



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUBO DE IMPEDANCIA, PARA LA
EVALUACIÓN DE LA ABSORCIÓN SONORA DE MATERIALES
UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN**

**Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniería en Sonido y Acústica**

**Profesor Guía
Ing. Miguel Chávez**

**Autores
Gustavo Sebastián Navas Reascos
Nelson David Santander Guerrero**

**Año
2011**

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con los estudiantes, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema y tomando en cuenta la Guía de Trabajos de Titulación correspondiente.”

.....
Miguel Chávez
Ingeniero Acústico
CI. 1710724848

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

.....
Gustavo Navas
CI. 1720487477

.....
Nelson Santander
CI. 1717932212

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia y amigos por todo el apoyo que me han brindado durante el transcurso de mi vida, lo que me ha permitido culminar este proyecto tan importante. Especialmente quiero agradecer a mis padres y a mi hermano por ser los pilares fundamentales en los que me sostengo.

Agradezco a todos los profesores que me guiaron durante mi carrera y en especial a mi director de tesis Ing. Miguel Ángel Chávez sin el cual este proyecto no habría culminado tan exitosamente.

Agradezco a mi compañero de tesis con quien logramos desarrollar este proyecto y vencimos todas las adversidades que se presentaron en el camino.

Gustavo Navas

AGRADECIMIENTOS

Una vez que he terminado mis estudios, quiero agradecer a mis padres, a mis amigos y sobre todo a una amiga especial Diana Sarmiento quienes de una u otra manera han colaborado para llevar a feliz término esta etapa de mi vida, base fundamental para continuar siempre hacia adelante.

Nelson Santander

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mis padres y a mi hermano quienes con su apoyo me han permitido culminar esta etapa tan importante.

Gustavo Navas

RESUMEN

La presente tesis está basada en la realización de un tubo de impedancia acústica, para determinar el coeficiente de absorción de materiales mediante el método de función de transferencia. Se realizó en primer lugar la recopilación de la información utilizando varias fuentes bibliográficas siendo las principales las normativas ISO y ASTM. Se realizó el diseño y construcción del tubo considerando las mejores opciones en cuanto a su funcionalidad y costo.

El tubo construido es recto, liso, no poroso, sin fugas ni huecos. Las paredes son pesadas y densas, para evitar vibraciones y resonancias. Se utilizó una técnica denominada de “dos micrófonos” la misma que ofrece resultados en menor tiempo, además la implementación de este sistema es más fácil y posee una gran precisión.

Al extremo del tubo se encuentra localizado un driver de compresión que envía la señal que es captada por los micrófonos, luego esta información es enviada al computador en donde es analizada con el software que fue desarrollado.

El software fue realizado usando el programa “LabView” el mismo que permite una programación sencilla ya que su interface es en gran medida visual lo que facilita su desarrollo.

Se planteó el análisis del coeficiente de absorción de varios materiales utilizados en el acondicionamiento acústico.

Los resultados obtenidos fueron coherentes según las bases teóricas, y cercanos a los entregados por el fabricante. Además los resultados fueron comparados con modelos matemáticos realizados en el programa Zorba dando valores del coeficiente de absorción bastante cercanos a los medidos.

ABSTRACT

This thesis is based on the performance of an impedance acoustic tube used to determine the absorption coefficient of materials through the transfer function method. The first step was to collect the information using some sources. The main were ISO and ASTM standards. Then the tube was designed and constructed considering the best options in terms of functionality and cost.

The constructed tube is straight, smooth, nonporous, no leaks or holes. The walls are heavy and dense, to prevent vibration and resonances. It was used a technique called "two microphones" it gives results in less time. The implementation of this system is easy and has great accuracy. At the end of the tube is located a compression driver that sends the signal that is picked up by the microphones, then this information is sent to the computer where it is analyzed with the software that was developed.

The software was done using "LabView" the same that allows easy programming because its interface is largely visual which facilitates development.

The analysis of the absorption coefficient of various materials used in conditioning acoustic was made.

The results obtained were consistent according to the theoretical funds and they were close to those given for the manufacturer. These results were compared with mathematical models made in the program Zorba, the absorption coefficient values were near to the measurement.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	2
1.2	ALCANCE	2
1.3	OBJETIVOS	3
2	BASES TEÓRICAS	4
2.1	FUNDAMENTOS	4
2.2	MATERIALES ACÚSTICOS	11
2.2.1	Absortores porosos	12
2.2.1.1	<i>Representación y características acústicas de materiales porosos</i>	12
2.3	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA	14
2.3.1	Microflown (método reciente)	14
2.3.2	Método de medida en cámara reverberante	15
2.3.3	Método de medida en campo libre	16
2.3.4	Sonda de intensidad	16
2.3.5	Métodos de medida en tubos	17
2.3.6	Comparación entre los principales métodos de medición	19
3	DESARROLLO	22
3.1	MÉTODO DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA – TUBO DE IMPEDANCIA ACÚSTICA	23
3.1.1	Orígenes	23
3.1.2	Descripción	24
3.1.2.1	<i>Normativas</i>	26
3.1.3	Principios	26
3.2	PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS	28

3.2.1	Construcción del tubo de impedancia	28
3.2.2	Restricciones y recomendaciones	28
3.2.3	Tubo de sección circular	28
3.2.4	Micrófonos	30
3.2.5	Porta muestras	33
3.2.6	Fuente sonora.....	35
3.2.6.1	<i>Terminación del altavoz</i>	36
3.2.7	Termómetro y barómetro	36
3.3	ESQUEMA BÁSICO DE CONEXIONES	37
3.4	PRUEBAS Y MEDICIONES PRELIMINARES.....	37
3.4.1	Antes de cada medición	37
3.4.2	Procedimiento de evaluación del sistema.....	38
3.4.3	Calibración periódica	40
3.5	DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRE DOS LOCALIZACIONES.....	41
3.5.1	Determinación del factor de reflexión	42
3.5.2	Determinación del coeficiente de absorción	43
3.5.3	Determinación de la relación de la impedancia acústica específica.....	43
3.5.4	Determinación de la relación de la admitancia acústica específica.....	44
3.5.5	Resultados del método	44
4	DISEÑO.....	46
4.1	RESUMEN DE EQUIPOS.....	48
4.2	RESUMEN DE DISEÑO	50
4.2.1	Selección del material de referencia y evaluación del sistema de medición	52
4.3	PLANOS CONSTRUCTIVOS	53
4.4	DESARROLLO DEL SOFTWARE	58
5	MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS	67

5.1	MATERIAL DE REFERENCIA.....	75
5.2	MEDICIONES.....	76
5.3	COMPARACIONES Y RESULTADOS.....	94
5.4	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	97
6	ANÁLISIS DE COSTOS	101
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
7.1	CONCLUSIONES.....	103
7.2	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA	106
	ANEXOS	109

1 INTRODUCCIÓN

En el país la acústica es una rama poco conocida y desarrollada, recientemente con la apertura de nuevas carreras universitarias en el campo de la acústica o similares, se espera un avance en el desarrollo y difusión de este tema.

En el pasado por desconocimiento, los diseños y construcciones de recintos no consideraban la parte acústica, lo cual resultaba en deficiencias tanto de confort como falta de aislamiento sonoro. También existía poca planificación en el control de ruido y poco interés por sus consecuencias.

En la actualidad para lograr subsanar estos inconvenientes la ciencia de la acústica aplicada en recintos está empezando a penetrar en las construcciones civiles y en la sociedad, para esto se requieren materiales acústicos. Estos materiales en la mayoría de los casos son importados, aunque también existen materiales desarrollados en el Ecuador los mismos que en su mayoría no presentan información técnica puesto que no existe una metodología de evaluación y medición que garantice sus propiedades.

De esta manera la evaluación acústica de materiales, es el proceso mediante el cual se pueden obtener características técnicas tales como absorción, reflexión, impedancia y admitancia acústica, entre otros. Para de esta manera determinar, por ejemplo, las condiciones de absorción y reflexión de las superficies que conforman los distintos espacios y recintos. El objetivo es lograr que la evaluación e investigación de materiales se conviertan en un factor importante para fabricantes, diseñadores e ingenieros en el país.

La presente investigación, se centra en el estudio de materiales, específicamente enfocados a la absorción acústica. Se desarrolla un método de medición para la caracterización acústica de materiales empleados en la construcción, mediante el tubo de impedancia. Además de comparar los valores obtenidos con valores determinados en bibliografía u otros estudios.

1.1 ANTECEDENTES

La acústica es la ciencia encargada del estudio de los fenómenos sonoros y de la interacción de estos con el entorno, como la transmisión, producción, almacenamiento, reproducción, etc. Un área de aplicación de la acústica está enfocada hacia la construcción de recintos, para lograr condiciones adecuadas para distintos espacios considerando los diferentes usos que tendrán éstos; ya sea para conseguir un adecuado aislamiento o para mejorar el acondicionamiento acústico. Se necesitan materiales idóneos para lograr este objetivo los cuales deben ser evaluados acústicamente para lograr diseños efectivos, permitiendo garantizar la respuesta esperada.

A lo largo de los años se han desarrollado varios métodos para realizar mediciones acústicas, siendo la más conocida la cámara reverberante. Este método es uno de los más efectivos, pero con un alto costo asociado a su construcción. Otro método es la denominada función de transferencia, la cual consiste en un modelo matemático que utiliza un tubo de impedancia acústica, con este método los costos son más bajos y sus resultados son altamente fiables.

1.2 ALCANCE

El método de función de transferencia requiere de un tubo de impedancia acústica, 2 micrófonos y un analizador. Determina el coeficiente de absorción acústico de los materiales a una incidencia normal del sonido. También se puede aplicar para la determinación de la impedancia acústica de una superficie. La impedancia acústica depende de las propiedades físicas de los materiales como la resistencia al flujo de aire, la porosidad, la densidad y elasticidad.

En el método de función de transferencia se utilizan ondas planas generadas en el tubo por una fuente de sonido. Se obtiene la presión acústica en dos lugares fijos mediante dos micrófonos montados en el tubo. Con esta información se realiza el cálculo de la función de transferencia acústica.

1.3 OBJETIVOS

Objetivo General:

Realizar el diseño y construcción de un tubo de impedancia acústica.

Objetivos específicos:

- Investigar y recopilar información sobre la elaboración y uso de los tubos de impedancia acústica.
- Realizar el diseño del tubo de impedancia acústica.
- Construir el tubo de impedancia acústica con el diseño planteado anteriormente.
- Implementar un software para la medición de los parámetros acústicos.
- Evaluar la efectividad del tubo de impedancia acústica mediante la medición de dos materiales que cuenten con especificaciones técnicas.
- Lograr tener un método de medición de absorción acústica para la investigación, desarrollo y caracterización de materiales.

2 BASES TEÓRICAS

2.1 FUNDAMENTOS

El objetivo es definir los conceptos fundamentales que van a ser desarrollados durante la presente tesis.

- **Velocidad del sonido en el aire:** Es la propagación de una onda sonora en un medio (aire), y puede ser evaluada con precisión sabiendo la temperatura, con la siguiente ecuación:

$$C_0 = 343.2\sqrt{T/293} \text{ [m/s]} \quad (2.1)$$

Donde:

T = Temperatura en grados Kelvin

- **Longitud de onda:** Será determinada por:

$$\lambda_0 = C_0/f \text{ [m]} \quad (2.2)$$

Donde:

f = Frecuencia [Hz]

- **Densidad del aire(ρ):** Puede ser calculada desde:

$$\rho = \rho_0 * \frac{P_a T_0}{P_0 T} \quad (2.3)$$

Donde:

T = Temperatura en grados Kelvin

P_a = Presión atmosférica [KPa]

T_0 = 293 K

P_0 = 101.325 KPa

ρ_0 = 1.186 Kg/m³

- **Coefficiente de absorción¹ (α):** Cuantifica la cantidad de energía acústica que es capaz de absorber un material. Sus valores están entre 0 y 1.

$$\alpha = \frac{I_A}{I_I} \quad (2.4)$$

Donde:

I_A = Intensidad energética absorbida

I_I = Intensidad energética incidente

- **Coefficiente de reflexión¹ (σ):** Cuantifica la cantidad de energía acústica que es capaz de reflejar un material. Sus valores están entre 0 y 1.

$$\sigma = \frac{I_R}{I_I} \quad (2.5)$$

Donde:

I_R = Intensidad energética reflejada

I_I = Intensidad energética incidente

- **Absorción acústica:** Es la capacidad que tiene una superficie de transformar la energía acústica en energía calorífica. Está determinada por la siguiente ecuación:

$$A = S * \alpha \ [m^2 Sabine] \quad (2.6)$$

Donde:

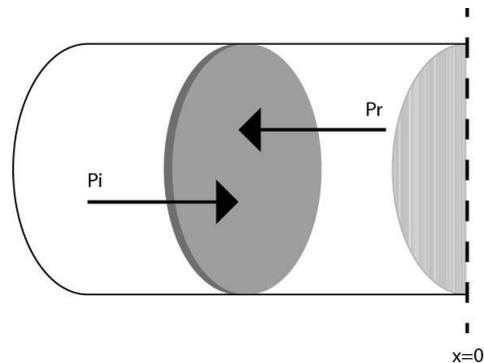
S : Área de la superficie

- **Factor de reflexión de la presión sonora (incidencia normal)² (r):** Es la relación compleja entre la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda incidente en el plano de referencia para una onda plana a una incidencia normal (ver Fig. 2-1).

¹ Dependerá de las características mecánicas del material, de la composición del mismo, de la forma de incidencia del sonido y de la frecuencia.

² A 0°, perpendicular a la muestra.

Fig.2-1 Ondas incidente P_i y reflejada P_r sobre el plano de referencia $x = 0$



Fuente: Los autores

- **Impedancia acústica (Z):** Es la relación entre la presión compleja y la velocidad de partículas compleja, en un punto dado. La impedancia acústica de los materiales está definida como la oposición total al paso del sonido a través de un material, el cual está formado por la resistencia (representa las pérdidas disipativas, en forma de calor), y la reactancia (efecto de ondas estacionarias dentro de un material).
- **Impedancia acústica característica (Z_s):** En un campo de ondas planas (impedancia característica), está dado por:

$$Z_s = \frac{P}{U} = \pm \rho c [\text{Rayls}] \quad (2.7)$$

Donde:

c = Velocidad del sonido en [m/s]

ρ = Masa por densidad de aire

Como se aprecia en la fórmula 2.7 la impedancia acústica en ondas planas es puramente real. Cuando $Z_s = \rho_0 c = 405 [\text{Rayls}]$; se conoce como la impedancia característica del aire, la cual depende de la temperatura. Entonces, la impedancia acústica normalizada:

$$Z = \frac{Z_s}{Z_{air}} = \frac{Z_s}{\rho_0 c} = \frac{P}{\rho_0 c U} \quad (2.8)$$

La cual es unidimensional y está compuesta por una cantidad compleja, sirviendo como representación gráfica de la impedancia. En un campo sonoro esférico y si la distancia r desde el origen es muy grande el comportamiento es similar a ondas planas:

$$Z_s \sim \pm \rho c \quad (2.9)$$

- **Número de onda:** Es una unidad de frecuencia que establece cuantas veces vibra una onda sonora en una unidad de distancia (el número de longitud de onda por distancia). Con una frecuencia angular ω (ciclos) está definido por:

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (2.10)$$

Donde:

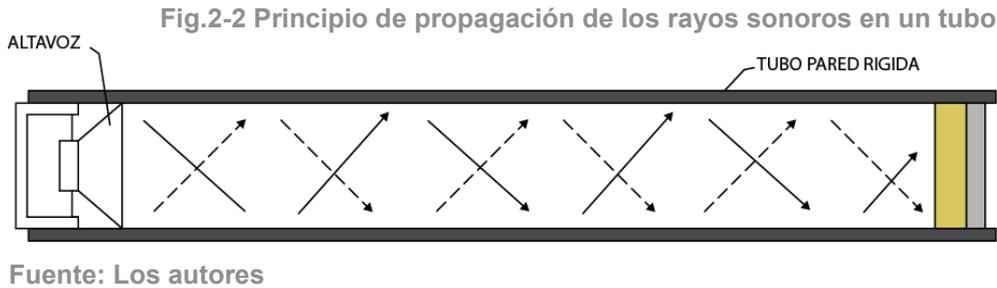
f = Frecuencia

c_0 = Velocidad del sonido

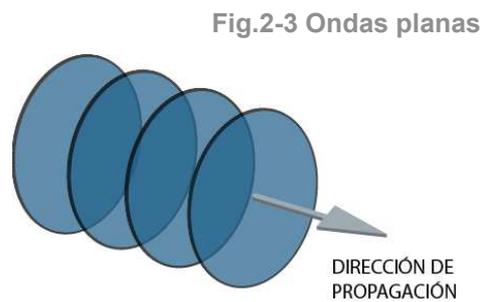
Generalmente el número de onda es complejo por lo tanto: $k_0 = k'_0 - jk''_0$

Donde k'_0 es el componente real ($k'_0 = 2\pi/\lambda_0$), k''_0 es el componente imaginario que es la constante de atenuación en Nepers por metro.

- **Ondas planas:** El sonido se propaga de forma natural en forma esférica, para conseguir la generación de ondas planas en un espacio se vuelve necesario el tener condiciones muy específicas, entre estas tenemos: la posición y la dirección de la fuente. Por otro lado para lograr fácilmente este campo sonoro de ondas planas es necesario capturar el sonido en una sola dimensión continua, lo cual puede ser logrado a través de un tubo rígido, donde el sonido es internamente guiado y forzado a propagarse a través del eje axial del tubo. Ver Fig.2-2.



Las ondas planas constituyen una de las propagaciones sonoras más simples y elementales (ondas más complejas se pueden descomponer en ondas planas). Las variables acústicas, tales como la presión de sonido o la velocidad de las partículas dependen únicamente de una coordenada espacial. Si en un momento dado todas las variables son constantes en cualquier plano perpendicular a esta coordenada, donde se formarán superficies de igual estado de fase y vibración, se llegará a la onda plana. Ver Fig.2-3.



Así se puede decir, que las superficies de una onda plana son planos paralelos, en estas situaciones la ecuación de onda está dada por:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial Z^2} + k^2 \hat{p} = 0 \quad (2.11)$$

Cuya solución general está dada por la ecuación:

$$\hat{p} = e^{j(\omega t - kz)} + p_- e^{j(\omega t + kz)} \quad (2.12)$$

- **Propagación sonora en tubos circulares:** La ecuación de onda para la propagación en tubos circulares está dada por:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} + k^2 P = 0 \quad (2.13)$$

Con una condición de borde: $\left. \frac{\partial \hat{p}}{\partial r} \right|_{r=a} = 0$

Con lo cual se llega a la denominada ecuación de Bessel:

$$\frac{d^2 p_r(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp_r(r)}{dr} + p_r(r) * \left(k_r^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) = 0 \quad (2.14)$$

Con la solución general: $p_r(r) = EJ_m(k_r r) + FN_m(k_r r)$

La función de Bessel solo será finita cuando $r=0$, entonces $F=0$.

Por lo tanto según la condición de borde:

$$\left. \frac{dJ_m(k_r r)}{dr} \right|_{r=a} = J'_m(k_r a) = 0 \quad (2.15)$$

Los puntos de inflexión de J_m son los que cumplirán esta condición, y la frecuencia de corte para cada modo normal vendrá dada por:

$$f_{mn} = \frac{n_{mn} c}{2\pi a} \quad (2.16)$$

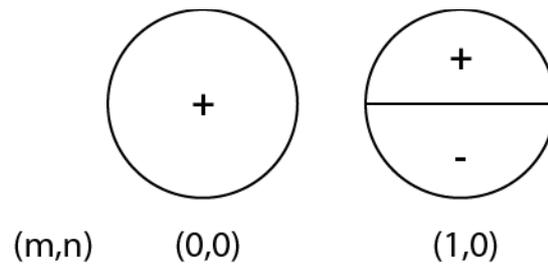
Donde n_{mn} son las raíces de la ecuación 2.14. Ver tabla 2-1. Ver Fig.2-4.

Tabla 2-1 Puntos de inflexión de J_m (Funciones de Bessel)

$n \setminus m$	0	1	2	3
0	0	1.8412	3.0542	4.2012

Fuente: Los autores

Fig.2-4 Modos normales en superficie circular



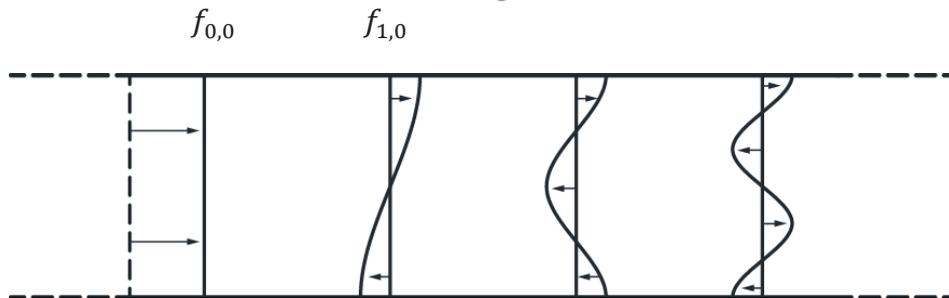
Fuente: Los autores

Cuando $m=n=0$, la solución general de la ecuación 2.13 y 2.14 es:

$$\hat{p}(p, \phi, z_1 t) = p_+ e^{j(\omega t - kz)} + p_- e^{j(\omega t + kz)} \quad (2.17)$$

Que es la solución general de ondas planas (ec. 2.12), por lo tanto la propagación de ondas planas se producirá desde las frecuencias de corte de $f_{0,0}$ a $f_{1,0}$. Ver Fig.2-5.

Fig.2-5 Modos normales transversales



Fuente: Los autores

El tubo de impedancia acústica actuará como un filtro de modos transversales, por debajo de la frecuencia de corte más baja, por lo tanto se puede utilizar dicho tubo para la generación de ondas planas.

- **Teorema de Nyquist:** El Teorema del Muestreo, o Teorema de Nyquist-Shannon, establece que la frecuencia mínima de muestreo necesaria para evitar el “aliasing³” debe ser:

$$F_s \geq 2F_n \quad (2.18)$$

Donde:

F_s = Frecuencia de muestreo

F_n = Frecuencia máxima reproducible fielmente

Es decir que para reproducir fielmente una señal se necesitan por lo menos dos muestras por cada ciclo de onda.

2.2 MATERIALES ACÚSTICOS

Actualmente existen un gran número de materiales disponibles para la construcción en general, con una extensa variedad de propiedades y características particulares. Así encontramos materiales como el hormigón, vidrio, madera, cerámica, piedra, yeso, plásticos, metal, fibras, lanas, etc.

Debido a la gran cantidad de materiales se limitará a hablar de los que tienen la propiedad de absorber sonido, en sus distintas configuraciones, recubrimientos y disposiciones. En donde la energía acústica que incide en el material es transformada en energía calorífica, debido al rozamiento que existe entre el aire que atraviesa los poros del material, o donde el sonido es absorbido por la configuración de frecuencias de resonancia en dispositivos específicos.

La estructura interna de este tipo de materiales suele ser irregular, y muchas veces los resultados dependerán de la dirección de la medición, aun así son considerados como homogéneos e isotrópos. La homogeneidad significa que las características del material se mantienen sin importar el lugar de la muestra que se escoja; la isotropía en cambio significa que sus características son las mismas en las tres direcciones espaciales.

³ Efecto que causa que una señal sea indistinguible o se distorsione como resultado de la reconstrucción de una señal continua mediante muestras.

2.2.1 Absortores porosos

Este tipo de materiales funcionan bien para medias y altas frecuencias, están formados por elementos de contextura porosa. Cuando el sonido incide sobre estos, la presión hace que el aire que está en el interior de los poros vibre, generando roce y de esta forma transformando la energía acústica en energía calorífica.

La cantidad de absorción del material depende de la porosidad efectiva del mismo, el factor de estructura y el espesor.

Este tipo de materiales son usados para las altas frecuencias, puesto que aunque tienen la capacidad de absorber frecuencias bajas el espesor del material debería aumentar significativamente, volviéndolo costoso y además se necesitarían espacios muy grandes para poder colocarlos.

Entre los materiales porosos más utilizados se destacan las esponjas, las lanas minerales y lanas de vidrio. Estas deben ir recubiertas con tela por seguridad, pero dicha tela deberá ser acústicamente transparente, es decir, que no oponga resistencia al paso del frente de ondas.

Por ejemplo la lana de vidrio que es un material que consta de fibras entrecruzadas en forma desordenada. Es ligero, su densidad oscila entre los 10 a los 110 kg/m³. Por otro lado la lana de roca que es un tipo de lana mineral, creado en base a rocas basálticas, es un producto que además tiene un gran índice de aislamiento térmico.

Existen nuevas alternativas de materiales porosos como por ejemplo: Fibras vegetales, desperdicios textiles (lanas y fieltros), polímeros plásticos.

2.2.1.1 Representación y características acústicas de materiales porosos

Gracias a la caracterización de los materiales podemos encontrar los parámetros que definen su comportamiento para el acondicionamiento acústico estos parámetros son: Impedancia acústica, coeficiente de absorción y reflexión acústica, etc. Para realizar la caracterización completa de un material se lo tiene que someter a una serie de mediciones para cada propiedad, o a su

vez se puede realizar la medición de las propiedades intrínsecas del material para, por medio de cálculo y modelamiento poder obtener las otras variables.

Son muchos los parámetros que ayudan para la caracterización acústica de los materiales, pero existen dos que sirven para caracterizar completamente a un material del tipo poroso y fibroso, la impedancia característica compleja (Z) y la constante de propagación (T). Dichos parámetros están relacionados con la capacidad de un material de absorber el sonido.

La impedancia acústica superficial es importante porque es independiente de los cambios que puedan existir en un mismo campo sonoro, como por ejemplo variaciones de NPS, el material a su vez posee dos propiedades intrínsecas: la impedancia característica (Z_m), y el número de onda (K), gracias a estos parámetros es posible encontrar las propiedades de densidad volumétrica del material poroso.

