hace ciertamente, que su construcción sea muy tediosa.

## **2.1 MATERIALES COMPUESTOS**

Los materiales compuestos es la formación de dos o más materiales. La finalidad de un material compuesto es mejorar las propiedades que no se consiguen en un material individual con el fin de hacerlo más resistentes a los esfuerzos, altas temperaturas, corrosión, más ligeros, etc. [2,3]

2.1.1 Materiales Aislantes. Son materiales que no permiten el paso del ruido, en su defecto lo reflejan. En sus características se encuentran que son: rígidos, compactos, densos y no porosos.

## 2.2 ACÚSTICA

La acústica es el estudio detallado de las ondas sonoras que se propagan por a través de una materia, ya sea líquido, sólido o gaseoso como el aire. Es definida como la ciencia que trata los diversos comportamientos del sonido como: producción, control, transmisión, recepción y los efectos. Las ondas sonoras se producen cuando las oscilaciones son convertidas en un tipo de onda como las ondas mecánicas que se propagan a través de un medio. En este estudio se basa en las ondas que se propagan en el aire. [4]

2.2.1 Impedancia acústica. Así como la impedancia eléctrica, la impedancia acústica es una resistencia, en este caso, la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este, y es definida como la presión sonora sobre la velocidad de las partículas, donde  $z$  es la impedancia acústica,  $p$  es la presión sonora y  $v$  es la velocidad de las partículas. [5]

$$Z = \frac{p}{v}$$

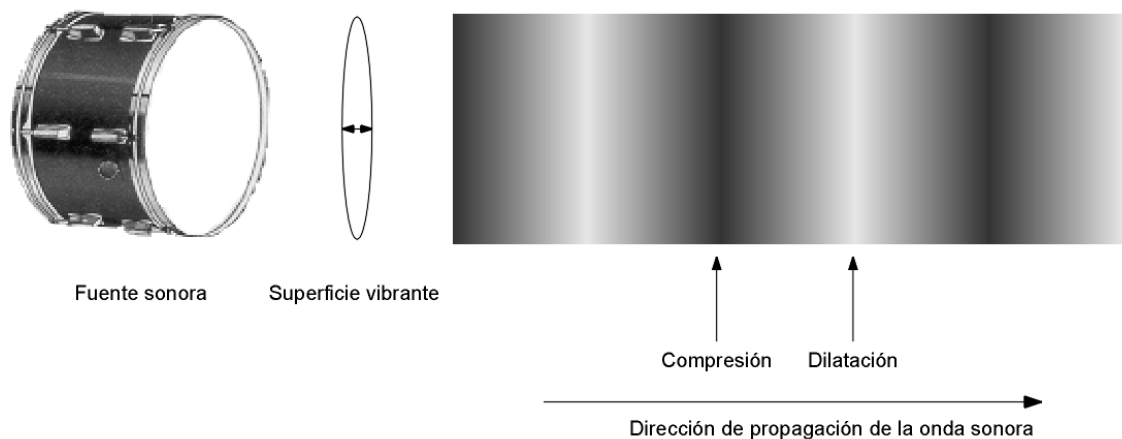
2.2.2 Admitancia acústica. Si bien la impedancia acústica es la resistencia que opone un medio a las ondas acústicas, la admitancia facilita el paso a través de ella. La admitancia es la inversa de la impedancia específica.

2.2.3 El sonido. El sonido es la perturbación de una partícula en un medio, generalmente ondas mecánicas y estas alteran su estado de reposo para entrar en vibración e interactuar. Esta genera un cambio de presión detectada por el oído humano debido a un movimiento vibratorio que se transmite por un medio en forma de ondas. la capacidad del oído humano para percibir sonidos se encuentra entre 20 Hz y 20.000 Hz. [7]

2.2.3.1 Generación y propagación del sonido. El elemento generador de sonido se le denomina fuente sonora (tambor, cuerda de un violín, cuerdas vocales, etc.). El sonido se genera cuando dichas fuentes entran en vibración. Esta vibración es transmitida a las partículas de aire que se encuentran alrededor y estas a su vez las transmiten a nuevas partículas contiguas.

Si se considera como fuente sonora un tambor, por ejemplo, un golpe sobre su membrana provoca una oscilación. Cuando la membrana se desplaza hacia afuera, las partículas de aire cercanas a la superficie se acumulan creando así una zona de compresión, mientras que en el caso contrario las partículas se separan generando una zona de dilatación, (ver figura).

**Ilustración 1.** Zona de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de la onda.

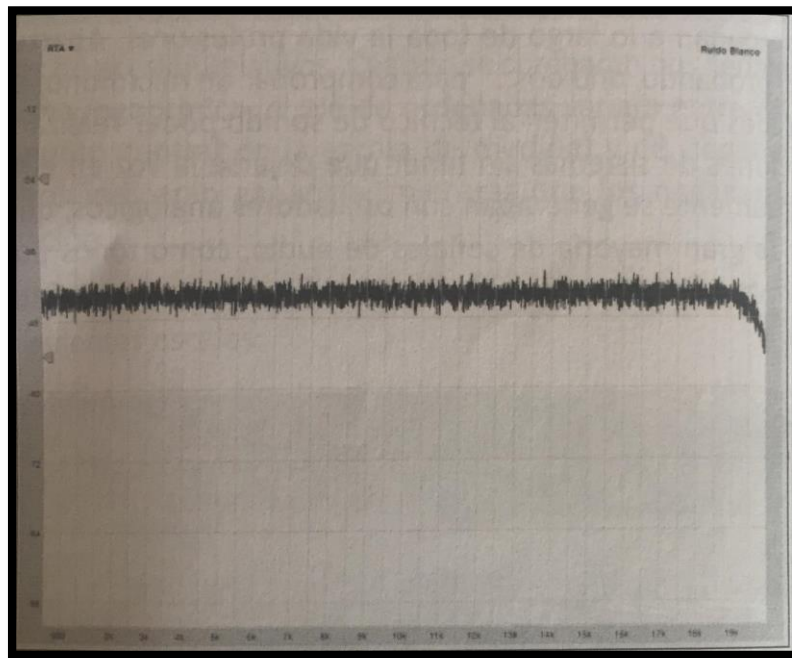


Fuente: CARRIÓN I, Antoni. Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora. [Libro Digital]. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona. Edicions de la Universitat Politecnica de Catalunya, SL. 1998. P.420. [Consultado: 20 de febrero de 2019]. Disponible en internet: <https://arqlemus.files.wordpress.com/2014/04/disec3b1o-acc3bastico-de-espacios-arquitectc3b3nicos.pdf>.

2.2.4 Generadores de señal. Existen varios tipos de señales que permiten realizar medidas y comprobaciones de sistemas sin tener que dejarse la voz en ellos. Estas señales permiten reproducir la gran mayoría de señales de audio, como tonos puros, ondas cuadradas o triangulares, permitiendo modificar tanto su amplitud como su frecuencia. Dentro de los principales tipos de ruidos sobresalen el ruido blanco, el rosa y el marrón.

2.2.4.1 Ruido blanco. El ruido blanco es una señal aleatoria que contiene la misma potencia por unidad de frecuencia, es decir que por hercio de margen audible proporciona el mismo nivel. En un eje lineal el ruido blanco se ve como una línea recta a lo largo de todo el eje de frecuencias, como se observa en la imagen.