Las propiedades a macro escala son las que definen las propiedades de densidad volumétrica, entre estas las más importantes son: la resistividad al flujo de aire, la porosidad, la tortuosidad, la longitud característica, etc. En la macro escala se estudia como el material interactúa con un fluido.

Las propiedades a micro escala son descritas por los detalles geométricos del material y revelan la interacción de las ondas sonoras con el material, el conocimiento de todas estas propiedades es de gran ayuda para el desarrollo y la investigación de los materiales.

Materiales localmente reactivos: son aquellos donde la velocidad de la onda de propagación en una capa porosa es mucho menor que la velocidad del sonido en el aire. Las ondas transmitidas se propagan perpendicularmente al ángulo de incidencia.

Materiales no localmente reactivos: la velocidad de la onda de propagación es comparable con la velocidad del sonido en el aire. La impedancia característica del material depende del ángulo de incidencia.

2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA

La medición de la impedancia acústica Z y el subsecuente cálculo o medición del coeficiente de absorción sonora de un material se puede realizar siguiendo métodos directos e indirectos.

El primer grupo abarca las técnicas diseñadas y preparadas para medir y cuantificar directamente la Impedancia acústica o alguna relacionada con esta, como es el caso del coeficiente de absorción. Una de las técnicas más usuales en mediciones directas es el método del tubo de impedancia.

En el segundo grupo se incluyen los métodos que se basan en deducir el valor a partir de modelos de propagación, donde la impedancia es un parámetro que se determina por comparación entre los valores obtenidos a partir de dichos modelos, con los valores medidos experimentalmente a un mismo nivel sonoro.

En el presente trabajo se presentarán las técnicas de medición directas para la determinación de las propiedades absorbentes del sonido las cuales se dividen en:

- Medida en campo libre (Microflown)
- Medida en cámara reverberante
- Medida en campo libre
- Sonda de intensidad
- Métodos de medida en tubos

2.3.1 Microflown (método reciente)

Consta de dos cables de calor, los cuales se encuentran muy cerca entre sí. El método de medición se basa en la detección de los cambios de temperatura entre los dos sensores, mediante esta diferenciase puede obtener una diferencia de tiempo, con lo cual se consigue la velocidad de partículas para el consecuente cálculo de la impedancia acústica. Requiere de la calibración del equipo y de correcciones en cálculo para la obtención de resultados confiables y es utilizado como herramienta de medición en campo libre. Ver fig. 2.6

Fig. 2-6 Microflown Sonda Estándar



Fuente: CAE Software&Systems

2.3.2 Método de medida en cámara reverberante

En una cámara reverberante se busca lograr un campo difuso, gracias a esto este método proporciona un mayor ajuste a la realidad ya que intenta medir la absorción en situaciones normales, aproximándose a una incidencia aleatoria. El resultado obtenido es un coeficiente de absorción en incidencia difusa o denominado α Sabine. El principio de funcionamiento se basa en medir el tiempo de reverberación antes y después de colocar una muestra de material. Este método se hace de acuerdo a la norma ISO 354 o la ASTM C423, el coeficiente de absorción α_{sab} es muy utilizado si se requiere realizar cálculos del tiempo de reverberación en un recinto, pero resulta de menor ayuda en control de ruido.

Fig. 2-7 Cámara de reverberación



Fuente: (www.Acusonic.com)

2.3.3 Método de medida en campo libre

La medición se la realiza en condiciones de campo libre, lo que significa que no se producen reflexiones indeseadas por parte de ningún elemento que no sea el propio material a estudiar. Se usa en materiales que no pueden ser medidos directamente en un tubo de impedancia acústica; se coloca a la fuente lo más lejos posible ya que en la evaluación se busca un campo sonoro de ondas planas. La medición se la realiza muy cerca del material (2cm). No tiene fiabilidad en bajas frecuencias además necesita de una extensa calibración con limitaciones para obtener precisión en dichas frecuencias.

Fig. 2-8 Cámara anecoica



Fuente: MSc Tesis DTU, Álvarez Jorge

2.3.4 Sonda de intensidad

Es uno de los métodos más rápidos y fáciles para obtener la impedancia acústica superficial, puede llevarse a cabo con instrumentos portátiles y de un relativo bajo costo. Gracias a esto es una técnica de gran utilidad para realizar mediciones in-situ, donde no se tiene el control de la forma y la extensión del material. Está limitado en el rango de frecuencias dado por las dimensiones, colocación y efectos de borde de la muestra en la medición. Entrega los resultados en forma directa en 1/1 o 1/3 banda de octava. Se compone de 2

micrófonos a una distancia muy cercana entre sí, de las presiones obtenidas y su separación se obtiene la presión y la velocidad de partículas, necesario para obtener la impedancia.

Fig. 2-9 Sonda de intensidad



Fuente: Bruel&Kajer tipo 3599

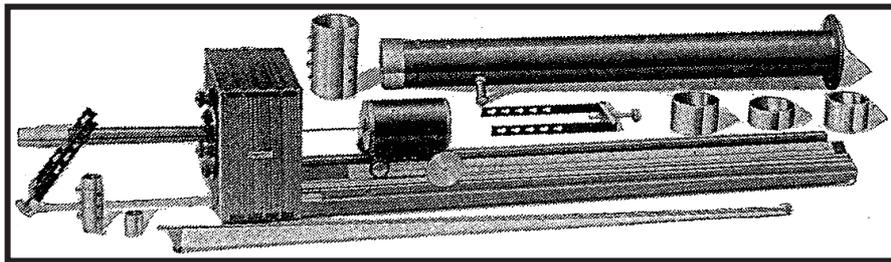
2.3.5 Métodos de medida en tubos

Es el método más clásico para determinar el coeficiente de absorción acústica a partir de la medida de la impedancia superficial de un material bajo incidencia normal. Está basado en el tubo de impedancia acústica (tubo de ondas estacionarias o tubo de Kundt). Su rango de frecuencias dependerá del diámetro del tubo, pero es uno de los métodos más confiables. Es utilizado sobre todo en la investigación y el desarrollo de materiales, métodos y técnicas de medición. Esta técnica se utiliza principalmente en laboratorio, pero actualmente algunos investigadores trabajan en la forma de aplicar dicho método para realizar medidas in-situ, cuando se trata de superficies planas (Ej. asfaltos en carretera). Los métodos más aceptados de medición que utilizan el tubo de impedancia acústica y que se encuentran tratados en las normas ISO 10354 y ASTM E1050 son:

- Método de relación de ondas estacionarias

Calcula la impedancia mediante la comparación entre las presiones mínima y máxima medidas mediante una sonda de micrófono. Se basa en las ondas estacionarias formadas por la onda incidente y reflejada creada dependiendo de la impedancia superficial del material a evaluar en la terminación del tubo. Es un método altamente comprobado y de alta fiabilidad pero requiere una medición en cada frecuencia, ya que emplea la excitación de tonos puros.

Fig. 2-10 Tubo de impedancia acústica (Método de ondas estacionarias)



Fuente: (www.Acusonic.com)

- Método de función de transferencia

Hace uso del tubo de impedancia pero usa la técnica sugerida por Chung y Blaser en 1980. Está basada en la medición de la función de transferencia H_{12} entre dos localizaciones de micrófono. Se desarrolló gracias al avance tecnológico de los analizadores de frecuencia y la FFT que pueden realizar, siendo un método muy útil y rápido para las mediciones.

Fig. 2-11 Tubo de impedancia acústica (Método de función de transferencia)



Fuente: Brüel&Kjær Producto 4206-A (100Hz a 3.2 KHz)

2.3.6 Comparación entre los principales métodos de medición

Tabla 2-2 Comparación métodos de medición

MÉTODO	RESUMEN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CÁMARA REVERBERANTE	Volumen de sala necesario aprox. 200 m ³ T ₆₀ con muestra y sin muestra ISO 354 ASTM C423	<ul style="list-style-type: none"> – Certificación de materiales. – Medición en incidencia difusa α_{sab}. – Útil cuando la absorción depende del tamaño y el tipo de montaje de la muestra (más real). – Cálculo más sencillo. – Permite medición de materiales no homogéneos. 	<ul style="list-style-type: none"> – Muestras grandes. – Mayor tiempo de evaluación (aproximadamente 20 min más instalación). – Es necesario calibrar equipos. – Recinto especial, mayor costo de laboratorio.
CAMPO LIBRE	Medición realizada muy cerca de la muestra en condiciones de ondas planas	<ul style="list-style-type: none"> – Usado en materiales que no se pueden usar en otros métodos. – Evita el daño de la superficie, puesto que esta no es movida. – Simple, no requiere grandes equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> – No tiene confiabilidad en bajas frecuencias. – Necesita de calibración y buenas condiciones atmosféricas. – No determina ni impedancia ni admitancia acústica.

			– Requiere condiciones de campo libre.
SONDA DE INTENSIDAD	Requiere solo de dos micrófonos a cierta distancia para el cálculo de la presión y la velocidad de partículas	<ul style="list-style-type: none"> – Medida in-situ. – Resultados a cualquier ángulo de incidencia – Menor tiempo de evaluación. – Medición del material en condiciones reales y normales de uso, no requiere de un montaje especial de la muestra. 	<ul style="list-style-type: none"> – Instrumentación delicada. – Problema de resultado en bajas frecuencias y en materiales rígidos – Limitado por el equipamiento y las condiciones de ambiente (difícil de conseguir). – Pequeño rango de frecuencias.
T U B O S	RELACIÓN DE ONDAS ESTACIONARIAS (SWR)	<p>Medición de un tono puro a la vez</p> <p>Comparación entre las presiones mínimas y máximas</p> <p>ISO 10534-1</p> <p>ASTM C23</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Muestras pequeñas. – No requiere de una calibración en los micrófonos. – Entrega resultados muy confiables – Investigación y desarrollo de materiales.
			<ul style="list-style-type: none"> – Resultados a incidencia normal. – Requiere de mayor tiempo de evaluación. – Enmascaramiento por ruido de fondo. – Medición de una frecuencia a la vez.

			<ul style="list-style-type: none"> – Requiere de cálculo relativamente simple. 	<ul style="list-style-type: none"> – Tubos muy largos (La frecuencia más baja depende del largo). – Limitado por el tipo del material. – No se pueden usar muestras grandes.
	<p>FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA</p>	<p>Ruido Banda ancha, ondas estacionarias</p> <p>ISO 10534-2</p> <p>ASTM E1050</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Muestras pequeñas. – Menor tiempo de evaluación (alrededor de 3 minutos). – Abarca un rango de frecuencias aceptable. – Ideal para investigación y desarrollo de materiales. – Curva continua de absorción. 	<ul style="list-style-type: none"> – Precisión en la colocación de la muestra. – Resultados solo obtenidos a incidencia normal. – Micrófonos deben ser calibrados. – Requiere de cálculo y correcciones. – Limitado por el tipo de material. – No se pueden usar muestras grandes.

Fuente: Los autores

3 DESARROLLO

De acuerdo a las posibilidades técnicas y económicas se ha optado por el método de función de transferencia, usando un tubo de impedancia acústica para el proceso de investigación, diseño, construcción y evaluación. Las justificaciones para haberse escogido este método son:

- El coeficiente de absorción obtenido puede ser usado en ciertas situaciones donde el material se coloca en pequeños espacios cerca de la fuente sonora como es el caso de encierros acústicos.
- Puede entregar valores aproximados de un coeficiente de absorción similar al medido en una cámara reverberante. Además en algún momento puede otorgar excelentes datos comparativos, donde las mediciones en una cámara reverberante no sean posibles o confiables.
- Los datos obtenidos son muy precisos (siguiendo los procedimientos de las normas).
- Se logra un método de medición (laboratorio) a bajo costo.
- Los implementos a utilizar no son tan específicos.
- Cuenta con un proceso de investigación previo, y el aval de normativa internacional que respalda la eficacia del método.
- El método es muy rápido.
- La eficiencia en el rango de frecuencias en el que opera es aceptable.
- Se pueden realizar mediciones a diferentes niveles de presión sonora.
- Las muestras a utilizar son relativamente pequeñas.
- Está enfocado al área de investigación y desarrollo.
- Tiene la posibilidad de realizar cambios y expansiones tanto el hardware como en el software.

Desventajas:

- En algunos casos pueden entregar resultados engañosos.

- No se debe utilizar al método como un sistema de certificación de materiales.
- Se debe hacer un continuo mejoramiento tanto en la parte constructiva como en el procedimiento de medición, así como en el software a utilizar.

3.1 MÉTODO DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA – TUBO DE IMPEDANCIA ACÚSTICA

3.1.1 Orígenes

Desde los comienzos del siglo pasado un gran número de métodos que hacen uso del tubo de impedancia han sido propuestos, entre ellos se tienen:

El SWR es un método clásico de relación de ondas estacionarias el cual es muy similar al descrito aquí. Utiliza un tubo de impedancia pero requería de gran cantidad de tiempo para la medición de cada frecuencia; gracias a los avances de la tecnología el método de dos micrófonos es mucho más rápido y común que su predecesor.

La exactitud y la repetitividad del método de los dos micrófonos, se ha evaluado en ensayos entre laboratorios. En esta prueba, las muestras constituidas por un material idéntico, fueron probadas por más de una docena de laboratorios independientes, los resultados obtenidos fueron similares, estos estudios se realizaron usando el antiguo "método de relación de onda estacionaria". Se obtuvieron excelentes resultados entre los dos métodos.

En la región de ondas planas en un ducto el campo sonoro puede ser completamente analizado, es decir, puede ser descompuesto en la propagación derecha e izquierda de la onda desde el resultado de dos mediciones simultáneas e independientes de presión.

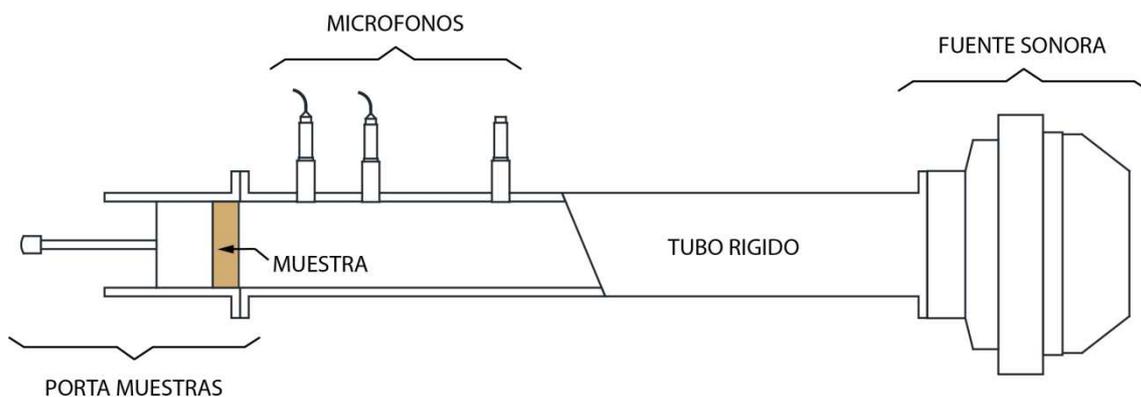
Seybert y Ross desarrollaron el primer método de dos micrófonos, desde las mediciones de auto espectro y espectro cruzado entre los dos micrófonos, para determinar el coeficiente de reflexión complejo. Estos fueron capaces de separar el espectro de la propagación de onda, de la dirección derecha e izquierda. Blasser y Chung desarrollaron un método similar al anterior, estos

utilizaron la medición de la función de transferencia entre dos micrófonos para determinar el coeficiente de absorción acústica. Si se conoce el autoespectro de un micrófono también es posible obtener una completa descomposición de la onda. Ambos métodos son muy parecidos pero el realizado por Belsser y Chung es más sencillo, por lo cual es el más desarrollado y utilizado ya que usa la medición directa de la función de transferencia en el análisis de Fourier.

3.1.2 Descripción

El método de la función de transferencia se muestra esquemáticamente en la Fig.3-1. En el extremo de un tubo recto se coloca una fuente sonora, típicamente un driver de compresión de alto desempeño acústico. Al otro extremo se ubica una muestra del material a ser evaluado, colocado en el dispositivo de soporte de la muestra con una sección de área igual a la del tubo. Un émbolo rígido con una profundidad ajustable se coloca detrás de la muestra para proporcionar una superficie rígida y reflectante. Un par de micrófonos se montan al ras de la pared interior del tubo, colocados a una cierta distancia de la muestra en el tubo.

Fig.3-1 Esquema tubo de impedancia



Fuente: Los autores

El rango de frecuencias donde se puede esperar resultados confiables depende del diámetro del tubo y de la posición de los micrófonos. Se puede lograr un rango amplio de frecuencias mediante la combinación de varios tubos

con diferentes medidas y diámetros, los cuales pueden estar acoplados entre sí o en forma individual, para luego solapar los resultados en una única tabla.

Para realizar la medición de la función de transferencia se pueden utilizar dos técnicas:

Técnica de dos micrófonos: Son necesarios dos micrófonos que serán colocados en dos posiciones en el tubo. Se utiliza para propósitos generales, necesita de una corrección de amplitud y fase entre los micrófonos. Entrega resultados más rápidos, la implementación del sistema es más fácil y posee una gran precisión.

Técnica de un micrófono⁴: Es necesario realizar el cambio de micrófono entre las dos localizaciones para realizar la medición. Requiere de más tiempo para la evaluación, elimina los problemas generados por la fase; y se utiliza para evaluar resonadores y obtener precisión en los resultados.

Se diferencia de la medición del coeficiente de absorción en cámaras reverberantes (ISO 354, ASTM C423), ya que esta determina el coeficiente de absorción (condiciones ideales de medición) por la difusión del sonido incidente. Es por esto que es usado para medir materiales con estructuras pronunciadas en dirección normal y lateral, pero a su vez requiere de muestras más grandes, por lo tanto no es conveniente para investigación y desarrollo de nuevos materiales. Se puede hacer una estimación desde la medición obtenida del tubo de impedancia acústica, para obtener las características del material en un campo difuso y su coeficiente de absorción⁵.

⁴ Ver Anexo A – Procedimiento para la técnica de un solo micrófono.

⁵ Ver Anexo B – Determinación del coeficiente de absorción con incidencia difusa α_{st} de absorbentes de reacción local desde los resultados del método.

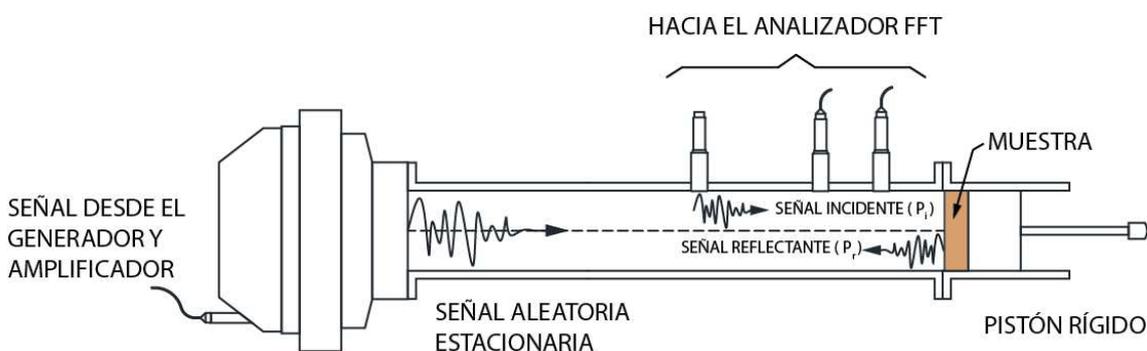
3.1.2.1 Normativas

Actualmente existen dos estándares con descripciones paralelas que han sido desarrollados para la normalización de la construcción y la técnica de medida, mediante un tubo de impedancia. Estas son: ASTM E1050 y la ISO 10534-2. Ambas normas describen lo que ha llegado a ser conocido como el método "función de transferencia" o "dos micrófonos", para medir la absorción y la impedancia acústica de materiales. Estas pautas constituyen las condiciones aceptables en las que los datos se pueden obtener de una forma fiable, sin embargo, el objetivo es sobrepasar los requisitos mínimos de las normas tanto en equipos como en las condiciones de medición.

3.1.3 Principios

La fuente sonora emite señales aleatorias de banda ancha (Ej. Ruido Blanco) producidas por un generador de señales. Estas se propagarán dentro del tubo para así formar un campo sonoro de ondas planas, por lo cual es necesario un tubo recto, rígido, liso y hermético, es decir que no existan desviaciones que puedan influir con la propagación de las ondas planas, además de evitar que entre ruido exterior o se produzcan vibraciones en del tubo. Esta onda incidente viajará desde el altavoz a la muestra donde dependiendo del material y su montaje en el porta muestras, este reflejará a la onda incidente. Ver Fig.3-2.

Fig.3-2 Funcionamiento tubo de impedancia



Fuente: Los autores

Para realizar el método de medición de la función de transferencia es necesario tener dos localizaciones (micrófonos) cerca de la muestra. Las mediciones simultáneas de presión sonora provenientes de dichos lugares serán las usadas para determinar y calcular el factor de reflexión complejo en incidencia normal, el cual se logra gracias a la descomposición de los patrones de onda sonora estacionaria en los componentes de la onda incidente y reflejada. Consecuentemente se computará la impedancia superficial del material y el coeficiente de absorción a incidencia normal. El resultado obtenido de la medición es dependiente de la frecuencia, y de la resolución del sistema.

Un analizador de espectro multi-canal es utilizado para obtener la función de transferencia (función de la respuesta de frecuencia) entre los micrófonos. En esta medición el micrófono más cercano a la fuente es el canal de referencia. Desde la función de transferencia H_{12} , la presión del coeficiente de reflexión R del material es determinado con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}} e^{j2k(L+s)} \quad (3.1)$$

Donde:

L = Distancia entre la cara de la muestra y el primer micrófono,

S = Distancia entre los micrófonos,

$k = 2\pi f / c$, donde f es la frecuencia y c es la velocidad del sonido.

Desde el coeficiente de reflexión, el coeficiente absorción α y la impedancia normalizada ($Z/\rho_0 c$) de la muestra pueden determinarse a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3.2)$$

$$\frac{Z}{\rho_0 c} = \frac{1 + R}{1 - R} \quad (3.3)$$

3.2 PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS

3.2.1 Construcción del tubo de impedancia

El tubo debe ser recto, liso, no poroso, sin fugas ni huecos (excepto para las posiciones del micrófono). Las paredes deben ser pesadas y densas, para evitar vibraciones y resonancias, debe poseer un buen asilamiento de sonido y vibraciones exteriores. Además debe poseer una sección de área uniforme a lo largo de todo el tubo, este valor no puede superar $\pm 0.2\%$. Dicha sección puede ser circular o rectangular⁶, para el presente trabajo se escogió la primera opción.

3.2.2 Restricciones y recomendaciones

Rango de frecuencias

Está determinado entre:

$$f_l < f < f_u \quad (3.4)$$

Donde:

f_l = Frecuencia más baja, limitada por la precisión del equipo de procesamiento de la señal y la separación entre los micrófonos.

f = Frecuencia de operación.

f_u = Frecuencia más alta hasta la que existen ondas planas en la propagación en el tubo, limitada por el diámetro del tubo.

3.2.3 Tubo de sección circular

a. Materiales

El tubo puede ser construido con distintos materiales, las características específicas para cada material se detallan a continuación:

- Paredes metálicas: El espesor debe ser similar al 5% del diámetro.
- Paredes concreto: Se debe sellar muy bien con adhesivos para lograr una superficie lisa, además se debe garantizar la hermeticidad del tubo.

⁶ Ver Anexo C – Parámetros de diseño para un tubo rectangular.

- Paredes de madera: Reforzar con una lámina metálica para evitar posibles fugas.

b. Largo del tubo de impedancia

Los altavoces no producen ondas planas, por lo tanto el tubo tiene que ser lo suficientemente largo para permitir la aparición de ondas planas entre la fuente y la muestra, además los puntos de medición deben estar localizados en el rango de las ondas planas. Debe existir un mínimo de 3 veces el diámetro entre el tubo y el micrófono más cercano a la fuente. Si se quieren realizar mediciones en un espectro ancho de frecuencias se deberían considerar varias posiciones de los micrófonos en el tubo.

c. Diámetro del tubo

Está determinado por:

$$Ka < 1.84 \quad \therefore d < 0.58\lambda_u = f_u d < 0.58 C_0 \quad (3.5)$$

Donde:

d = Diámetro del tubo [m]

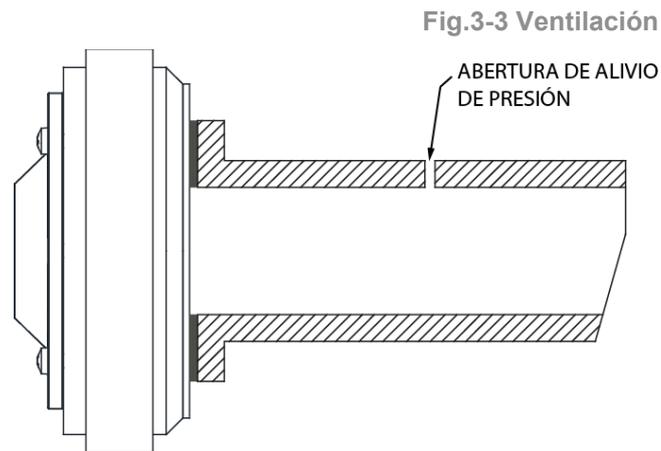
f = Frecuencia [Hz]

C_0 = Velocidad del sonido [m/s]

Es recomendable dejar un margen en la frecuencia superior, por la posible presencia de modos al acercarse a la frecuencia de resonancia transversal del tubo.

d. Ventilación del tubo

Al colocar o quitar la muestra en el tubo se pueden generar grandes variaciones de presión temporales dentro del tubo, esto puede ocasionar deflexión en el diafragma del micrófono lo cual podría ocasionar un potencial daño a largo plazo del mismo, esto se puede solucionar al colocar una abertura de alivio de presión en el tubo, para lo cual se puede realizar una perforación localizada cerca de la fuente de 1-2 [mm]. Al realizar las mediciones se debe sellar dicha abertura. Ver Fig.3-3.



Fuente: Los autores

3.2.4 Micrófonos

a. Distancia entre los micrófonos

Una larga distancia entre los micrófonos puede aumentar la precisión de la medición sin embargo debe cumplir la siguiente relación:

$$f_u s < 0.45 C_o \quad (3.6)$$

Donde:

s = Distancia entre micrófonos [m]

f_u = Frecuencia [Hz]

C_o = Velocidad del sonido [m/s]

Es recomendado que el máximo espaciado(s), sea alrededor del 80% de $C_o/2f_u$, El límite de la frecuencia más baja depende de la separación de los micrófonos y de la precisión del sistema de análisis, pero como guía general:

$$s > 5\% \lambda_l \quad (3.7)$$

Donde:

λ_l = Longitud de onda de la frecuencia más baja [m].

Esta restricción se aplica únicamente si se cumple con todos los requerimientos anteriores.

b. Distancia entre la muestra y los micrófonos

El ubicar los micrófonos muy cerca de la muestra puede causar distorsión, como recomendación general se plantea las siguientes distancias de acuerdo al tipo de material:

- Material plano: 1/2 diámetro.
- Material no homogéneo: 1 diámetro, ayuda a evitar modos de alto orden⁷ inducidos por la superficie tosca del material.
- Material profundamente asimétrico: 2 diámetros, ayuda a disipar los modos de alto orden generados por la superficie.

c. Tamaño de los micrófonos

Se deben utilizar micrófonos del mismo tipo en cada localización bajo la misma configuración de montaje. El diámetro de los micrófonos debe ser muy pequeño comparado con la longitud de onda de la frecuencia más alta y con el espaciamiento de los micrófonos, para de esta manera evitar posibles errores en frecuencias altas. Si se requiere mayor sensibilidad se necesitará un diafragma más grande lo cual puede ser efectivo para tubos más largos, trabajando a frecuencias más bajas. La tabla 3-1 provee las frecuencias límites para los tamaños típicos de micrófonos, a continuación están las recomendaciones para los tamaños del diámetro del micrófono:

$$\phi_m < C_o / f_u \quad (3.8)$$

$$\phi_m < 20\% s \quad (3.9)$$

Tabla 3-1 Recomendación de las máximas frecuencias en base al diámetro del micrófono

Diámetro nominal (in)	Diámetro diafragma (mm)	Frecuencias máximas (Hz)
1	22.7	3000
1/2	12.2	5600
1/4	5.95	11500

Fuente: Los autores

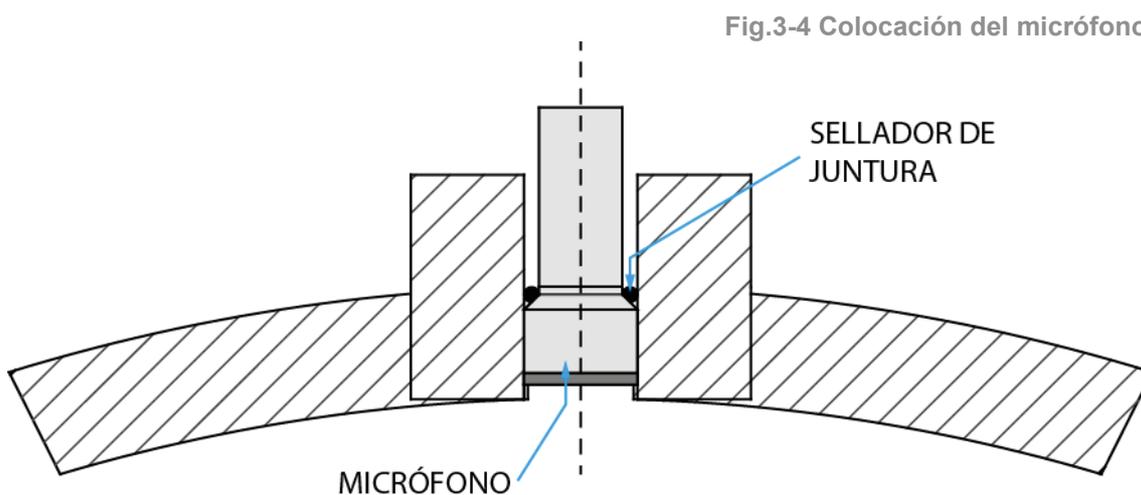
⁷ Los modos de alto orden se disipan de manera exponencial a medida que se propagan en el tubo.

d. Posiciones del micrófono

Es recomendable ubicar los diafragmas de los micrófonos al ras de la pared interna del tubo, como está descrito en la Fig.3-4 en este caso se recomienda el uso de micrófonos de presión⁸.

Al ubicar los micrófonos al ras del tubo se debe dejar un pequeño espacio. Se puede utilizar una viñeta de soporte del micrófono o un sistema de sujeción del cuerpo del micrófono, el cual debe ser idéntico en los 2 micrófonos. El espacio entre la grilla del micrófono y el contenedor del mismo debe estar sellado en forma ajustada, de igual manera que el cuerpo del micrófono en el agujero.

Al usar un solo micrófono o al tener más aberturas se deben sellar los otros agujeros para evitar fugas.



Fuente: Los autores

⁸ Si el micrófono se encuentra dentro del tubo se recomienda el uso de micrófono de campo libre.

3.2.5 Porta muestras

a. Soporte de la muestra

Este dispositivo puede estar integrado al tubo o puede ser una unidad separada. El tamaño del porta muestras deber ser lo suficientemente largo para poder instalar el objeto de prueba, y permitir un espacio de aire luego de este. Si es una unidad separada debe cumplir con las mismas dimensiones del tubo (sección transversal), e igualmente debe tener una precisión de $\pm 0.2\%$.

Se recomienda hacer el objeto de prueba accesible tanto desde la parte frontal como desde la parte trasera del porta muestras, de esta forma es posible verificar la correcta ubicación de la muestra. La parte posterior del porta muestras tiene que encajar de forma ajustada dentro del tubo, ya que esta sirve como una terminación rígida para realizar las mediciones. Esta terminación puede consistir de una placa metálica con un espesor igual o mayor a 20 mm, para algunos tipos de medición se puede dejar un espacio de aire entre la muestra y la placa, formando una cavidad⁹, que sirve por ejemplo para simular placas suspendidas.

b. Montaje de la muestra a ser evaluada

La muestra debe encajar cómodamente en el contenedor, por lo cual no debe ser comprimida excesivamente, ni tampoco debe quedar muy ajustada ni abultada. Es recomendado sellar cualquier grieta o abertura cercana al filo de la muestra con vaselina o plastilina. La muestra debe ser sujeta firmemente si es necesario tapando y engranando totalmente el borde. Por ejemplo, las muestras como alfombra deben ser firmemente fijadas a la placa trasera, usando una cinta adhesiva doble faz, para prevenir movimiento provocado por vibraciones y huecos de aire.

La superficie frontal de una muestra plana debe ser montada al eje del tubo. Sus posiciones deben ser especificadas con tolerancias mínimas de ± 0.5 [mm] para objetos planos y superficies lisas. Para materiales porosos de una baja

⁹ Ver Anexo D – Cavidad en la terminación del porta muestras.

densidad volumétrica, es de utilidad arreglar y definir la superficie de forma delgada, usando una malla amplia de alambre anti vibratoria.

Si la muestra posee una cara desigual o irregular, la posición de los micrófonos debe estar seleccionado lo suficientemente alejado, para que la medición de la función de transferencia se encuentre en la región de la onda plana. Cuando la muestra tiene desigualdades en la parte trasera, que podrían introducir un espacio de aire no deseado, una capa de masilla debe ser situada entre esta y la placa trasera, para sellarla y añadir suficiente espesor, obteniéndose una superficie frontal paralela a la placa. Un mínimo de dos muestras deben ser medidas repetidamente usando las mismas condiciones de montaje, si es que la muestra no es uniforme.

Si el objeto de prueba tiene una estructura lateral irregular (Ej. Hojas perforadas cubiertas, arreglos de resonadores, etc.), los cortes de las muestras de prueba deben ser a lo largo de las líneas de simetría de dicha estructura. Si las dimensiones del objeto no se ajustan a las dimensiones de corte del tubo de impedancia, las mediciones deben ser hechas con varias muestras variando las posiciones de los cortes relativos de la estructura. Repeticiones de las mediciones con muestras cortadas en diferentes secciones del objeto de prueba son también necesarias con materiales que son lateralmente no homogéneos (como los productos de la fibra mineral).

c. Equipos de procesamiento de señal

Consiste de un sistema con dos preamplificadores y dos canales con analizadores de transformada rápida de Fourier (FFT). Este sistema es requerido para medir la presión del sonido en las localizaciones de los dos micrófonos y calcular la función de transferencia entre ellos.

El rango dinámico del analizador debe ser mayor a 65 dB. Los errores en la función de transferencia estimada, pueden ser ocasionados por no linealidades, resolución, inestabilidad y sensibilidad de la temperatura del equipo de procesamiento de señales, los errores no deben ser mayores a 0.2 dB.

Además es necesario tener un generador capaz de producir una señal para realizar la evaluación.

d. Generador de señal

Tiene que ser capaz de generar una señal estacionaria, con una densidad espectral plana en el rango de frecuencias de interés. Debe ser capaz de producir una o más de las siguientes señales:

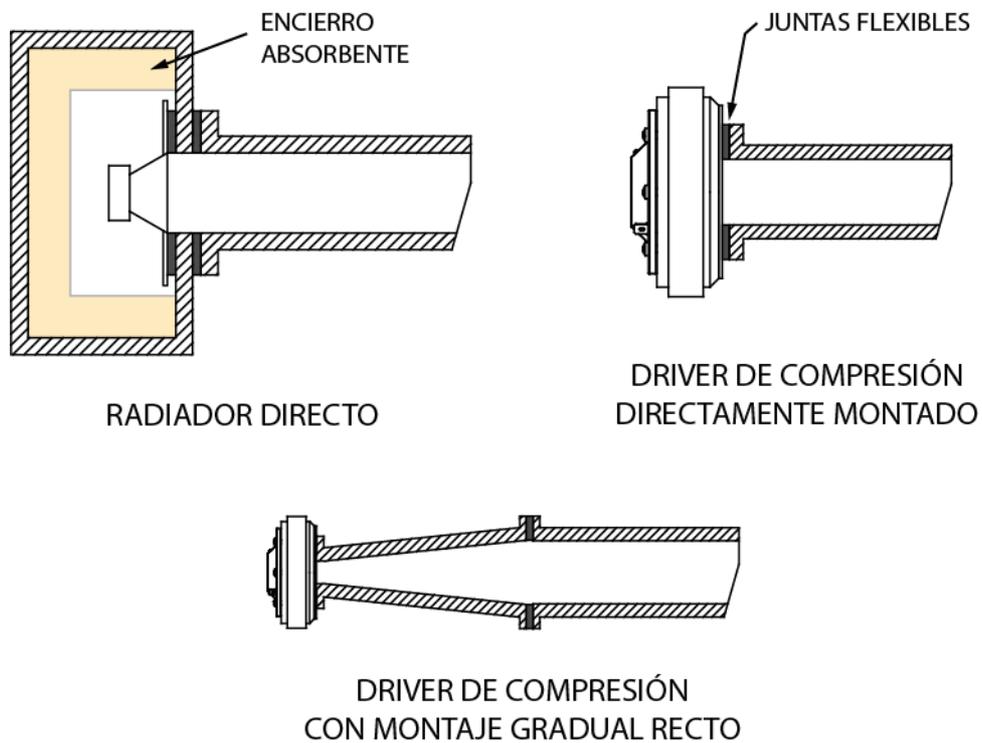
- Random (Aleatoria)
- Pseudo-Random (Pseudo-Aleatoria)
- Periodic Pseudo-Random (Periódica Pseudo-Aleatoria)
- Chirp Excitation

Para propósitos de la calibración es necesaria la generación de una frecuencia discreta, esta prueba debe tener un error o incertidumbre menor al 2%.

3.2.6 Fuente sonora

Un altavoz de membrana (o driver de compresión), debe ser localizado al extremo del tubo, opuesto al sitio donde va ubicada la muestra. La superficie de la membrana del altavoz debe cubrir por lo menos $2/3$ del área transversal del tubo de impedancia. El eje de simetría (coaxial) entre el altavoz y el tubo puede ser el mismo, pero también podría estar inclinado o conectado al tubo mediante un codo. El altavoz puede estar contenido en una caja para evitar transmisión de ruido por el aire a los micrófonos. Se debe aplicar un sistema elástico anti vibratorio entre el tubo de impedancia y el marco del altavoz o a la caja del altavoz, para evitar que la estructura del tubo entre en vibración. La fuente sonora debe tener una respuesta de potencia homogénea sobre todas las frecuencias de interés. Algunos ejemplos de montaje del altavoz pueden ser vistos en la Fig.3-5.

Fig.3-5 Tipos de montaje del altavoz



Fuente: Los autores

3.2.6.1 Terminación del altavoz

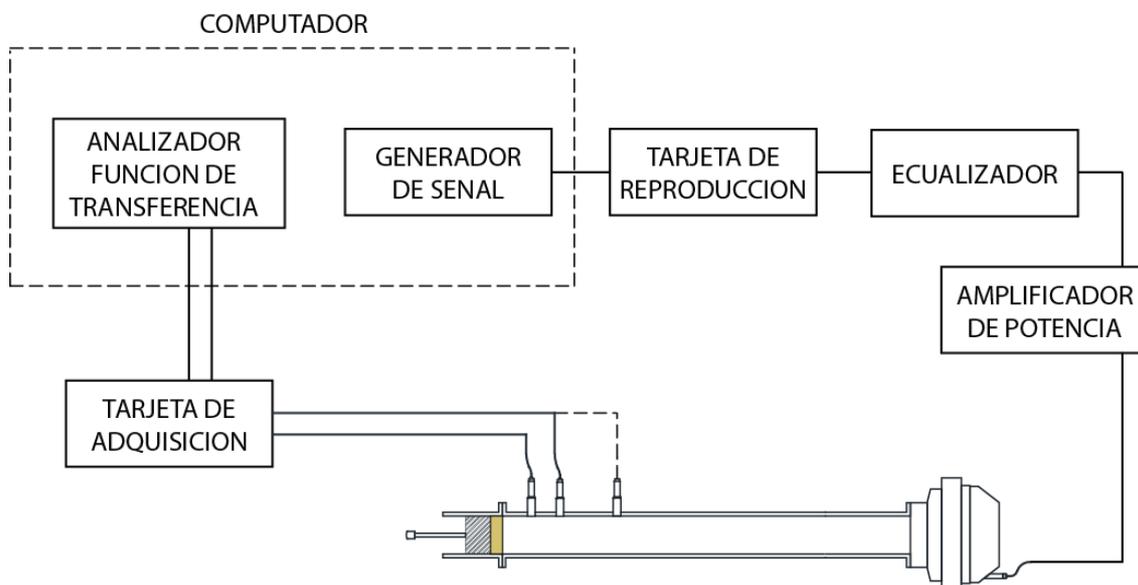
Las resonancias de la columna de aire en el tubo de impedancia pueden aparecer si la impedancia mecánica del diafragma del altavoz es alta, para evitar esto se debe revestir el interior del tubo cerca al altavoz con algún material absorbente, en al menos 200 mm de longitud, pero se debe realizar un proceso de ecualización por la pérdida de energía sonora en altas frecuencias al poner este material.

3.2.7 Termómetro y barómetro

La temperatura en el tubo de impedancia debe ser medida y mantenida constante durante la medición con una tolerancia de $\pm 1^\circ\text{K}$. La presión atmosférica debe ser medida con una tolerancia de $\pm 0.5 \text{ KPa}$.

3.3 ESQUEMA BÁSICO DE CONEXIONES

Fig.3-6 Equipos e instrumentación



Fuente: Los autores

3.4 PRUEBAS Y MEDICIONES PRELIMINARES¹⁰

El equipo debe ser conectado como se indica en la Fig.3-6 y debe ser revisado antes de realizar las pruebas. Estas ayudan a excluir errores y aseguran los requerimientos mínimos. Las pruebas serán consideradas en dos categorías: previo a cada medición y calibraciones periódicas. En cada caso el altavoz debe ser operado por lo menos 10 minutos antes de cada medición para permitir que la temperatura se estabilice.

3.4.1 Antes de cada medición

Chequeos previos a cada medición involucran la respuesta constante del micrófono, la medición de la temperatura y la relación señal ruido.

- a. **Medición de la temperatura:** Precisión ± 0.5 K o mejor.
- b. **Medición de la presión del aire**
- c. **Calibración de la amplitud del micrófono:** Precisión ± 0.3 dB o mejor.

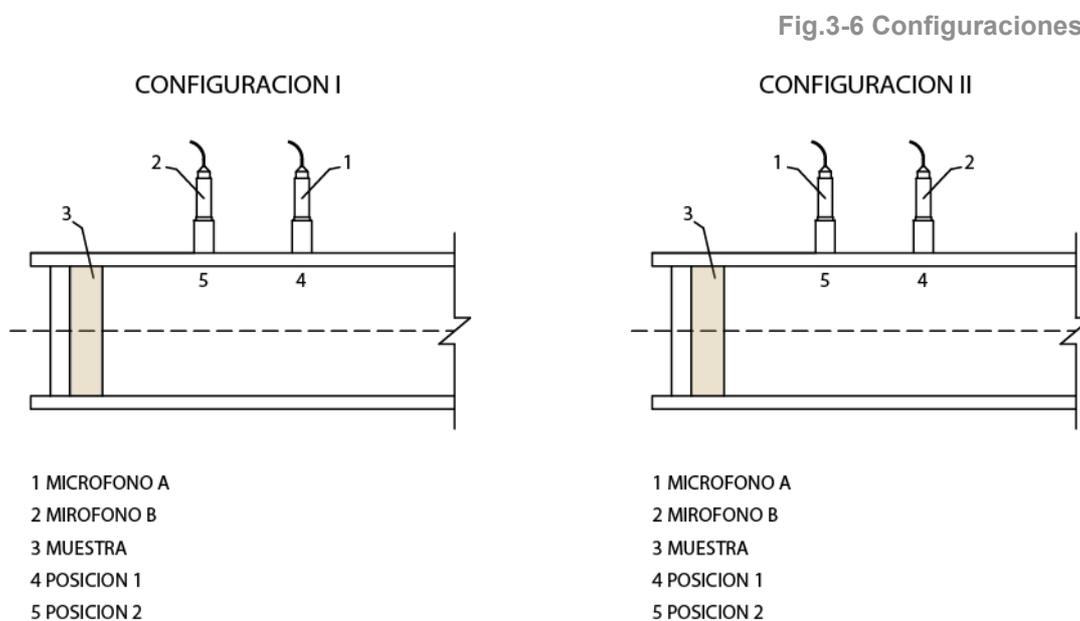
¹⁰ Ver anexo E – Mediciones y calibraciones preliminares y periódicas.

d. **Relación señal ruido:** Debe ser 10dB o más.

3.4.2 Procedimiento de evaluación del sistema

- a. **Especificación del plano de referencia** (sección ubicada en la unión del tubo y del porta muestras).
- b. **Determinación de la velocidad del sonido, longitud de onda e impedancia característica**
- c. **Selección de la amplitud de la señal:** Durante una prueba cualquier frecuencia que tenga un valor de respuesta por debajo a 60 dB del valor de la frecuencia máxima debe ser rechazada.
- d. **Selección del número de promedios de mediciones¹¹**
- e. **Corrección por errores de micrófono**
 - i. **Mediciones repetidas con los micrófonos cambiados**

La corrección para los errores de micrófono se da al cambiar canales para cada medición en un espécimen de prueba.



Fuente: Los autores

¹¹ Ver anexo F – Errores de fuente.

Con los datos obtenidos se computa la función de transferencia utilizando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = (H_{12}^I * H_{12}^{II})^{1/2} = |H_{12}|e^{j\phi} \quad (3.10)$$

Si el analizador es solamente capaz de medir la función de transferencia en una sola dirección H_{12} puede ser computada usando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = \left(\frac{H_{12}^I}{H_{12}^{II}} \right)^{1/2} = |H_{12}|e^{j\phi} \quad (3.11)$$

ii. Predeterminar factor de calibración

Este es un procedimiento de calibración usando un espécimen especial de calibración (Ver sección 4.2.1), y su corrección es válida para todas las mediciones posteriores. Este procedimiento deber ser hecho antes de una serie de mediciones de varias muestras. Luego de la calibración los micrófonos se mantienen en su lugar. Se sigue el procedimiento descrito anteriormente. Ver Fig.3-6.

Se completa el factor de calibración H_c usando la siguiente ecuación:

$$H_c = \left(\frac{H_{12}^I}{H_{12}^{II}} \right)^{1/2} = |H_c|e^{j\phi_c} \quad (3.12)$$

Donde:

H_c = Es el factor de calibración usado para corregir errores de amplitud y fase entre los micrófonos.

Si el analizador es solamente capaz de medir la función de transferencia en una sola dirección H_c puede ser computada usando la siguiente ecuación:

$$H_c = (H_{12}^I * H_{12}^{II})^{1/2} = |H_c|e^{j\phi_c} \quad (3.13)$$

Para las subsecuentes mediciones se debe ubicar los micrófonos en la configuración I (ver Fig.3-6). Luego se inserta el espécimen de evaluación y se mide la función de transferencia.

$$\hat{H}_{12} = |\hat{H}_{12}|e^{j\hat{\phi}} = \hat{H}_r + j\hat{H}_i \quad (3.14)$$

Donde:

\hat{H}_{12} = Función de transferencia sin corregir

$\hat{\phi}$ = Ángulo de fase sin corrección

\hat{H}_r = Parte real de \hat{H}_{12}

\hat{H}_i = Parte imaginaria de \hat{H}_{12}

Se deben corregir los errores en la respuesta del micrófono usando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = |H_{12}|e^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} \quad (3.15)$$

3.4.3 Calibración periódica

Las calibraciones periódicas son desarrolladas con la terminación rígida del tubo de impedancia vacío. Su objetivo es la determinación del centro acústico del micrófono y/o las correcciones por atenuación en el tubo de impedancia. (Ver sección 4.2.1).

- a. Corrección por la atenuación en el tubo
- b. Determinación del centro acústico del micrófono

3.5 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRE DOS LOCALIZACIONES

Se debe insertar el espécimen de prueba y se procede a realizar la medición de la función de transferencia compleja.

La función de transferencia compleja puede ser definida en 3 formas:

$$H_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}} = |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i \quad (3.16)$$

$$H_{12} = \frac{S_{22}}{S_{21}} = |H_{12}|e^{j\phi} = H_r + jH_i \quad (3.17)$$

$$H_{12} = \left[\frac{S_{12}}{S_{11}} * \frac{S_{22}}{S_{21}} \right]^{1/2} = H_r + jH_i \quad (3.18)$$

Donde:

H_r = Parte real de H_{12}

H_i = Parte imaginaria de H_{12}

S_{12} (Espectro cruzado) = Es el producto de $P_1P_2^{12}$, determinado desde la presión del sonido compleja p_1 y p_2 , en dos posiciones del micrófono.

S_{11} (Auto Espectro) = Es el producto de $P_1P_1^{11}$, determinado desde la presión del sonido compleja p_1 en la posición del micrófono 1.

H_{12} (Función de transferencia) = Es la función de transferencia desde la posición del micrófono 1 a la posición del micrófono 2, definido por una relación compleja p_2/p_1 .

p (Presión del sonido complejo) = Es la transformada de Fourier de la presión acústica temporal.

- La ecuación 3.16 es normalmente usada.
- La ecuación 3.17 es recomendada en casos donde hay ruido en la entrada.
- La ecuación 3.18 es recomendada para el caso donde hay ruido envolvente en la entrada y la salida.

¹² Es la compleja conjugada.

3.5.1 Determinación del factor de reflexión¹³

El método de medición está basado en el hecho, que el factor de reflexión sonora a una incidencia normal r , puede ser determinado de la medición de la función de transferencia H_{12} entre dos posiciones de micrófono en frente del material a ser evaluado.

Las presiones del sonido de la onda incidente P_i y la onda reflejada P_r son respectivamente:

$$P_i = \widehat{P}_i e^{jk_0 x} \quad (3.19)$$

$$P_r = \widehat{P}_r e^{-jk_0 x} \quad (3.20)$$

Donde:

\widehat{P}_i y \widehat{P}_r = Son las magnitudes de P_i y P_r en el plano de referencia ($x=0$)
 $K_0 = K'_0 - jK''_0$ es un número de onda complejo.

Las presiones sonoras P_i y P_r en las dos posiciones del micrófono son:

$$P_1 = \widehat{P}_i e^{jk_0 x_1} + \widehat{P}_r e^{-jk_0 x_1} \quad (3.21)$$

$$P_2 = \widehat{P}_i e^{jk_0 x_2} + \widehat{P}_r e^{-jk_0 x_2} \quad (3.22)$$

La función de transferencia para la onda incidente H_i es:

$$H_i = \frac{P_{2i}}{P_{1i}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad (3.23)$$

Donde:

$S = x_1 - x_2$, es la separación entre los dos micrófonos.

De forma similar la función de transferencia para la onda reflejada H_r es:

$$H_r = \frac{P_{2r}}{P_{1r}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0 s} \quad (3.24)$$

¹³ Es importante que la función de transferencia sea compensada por los errores de fase y amplitud de la presión en los micrófonos.