**Ilustración 2.** Representación de frecuencia de un ruido en escala lineal

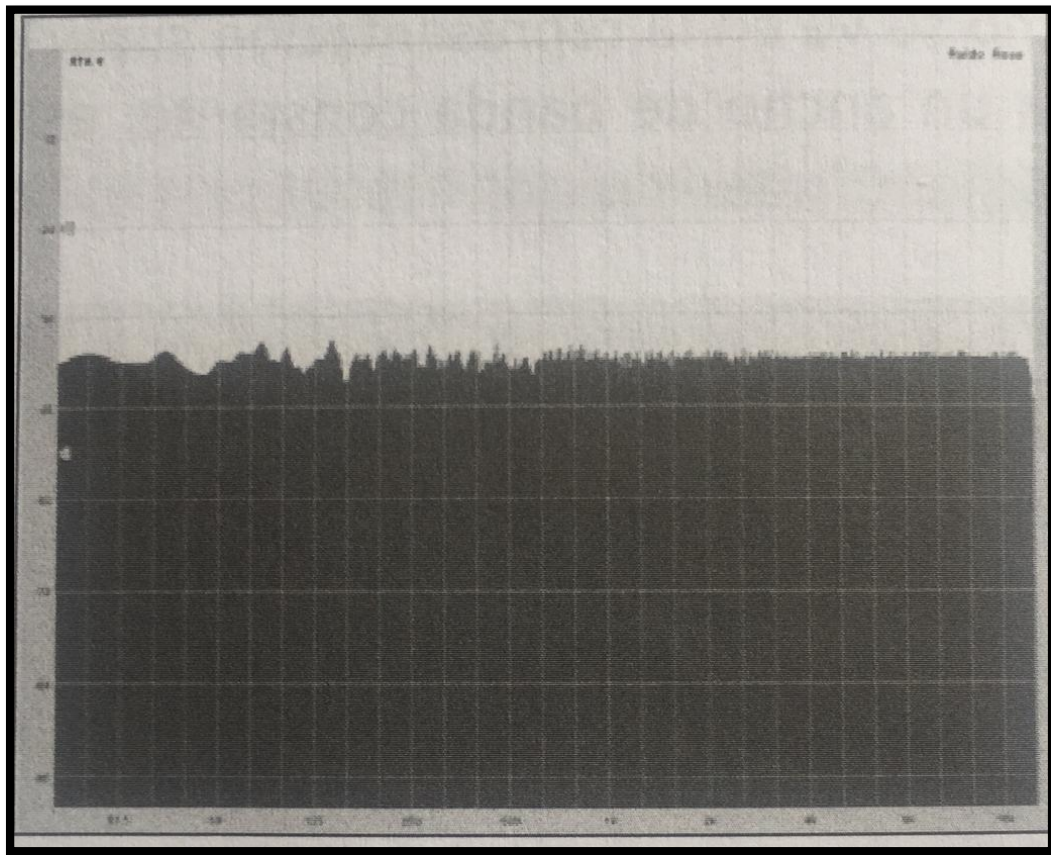


Fuente: Digón –Ferrer, 2014. p.50.

En el caso que se observe con un eje por bandas de octavas, en frecuencia, cada vez que se aumenta una octava, se obtiene el doble de frecuencia.

2.2.4.2 Ruido rosa. A diferencia del blanco, se caracteriza por tener la misma energía por bandas de octava. Por lo tanto, un ruido rosa, se excita con la misma energía todas las bandas de frecuencia. Como se observa en la figura, se verá como una señal plana, ya que cada banda de frecuencia contiene la misma energía.

**Ilustración 3.** Representación frecuencial de un ruido rosa en bandas de octavas

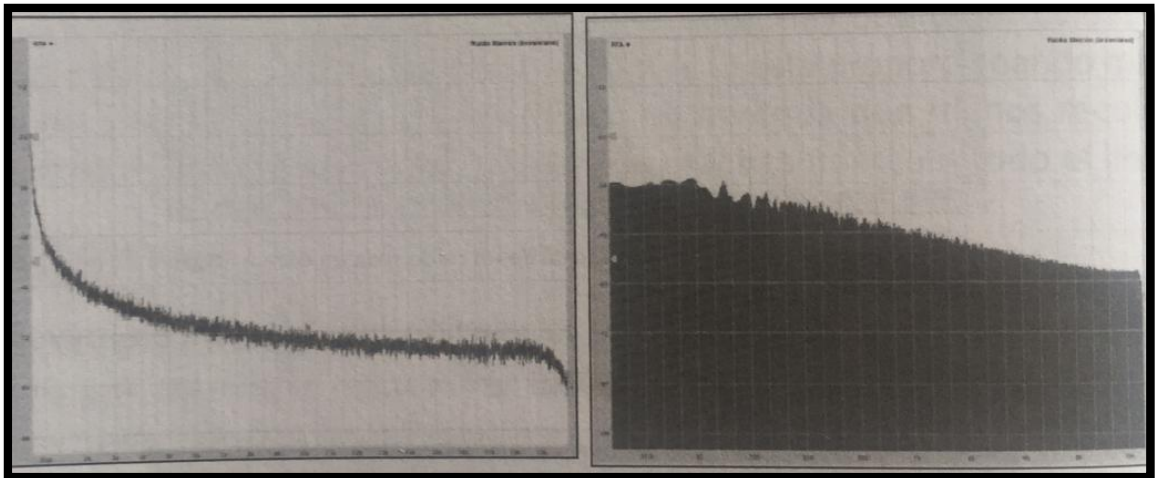


Fuente: Digón – Ferrer, 2014. p.52.

El ruido rosa es más grave que el ruido blanco o, mejor dicho, es menos agudo y es uno de los que más se utiliza en el análisis de sistemas de audio, ya que, al tener una respuesta plana en una representación por bandas de octavas, se visualiza de manera muy rápida lo que está ocurriendo en una banda de frecuencias determinadas.

2.2.4.3 Ruido marrón. Este ruido tiene como característica principal que su nivel tiene una pendiente de atenuación de  $-6\text{dB}$  por octava. Por lo que en un eje lineal tendría una pendiente de  $-6\text{dB}$  por octava y en bandas de octava tendría una pendiente de  $-3\text{dB}$  por octava.

**Ilustración 4.** Representación frecuencial en escala lineal (izquierda) y logarítmica (derecha) de un ruido marrón.



Fuente: Digón – Ferrer, 2014. p.54.

El ruido marrón es el más grave de los tres y no suele tener gran utilidad en el ámbito técnico de sistemas, si bien puede ser utilizado en otros campos como la producción musical.

2.2.5 Reflexión. Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, esta cambia de dirección, bien sea regresando o cambiando de trayectoria según el ángulo de incidencia.

Cuando una onda incidente es reflejada por una superficie rugosa, esa onda no se refleja de manera coherente, sino que se dispersa en todas las direcciones, y para que una onda sea reflejada, la superficie debe ser lo suficientemente grande, en comparación de la longitud de onda incidente, de lo contrario se genera un fenómeno llamado difracción. [7]

2.2.5.1 Reflexión regular. Es la que ocurre cuando una onda incidente incide sobre una superficie plana lisa, de tal forma que las ondas incidentes se reflejan de forma paralela.

2.2.5.2 Reflexión irregular. Reflexión irregular o difusa, es la que ocurre cuando una onda incidente incide sobre una superficie la cual presenta rugosidades, como consecuencia, la onda es reflejada, no de forma paralela a la onda incidente, sino que se refleja en diferentes direcciones.

## **2.3 ONDAS MECÁNICAS**

Las ondas mecánicas son perturbaciones que viajan a través de un material o sustancia por el cual la onda se desplaza. Las partículas sufren desplazamientos conforme la onda se está desplazando dependiendo la naturaleza de la onda. [6]

2.3.1 Onda transversal. Si la partícula se desplaza perpendicularmente en la dirección en que se está propagando a la onda, es una onda transversal. [6]

2.3.2 Onda longitudinal. Si los movimientos de las partículas son en dirección de la propagación de la onda, es decir, un vaivén, se trata de una onda longitudinal. [6]

2.3.2 Longitud de onda. Las velocidades de propagación de una onda dependen de la naturaleza de la onda y del medio en el que se propagan. La velocidad de la onda determina el tamaño físico de la onda, llamado longitud de onda.

El tamaño físico de la longitud de la onda se puede determinar a través de la siguiente ecuación:

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

Donde,

c, es la velocidad del sonido en m/s;

f, es la frecuencia en Hertz.

## **2.4 TUBO DE IMPEDANCIA**

Es un sistema que estudia el comportamiento acústico de los materiales en función de la frecuencia con ondas que inciden de forma normal al material de ensayo.