La función de transferencia H_{12} para el campo sonoro ahora puede ser obtenida usando las ecuaciones 3.21 y 3.22 y notando que $\hat{P}_R = r\hat{P}_I$ como:

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{jk_0x_2} + re^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1} + re^{-jk_0x_1}} \quad (3.25)$$

Transponiendo la ecuación anterior, y obteniendola, desde las ecuaciones de H_i y H_r se tiene:

$$r = |r|e^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} * e^{2jk_0x_1} \quad (3.26)$$

Donde:

r_r = Componente real

r_i = Componente imaginario

x_1 = Distancia entre la muestra y el micrófono más lejano

ϕ_r = Es el ángulo de fase del factor de reflexión en una incidencia normal

El factor de reflexión sonora rR en el plano de referencia ($X=0$) puede ser ahora determinado desde las funciones de transferencia medidas, la distancia X_1 y el número de onda K_0 la cual debe incluir la constante de atenuación en el tubo k_0'' de ser necesaria.

3.5.2 Determinación del coeficiente de absorción

Coeficiente de absorción a una incidencia normal:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (3.27)$$

3.5.3 Determinación de la relación de la impedancia acústica específica

Impedancia acústica específica:

$$\frac{Z}{\rho c_0} = \frac{R}{\rho c_0} + \frac{jX}{\rho c_0} = \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (3.28)$$

Donde:

R = Componente real

X = Componente imaginario

ρc_0 = Impedancia característica

3.5.4 Determinación de la relación de la admitancia acústica específica

Admitancia acústica específica:

$$G\rho c_0 = g\rho c_0 - jb\rho c_0 = \frac{\rho c_0}{Z} \quad (3.29)$$

Donde:

g = Componente real

b = Componente imaginario

ρc_0 = Impedancia característica

3.5.5 Resultados del método

Precisión

Los detalles del procedimiento de medición y el procesamiento de la señal deben ser escogidos para que el rendimiento sea mejor al 1% y la incertidumbre sea menor al 1% para la amplitud y 0.6 grados para la fase de la función de transferencia en todas las frecuencias evaluadas y reportadas. Los errores se pueden suscitar por errores de la fuente, por la evaluación de la función de transferencia (particularmente por las muestras y colocación de las mismas en el tubo de impedancia), error de Bias y errores en la definición del plano de referencia.

Los errores de fuente deben ser considerados en dos grandes categorías:

Errores de Bias

a. Tiempo de Aliasing (Señales no periódicas)

Se debe evitar el tiempo de aliasing seleccionando la duración para que cada medición sea mucho más larga que los tiempos de propagación acústica dentro del sistema del tubo de impedancia, cuya fórmula es:

$$t \gg \frac{2x_1}{c_0} \quad (3.30)$$

Donde:

t = Duración de la muestra grabada [segundos]

x_1 = Distancia desde la muestra al micrófono más lejano [m]
 c_0 = Velocidad de sonido [m/s]

b. Errores de fase (Falta de coincidencia)

Cuando se usa la técnica de dos micrófonos, el error de fase entre estos es inevitable y debe ser compensado mediante el factor de calibración.

c. Errores de amplitud

Cuando se usan dos micrófonos, puede existir un error debido a la sensibilidad de los mismos, por lo cual se debe seguir una calibración del sistema antes de iniciar la medición.

Errores aleatorios

El número de promedios requerido para conseguir un error estándar particular para las mediciones en una localización de un micrófono en particular está dado por:

$$n = (1/(2 \sigma))^2 \quad (3.31)$$

Donde:

n = Es el número de promedios de espectro independiente (no solapados)

σ = Error estándar

4 DISEÑO

Una vez revisados todos los parámetros y limitaciones en la construcción del tubo de impedancia se presentan las opciones escogidas tanto en materiales, equipos, dimensiones y configuración del tubo. Para realizar esta tarea se siguieron los siguientes lineamientos:

- Costo
- Eficiencia
- Lograr un ancho de frecuencia para la medición de 80 Hz a 5600 Hz
- Fácil montaje
- Opción a diferentes posibilidades de montaje

TUBO DE IMPEDANCIA

Se eligió acero inoxidable para la construcción del tubo, ya que este tipo de tubos presentan una tolerancia aceptable en la sección transversal ($\pm 0.057\%$ / metro), es un material mucho más liso, sin poros, que posee buena rigidez y densidad. Las dimensiones se determinaron de acuerdo a los tubos que se encuentran comercializados en el país.

Como se busca un rango de frecuencias lo suficientemente amplio, se optó por un diámetro pequeño del tubo ($d=38.1\text{mm}$ $e=2\text{mm}$). El largo del tubo es de 1,3 metros y se consideran varias posiciones de micrófonos en el tubo.

El porta muestras es del mismo material del tubo, se integra mediante platinas de sujeción con un material elástico en el medio. El largo del porta muestras es de 30 cm, y se determinó por el hecho de poseer una placa móvil rígida de 20 mm de espesor y para tener espacio suficiente para poder realizar distintas pruebas con distintos espesores de material y/o cámaras de aire.

Todas estas medidas están dirigidas a obtener un nivel de ruido de fondo bajo dentro del tubo, en lo posible entre 10 – 20 dB. Esto porque a menudo es necesario medir materiales de absorción a niveles relativamente bajos para que coincida con las condiciones de campo (por ejemplo, aproximadamente 65 dB para los materiales utilizados en las oficinas o vehículos), el estándar

recomienda 10 dB entre la señal y el ruido de fondo, pero se buscará llegar de 20 – 30 dB.

MICRÓFONOS

Para lograr una mayor precisión y realizar posibles comparaciones en los resultados se tienen 4 localizaciones de micrófonos con sistemas de montajes iguales, sobre todo para abarcar una mayor precisión en bajas frecuencias.

Para poder abarcar todo tipo de material, es decir de diferente estructura, se instaló una placa rígida movable en el porta muestras (émbolo), que puede variar la distancia entre la muestra y la terminación del tubo. Además dicho sistema funcionará para realizar mediciones del material con cámara de aire. De acuerdo al tipo de medición se escogieron dos micrófonos de presión de ¼” y del mismo tipo, los cuales poseen una curva de respuesta de frecuencia plana en el rango de interés, además de tener un NPS máximo muy elevado para realizar mediciones a diferentes niveles sonoros y con una relación Señal/Ruido adecuada para lograr una muy buena precisión.

Para el montaje de los micrófonos se pueden usar o’ rings¹⁴ para lograr un buen sellamiento, y se los debe ubicar al ras de la pared del tubo de acuerdo a lo especificado anteriormente.

ALTAVOZ

Se utilizó un driver de compresión acústica que posee una buena respuesta de frecuencias, es decir con una señal aceptable desde los 50 Hz hasta los 7000 Hz con una tolerancia de ± 10 dB, sobre todo en el rango de interés, capaz de manejar niveles sonoros elevados dentro del tubo, ya que la absorción de muchos materiales depende de la intensidad del sonido, por lo que resulta útil probar estos materiales con niveles por encima y por debajo de las condiciones de campo. El altavoz escogido tiene un diafragma que cumple con la condición

¹⁴ Sistemas de sellamiento de caucho de forma circular.

de que debe ser mayor a los 2/3 del diámetro del tubo. Se lo colocó de forma coaxial con el eje de simetría del tubo.

GENERADOR DE SEÑAL

Se utilizó un computador como generador de señales para alimentar al altavoz mediante un amplificador de potencia. Se tendrá una señal estacionaria que cumpla con las condiciones de las normas. Se utiliza ruido blanco como señal de medición, por poseer una densidad espectral uniforme.

SISTEMA DE PROCESAMIENTO SEÑAL

Para el sistema de procesamiento se utiliza una interfaz que realiza la conversión A/D de la señal. Posteriormente se conecta a un computador donde los datos son recopilados, grabados, calculados y analizados mediante software para la entrega de los resultados deseados. Al trabajar en sistemas digitales el rango dinámico, la linealidad del sistema, la resolución y estabilidad del equipo superan los límites requeridos.

OTROS

Termómetro y barómetro

Sistemas para realizar mediciones atmosféricas previas para lograr resultados más precisos, ya que afectan a variables como la velocidad del sonido y la impedancia acústica del aire.

4.1 RESUMEN DE EQUIPOS¹⁵

Tabla 4-1 Equipos a utilizar

DESCRIPCIÓN		
TUBO		
MATERIAL	ACERO INOXIDABLE	
TOLERANCIA DIÁMETRO	±1.3	mm
ESPESOR	1.5	mm

¹⁵ Ver Anexo I – Especificaciones técnicas de equipos.

LONGITUD	1	m
DIÁMETRO EXTERNO	38.1	mm
DIÁMETRO INTERNO	35.1	mm
PORTA MUESTRAS		
LONGITUD	0.25	m
TERMINACIÓN	PISTÓN (ÉMBOLO)	
ESPESOR PLACA	25	mm
MICRÓFONO		
RESPUESTA DE FRECUENCIA	50 – 16000 Hz \pm 1.5dB	
SENSIBILIDAD	16	mV/Pa
NPSmax	128	dB
S/N	>57	dB
TIPO	PRESIÓN	
DIÁMETRO CAPSULA	9	mm
ALTAVOZ		
RESPUESTA DE FRECUENCIA ¹⁶	20 – 20000 Hz -20dB	
SENSIBILIDAD	118	dB 1mW
POTENCIA (AES)	80	watts
IMPEDANCIA NOMINAL	8	Ohm
DIÁMETRO GARGANTA	1	Pulgadas
DIÁMETRO DIAFRAGMA	2	Pulgadas
INTERFAZ DE AUDIO		
RESPUESTA DE FRECUENCIA	20 – 20000 Hz	
S/N	91	dB
RESOLUCIÓN	41	KHz
BIT DEPTH	16	bits

Fuente: Los autores

¹⁶ Ondas planas dentro del tubo.

4.2 RESUMEN DE DISEÑO

Tabla 4-2 Parámetros de diseño

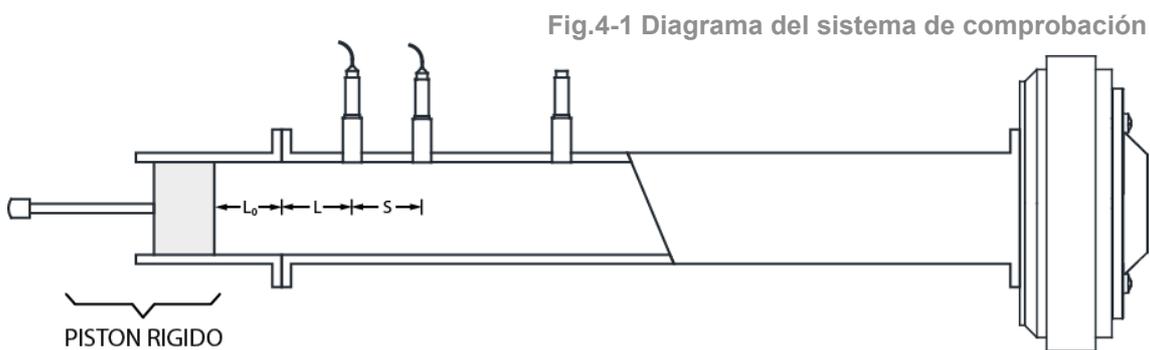
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PARÁMETROS				
CONSTRUCCIÓN				
DIMENSIONES				
PARÁMETRO	FUENTE	RESTRICCIÓN	LIMITANTE	VALOR ESCOGIDO
f_{u1}	ISO	$d < 0.58\lambda_u = \frac{f_u d}{C_o} < 0.58 C_o$	$f_u < 5684.3 [Hz]$	$f_u = 5660 [Hz]$
s_1	ISO	$f_u s < 0.45 C_o$	$s < 0.0273 [m]$	$s = 0.025 [m]$
f_{l1}	ISO	$s > 5\% \lambda_l$	$f_l > 631.6 [Hz]$	$f_l = 690 [Hz]$
s_2		-	-	$s = 0.075 [m]$
f_{l2}	ISO	$s > 5\% \lambda_l$	$f_l > 229 [Hz]$	$f_l = 250 [Hz]$
f_{u2}	ISO	$f_u s < 0.45 C_o$	$f_u < 2064 [Hz]$	$f_u = 2000 [Hz]$
s_3		-	-	$s = 0.2 [m]$
f_{l3}	ISO	$s > 5\% \lambda_l$	$f_l > 86 [Hz]$	$f_l = 88 [Hz]$
f_{u3}	ISO	$f_u s < 0.45 C_o$	$f_u < 774.5 [Hz]$	$f_u = 700 [Hz]$
x_1	ISO	Estructura material		
		Sin estructura = 1/2 D Estructura semi-lateral = 1 D Asimétrico = 2 D	$x_1 > 0.01755$	$x_1 = 0.02 [m]$

L	ISO	$L > 3\phi_T$	$L = 0.10 [m]$	$L = 0.78 [m]$
EQUIPOS				
TUBO				
MATERIAL	Liso, rígido, uniforme, poco poroso			
TOLERANCIA	ISO	$\pm 0.2 \%$	$\pm 0.34\%$	-
ESPESOR	ISO	$e \sim 5 \% \phi_T$	5.25 %	-
MICRÓFONOS				
DIÁMETRO CAPSULA	ISO	$\phi_m < C_o/f_u$	$\phi_m = 0.06 [m]$	$\phi_m = 0.009[m]$
		$\phi_m < 20\% s$	$\phi_m = 0.005 [m]$	$\phi_m = 0.009[m]$
ALTAVOZ				
DIÁMETRO DIAFRAGMA	ISO	$\phi_A > 2/3 \phi_T$	$\phi_A > 0.0234[m]$	$\phi_A = 0.0254[m]$

Fuente: Los autores

4.2.1 Selección del material de referencia y evaluación del sistema de medición

A pesar de todos estos ensayos y las guías que establecen las normas, vale recalcar que ante la inexistencia de un material absoluto de referencia que tenga información de todas sus propiedades acústicas, es importante contar con un material de referencia que sea testeado periódicamente que garantice la calidad y precisión de los equipos. Sin embargo, se puede realizar una prueba fácil y rápida para comprobar el sistema y el proceso de medición. Dicha prueba consiste en medir la parte imaginaria de la impedancia de un tubo cerrado de longitud L_0 como se muestra en la Fig.4-1. Para llevar a cabo la prueba, la muestra se extrae del porta muestra, y el émbolo del soporte de la muestra es configurado a una profundidad específica. La profundidad no es relevante, pero su valor debe ser conocido con precisión.



Fuente: Los autores

La impedancia normalizada teórica $Z/\rho_0 C$ de un tubo cerrado de longitud L_0 está dado por:

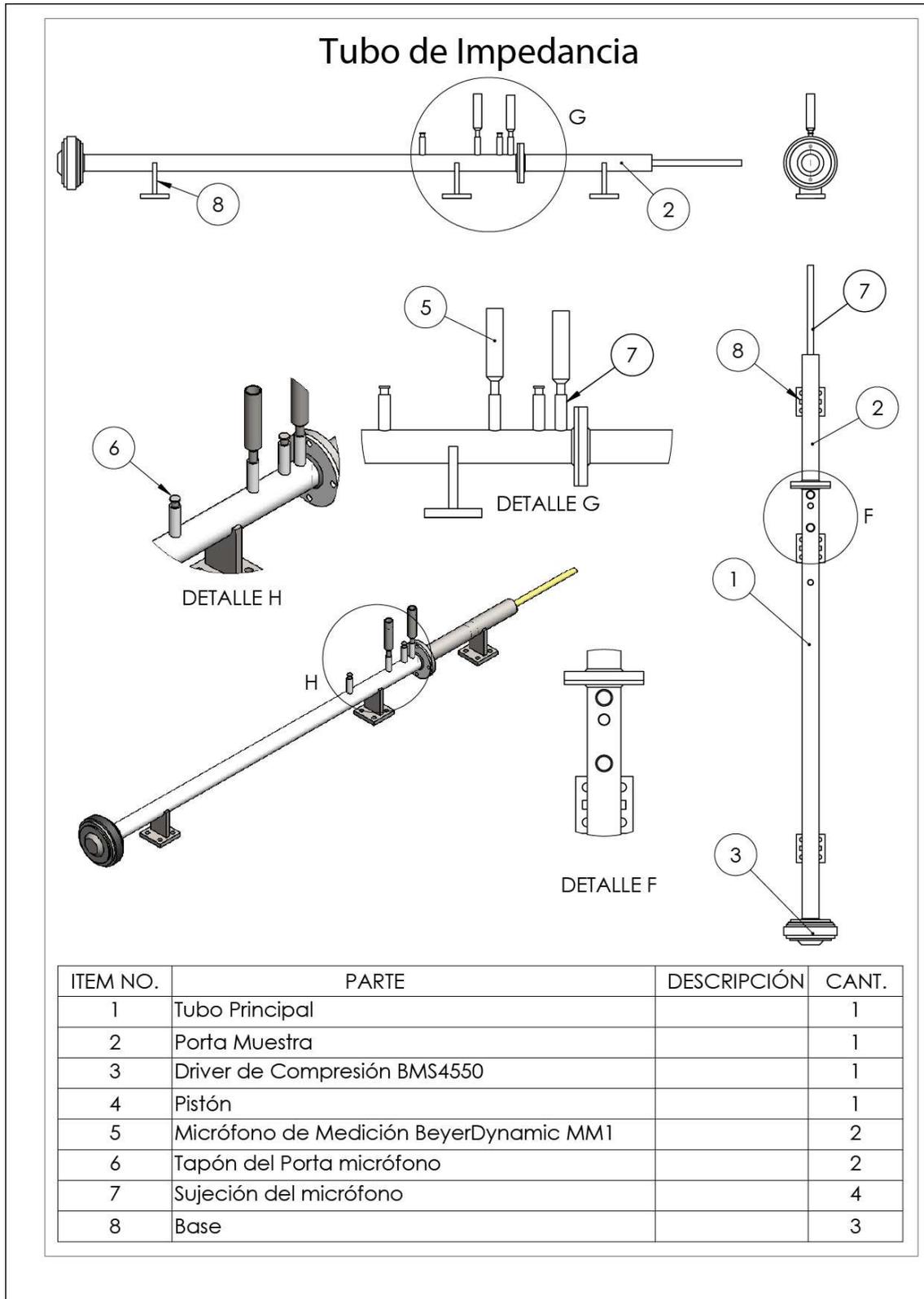
$$Im\left(\frac{Z}{\rho_0 C}\right) = \frac{-1}{\tan KL_0} \quad (4.1)$$

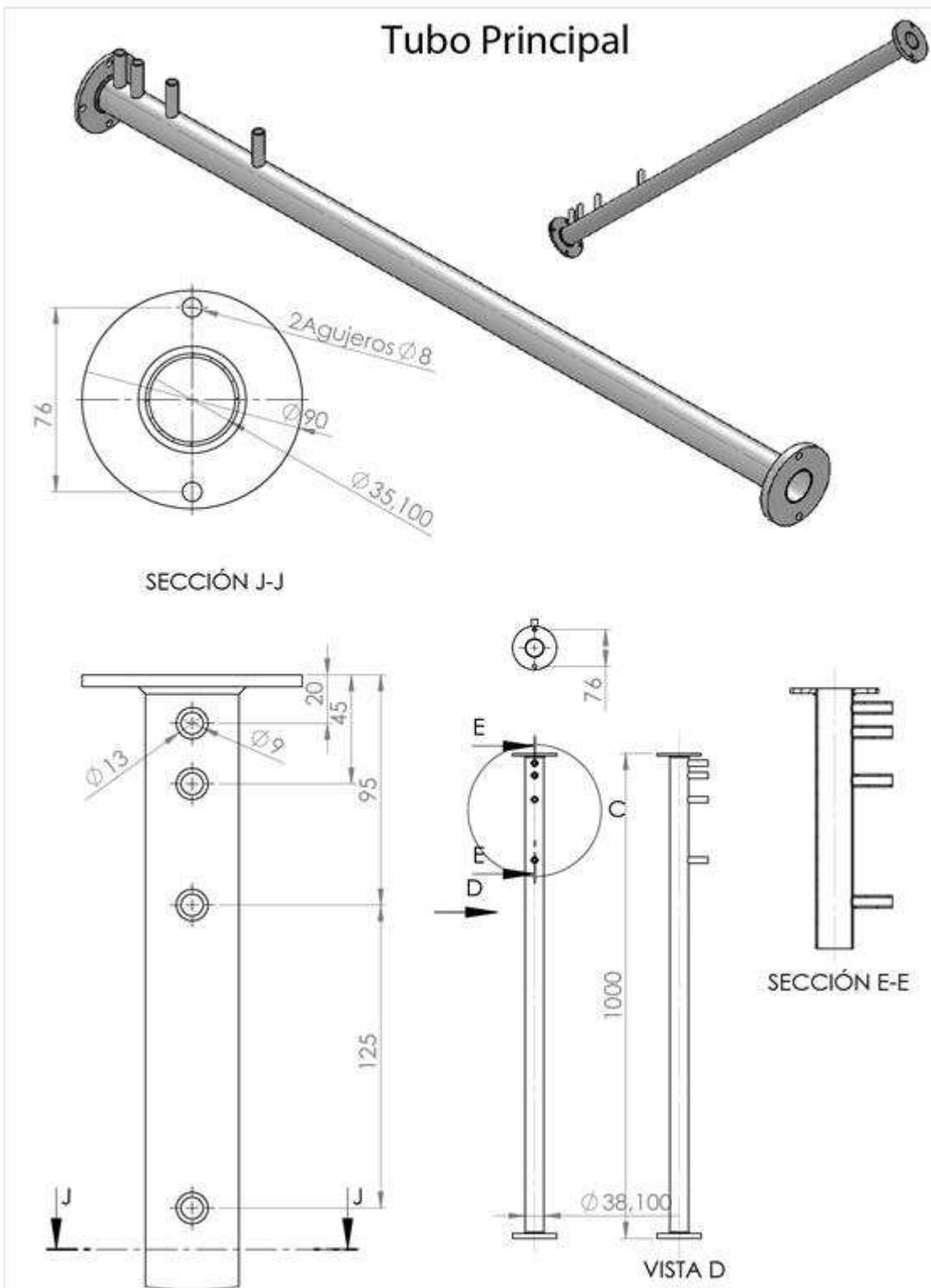
Donde:

$$k = 2\pi f/c.$$

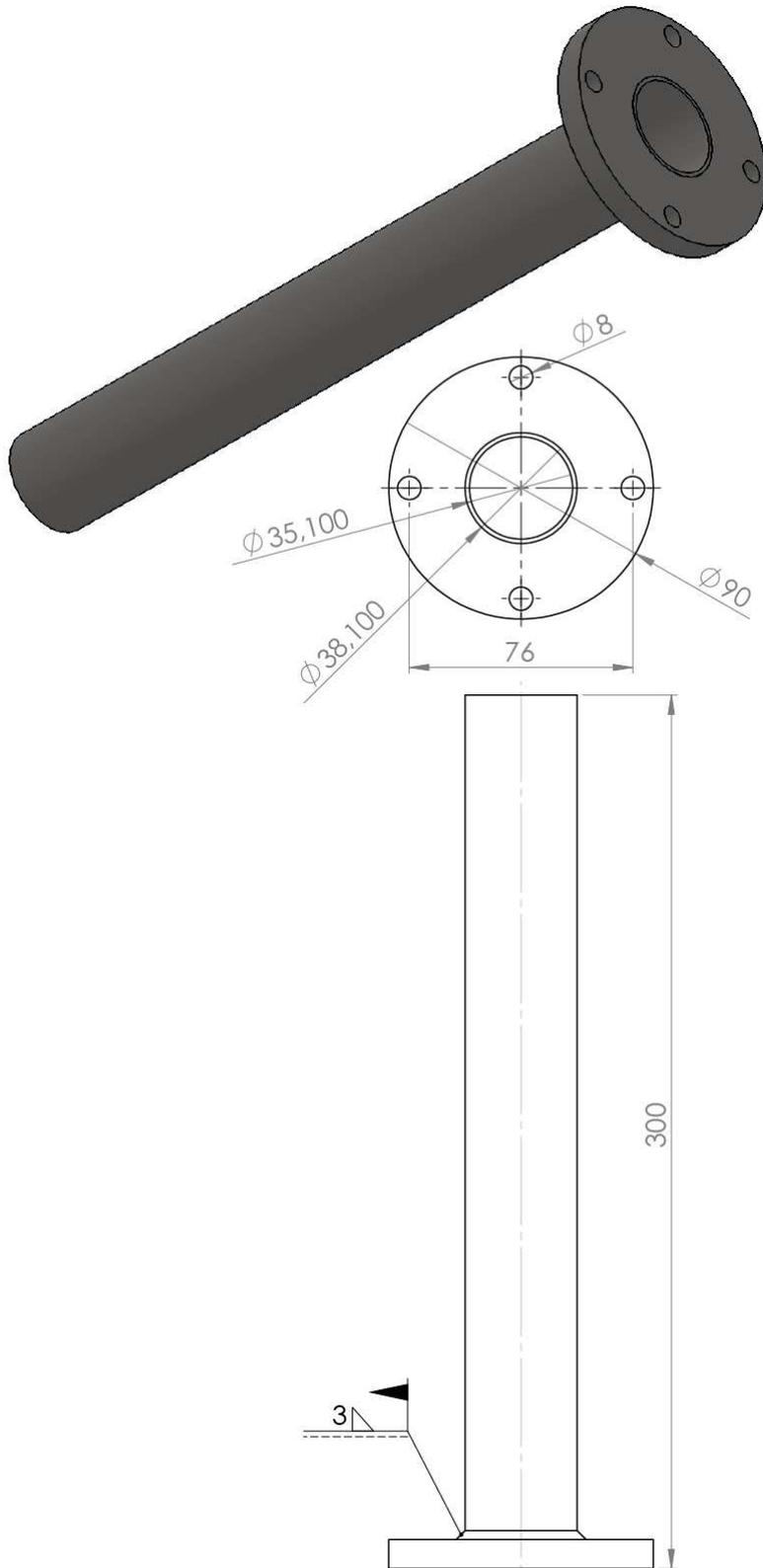
Se deberá realizar una medición para comprobar el sistema, comparando los resultados con el cálculo teórico.