Sus componentes son:

Fuente de sonido (altavoz de membrana), es el que emite una onda con incidencia normal, dos Micrófonos que son los que reciben la señal de la onda para la adquisición de la toma de datos, un generador de señal, un porta muestras donde va localizado el material a ensayar y un sistema de análisis de frecuencia. [1,9]

## **2.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA**

Una función de transferencia es la transformada de Laplace y es un modelo matemático que se usa para resolver problemas de ecuaciones diferenciales. Se define como el cociente entre dos señales: una señal de salida y una señal de entrada, suponiendo condiciones iniciales nulas. Estas operaciones matemáticas no necesitan un cálculo extenso de ecuaciones diferenciales, sino que se obtiene en una sola operación matemática. Esta ecuación diferencial convierte una ecuación diferencial en una ecuación algebraica, la cual hace más sencillo el cálculo porque estas son manipuladas con reglas básicas de álgebra. [8]

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 FUNDAMENTOS

El tubo de impedancia debe ser un tubo recto, rígido, liso y hermético donde la muestra de prueba está ubicada en un extremo y la fuente de sonido está ubicada en el otro extremo generando ondas planas mediante una señal aleatoria, pseudo-aleatoria o chirridos que se desplazan a través del tubo hasta llegar a la muestra. Las presiones de sonido son medidas en dos ubicaciones fijas cercanas a la muestra. Se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales mediante el método de los dos micrófonos para calcular el factor de reflexión compleja de incidencia normal, el coeficiente de absorción de incidencia normal.

Para realizar la medición existen dos métodos:

a) Método de los dos micrófonos: Este método utiliza dos micrófonos en posiciones fijas, el cual requiere un procedimiento de corrección previo o simultáneo al ensayo para minimizar las diferencias de amplitud y fase entre los micrófonos.

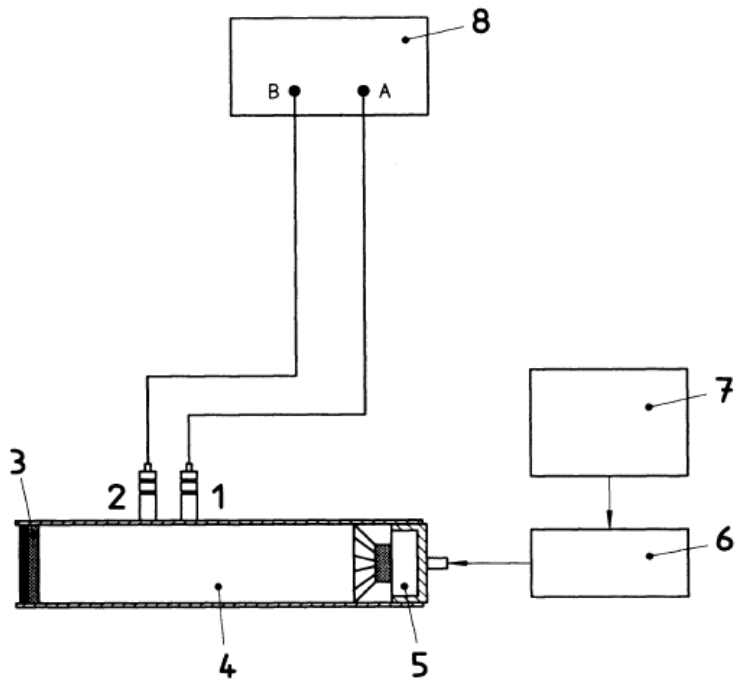
b) Método de un micrófono: Este método requiere generación y procesamiento de señales particulares que puede requerir más tiempo. Sin embargo, elimina las diferencias de fase entre los dos micrófonos y permite posiciones óptimas para cualquier frecuencia.

### 3.2 EQUIPO QUE COMPONE EL TUBO DE IMPEDANCIA

Los componentes necesarios que implementa el tubo de impedancia según la norma son:

- El tubo de impedancia.
- Micrófonos
- Portamuestras
- Altavoz
- Equipo de procesamiento de señal
- Generador de señal

**Ilustración 5.** Componentes que hacen parte del equipo.



Fuente: BN EN ISO 10534-2-2001. p.7.

1. Micrófono A
2. Micrófono B
3. Muestra de ensayo
4. Tubo de impedancia
5. Altavoz
6. Amplificador
7. Generador de señal
8. Sistema de análisis de frecuencia

3.2.1 El tubo de impedancia. El tubo de impedancia debe ser un tubo recto, rígido, y hermético con una sección transversal uniforme con paredes lisas y no porosas, sin orificios o hendiduras (excepto en las posiciones del micrófono). Las paredes deben ser lo suficientemente pesadas y macizas para que no entre en vibración con la señal emitida por la fuente de sonido y no presenten resonancias de vibración con el rango de frecuencia de trabajo. Se recomienda secciones transversales circulares o rectangulares. Para paredes metálicas, es recomendable que el espesor sea aproximadamente el 5% del diámetro para tubos circulares, y para rectangulares que sea aproximadamente el 10% de la sección transversal. El tubo debe ser lo suficientemente largo como para causar el desarrollo de ondas planas entre la fuente de sonido y la muestra de prueba.

3.2.2 Micrófonos. Se deben utilizar micrófonos de tipo idéntico en cada ubicación. Cuando se usan micrófonos de pared lateral, el diámetro de los micrófonos debe ser pequeño en comparación con  $c_0/f_u$ . Además, se recomienda que los diámetros de los micrófonos sean inferiores al 20% del espacio entre ellos.

3.2.2.1 Posición de los micrófonos. Cuando se usan micrófonos de pared lateral, cada micrófono debe estar a ras con la superficie del interior del tubo. El orificio debe ser pequeño y debe ser idéntico para ambos montajes de micrófono. La ubicación de los micrófonos debe cumplir con las especificaciones descritas en la norma ISO 0534-2:2001 para su correcta precisión en los cálculos. Los micrófonos se deben situar en el campo de ondas planas.

El altavoz produce ondas planas, además de ondas no planas que desaparecen a una distancia aproximadamente o igual a tres veces el diámetro del tubo. Por lo tanto, se recomienda que los micrófonos no estén ubicados más cerca de la fuente de lo sugerido anteriormente, pero, en cualquier caso, no más cerca de un diámetro.

Las muestras de prueba también causan distorsiones de proximidad al campo acústico y se recomienda que la distancia mínima entre el micrófono y la muestra, dependiendo del tipo de muestra, sea:  $1/2 d$  para muestras sin elementos de estructuras,  $1 d$  para muestras de estructura semilatural y  $2 d$  para muestras fuertemente asimétricas ( $d$  es el diámetro interno).

En la figura se muestra un ejemplo de la posición de uno de los micrófonos, su montura y sellado. En la figura 3 se ve una vista panorámica de la posición con respecto a la muestra y el altavoz.

**Ilustración 6.** Posición de los micrófonos

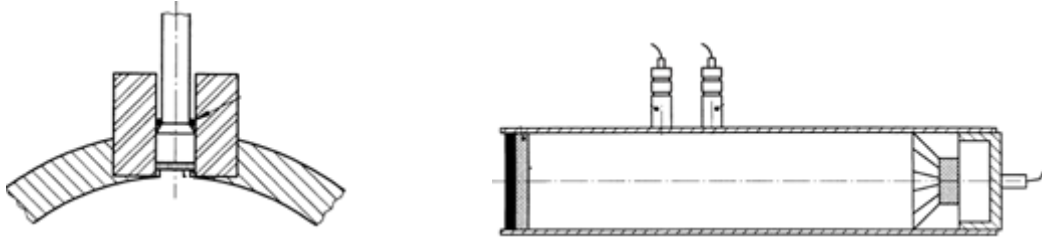


Figura A

Figura B

Fuente: BS EN ISO 10534-2-2001. p.5.

3.2.3 Porta Muestras. El soporte de muestras puede ser una parte integrada del tubo de impedancia o una unidad separada pero que está firmemente sujeta al tubo. Si el portamuestras es una unidad separada, su tolerancia debe ser del  $\pm 0,2\%$  respecto al tubo. Para tubos circulares, el portamuestras debe estar fuertemente sujeto al tubo sin juntas elásticas (se recomienda vaselina para el sellado). La placa posterior del portamuestras debe ser rígida y debe fijarse muy bien al tubo de tal manera que la montura quede hermético al tubo, ya que sirve como terminación rígida para muchas mediciones.