4.3 PLANOS CONSTRUCTIVOS





Porta Muestra



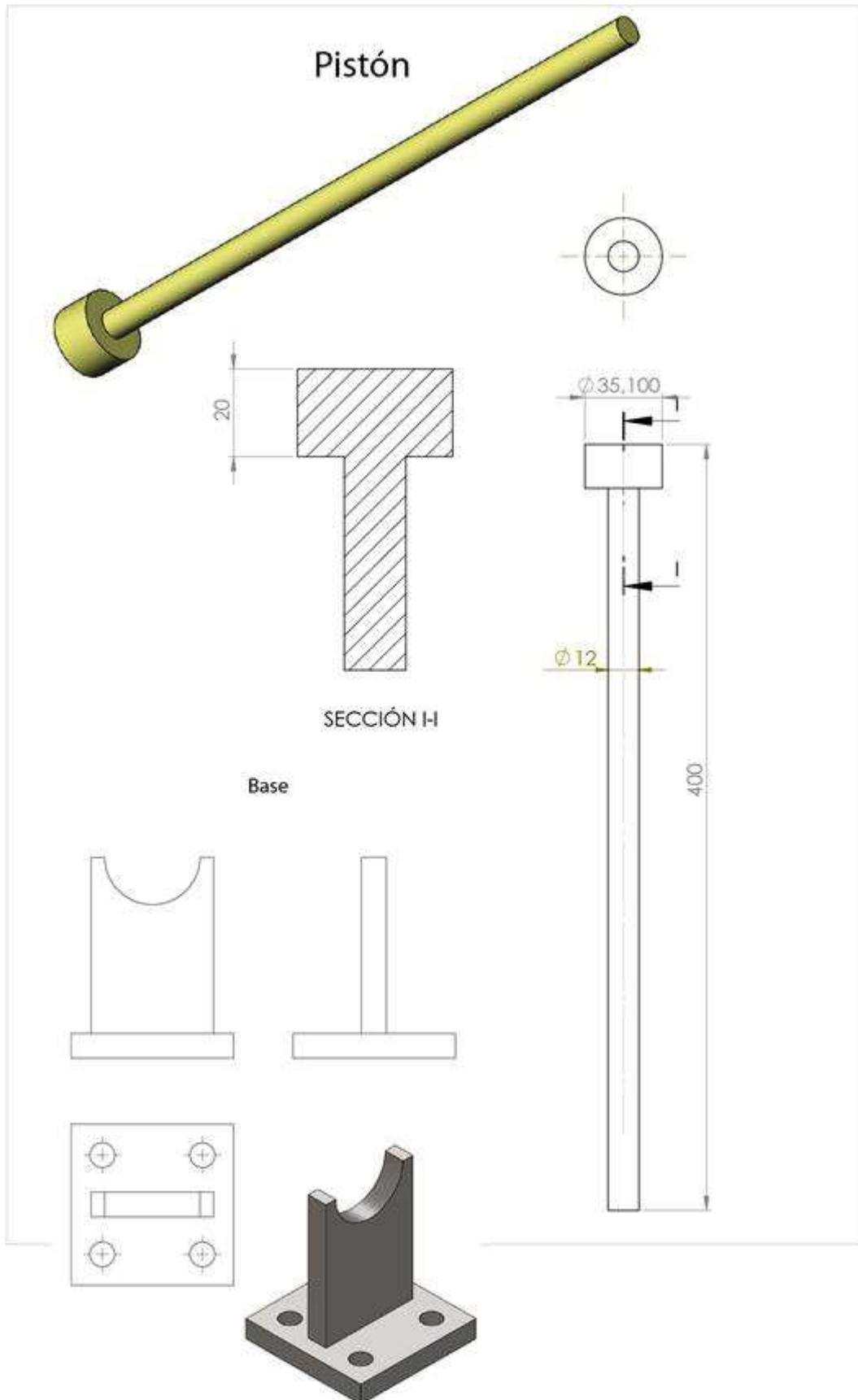


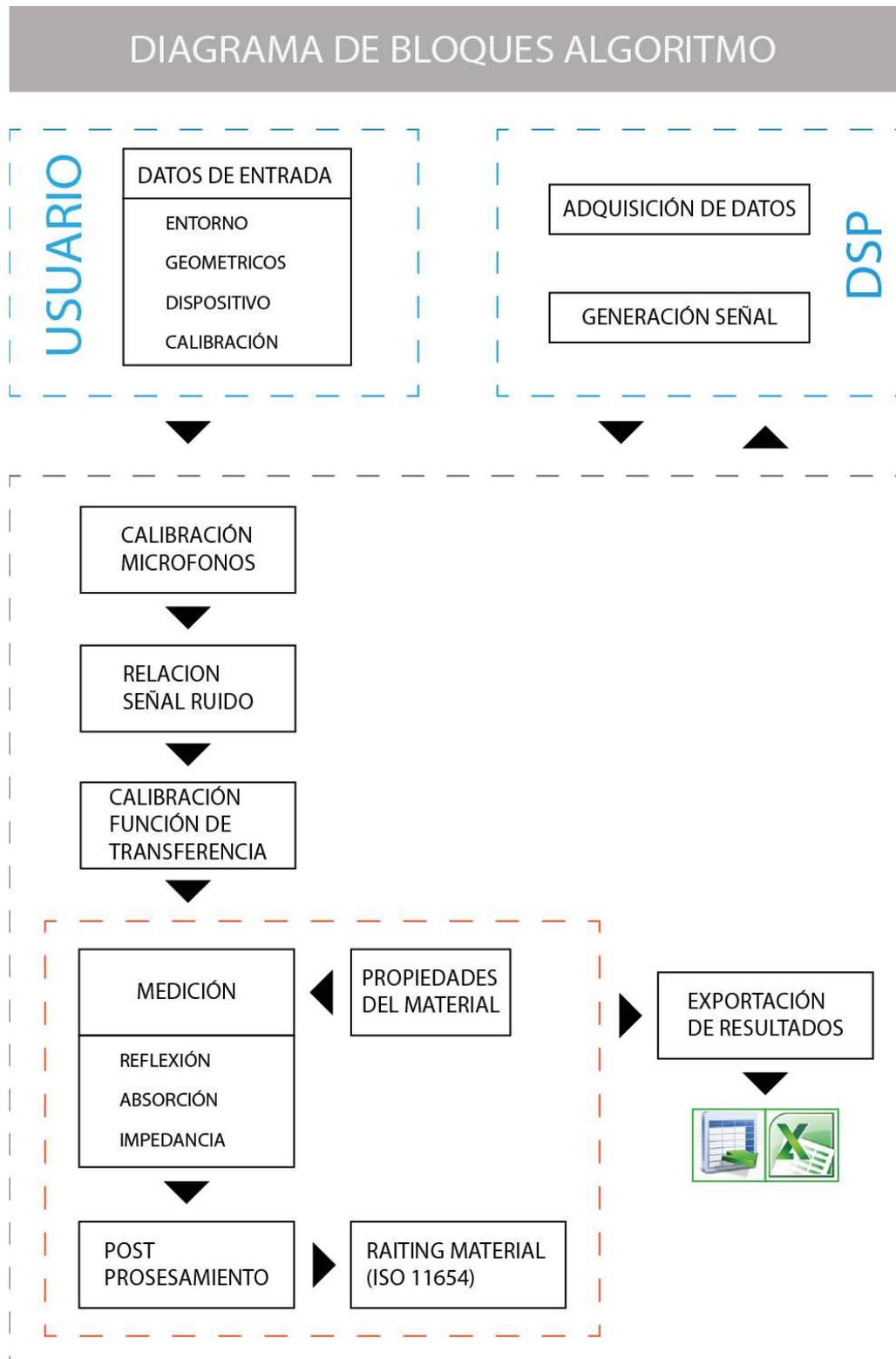
Fig.4-2 Fotos de tubo de impedancia¹⁷

Fuente: Los autores

¹⁷ Ver anexo J – Proceso constructivo.

4.4 DESARROLLO DEL SOFTWARE

Fig.4-3 Diagrama de bloques del software



Fuente: Los autores

Para el desarrollo del software se ha buscado un algoritmo que facilite el manejo del mismo; es decir que un usuario con conocimientos básicos de acústica pueda operarlo sin dificultad. Según estos lineamientos, se ha construido el diagrama de bloques (Fig.4-3) con los procesos secuenciales para la obtención de la reflexión, absorción e impedancia acústica respectivamente. Estos resultados se muestran visualmente en la interfaz gráfica, todo esto gracias a los parámetros del diseño; además tiene la posibilidad de exportar dichos resultados. A continuación se procede a detallar cada uno de los bloques:

1era. Etapa._ Datos de entrada: Se refiere a la sección donde el usuario realiza la configuración básica para todos los procesos y cálculos posteriores. Se ingresarán los valores correspondientes a:

- Entorno: Temperatura, presión atmosférica (establece la velocidad del sonido (ec.2.1) y la densidad del aire (ec. 2.3) para obtener la impedancia característica del aire (ec. 2.9)).
- Geométricas: Longitud del tubo, distancia entre los micrófonos, diámetro del tubo (necesario para cálculos posteriores).
- Dispositivo: Duración de la medición (ec. 3.30), sample rate (Parámetros comunes en todas las mediciones realizadas).
- Calibración: Frecuencia de calibración; NPS de calibración (Necesarios para realizar una calibración de los micrófonos).

2da. Etapa._ Calibración de micrófonos: Realiza una comparación con los datos ingresados y la señal obtenida de la tarjeta de adquisición realizando un FFT y ajuste de la sensibilidad por cada canal. La diferencia entre los micrófonos debe ser menor a ± 0.3 dB y el nivel calibrado y ajustado será menor al 1% con respecto al NPS de calibración escogido para que el programa permita continuar, además es necesario que el error en la frecuencia de medición sea menor al 1%.

3era. Etapa._ Relación señal ruido: Ejecuta una comparación entre una medición del ruido de fondo dentro del tubo y señal emitida por el driver. Se

recopila la información en cada canal, para lo cual se ocupa la FFT. La señal debe cumplir con los parámetros anteriormente mencionados para continuar (ver sección 3.4). Para este módulo en específico la duración de la señal enviada al altavoz es por defecto de 60 segundos para poder estabilizar la medición. De igual manera la señal grabada será de 60 segundos con alrededor de 300 promedios en dicho tiempo para el cálculo necesario.

4ta. Etapa._ Calibración de la función de transferencia: Para evitar errores y realizar las respectivas correcciones se realiza la función de transferencia en la configuración A y B (Fig.3-6). De esta manera se obtiene el factor de corrección necesario para las mediciones utilizando la ec. 3.13. Para este módulo se ha utilizado la función de respuesta de frecuencia con la cual se obtiene la función de transferencia (ver sección 3.5) entre la señal de entrada y salida (Mic A y B). El tiempo determinado para esta medición viene dado por la ec. 3.30, y estará en función del número de promedios escogido.

5ta. Etapa._ Medición: Se realiza la medición de las propiedades del material que son el coeficiente de reflexión (ec. 3.26), absorción (ec. 3.27), impedancia (ec. 3.28) y admitancia acústica del material (ec.3.29). Antes de efectuar la medición se deberá llenar las propiedades y características del material (nombre, dimensiones, configuración, etc.)¹⁸. El tiempo para la medición es el determinado por la ec. 3.30 y del número del número de promedios escogido. Además para la realización de los cálculos se emplearon las ec. 2.08, 2.10.

6ta. Etapa._ Post procesamiento: Es la sección para realizar promedios entre las diferentes mediciones, dadas tanto por la repetición de estas, como por la realización de solapamientos dados en las mediciones en diferentes configuraciones del tubo (diferentes distancias entre micrófonos). Se pueden hacer comparaciones y visualizar las diferentes mediciones.

7ma. Etapa._ Clasificación: Cataloga el material según la absorción sonora obtenida¹⁹.

¹⁸ Anexo G – Reporte de la medición

¹⁹ Anexo I – Clasificación de absorbentes sonoros

8va. Etapa._ Exportación: Brinda la posibilidad de enviar los datos medidos, post procesados, comparados con la clasificación de un material evaluado a un archivo ASCII²⁰ (hoja de cálculo o editor de texto), para Excel o cualquier programa que soporte este tipo de archivo para realizar: manejo de los datos, análisis, realización de reportes, etc.

Para todas las Etapas._ Propiedades generales: En cada módulo existen varias posibilidades de configuración de la adquisición de datos y la generación de la señal. A continuación se muestran las recomendaciones de configuración para las diferentes opciones de cálculo en los módulos:

Parámetros de promediación:

Modo de promediación: Controla la forma algorítmica en que se obtiene H_{12} . Existen dos opciones: tipo vector y tipo RMS. Se escogió de tipo RMS para ser compatible con la norma.

Modo de ponderación: Corresponde a la forma en que se evalúan las promediaciones respecto al resto de valores acumulados de H_{12} . Existen dos opciones: ponderación lineal y ponderación exponencial. En la ponderación lineal cada bloque espectral contribuye por igual al promedio final. En la ponderación logarítmica, el último bloque tiene una mayor influencia para realizar el promedio (utilizado en sonómetros). Por defecto se encuentra el tipo exponencial ya que converge más rápidamente a un valor de H_{12} .

Número de promediaciones: Esta opción permite controlar el número total de promediaciones (n) que se desee efectuar. Un número adecuado de este permitirá disminuir el error debido al ruido aleatorio y obtener un cierto error estándar controlado. El número por defecto es $n = 1000$

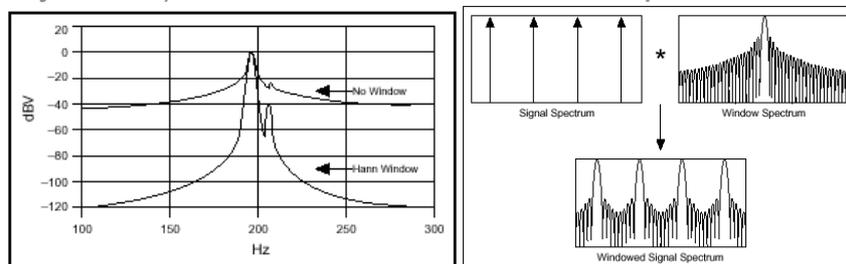
Ventana: Existen varias clases de ventanas para la realización de la FFT. Por defecto se ha escogido el tipo Hanning, ya que esta se usa al tener señales de tipo “ruido”. Este tipo de ventana reduce la supresión de fugas²¹, en el cálculo

²⁰ ASCII Float— El archivo se puede leer con cualquier editor de texto, pero los valores están en formato de coma flotante (Ej. 21.034). Cada línea contiene un único valor por cada muestra.

²¹ Suaviza y define la curva.

posee una resolución de la amplitud excelente, la resolución de la frecuencia se ve un poco afectada pero es razonable.

Fig.4-4 a) Fugas de espectro Ocultando las componentes de frecuencia adyacentes b) Características de la frecuencia de un espectro de ventana



Fuente: Labview - <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4278>

Modo FRF: Selecciona el tipo de función de transferencia a calcular: H_1 , H_2 o H_3 . La opción es válida cuando el modo de promediación es de tipo RMS. Se utilizó la función H_1 por defecto (ver sección 3.4).

Sample rate: Determina cuántas veces por segundo la señal analógica de entrada es "muestreada" o digitalizada por la tarjeta de adquisición. Una velocidad de muestreo de 10.000 Hz hará un muestreo de la señal cada 0,0001 de segundo. El rango de frecuencias de muestreo está limitado por la capacidad de la tarjeta de adquisición. Para cumplir con el teorema de Nyquist la máxima frecuencia de medición será la mitad de la frecuencia de muestreo.

Líneas espectrales: El número de líneas espectrales es siempre 1/2 del tamaño de la FFT seleccionada. Así una FFT de 1024 produce 512 líneas de salida espectral. La resolución de la frecuencia de cada línea espectral es igual al sampling rate dividido por el tamaño de la FFT. Por ejemplo, si el tamaño de la FFT ("duración") es de 1024 y la Frecuencia de muestreo es de 8192, la resolución de cada línea espectral será: $8192/1024=8\text{Hz}$. Tamaños más grandes de FFT proporcionan una mayor resolución espectral, pero tardan más en calcularse.

Duración de la medición: Está relacionado con el simple rate dividido para número de muestras por segundo (líneas espectrales).

Auto-espectro: Multiplica un espectro por su complejo conjugado (fase opuesta). El auto-espectro es real y es idéntico a la magnitud del espectro.

Espectro cruzado: Multiplica un espectro por el complejo conjugado de un segundo espectro. Entrega una cantidad compleja (componentes reales e imaginarios). La magnitud del espectro cruzado representa la cantidad de energía común para ambos canales y la fase representa la diferencia de fase entre canales. Por ejemplo, si dos señales idénticas están 180 grados fuera de fase, la magnitud del espectro cruzado es cero. Si dos canales son idénticos, su espectro cruzado es igual a la auto-espectro de cualquiera de los canales.

Coherencia: Es la relación entre la magnitud ajustada del espectro cruzado y el producto del auto-espectro de los dos canales. Mide el grado de linealidad entre los canales y es análogo al coeficiente de correlación al cuadrado utilizado en estadística. Dos señales perfectamente coherentes tienen un valor de coherencia de 1,0 (dB).

Esquema de funcionamiento del programa de medición de absorción a incidencia normal: La estructura del programa está diseñado para que el usuario interactúe a través de pasos secuenciales, pueda guardar y cargar información en los distintos módulos y evitar repetir calibraciones, mediciones y correcciones. Los datos preliminares podrán ser realizados una sola vez por cada periodo de medición (Ej.: campañas de medición diarias). Por otra parte la sección de resultados se enfoca en módulos para realizar todas la pruebas que el usuario desee realizar, se podrán acceder a los módulos extras una vez completado el proceso anterior, entre estos módulos se puede realizar la exportación de un reporte con formato estándar.^{22 23}

Es importante considerar que para la corrección se deberán hacer 3 mediciones, una por cada posición de los micrófonos, es decir en las distintas configuraciones (S1, S2 y S3); utilizando el material de referencia²⁴.

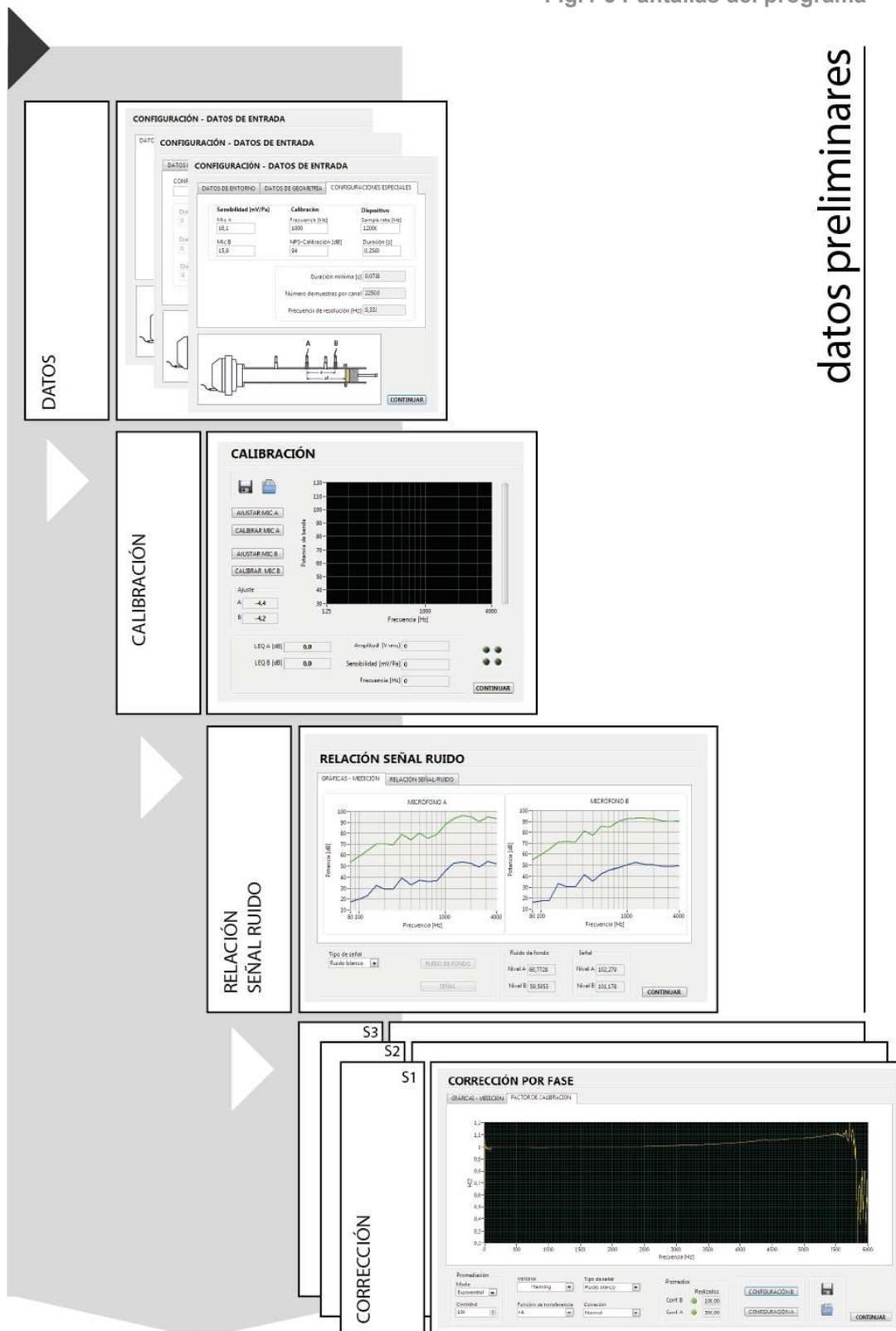
²² Ver anexo H – Reporte de la medición.

²³ Ver anexo G – Clasificación de los absorbentes sonoros.

²⁴ Material escogido por su alto coeficiente de absorción

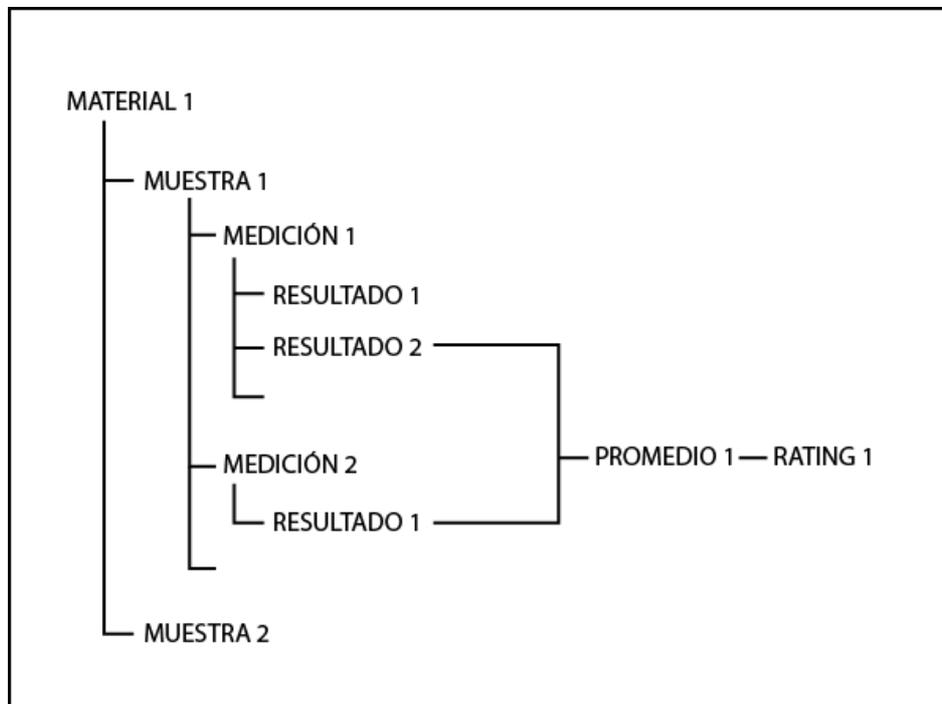
A continuación se presenta el esquema de funcionamiento del programa y la forma como debe ser manejado por el usuario:

Fig.4-5 Pantallas del programa



Flujo de medición de materiales:

Fig.4-6 Flujo de medición de materiales



Fuente: Los autores

La figura 4-6 presenta el flujo básico para la realización de una medición que permita obtener resultados lo más precisos posibles, reafirmando su repetitividad y reproducibilidad. Para esto es necesario evaluar varias muestras del mismo material y de cada una de ellas promediar sus mediciones obteniéndose de esta forma un promedio final que será el resultado de la medición.