3.2.4 Altavoz. El altavoz debe estar ubicado en el extremo opuesto del portamuestras. Esta puede ir de forma coaxial al tubo de impedancia, inclinado o conectado al tubo por medio de un codo. El altavoz debe cubrir, por lo menos,  $2/3$  del área de la sección transversal del tubo de impedancia. El altavoz debe estar dentro de una caja aislante para así evitar la transmisión de flancos de aire a los micrófonos. Debe aplicarse un material elástico de aislamiento de vibración entre el tubo de impedancia y el montaje del altavoz, para así evitar la excitación acústica del tubo.

3.2.5 Equipo del procesado de señal. El sistema para el procesamiento de señal está formado por: un generador de señal, un amplificador y un sistema de análisis de dos canales que funcione aplicando la transformada rápida de Fourier. El sistema debe medir la presión acústica en las dos posiciones de los micrófonos y calcular la función de transferencia  $H_{12}$  entre ellos. Se requiere que el rango dinámico del analizador sea superior a 65 dB.

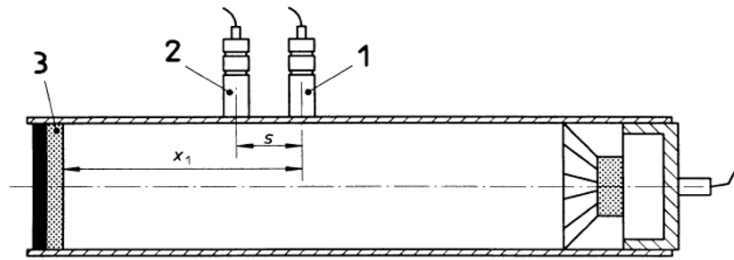
### 3.2.6 Generador de Señal.

El generador de señal debe poder generar una señal estacionaria con una densidad espectral plana en el rango de frecuencia de interés. La señal de excitación del generador puede ser aleatoria, pseudo-aleatoria o pseudo-aleatoria periódicas, o excitación de chirridos, según sea necesario.

## 3.3. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

3.3.1 Especificación del plano de referencia. Después haber montado la muestra de prueba, se prosigue a especificar el plano de referencia ( $x=0$ ), que, por lo general, coincide con la muestra de prueba. Cabe destacar que, si la superficie de la muestra de prueba presenta altos relieves o estructura lateral, el plano de referencia se colocará a una cierta distancia de la muestra. Así mismo, la distancia entre la muestra (plano de referencia) y el micrófono más cercano debe cumplir con lo descrito en “micrófono”.

Ilustración 7. Micrófono



Fuente: BS EN ISO 105534-2-2001. p.5

1. MICRÓFONO A
2. MICRÓFONO B
3. ESPÉCIMEN DE PRUEBA

3.3.2 Determinación de la velocidad del sonido, la longitud de onda y la impedancia característica. Para empezar a medir, es necesario conocer la velocidad del sonido  $c_0$  dentro del tubo y la longitud de onda a las frecuencias de medición.

Para conocer la velocidad del sonido en el interior del tubo, solo basta con conocer la temperatura y reemplazarla en la ecuación 1.

$$c_0 = 343,2\sqrt{T/293} \text{ m/s} \quad (3.1)$$

Donde T es la temperatura en grados Kelvin.

La longitud de onda se expresa como:

$$\lambda_0 = c_0/f \quad (3.2)$$

La densidad del aire puede calcularse de:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{P_a T_0}{P_0 T} \quad (3.3)$$

Donde

$T$  es la temperatura, en Kelvin.

$P_a$  es la presión atmosférica, en kilopascales.

$$T_0 = 293 \text{ K}$$

$$P_0 = 101,325 \text{ kPa}$$

$$\rho_0 = 1,186 \text{ kg/m}^3$$

La impedancia característica es el producto de  $\rho c_0$

3.3.3. Rango de frecuencia de trabajo del tubo de impedancia. El rango de frecuencia de trabajo es:

$$f_1 < f < f_u$$

Donde

$f_1$  es la frecuencia de trabajo más baja del tubo de impedancia.

$f$  es la frecuencia de operación.

$f_u$  es la frecuencia de trabajo más alta del tubo de impedancia.

La frecuencia de trabajo  $f_1$  se limita por la exactitud del equipo de procesamiento de señal y  $f_u$  es elegido para evitar la ocurrencia de propagación de ondas en modo no planas.

La condición para  $f_u$  es:

$$d < 0,58\lambda_u ; f_u \cdot d < 0,58c_0 \tag{3.4}$$

Esta ecuación se da para tubos circulares, donde:

$d$  es el diámetro en metros.

$f_u$  en Hertz.

$\lambda_u$  es la longitud de onda.

$c_0$  es la velocidad del sonido dado de metros por segundos, que corresponde a la ecuación 1.

Para el espaciado entre los micrófonos, se da la siguiente condición:

$$f_u \cdot s < 0,45c_0 \quad (3.5)$$

El límite de frecuencia inferior depende del espaciado entre los micrófonos y la exactitud del sistema de análisis, pero, el espaciado entre los micrófonos no debería exceder el 5% de la longitud de onda correspondiente a la frecuencia más baja de interés, siempre y cuando cumpla con los requisitos de la ecuación anterior. Un mayor espaciado entre los micrófonos mejoraría la exactitud de las mediciones.

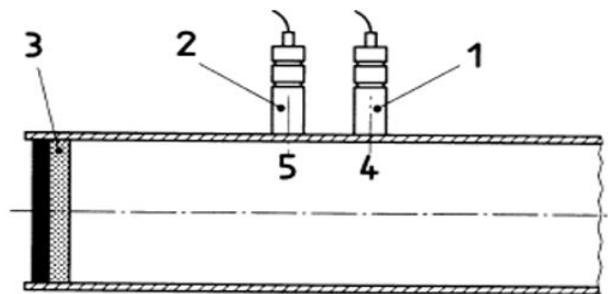
3.3.4 Selección de la amplitud de señal. La amplitud de la señal debe ser, por lo menos, 10 dB mayor que el ruido de fondo en todas las frecuencias de interés, medido en las ubicaciones de los micrófonos.

3.3.5 Corrección por desajuste de los micrófonos. Cuando se opta por utilizar la técnica de los dos micrófonos, va a existir una discrepancia de los canales, lo cual debe ser corregido para obtener los datos de la función de transferencia. Entre las correcciones, existen: mediciones repetidas con los canales intercambiados o, utilizando el procedimiento del factor de calibración. Cabe destacar que un canal se compone de un micrófono, un preamplificador y un canal analizador donde se procesa la señal.

Para realizar ensayos de muestras limitadas, se puede corregir la falta de coincidencia de los micrófonos intercambiando los canales para cada medición. Pero para este caso, se recurre al método de factor de calibración predeterminado. el procedimiento de factor de calibración predeterminado emplea una muestra de calibración especial, y la corrección es válida para todas las mediciones sucesivas. en este procedimiento, se coloca una muestra de absorción especial en el portamuestras del tubo y se prosigue al cálculo de la función de transferencia  $H_{12}^I$  y  $H_{12}^{II}$ .

Para el cálculo de la función de transferencia  $H_{12}^I$  se coloca los micrófonos en la configuración I (configuración estándar), y se calcula la función de transferencia  $H_{12}^I$ .

**Ilustración 8.** Configuración predeterminada.



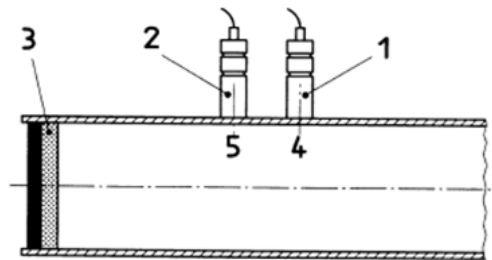
Configuración estándar (configuración I)

Fuente: BS EN ISO 10534-2-2011. p.8.

1. Micrófono A
2. Micrófono B
3. Especimen de prueba
4. Posición 1
5. Posición 2

Una vez obtenido el valor de  $H_{12}^I$ , se intercambia la configuración I a la configuración II donde el micrófono A ubicaría la posición del micrófono B en la configuración I, y viceversa. En la configuración II no se cambia la conexión de micrófono al preamplificador y analizador de señal. En la figura 9 se muestra la configuración II.

**Ilustración 9.** Configuración predeterminada.



Configuración con micrófonos intercambiados (configuración II)

Fuente: BS EN ISO 10534-2-2001. p.8.

1. Micrófono B
2. Micrófono A
3. Espécimen de prueba
4. Posición 1
5. Posición 2

Una vez medida la función de transferencia  $H_{12}^I$  y  $H_{12}^{II}$ , se calcula el factor de calibración  $H_c$  usando la ecuación 6

$$H_c = (H_{12}^I / H_{12}^{II})^{1/2} \quad (3.6)$$

Si el analizador solo mide la función de transferencia en una sola dirección (ejemplo, del micrófono A al B) el cálculo de  $H_c$  se puede medir mediante la siguiente expresión.

$$H_c = (H_{12}^I \cdot H_{21}^{II})^{1/2} \quad (3.7)$$

Para realizar los siguientes ensayos, se colocan los micrófonos en la configuración I (configuración estándar) y se mide la función de transferencia sin corregir  $\hat{H}_{12}$

$$H_{12} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} \quad (3.8)$$

Siendo  $H_{12}$  es la función de transferencia corregida para realizar los ensayos.

3.3.6 Determinación de la función de transferencia entre las dos ubicaciones. La compleja función de transferencia acústica se puede definir de tres maneras:

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i \quad (3.9)$$

$$H_{12} = \frac{S_{22}}{S_{21}} = |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i \quad (3.10)$$

$$H_{12} = \left| \frac{S_{12}}{S_{11}} \cdot \frac{S_{22}}{S_{21}} \right|^{1/2} = H_r + jH_i \quad (3.11)$$

Donde

$H_r$  es la parte real de  $H_{12}$

$H_i$  es la parte imaginaria de  $H_{12}$

$S_{12}$ , espectro cruzado: es el productora  $P_1 \cdot P_2$  determinada a partir de las presiones acústicas complejas  $P_1$  y  $P_2$  en dos posiciones de micrófonos.

$S_{11}$ , auto espectro: es el productora  $P_1 \cdot P_1$  determinada a partir de la presión acústica compleja  $P_1$  en la posición de un solo micrófono.

(Los productos entre las presiones significan el complejo conjugado.)

Normalmente se usa la ecuación (3.9).

La ecuación (3.10) se recomienda para casos donde hay ruido en la entrada.

La ecuación (3.11) se recomienda para casos que involucran ruido en la entrada y salida.

3.3.7 Determinación del coeficiente de reflexión. La ecuación para el cálculo de factor de reflexión en incidencia normal se expresa de la siguiente manera:

$$r = e^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (3.12)$$

Donde

$r_r$  es la componente real

$r_i$  es la componente imaginaria

$x_1$  es la distancia entre la muestra y la ubicación del micrófono más lejano

$\phi_r$  es el ángulo de fase del factor de reflexión de incidencia normal

El método de medición descrito en este trabajo se basa en el hecho de que el factor de reflexión del sonido en incidencia normal  $r$  puede determinarse a partir de la función de transferencia  $H_{12}$  entre dos posiciones de micrófono frente al material ensayado.

Las presiones acústicas de la onda incidente  $P_I$  y la onda reflejada  $P_R$  son, respectivamente:

$$P_I = \hat{P}_I e^{jk_0x} \quad (3.13)$$

$$P_R = \hat{P}_R e^{-jk_0 x} \quad (3.14)$$

Dónde

$\hat{P}_I$  y  $\hat{P}_R$  son los módulos de  $P_I$  y  $P_R$  en el plano de referencia ( $x = 0$ );

$k_0 = k_0'' - k_0'''$  es un número de onda complejo.

Las presiones acústicas  $p_1$  y  $p_2$  en las dos posiciones de micrófono son:

$$P_1 = \hat{P}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{P}_R e^{-jk_0 x_1} \quad (3.15)$$

$$P_2 = \hat{P}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{P}_R e^{-jk_0 x_2} \quad (3.16)$$

Siendo  $x_1$  y  $x_2$  las distancias desde los micrófonos a la muestra.

La función de transferencia para solo una onda incidente  $H_I$  es:

$$H_I = \frac{P_{2I}}{P_{1I}} = e^{-jk_0(x_1 - x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad (3.17)$$

Donde  $s = x_1 - x_2$  que es la separación entre los dos micrófonos.

Así mismo, la función de transferencia para la onda reflejada  $H_R$  es:

$$H_R = \frac{P_{2R}}{P_{1R}} = e^{jk_0(x_1 - x_2)} = e^{jk_0 s} \quad (3.18)$$

La función de transferencia  $H_{12}$  para el campo acústico total se puede obtener utilizando las ecuaciones (3.15) y (3.16) y considerando que  $\hat{P}_R = r\hat{P}_I$

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}} = H_r + jH_i \quad (3.19)$$

Despejando  $r$  de la ecuación 3.19 y utilizando las ecuaciones 3.17 y 3.18 para la que se tiene la ecuación 3.14.

Por lo tanto, un plano de referencia ( $x = 0$ ) a partir de las funciones de transferencia, la distancia  $x_1$  y el número de onda  $k_0$ , incluyendo la constante de atenuación  $k_0''$  se puede determinar el coeficiente de reflexión acústico.

3.3.8 Determinación del coeficiente de absorción acústica. Para el cálculo del coeficiente de absorción acústica de incidencia normal, se obtiene de la siguiente ecuación

$$\alpha = 1 - |r|^2 = r_r^2 - r_i^2 \quad (3.20)$$

3.3.9 determinación de la impedancia acústica específica. Para el cálculo de la relación de impedancia acústica específica

$$Z/\rho c_0 = R/\rho c_0 + jX/\rho c_0 = (1 + r)(1 - r) \quad (3.21)$$

Donde

$R$  Es al componente real

$X$  Es la componente imaginaria

$\rho c_0$  Es la impedancia característica

## 4. PARÁMETROS DE DISEÑO

El diseño y construcción del dispositivo para medir las características acústicas de los materiales, se basó en la norma BS EN ISO 10534-2:2001 donde se describen los métodos de ensayo a utilizar para una correcta medición.

### 4.1 ELEMENTOS EMPLEADOS

A continuación, se muestran los elementos que conforman el tubo de impedancia que se utilizaron para el montaje.

**Tabla 1.** Elementos que conforman tubo de impedancia.

ELEMENTO	MARCA	MODELO
Tubo de acero inoxidable	-	-
Micrófonos	PCB Piezotronics	130D20
Tarjeta de adquisición	National Instruments	Ni USB-9233
Altavoz	THUNDER	UD105-2
Pc	DELL	-

El tubo de impedancia es un tubo de acero inoxidable recto, rígido, sin hendiduras, y completamente liso.

A continuación, se especifican sus características técnicas:

- Longitud: 0,9 m
- Diámetro exterior/interior: 0,0508 m / 0,048 m

- Espesor: 0,0015 m

Distancia del micrófono más cercano a la muestra: 0.0527 m

Distancia del micrófono más alejado de la muestra: 0.106 m.

Distancia entre micrófonos: 0.0535 m.

Los micrófonos son idénticos y van montados a lo largo del tubo cerca de la muestra.

**Ilustración 10.** Micrófono



Fuente: Autores del proyecto.

El altavoz es un altavoz que tiene una potencia de 150W / 300W y un rango de frecuencia de 1,2 kHz hasta 20 kHz.

**Ilustración 11.** Altavoz



Fuente: Autores del proyecto

La tarjeta de adquisición de datos, es de NI (national instrument).

**Ilustración 12.** Tarjeta de adquisición de datos.



Fuente: Autores del proyecto.

En la ilustración 13 se muestra la montura del tubo de impedancia

**Ilustración 13.** Montura Tubo de impedancia



Fuente: Autores del proyecto

Programas empleados para el cálculo del coeficiente de absorción acústica:

- Matlab: Se utilizó para hallar la función de transferencia en los dos micrófonos y coeficiente de absorción acústica.
- LabVIEW: Se utilizó para adquirir los datos de las presiones acústicas de los micrófonos.