5 MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

CONDICIONES DE MEDICIÓN

Se utilizaron ciertas condiciones que se mantuvieron en todas las mediciones, y que se detallan a continuación:

Tabla 5-1 Condiciones de medición

Sample Rate	12000 [Hz]
Cantidad de muestras promediadas	300
Tipo de señal	Ruido blanco
Modo de promediación	Exponencial
Tipo de ventana	Hanning
Método de la función de transferencia	H1 (normal)
Duración / promedio	0.25 [s]
Número de muestras	1500
Temperatura ²⁵	20 [°C]
Presión ²⁶	6.9 [kpa]
Calibración	
Frecuencia	1000 [Hz]
NPS de calibración	94[dB]
Sensibilidad	
Micrófono A	16.1 [mV/Pa]
Micrófono B	15.9 [mV/Pa]

Fuente: Los autores

CALIBRACIÓN

La calibración se realizó con un calibrador marca Larson Davis CAL200, tipo I (según IEC 60942-1:2003); al cual se le acopló un adaptador de 1/4". Cabe

²⁵ Temperatura media obtenida en el lugar de la medición al momento de realizar las pruebas

²⁶ Presión Atmosférica normal

destacar que en el proceso de calibración se realiza un ajuste en el programa (factor de calibración) entre la señal de calibración y la respuesta del micrófono, la cual dependerá de la ganancia de entrada que se ha fijado en la interface de audio. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 5-2 Resultados calibración

Parámetro	Valor Mic A [dB]	Valor Mic B [dB]
Factor de calibración	4.36	4.16
LEQ	94	94.2

Fuente: Los autores

Se realizaron también pruebas de comparación con un sonómetro Quest SoundPro SE. Se midió ruido de fondo en una habitación durante un minuto. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5-3 Comparación con sonómetro

Equipo	Leq (Lineal)
Software	72.1
Sonómetro Quest	69.9

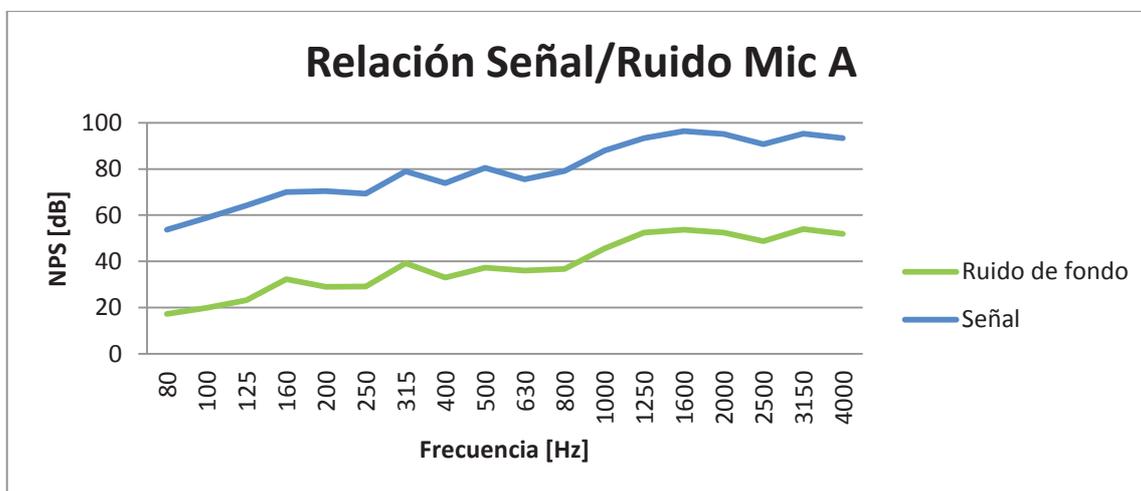
Fuente: Los autores

Estos valores son muy similares, su diferencia puede deberse principalmente al tipo de transductor o al número de mediciones realizadas.

RELACIÓN SEÑAL-RUIDO

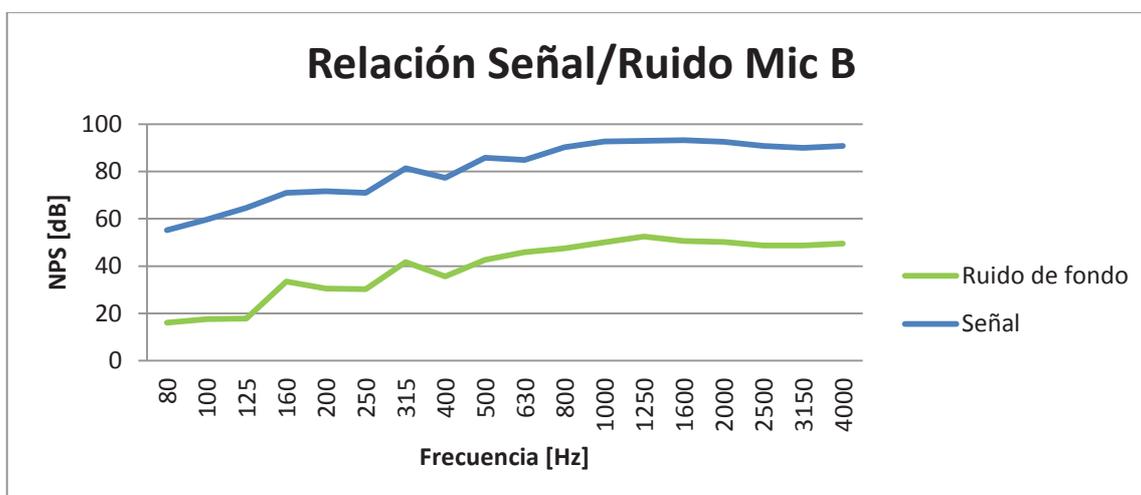
Los resultados obtenidos fueron:

Fig.5-1 SNR Mic. A



Fuente: Los autores

Fig.5-2 SNR Mic. B



Fuente: Los autores

El ruido de fondo puede ser ocasionado por ruido eléctrico y/o ruido inherente del sistema, la calidad de los componentes de la cadena electroacústica, además del ruido aéreo o por vibraciones externas al tubo. En los experimentos realizados estos últimos tienen poca influencia, aunque dependerá del ambiente donde se realice la medición.

Si bien la curva de respuesta del altavoz en el tubo no es plana se puede apreciar una diferencia de +7dB respecto al nivel más alto y de -33dB con respecto al nivel más bajo, estos niveles fueron determinados comparando el valor obtenido en 1000 Hz (nivel de referencia) el mismo que es 90dB. Estas diferencias son perfectamente aceptables según la normativa.

A continuación se presenta la tabla de la relación de señal ruido por banda de tercio de octava, obtenida en las dos posiciones de micrófono, si bien presentan pequeñas diferencias, las curvas son muy similares entre ambos micrófonos. Estas diferencias pueden deberse principalmente a las distancias existentes entre los micrófonos y la fuente sonora.

Tabla 5-4 Diferencia entre ruido de fondo y señal

Frecuencia [Hz]	Diferencia Mic A [dB]	Diferencia Mic B [dB]
80	36,5	39
100	39	42,1
125	41	46,9
160	37,7	37,5
200	41,5	41,2
250	40,1	40,8
315	39,8	39,8
400	40,8	41,7
500	43,1	43,2
630	39,5	39
800	42,3	42,9
1000	42,3	42,6
1250	41	40,5
1600	42,6	42,6
2000	42,6	42,3
2500	42	42
3150	41,4	41,4
4000	41,4	41,3

Fuente: Los autores

Los valores obtenidos cumplen con la restricción de 10dB de diferencia mínima entre el ruido de fondo y la señal, en todo el rango de frecuencias que se va a realizar la medición.

El LEQ obtenido fue:

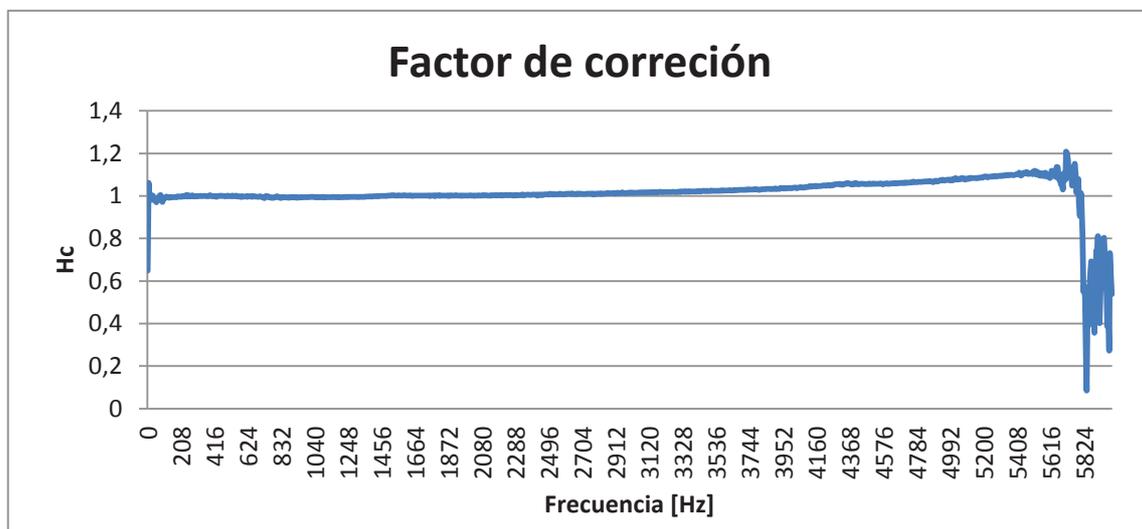
Tabla 5-5 Diferencia en LEQ entre ruido de fondo y señal

	LEQ Ruido de fondo [dB]	LEQ Señal [dB]
Mic A	60.8	102.3
Mic B	59.6	101.2

Fuente: Los autores

CORRECCIÓN

Fig.5-3 Corrección

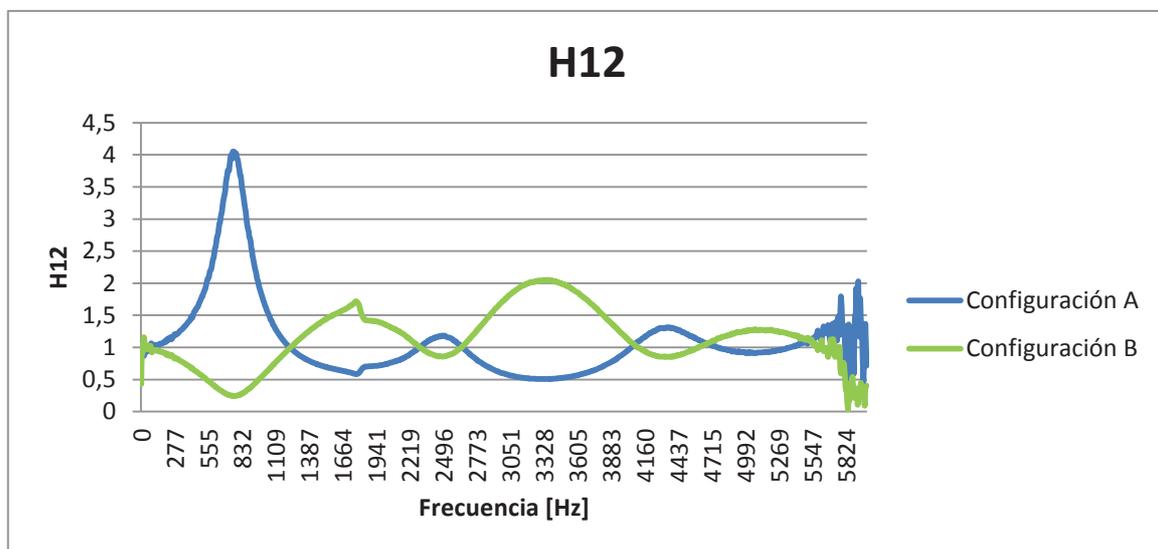


Fuente: Los autores

La Fig.5-3 representa el factor de corrección (H_c) el mismo que sirve para evitar errores de fase y/o amplitud generadas por diferentes distancias entre los micrófonos. Además con este factor se corrige el error del centro acústico y el centro geométrico ocasionado por la diferencia de ubicación que pueda existir entre los micrófonos en el porta micrófonos.

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Fig.5-4 Función de Transferencia



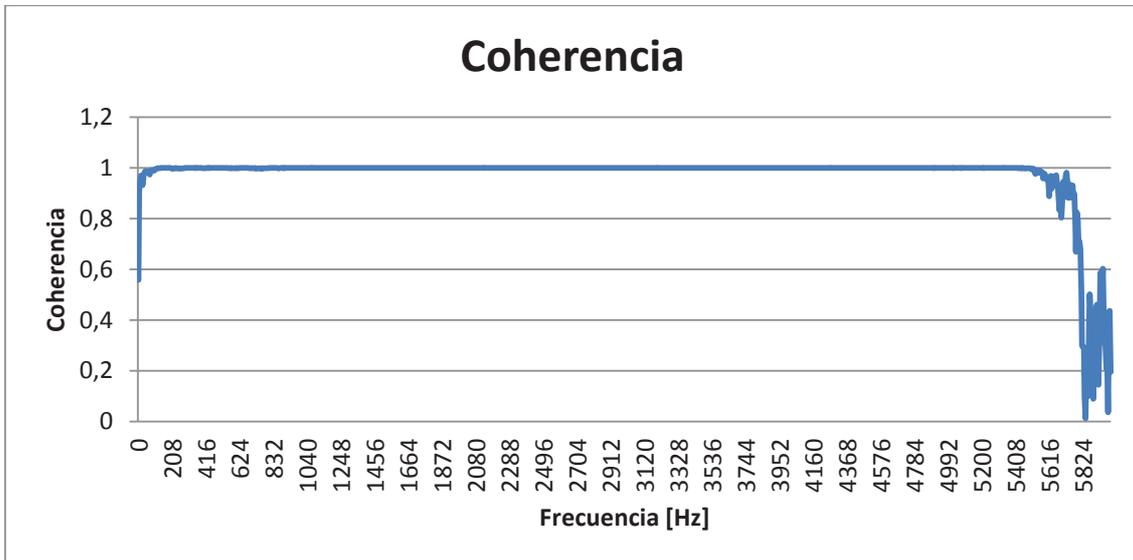
Fuente: Los autores

En la Fig.5-4 se observa como las curvas de la función de transferencia son inversas entre sí. En los puntos de cruce entre las curvas, los valores siempre serán los mismos, es decir la entrada es igual a la salida.

Los valores obtenidos siempre deberán ser positivos ya que son comparaciones espectrales por lo tanto siempre se deberán entregar valores sobre el cero.

COHERENCIA

Fig.5-5 Coherencia



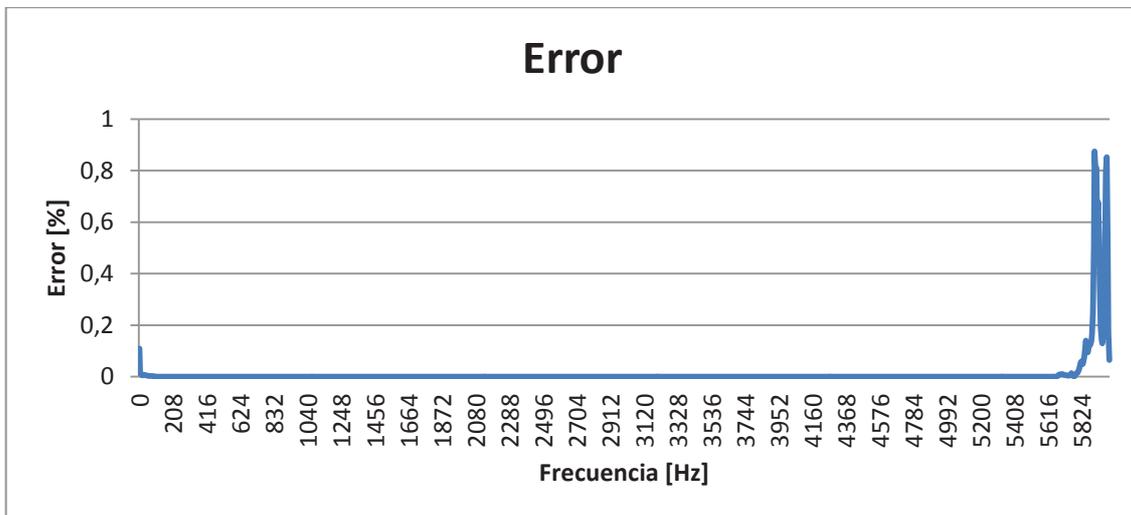
Fuente: Los autores

La Fig.5-5 muestra que los valores obtenidos en la coherencia son muy satisfactorios ya que se encuentran sobre los 0,9 en todo el rango de la medición. Claramente se observa como esta curva cae sobre los 5600 [Hz], que son las frecuencias en donde aparecen los primeros modos normales transversales del tubo, los mismos que son ocasionados por el diámetro del tubo y producen una caída brusca en la coherencia.

En bajas frecuencias y en aquellas que coinciden en $\lambda/2$ de la distancia entre micrófonos (S), también se observan pequeñas caídas que no son significativas.

ERROR ESTÁNDAR NORMALIZADO

Fig.5-6 Error estándar normalizado



Fuente: Los autores

En la Fig.5-6 se muestra el error producido. Esta curva es inversa a la curva de coherencia. Además ya que también depende del número de promedios y al haber realizado las pruebas con 300 promedios, el porcentaje de error es sustancialmente bajo, con la ec. 3.31 se pudo establecer que el valor del error estándar es de 2.88%, con lo cual se cumple los requerimientos de la normativa.

5.1 MATERIAL DE REFERENCIA

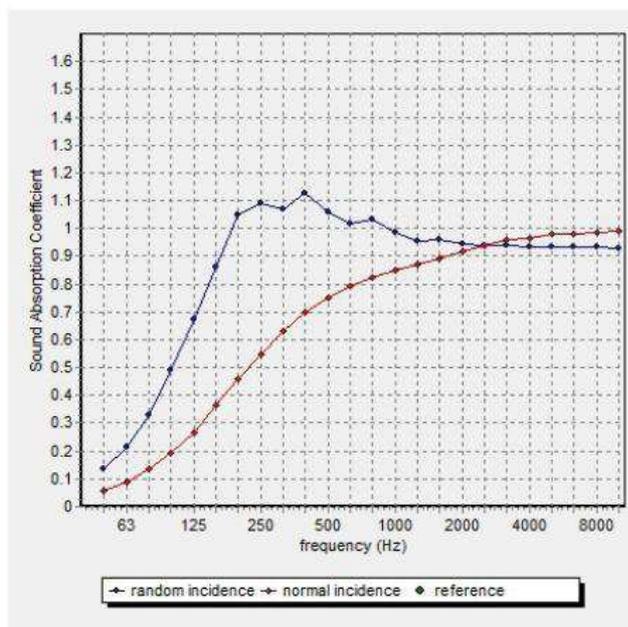
Se debe tener un material de referencia (resistente y que no se deteriore con rapidez) que permita comprobar y garantizar el resultado de las mediciones. Sus características de absorción deben ser estables. El coeficiente de absorción en 250Hz debe ser $\geq 0,20$.

El material de referencia que se utilizó es lana de vidrio de 70Kg/m³ de 3" de espesor, la primera medición que se realizó corresponde a este material (ver Fig.5-8 hasta Fig.5-22).

La tabla de los coeficientes de absorción modelados con el software Zorba de Marshall Days se muestran a continuación:

Fig.5-7 Modelación acústica del coeficiente de absorción del material de referencia

Frequency (Hz)	alpha random	
50	0.13	
63	0.21	
80	0.33	
100	0.49	
125	0.67	0.65
160	0.86	
200	1.05	
250	1.09	1.05
315	1.07	
400	1.13	
500	1.06	1.05
630	1.02	
800	1.03	
1000	0.98	1.00
1250	0.95	
1600	0.96	
2000	0.94	0.95
2500	0.94	
3150	0.94	
4000	0.94	0.95
5000	0.93	



Fuente: Software Zorba (Marshall Days)

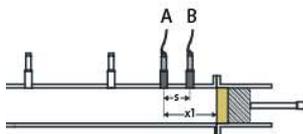
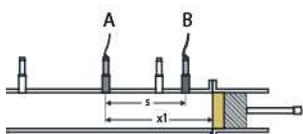
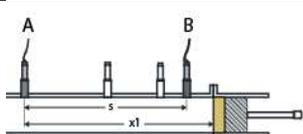
La curva roja representa al coeficiente de absorción a incidencia normal y la curva azul representa el coeficiente de absorción a incidencia aleatoria, es decir que la onda llega de cualquier forma. Se puede notar que en incidencia

normal la curva posee menor absorción en el rango de bajas frecuencias y en altas frecuencias las dos curvas son similares.

5.2 MEDICIONES

A continuación se tienen los resultados de diversas mediciones realizadas con dos materiales, en ellas se muestran las fotografías del material, las características de medición, así como también los resultados obtenidos en las diferentes configuraciones (S1, S2 y S3).

Tabla 5-6 Configuraciones para las mediciones

Nombre	Descripción	Valor	X1 ²⁷	Imagen
S1	Distancia de los micrófonos entre las posiciones 1 y 2	0.025 m	0.045 m	
S2	Distancia de los micrófonos entre las posiciones 1 y 3	0.075 m	0.095 m	
S3	Distancia de los micrófonos entre las posiciones 1 y 4	0.20 m	0.225 m	

Fuente: Los autores

Tabla 5-7 Frecuencias límite para cada configuración

Configuración	Frecuencia min. [Hz]	Frecuencia max. [Hz]
S1	690	5600
S2	230	2000
S3	86	720

Fuente: Los autores

²⁷ Distancia entre la muestra y el micrófono más lejano.

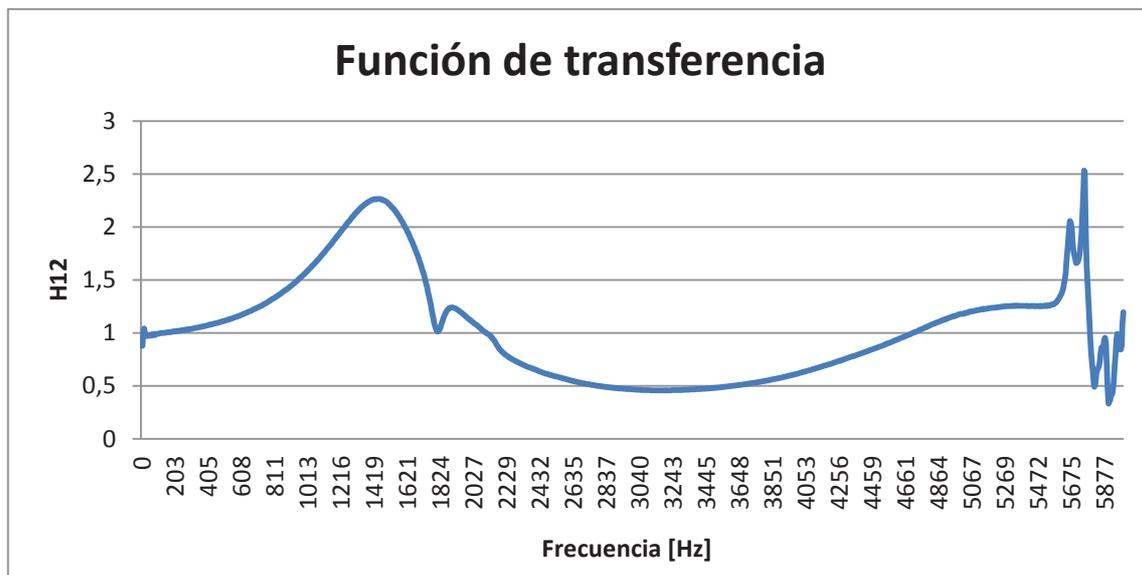
Medición de lana de vidrio de 70 Kg/m³ de 3" sin cámara de aire.



Material	Tipo	Espesor [mm]	Densidad [Kg/m ³]	Cámara de aire [mm]
Lana de vidrio	Fibroso	75	70,0	0,0

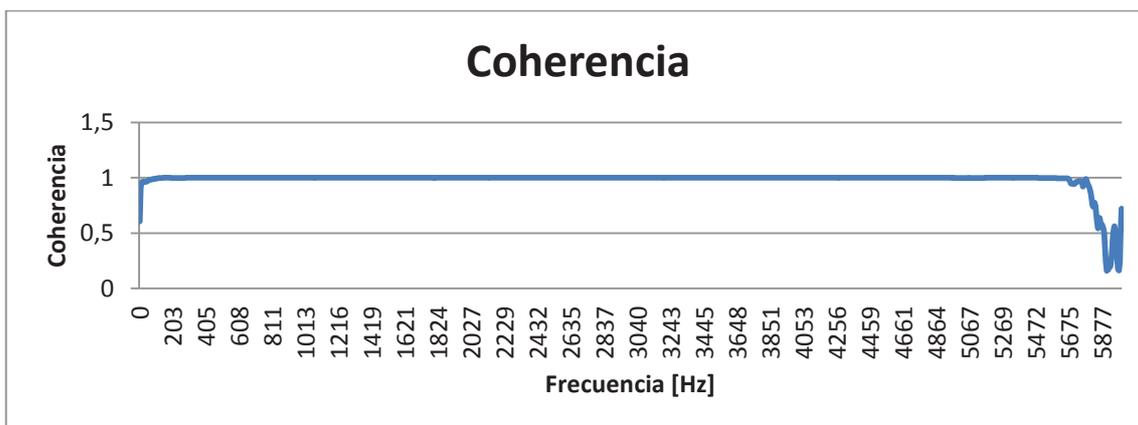
Medición en configuración S1

Fig.5-8 Función de transferencia en la configuración S1



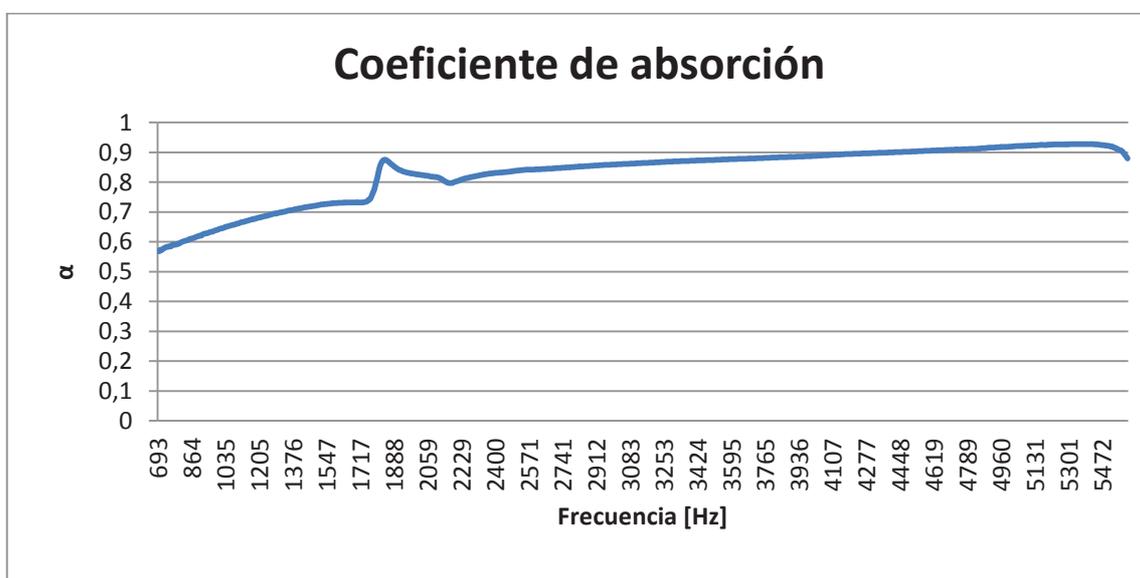
Fuente: Los autores

Fig.5-9 Coherencia en la configuración S1



Fuente: Los autores

Fig.5-10 Curva de absorción en la configuración S1



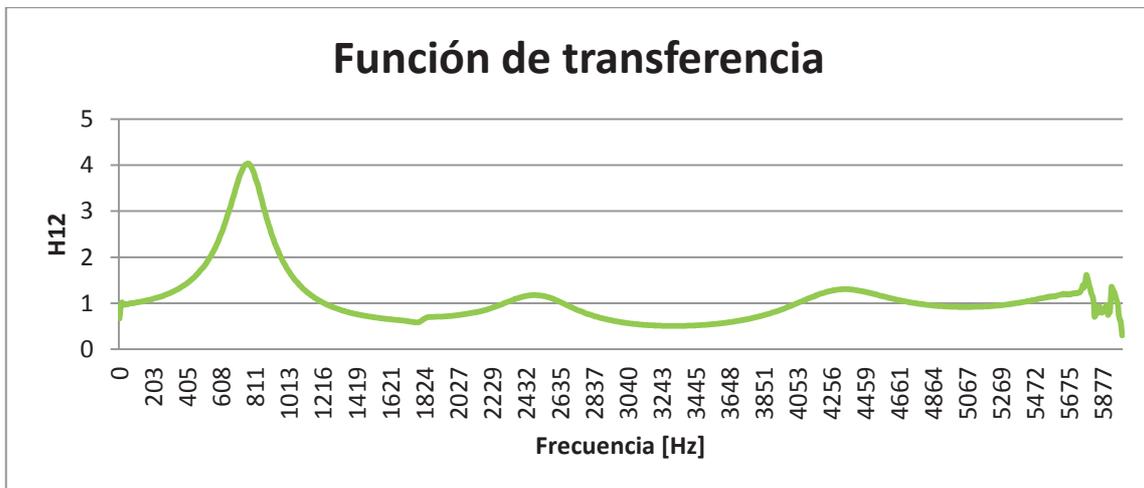
Fuente: Los autores

Las Fig.5-8 a la 5-10 muestran los resultados obtenidos para la configuración S1. Se observa una buena coherencia en el rango de medición.

En la Fig.5-10 se observa un pico alrededor de los 1800 Hz que se desvía de la tendencia de la curva de absorción.

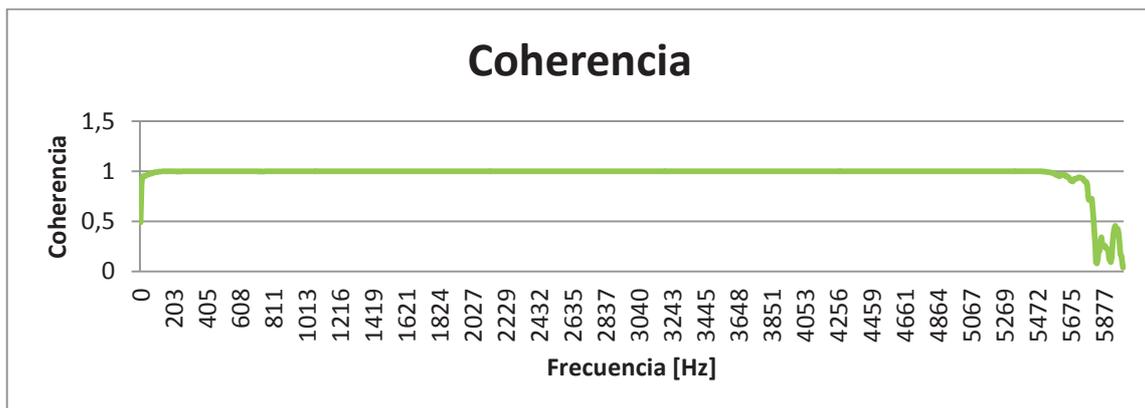
Medición en configuración S2

Fig.5-11 Función de transferencia en la configuración S2



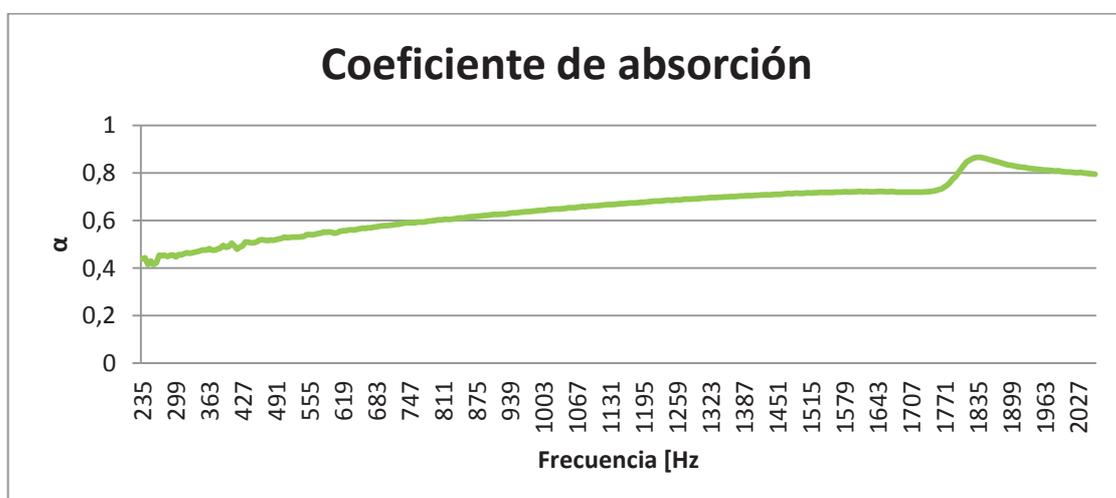
Fuente: Los autores

Fig.5-12 Coherencia en la configuración S2



Fuente: Los autores

Fig.5-13 Curva de absorción en la configuración S2

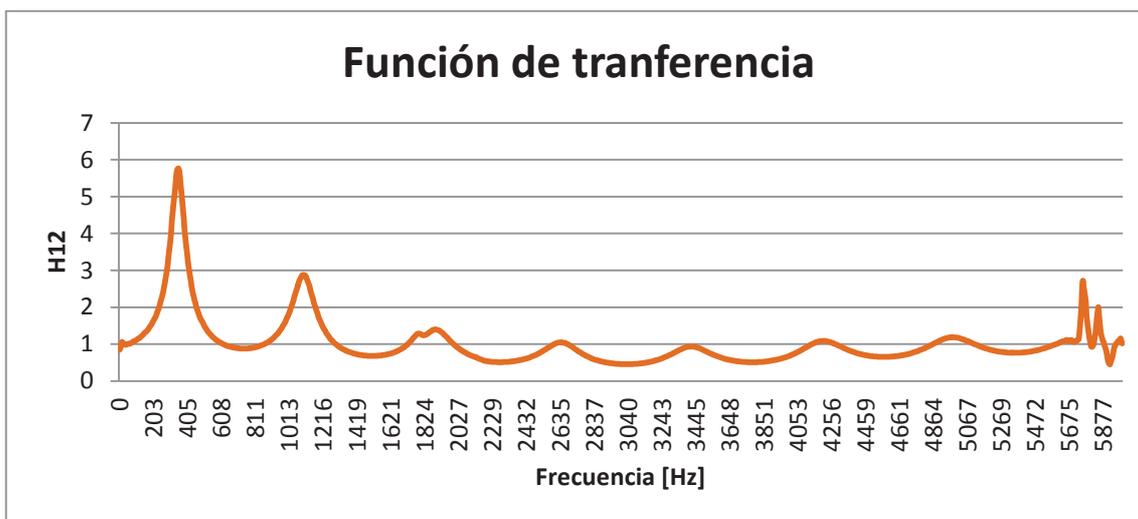


Fuente: Los autores

Las Fig.5-11 a la 5-13 muestran los resultados de la medición realizada en configuración S2. La coherencia responde perfectamente en el rango de interés de 230 Hz a 2000 Hz. Es importante destacar que para estas gráficas los valores empiezan a ser relevantes desde los 230 Hz porque es la frecuencia límite para esta configuración. Ver tabla 5-7.

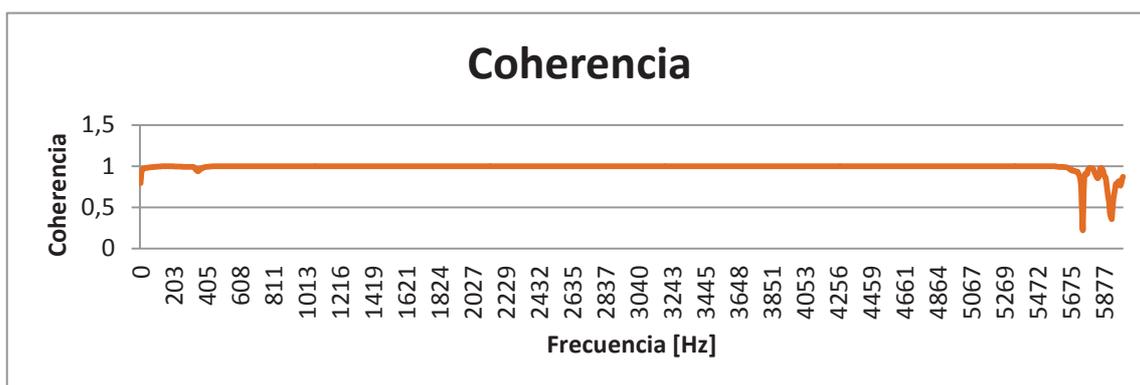
Medición en configuración S3

Fig.5-14 Función de transferencia en la configuración S3



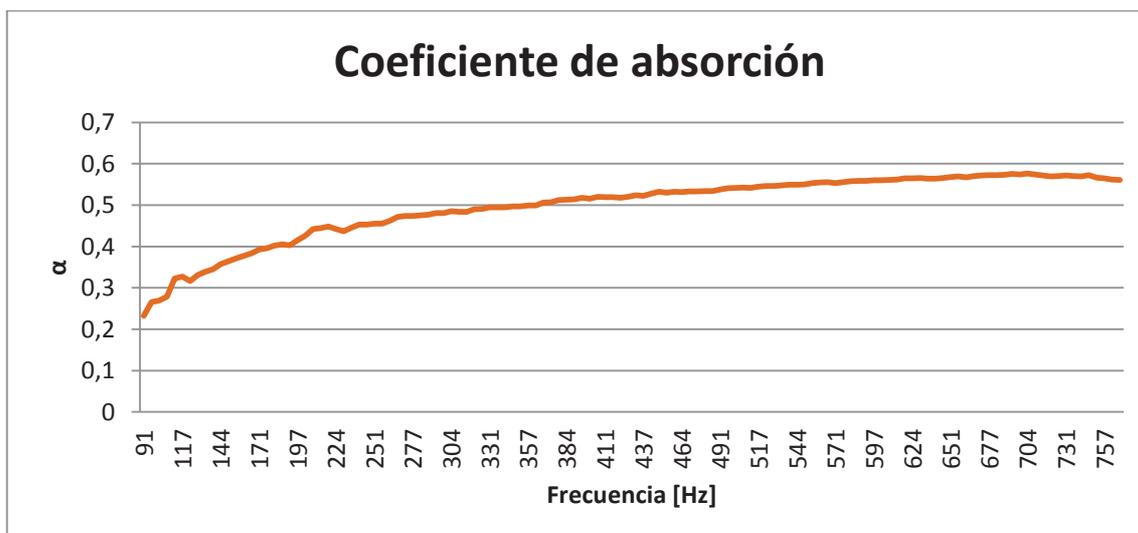
Fuente: Los autores

Fig.5-15 Coherencia en la configuración S2



Fuente: Los autores

Fig.5-16 Curva de absorción en la configuración S3

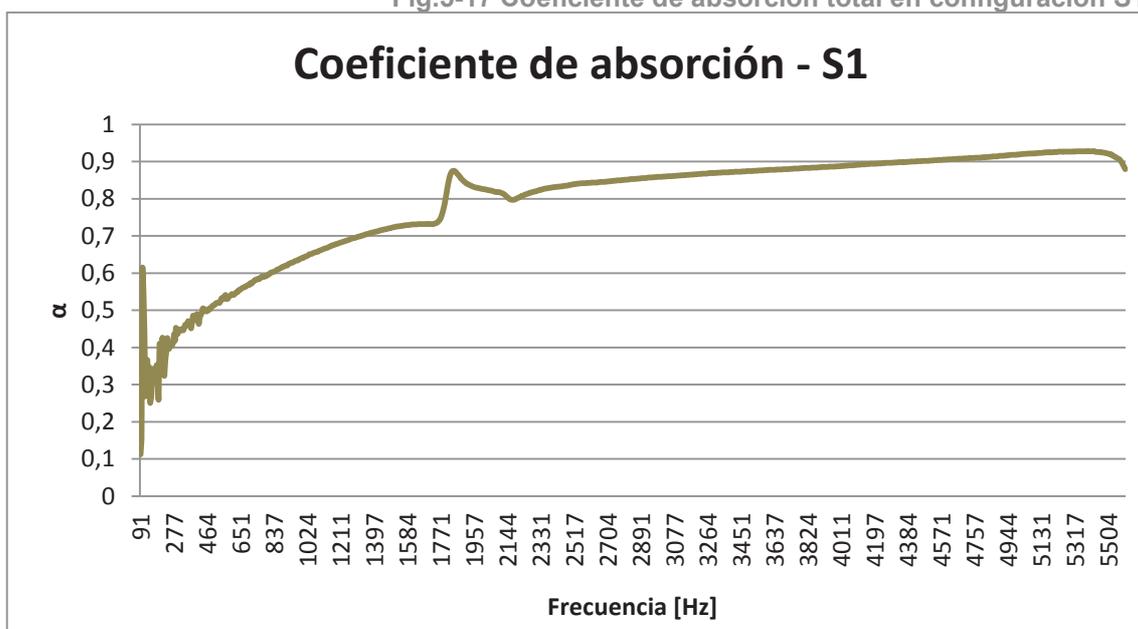


Fuente: Los autores

Las Fig.5-14 a la 5-16 muestran la medición realizada en configuración S3. La coherencia al igual que las anteriores presenta una buena respuesta. Si bien en bajas frecuencias disminuye, siempre se encuentra por arriba de la normativa es decir sobre los 0.9 en el rango de interés de 86 Hz a 770 Hz, determinado por la configuración. Ver tabla 5-7.

Análisis configuración S1

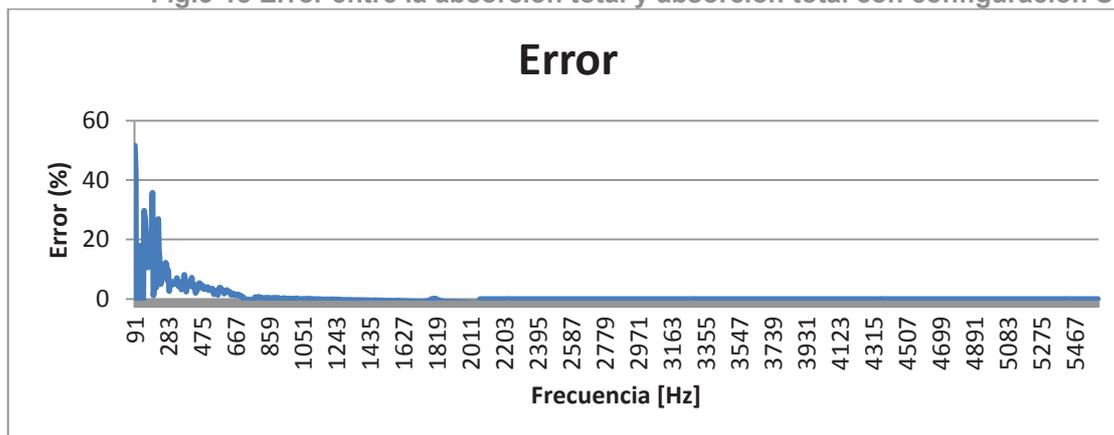
Fig.5-17 Coeficiente de absorción total en configuración S1



Fuente: Los autores

La Fig.5-17 muestra la curva de la medición de la absorción utilizando únicamente la configuración S1, con esta medición se puede obtener un resultado del rango completo, pero la precisión en bajas frecuencias disminuye. Sin embargo es un método de análisis preliminar.

Fig.5-18 Error entre la absorción total y absorción total con configuración S1



Fuente: Los autores

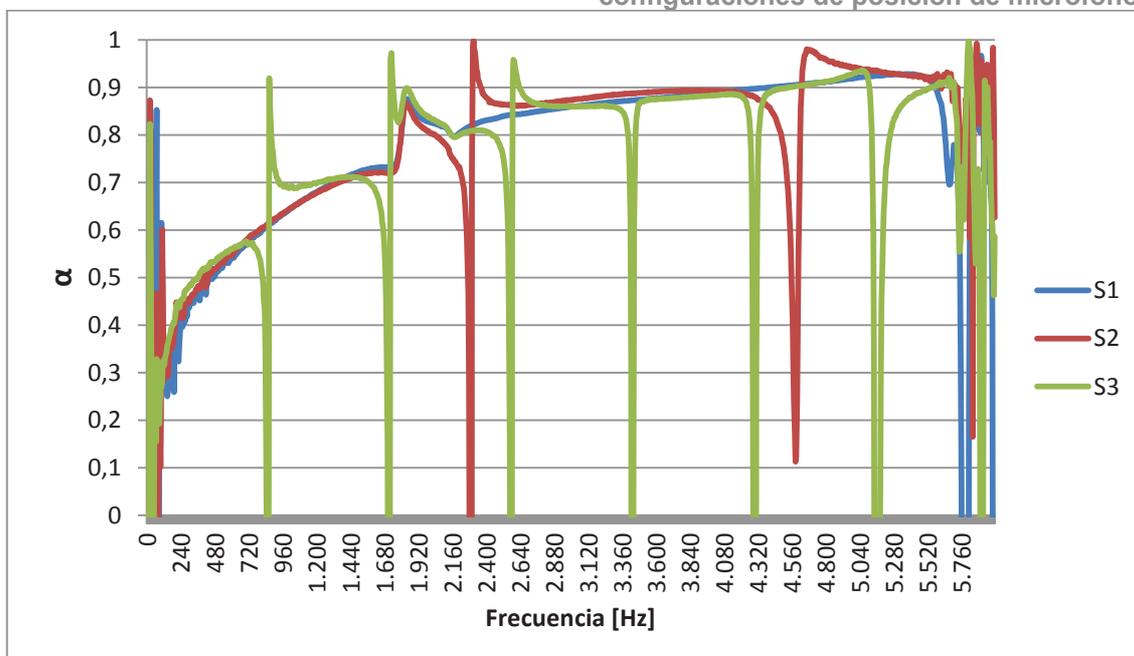
La Fig.5-17 muestra el error al comparar la curva de absorción total obtenida del solapamiento de las tres configuraciones, con la curva de absorción solamente en la configuración S1. La precisión en bajas frecuencias disminuye y desde los 750 Hz el error es mayor al disminuir la frecuencia.

Como se puede apreciar en las funciones de transferencia de las tres configuraciones (Fig.5-8, 5-11, y 5-14), al aumentar el espaciamiento entre los micrófonos existen más picos y valles en la gráfica. Se destaca que estos picos están relacionados con el resultado del coeficiente de absorción en donde se manifiestan como caídas abruptas en la gráfica, así mientras más picos existan en la gráfica de H12 más caídas o irregularidades se manifestarán en los resultados. Este comportamiento confirma la existencia de frecuencias de corte superior para cada configuración según la Ec. 3.6 y se debe a la distancia existente entre los micrófonos (s); así por ejemplo en la configuración s3 existirán más caídas debido a que la frecuencia fundamental es más baja, y se tiene la aparición de un modo, correspondiente al $\lambda/2$, dado por la distancia s . Así en $s_3=0.2$ m= 0.4 dando correspondiente a una frecuencia de 860 Hz

según la ec. 2.2, en donde las siguientes caídas corresponden a los armónicos de esta frecuencia fundamental. Así mismo en $S2 = 0.075 \text{ m} = 0.15$ se obtiene una frecuencia fundamental de 2293 Hz.

Sin embargo, en $S1 = 0.025 \text{ m}$, la frecuencia fundamental obtenida es de 6880 Hz; la cual está fuera del rango de funcionamiento del tubo dado por el diámetro del mismo; razón por la cual no existirá una caída abrupta en los resultados obtenidos, dados por la aparición de los modos normales ocasionados por las posiciones de los micrófonos. Este análisis puede ser observado en la Fig.5-19.

Fig.5-19 Coeficiente de absorción en todo el rango de frecuencias estudiado en las tres configuraciones de posición de micrófono.



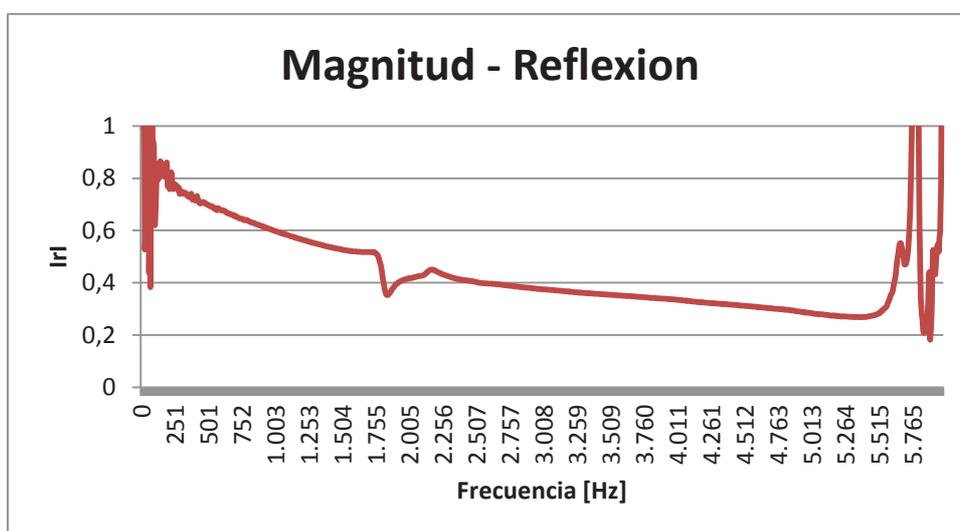
Fuente: Los autores

Hay que destacar que la fase obtenida en la medición de la función de transferencia afirma la experimentación y los resultados concluidos, esta se manifiesta igualmente por la separación de los micrófonos que concuerdan con 180 grados de desfase (cancelación) en los armónicos impares y 360 grados (suma) en los armónicos pares de las frecuencias fundamentales establecidas en el análisis anterior, siendo este tipo de desfase el causante de las caídas abruptas en los resultados, por la presencia de nodos en la ubicación de los micrófonos.

Con este análisis se llega a determinar que la configuración S1 presenta resultados globales y puede incluso ser usado como referencia para absorción de un material.

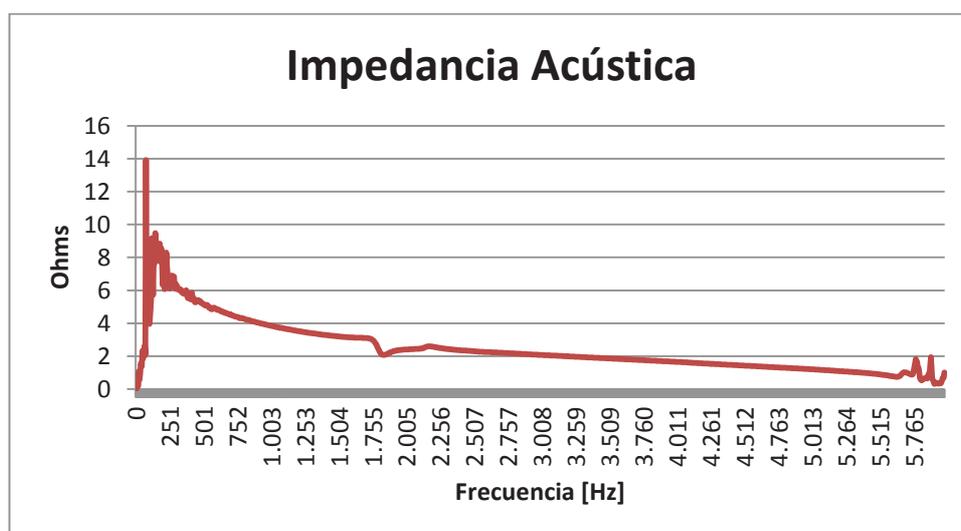
Sin embargo cabe destacar que aunque la configuración S1 puede ser utilizada para abarcar todo el rango de estudio (86 – 5600 Hz), la precisión de la medición disminuye en frecuencias más bajas, como se observa en la fig. 5-17 donde la relación entre la configuración S3 y S1 es cada vez más notable al bajar la frecuencia especialmente desde los 200 Hz.