## 4.2 DETERMINACIÓN DEL RANGO DE FRECUENCIA

Para calcular el rango de frecuencia, se tomó una temperatura de 22° C para determinar la velocidad del sonido  $c_0$ .

$$c_0 = 443.3\sqrt{295.15/293} \quad (4.22)$$

$$c_0 = 344.557 \text{ m/s}$$

La frecuencia de trabajo más alta  $f_u$  se halla para evitar la ocurrencia de ondas no planas en el interior del tubo, y esta, está relacionada con el diámetro del tubo y la velocidad del sonido (ecuación 4.23).

$$f_u \cdot d < 0,58c_0 \quad (4.23)$$

Despejando  $f_u$  tenemos,

$$f_u < \frac{0,58c_0}{d} \quad (4.24)$$

Remplazado los valores de la ecuación 4.23.

$$f_u < \frac{0.58 \cdot 344.557}{0.0482} = 4146.122 \text{ Hz}$$

5353 Hz es la frecuencia más alta que garantiza la no generación de ondas no planas.

Pero existe otra ecuación donde está involucrada  $f_u$  y que relaciona la distancia entre los micrófonos  $s$ . esta ecuación se debe tener en cuenta, ya que  $f_u$  depende de esta distancia.

$$f_u \cdot s < 0,45c_0 \quad (4.25)$$

Despejando

$$f_u < \frac{0.45 \cdot 344.557}{0.041} = 3781.723 \text{ Hz}$$

Aunque la ecuación M que da un valor de 4146 Hz nos garantiza la propagación de ondas no planas, la ecuación K, donde está involucrada la distancia entre los micrófonos  $s$ , limita el límite de frecuencia superior que es 3781 Hz.

La frecuencia de trabajo más baja  $f_1$  está limitada por, la exactitud del sistema, la distancia entre los micrófonos. Teniendo en cuenta que la distancia entre los micrófonos debería exceder el 5% de la longitud de onda, es decir:

$$s > \frac{5}{100} \lambda_1 \quad (4.26)$$

Como  $\lambda_1 = \frac{c_0}{f_1}$ , para este caso con valores de  $c_0$  y  $f_1$ . Entonces la siguiente ecuación queda.

$$s > \frac{5}{100} \frac{c_0}{f_1} \quad (4.27)$$

Despejando  $f_1$

$$f_1 > \frac{5}{100} \frac{c_0}{s} \quad (4.28)$$

Reemplazando los valores, se halla la frecuencia de trabajo más baja de trabajo.

$$f_1 > \frac{5}{100} \frac{344.557}{0.041} = 420.191 \text{ Hz}$$

Suponiendo una temperatura de 22°C, el Intervalo de frecuencia de trabajo para las especificaciones del tubo dadas es de 420 Hz hasta 3700 Hz.

#### **4.3 VERIFICACIÓN DE LOS REQUISITOS DE INSTRUMENTACIÓN.**

Según la norma BS EN ISO 10534-2:2001: Para paredes metálicas, es recomendable que el espesor sea aproximadamente el 5% del diámetro para tubos circulares. Se optó por trabajar con un tubo de 1.5mm de espesor que es el 4.5% del diámetro del tubo. Ya que adquirir un tubo en el mercado que cumpla con las especificaciones descritas en la norma, hace que el tubo sea de alto costo y, por consiguiente, difícil obtenerlo. Aunque el tubo no cumple con lo requerido en la norma, tiene una aproximación a lo sugerido.

Para micrófonos montados en la pared, es recomendable que los micrófonos no se sitúen a una distancia de tres veces de diámetro del tubo a la fuente, pero en ningún caso a un diámetro de tubo. La distancia del altavoz al primer micrófono es de 8.2m. Tres veces el diámetro del tubo es 0.144 m. la ubicación de los micrófonos cumple con lo establecido en la norma.

Además, se recomienda que los diámetros de los micrófonos sean pequeños en comparación con la relación  $c_0/f_u$ . Para un valor  $c_0 = 344.557$  m/s y  $f_u=3781$  Hz, el resultado es 0.083 m, que es un valor grande comparado con los diámetros de los micrófonos que son de 0.007 m.

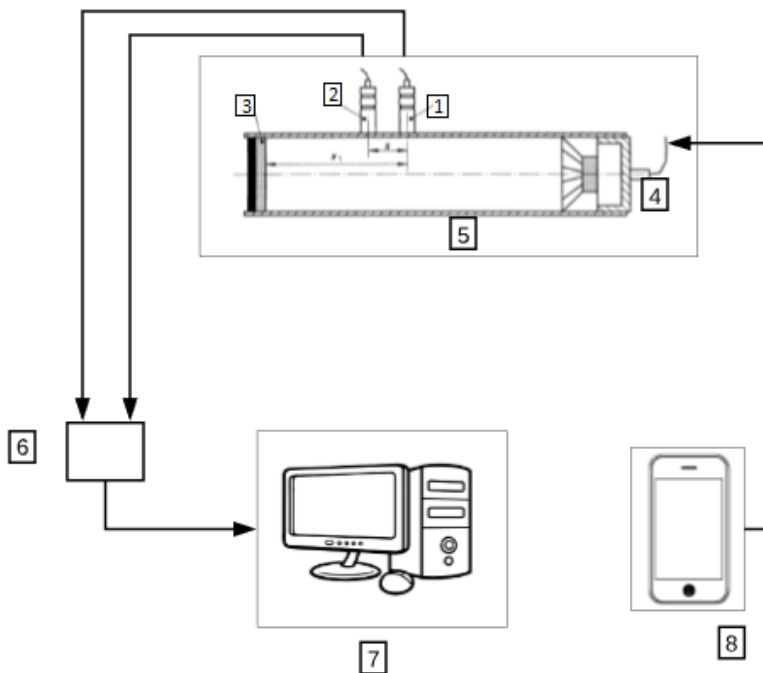
Los diámetros de los micrófonos deben ser inferiores al 20% de la distancia entre ellos. La distancia entre los micrófonos "s" es de 0.036m, comparándolo con los diámetros de los micrófonos, este requisito cumple.

Para muestras sin elemento de estructura, es recomendable 1/2 de diámetro a la distancia de la muestra, 1 diámetro a elementos con estructura semilateral y a 2 diámetros con elementos fuertemente asimétricos. Para este proyecto, la muestra que se empleó no tiene elementos con estructura. La distancia de la muestra al micrófono más cercano es de 0.05225 m. 1/2 de diámetro es 0.024 m, por lo que la ubicación del micrófono más cercano a la muestra cumple con la recomendación.

#### 4.4 MONTAJE DE PRUEBA

Para este montaje los micrófonos A y B se ubicaron en las posiciones de la configuración I (configuración estándar) respectivamente. Estos micrófonos están conectados a la tarjeta de adquisición de datos NI (National Instrument) de dos puertos de entrada. Esta tarjeta está conectada al pc y es operada por un software, en este caso LabVIEW, el cual permite la lectura de las presiones acústicas de los micrófonos. Para hallar la función de transferencia y el coeficiente de absorción acústica se utilizó Matlab. Como dispositivo para la generación de señal se utilizó un teléfono celular.

**Ilustración 14.** Configuración del montaje.



Fuente: Autores del proyecto.

1. Micrófono A
2. Micrófono B
3. Muestra de ensayo
4. Altavoz
5. Tubo de impedancia
6. Tarjeta de adquisición de datos
7. Computador
8. Teléfono Celular

#### **4.5. ELABORACIÓN DE LA MUESTRA.**

4 5.1 Troqueladora. La troqueladora es el dispositivo empleado para sacar las muestras que van ubicadas en el tubo. La troqueladora tiene el diámetro preciso solo para sacar muestras que calcen en el interior del tubo. Para sacar las muestras, se requiere una prensa hidráulica para ejercer la fuerza de tal manera que empuje un cilindro verticalmente para sacar la muestra por la parte inferior. El resorte devuelve el cilindro que empuja el material para sacar la muestra.

**Ilustración 15.** Troqueladora



Fuente: Autores del proyecto.

4.5.2 Muestra de ensayo. La muestra de ensayo es fique y tiene un diámetro de 4.7 cm aproximadamente que va ubicado en el portamuestras del tubo y tiene un espesor de 0.7 cm.

**Ilustración 16.** Espécimen de prueba.



Fuente: Autores del proyecto.

**Ilustración 17.** Acople del portamuestra.



Fuente: Autores del proyecto.

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADO**

En este apartado trata de los análisis sobre la construcción del tubo de impedancia y el resultado obtenido mediante una muestra de prueba para ser comparada con datos reportados en la literatura.

### **5.1 CONSTRUCCIÓN DEL TUBO.**

Si bien es claro, la construcción del tubo siguió las indicaciones descritas en la normal EN ISO 10534-2:2001 “parte 2: método de función de transferencia” para su correcta precisión en el momento de hallar los datos de los materiales a estudio. El tubo de impedancia es usado para hallar los coeficientes de absorción acústica de incidencia normal, a su vez, también puede ser usado para medir la impedancia acústica, admitancia acústica, Como lo indica la norma.

En los elementos que hacen parte del tubo de impedancia está el altavoz que maneja un rango de frecuencia de 1.200 Hz hasta 20.000 Hz. El rango de frecuencia del tubo según los parámetros de diseño está entre 420 Hz y 3700 Hz. Debido a las limitaciones que se tiene por el altavoz, y teniendo en cuenta el rango de frecuencia del tubo, para la medición de la muestra de prueba, se tiene un rango de frecuencia de trabajo de 1.200 Hz hasta 3.700 Hz.

La norma menciona al uso de un amplificador para amplificar la señal generando ruido blanco. En este proyecto, se usó un dispositivo telefónico que generaba ruido blanco para las tomas de medición de la muestra de prueba omitiendo el uso del amplificador.

Para la adquisición de la señal mediante los micrófonos se utilizó una tarjeta de adquisición de National Instrument para la recopilación de las presiones acústicas. Mediante LabVIEW se leían las señales de las presiones acústicas para exportarlas como datos en Excel, para posteriormente ser llamados por el software Matlab para la generar la gráfica frecuencia vs coeficiente de absorción

## **5.2 ANÁLISIS DE RESULTADO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN**

Después de poner en funcionamiento el tubo de impedancia, considerando los parámetros descritos en la norma que son: rango de frecuencia, ruido de la señal mayor a 10 dB todos los rangos de interés en las ubicaciones de los micrófonos, se determina el coeficiente de absorción acústica

El material seleccionado para hacer la medición de prueba fue fibra de fique. La probeta de fibra de fique fue cortada mediante una troqueladora para obtener la muestra.

Para hallar los datos, se tomaron 10 pruebas en un intervalo de 1s, el cual nos arrojaba por medio de LabVIEW 20.000 datos diferentes para cada micrófono en cada prueba. En la tabla 2 se ilustran los valores de las presiones acústicas de los dos micrófonos en una muestra de 20 datos.

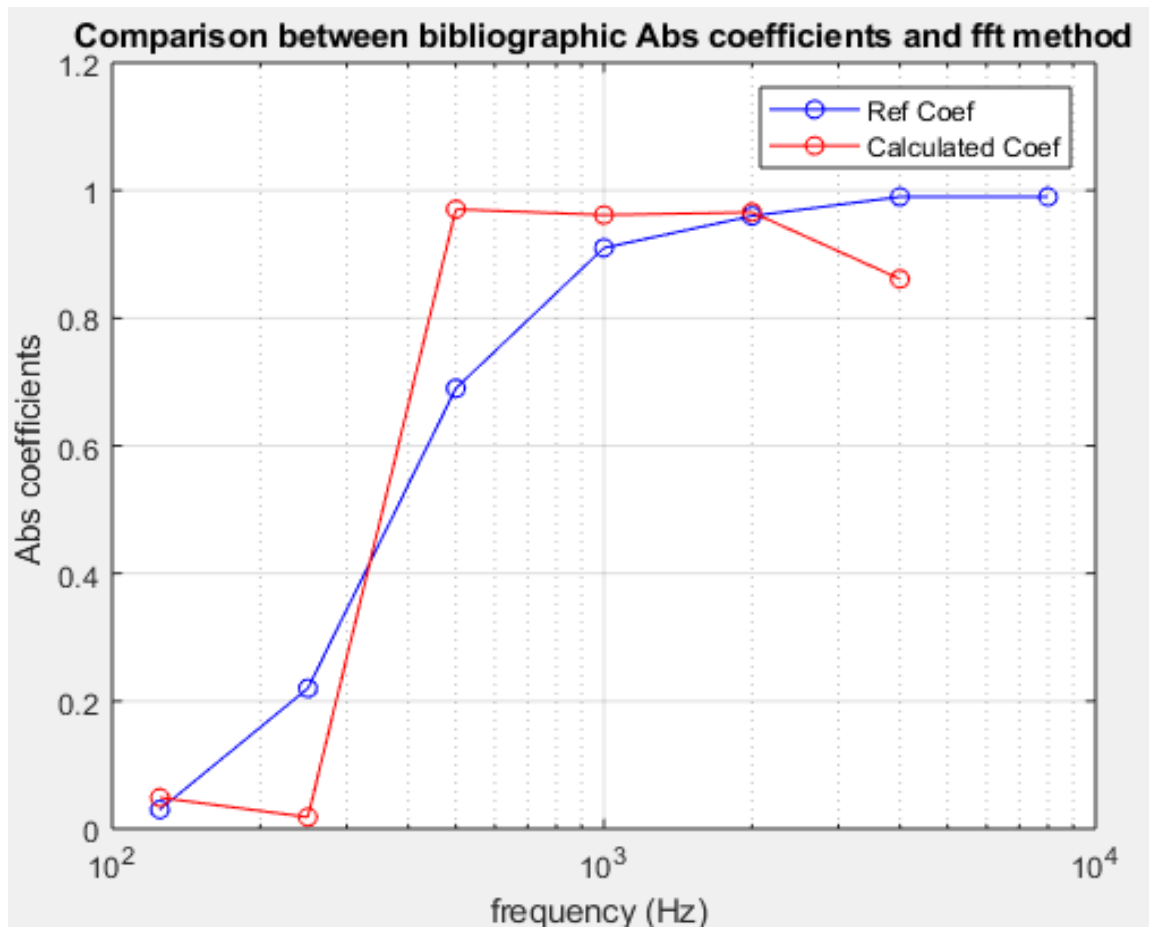
**Tabla 2.** Datos arrojados por LabVIEW.

	A	B
1	Sound Pressure 1	Sound Pressure_2
2	0,147913	0,001032
3	-0,021803	0,440169
4	-0,340847	0,397342
5	-0,058618	-0,305589
6	0,2388	0,005022
7	0,38989	0,56753
8	0,000886	0,091085
9	-0,100618	-0,374803
10	-0,241426	-0,004006
11	0,471704	0,347248
12	0,21081	0,245968
13	0,266775	0,077396
14	0,025948	0,136664
15	0,478534	0,616066
16	0,041443	0,651321
17	0,008837	0,195496
18	-0,068434	-0,175301
19	0,105913	0,292669
20	0,013424	0,061407

Fuente: Autores del proyecto.

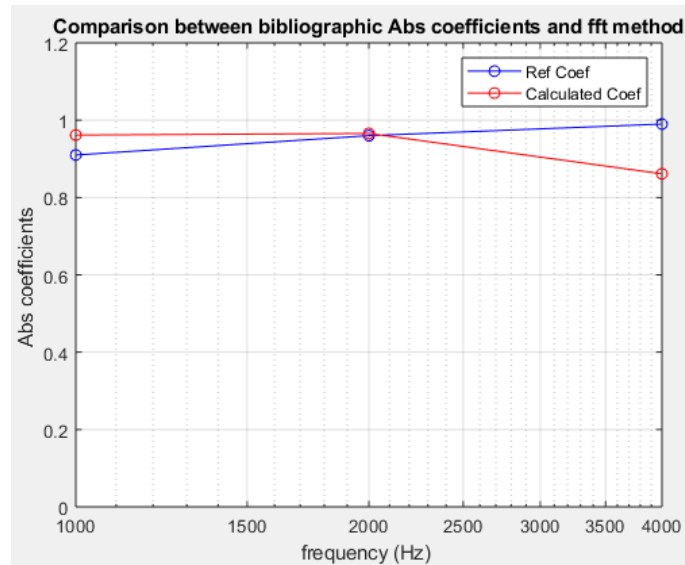
Posteriormente estos datos son llamados desde el software Matlab para hallar la función de transferencia, el espectro cruzado y el auto espectro, así como la gráfica frecuencia vs coeficiente de absorción acústica. A continuación, se muestran las gráficas creadas con los valores recolectados.

Gráfica 1. Comparación entre el coeficiente de absorción bibliográfico y método FFT.



Fuente: Autores del proyecto.

**Gráfica 2.** Comparación entre el coeficiente de absorción bibliográfico y método FFT.



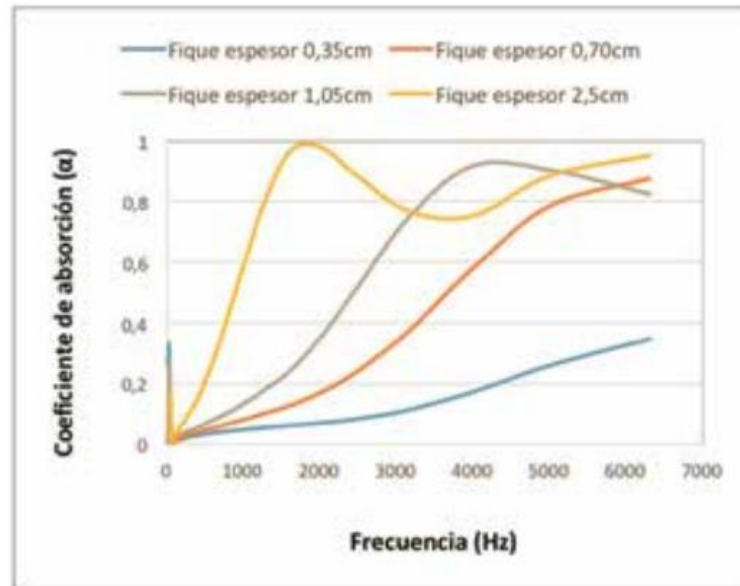
Fuente: Autores del Proyecto.

La función de color azul es una gráfica creada para que sea graficada por Matlab como una referencia a un comportamiento teórico y la función de color rojo es la gráfica que nos muestra el coeficiente de absorción. Vemos que el coeficiente de absorción no sobrepasa el valor de 1, ya que un valor igual a uno, nos indica que el material es completamente absorbente.

Para rangos de frecuencia de 1 kHz y 2 kHz los valores son bastante significativos, ya que se evidencia un alto coeficiente de absorción acústica tiene una aproximación al 100%, siendo bastante nula el valor del coeficiente de reflexión. Para frecuencias mayores a 2kHz, el coeficiente de absorción va disminuyendo conforme la frecuencia va aumentando.

### 5.3 COMPARACIÓN CON DATOS REPORTADOS EN LA LITERATURA

**Gráfica 3.** Caracterización Acústica de materiales no tejidos basados en fibras naturales para el acondicionamiento de espacios laborales y académicos.



Fuente: Gómez, Tomás. Restrepo, Camila. Castrillón, Reynel. Morales, Patricia. [Consultado: 26 de febrero de 2019]. Disponible en Internet: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3500/Caracterizaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En la gráfica 3, se muestran el estudio de 4 curvas con diferentes espesores para saber el comportamiento del fique. La gráfica nos muestra que, a mayor espesor, mayor coeficiente de absorción tiene la muestra a ensayar en el rango de frecuencia de interés.

Las gráficas muestran coeficientes de absorción más altas a ciertas frecuencias. Para la gráfica hallada con el tubo de estudio, mostró un pico más alto de absorción entre 1.2 kHz y 2 kHz, donde el coeficiente de adsorción empieza a caer conforme aumenta la frecuencia. Con un espesor de la muestra de 0.7cm.

Si bien, comparándolo con muestras de fique con diferentes espesores, las muestras también tienden a tender un rango de frecuencia en el que el coeficiente de absorción es mayor, mostrando un comportamiento similar en la curva a la muestra obtenido en este proyecto.

Cabe destacar que los rangos de frecuencia de trabajo dependen del diámetro del tubo, el espaciado entre los micrófonos y la temperatura.

## 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de diseñar y construir un tubo de impedancia para determinar el coeficiente de absorción acústica de materiales aislantes según la norma de EN ISO 10534-2, “parte 2. Método de la función de transferencia”. Se realizó una prueba de funcionamiento del tubo, para la cual se eligió fibra de fique como material de prueba de ensayo, para posteriormente analizar el comportamiento en la medición del tubo de impedancia, seguidamente se calculó el coeficiente de absorción acústica del material de prueba mediante los softwares explicados anteriormente.

Los parámetros de diseño se obtuvieron de las recomendaciones de la norma antes mencionada, con los que se construyó el tubo de impedancia y para los cuales validamos con la prueba de ensayo en la obtención de una curva del coeficiente de absorción acústica del material de prueba.

Como resultado de la prueba se obtuvo una gráfica que relaciona la frecuencia vs coeficiente de absorción acústica, la cual refleja un comportamiento similar a los estudios realizados en otras universidades, por lo que se puede decir que el tubo de impedancia cumple con el objetivo de calcular el coeficiente de absorción acústica de un material.

Se puede evidenciar una gran variación en la curva obtenida de la prueba de ensayo respecto a las de la comparativa, eso se debe a que se necesita una mejora en la forma de adquirir la señal que se reciben de los micrófonos y de qué manera se leen estas señales con los softwares.

## Futuras líneas de investigación

Como futuras líneas de investigación se recomienda hacer un código adecuado para obtener una mejor interpretación de las señales adquirida por los micrófonos y así tener una excelente exactitud en el coeficiente de absorción acústica de los materiales que se deseen ensayar.

## 1. REFERENCIAS

[1] BS EN ISO 10534-2:2001. Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method. 2001.

[2] Callister, Jr, William D. Ciencia e ingeniería de materiales. Pág 5.

[3] Askeland, Donald R. Ciencia e ingeniería de materiales. 3ta edición. México 1998. Pág 9.

[4] definición de acústica. [en línea] [citado: 6 de septiembre de 2018] disponible en: [https://conceptodefinicion.de/acustica/]

[5] Beranek, Leo L. Acústica. Segunda edición. Buenos Aires. 1969.

[6] YOUNG, HUGH D. y ROGER A. FREEDMAN. Física Universitaria. Decimosegunda edición. Person edición 2009. Pag 327

[7] Carpetapedagogica.com. Reflexión de luz. [en línea] [citado: 28 de agosto de 2018] disponible en internet: <http://compendiodefisica.carpetapedagogica.com/2014/05/reflexion-de-la-luz.html>

[8] carrillo paz, Alì José. Sistemas automáticos de control, Fundamentos básicos de análisis y modelado. Segunda edición. 2011 [en línea] [citado: 28 de agosto de 2018 ] Disponible en internet: [http://150.185.9.18/fondo\\_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf](http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf)

[9] Álava ingenieros, tubo de impedancia-kundt [en línea] [revisado 6 de septiembre de 2018] disponible en: <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/instrumentacion-y-ensayos/acustica-y-vibraciones/tubos-de-impedancia-kundt/>

[10] MATTIOLI, A. y TORQUETE, L. Time-domain simulation of acoustic impedance tubes: publicado en línea: 09 de marzo de 2016.

[11] ASTM designation E1050-12. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. Edit. 2017

[12] Héctor Arnay Sarabia; TRABAJO FIN DE MASTER: Estudio de la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia; mayo 2014.

[13] Albert G. Digón, Pepe Ferrer; Configuración y ajustes de sistemas de sonidos; Bogotá: ediciones de la u, 2014.

[14] Sociedad Española de Acústica, Glosario de Términos Acústicos Vol.3, ISBN: 978-84-97985-22-5, Edición Julio 2012.

[15] ISO 10534-1: 1996. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes - Part 1: Method using standing wave ratio. 1996.

[16] CARRIÓN I, Antoni. Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora. [Libro Digital]. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona. Edicions de la Universitat Politecnica de Catalunya, SL. 1998. P.420. [Consultado: 20 de febrero de 2019]. **Disponible en internet:** <https://arqlemus.files.wordpress.com/2014/04/disec3b1o-acc3bastico-de-espacios-arquitectc3b3nicos.pdf>.