Fig. 5-20 Magnitud del factor de reflexión



Fuente: Los autores

Fig. 5-21 Magnitud de la impedancia acústica



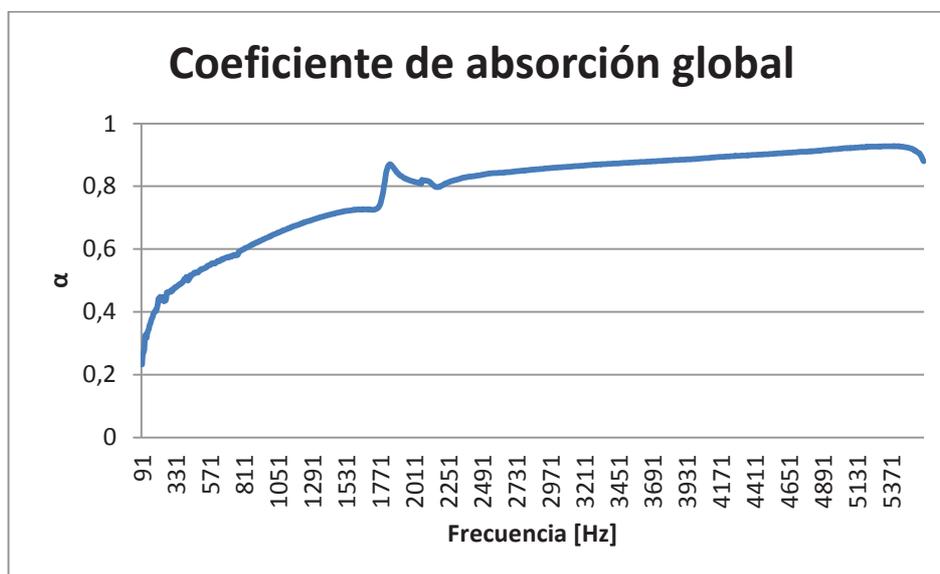
Fuente: Los autores

Los resultados obtenidos no solo están limitados a la absorción acústica, aunque la presente tesis se centra en estos resultados, otras propiedades pueden ser fácilmente calculadas para otro tipo de estudios o análisis. Entre las más importantes se tiene al factor de reflexión (Fig.5-20) y la impedancia acústica característica del material (Fig.5-21). Estas figuras presentan características opuestas a la gráfica obtenida de la absorción, y como era de esperarse la impedancia en bajas frecuencias es mayor, razón por la cual la absorción es menor.

A continuación se presenta los resultados tabulados y graficados del material de referencia utilizado, para lo cual se realizó un solapamiento entre las tres configuraciones, es decir entre las 3 curvas a distintos rangos de frecuencia según la tabla 5-7. Las frecuencias solapadas fueron promediadas linealmente. Los resultados obtenidos fueron:

Coefficiente de Absorción

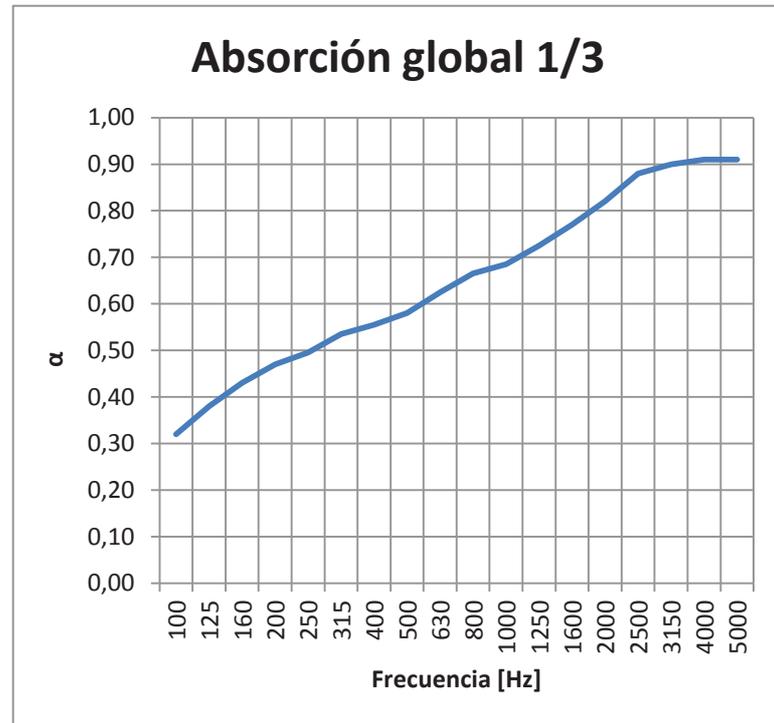
Fig. 5-22 Curva de absorción global (solapamiento de las curvas)



Fuente: Los autores

Fig.5-23 Tabla y curva de absorción en 1/3 de octava

Frec. [Hz]	α normal	
100	0,32	
125	0,38	0,38
160	0,43	
200	0,47	
250	0,50	0,50
315	0,54	
400	0,56	
500	0,58	0,59
630	0,63	
800	0,67	
1000	0,69	0,69
1250	0,73	
1600	0,77	
2000	0,82	0,82
2500	0,88	
3150	0,90	
4000	0,91	0,91
5000	0,91	



Fuente: Los autores

Las Fig.5-22 y 5-23 muestran los resultados de la absorción acústica obtenidos para este material. Este tipo de absorción es típica de un material poroso donde el espesor del material aumenta la absorción en bajas frecuencias. Para conseguir una absorción en todo el rango audible es necesario un espesor muy grande del material. En la tabla incluida en la Fig.5-23 se presentan los resultados tanto en tercio de octava como de octava obtenidos con promediaciones lineales.

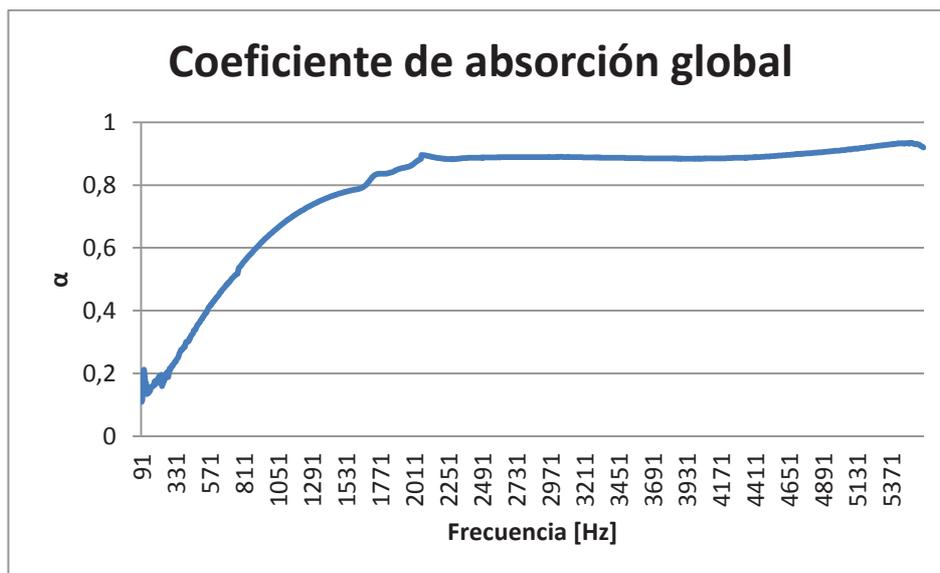
Medición de lana de vidrio 70kg/m³ de 1" sin cámara de aire.



Material	Tipo	Espesor [mm]	Densidad [Kg/m3]	Cámara de aire [mm]
Lana de vidrio	Fibroso	25,40	70,0	0,0

Coeficiente de Absorción

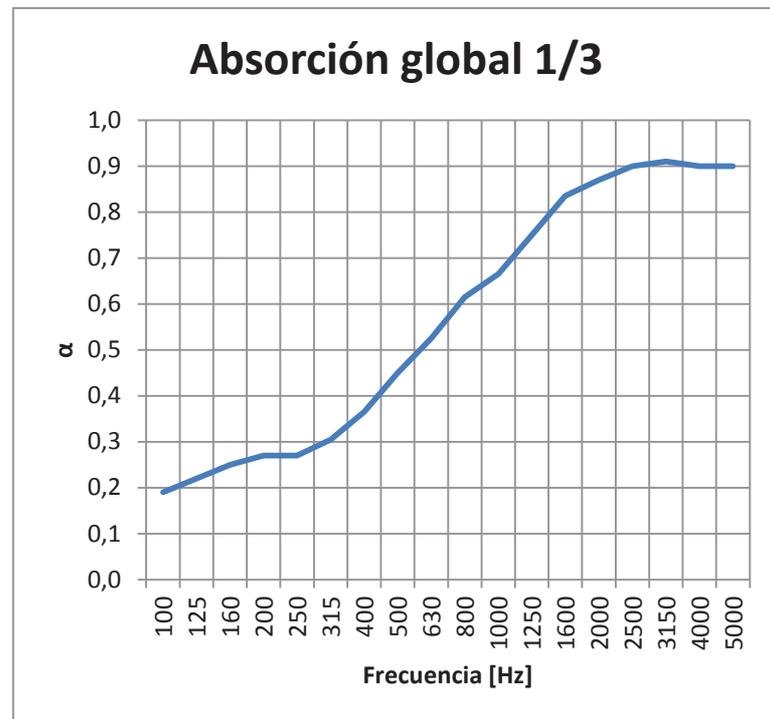
Fig. 5-24 Curva de absorción global (solapamiento de las curvas)



Fuente: Los autores

Fig.5-25 Tabla y curva de absorción en 1/3 de octava

Frec. [Hz]	α normal	
100	0,19	
125	0,22	0,22
160	0,25	
200	0,27	
250	0,27	0,28
315	0,31	
400	0,37	
500	0,45	0,45
630	0,53	
800	0,62	
1000	0,67	0,68
1250	0,75	
1600	0,84	
2000	0,87	0,87
2500	0,90	
3150	0,91	
4000	0,90	0,90
5000	0,90	



Fuente: Los autores

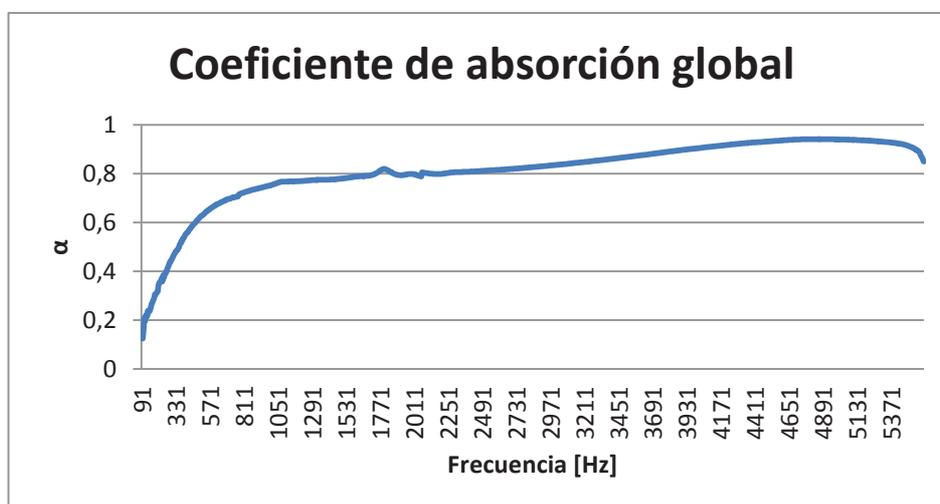
Las Fig. 5-24 y 5-25 muestran la absorción acústica obtenida para esta medición. La curva obtenida es la típicamente encontrada, sin embargo se observa una absorción un poco elevada en bajas frecuencias para el espesor de este tipo de material. El punto más alto de absorción corresponde a $\lambda/4$ del espesor del material, es decir a una frecuencia de 3440 Hz perteneciente a la banda de octava de 3150 Hz.

Medición de lana de vidrio 70kg/m³ de 1" con cámara de aire.

Material	Tipo	Espesor [mm]	Densidad [Kg/m3]	Cámara de aire [mm]
Lana de vidrio	Fibroso	25,4	70,0	25,4

Coefficiente de Absorción

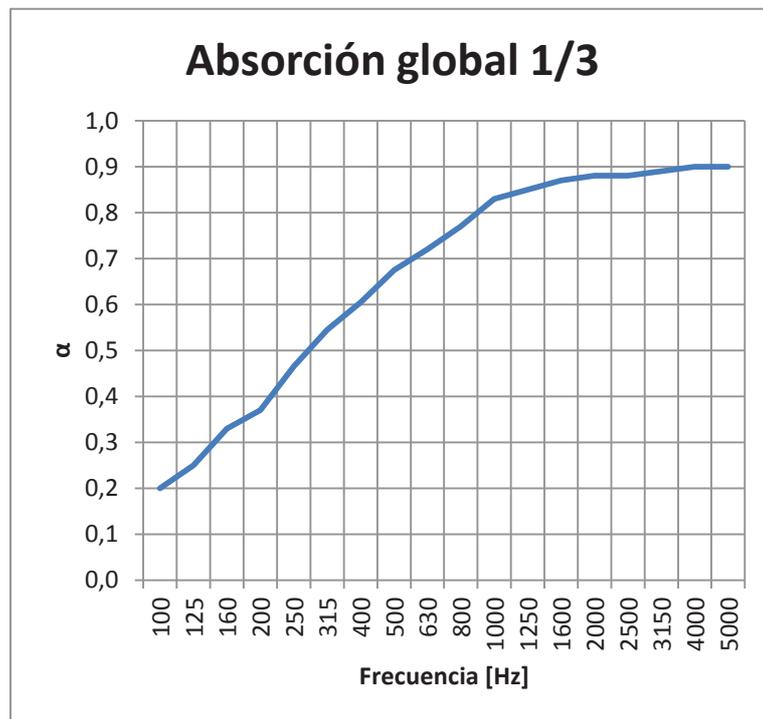
Fig. 5-25 Curva de absorción global (solapamiento de las curvas)



Fuente: Los autores

Fig.5-26 Tabla y curva de absorción en 1/3 de octava

Frec. [Hz]	α normal	
100	0,20	
125	0,25	0,26
160	0,33	
200	0,37	
250	0,47	0,46
315	0,55	
400	0,61	
500	0,68	0,67
630	0,72	
800	0,77	
1000	0,83	0,82
1250	0,85	
1600	0,87	
2000	0,88	0,88
2500	0,88	
3150	0,89	
4000	0,90	0,90
5000	0,90	



Fuente: Los autores

Las Fig.5-25 y 5-26 muestran la absorción obtenida en esta medición. El dejar una cámara de aire, mejora la respuesta de absorción en casi todo el rango de frecuencias, especialmente en bajas. La cantidad de material utilizado no varió con respecto a la medición anterior, pero los resultados fueron significativamente mejores.

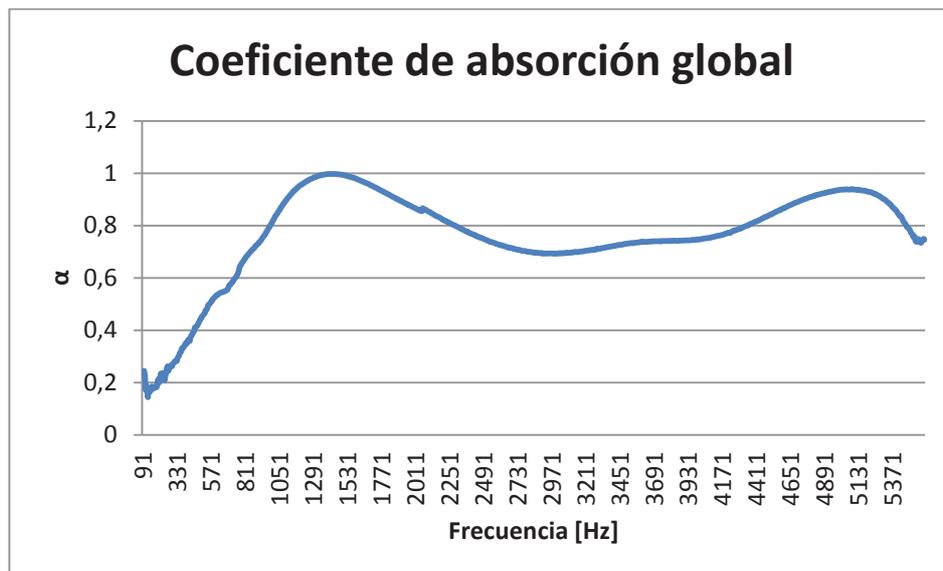
Medición de fonac pro liso de 30mm sin cámara de aire.



Material	Tipo	Espesor [mm]	Densidad [Kg/m3]	Cámara de aire [mm]
Poliéster + Lámina PU	Poliéster	30	32	00,0

Coeficiente de Absorción

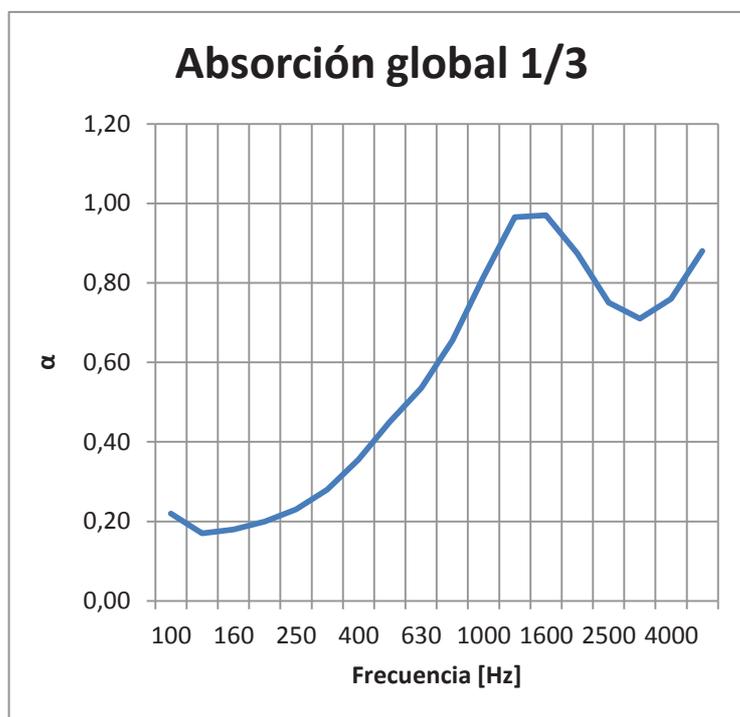
Fig.5-27 Curva de absorción global (solapamiento de las curvas)



Fuente: Los autores

Fig. 5-28 Tabla y curva de absorción en 1/3 de octava

Frec. [Hz]	α normal
100	0,22
125	0,17 0,19
160	0,18
200	0,20
250	0,23 0,24
315	0,28
400	0,36
500	0,45 0,45
630	0,54
800	0,66
1000	0,82 0,81
1250	0,97
1600	0,97
2000	0,88 0,87
2500	0,75
3150	0,71
4000	0,76 0,78
5000	0,88



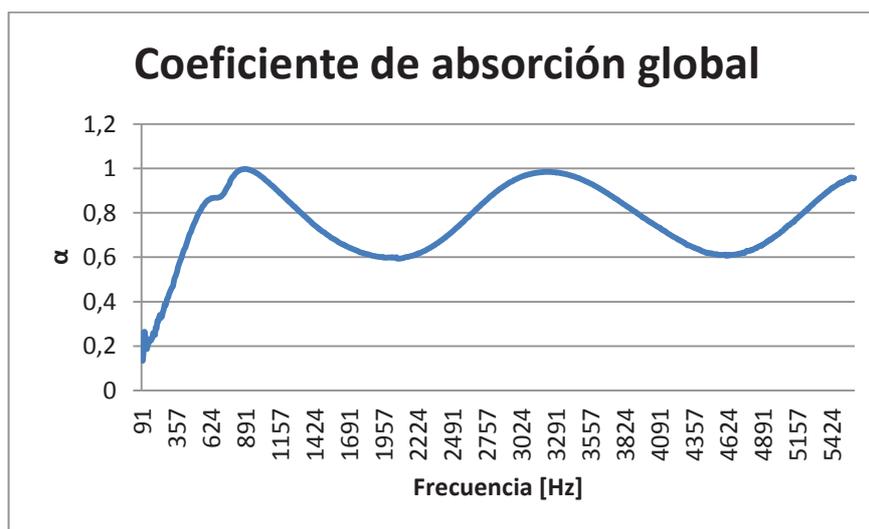
Fuente: Los autores

Las Fig. 5-27 y 5-28 muestran los resultados de absorción para el fonac. La curva se desvía del resultado esperado ya que el comportamiento para un material tipo poroso presenta curvas más parecidas a la del acustifibra. Esta diferencia puede deberse al film plástico (impermeabilización poliuretánica) que posee este material.

Medición de fonac pro liso de 30 mm con cámara de aire.

Material	Tipo	Espesor [mm]	Densidad [Kg/m3]	Cámara de aire [mm]
Poliéster + Lámina PU	Poliéster	30	32	25,4

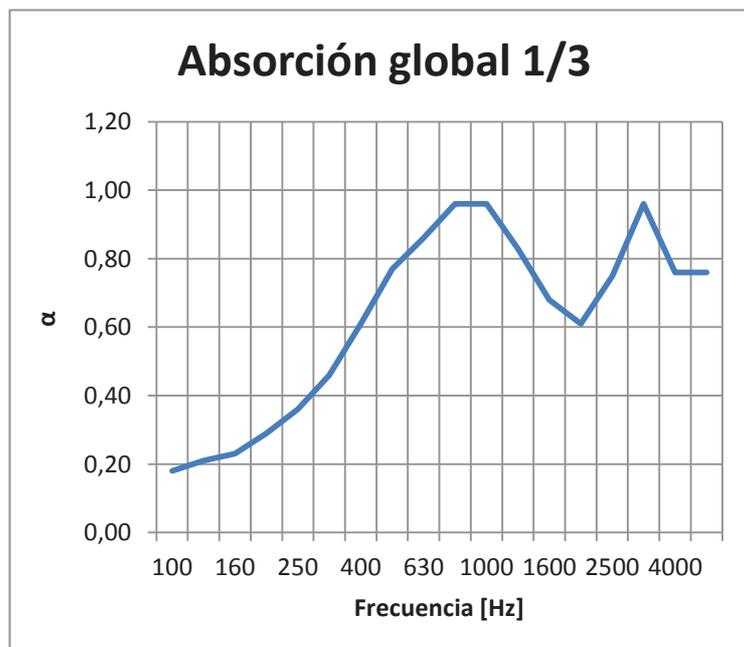
Fig.5-29 Curva de absorción global (solapamiento de las curvas)



Fuente: Los autores

Fig. 5-30 Tabla y curva de absorción en 1/3 de octava

Frec. [Hz]	α normal
100	0,18
125	0,21 0,21
160	0,23
200	0,29
250	0,36 0,37
315	0,46
400	0,61
500	0,77 0,75
630	0,86
800	0,96
1000	0,96 0,92
1250	0,83
1600	0,68
2000	0,61 0,68
2500	0,75
3150	0,96
4000	0,76 0,83
5000	0,76

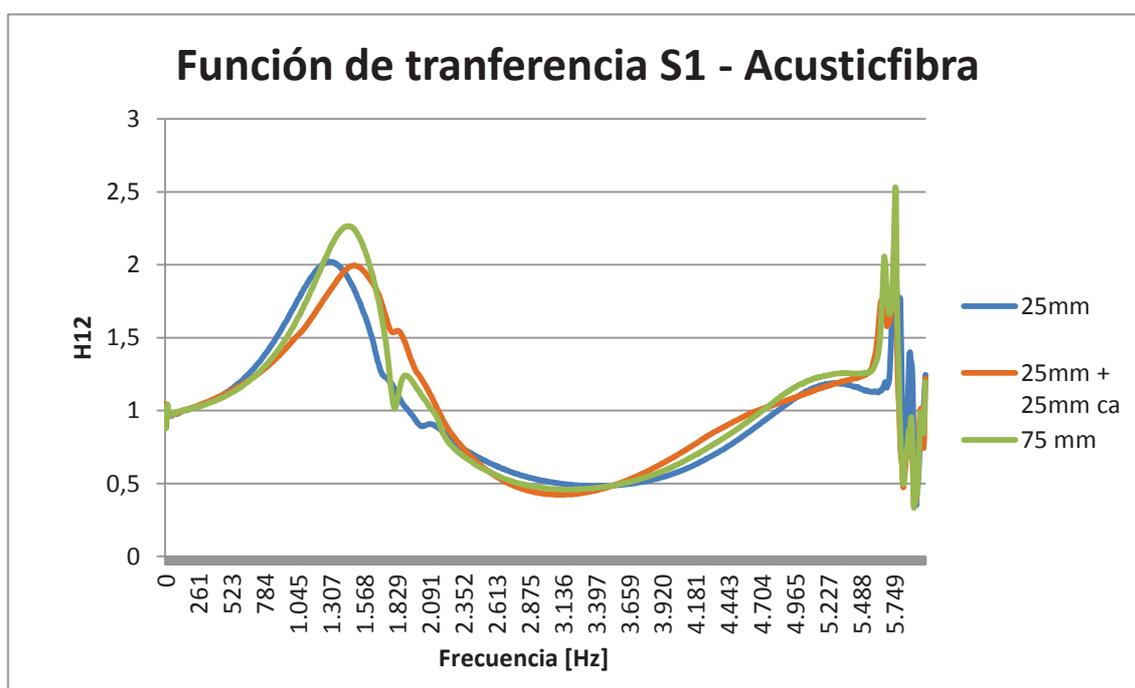


Fuente: Los autores

Las Fig. 5-29 y 5-30 muestran la absorción para este material. Al igual que en el caso anterior presenta el mismo tipo de curva, la cual es parecida a un resonador diafragmático, posiblemente por la capa plástica de este material.

5.3 COMPARACIONES Y RESULTADOS

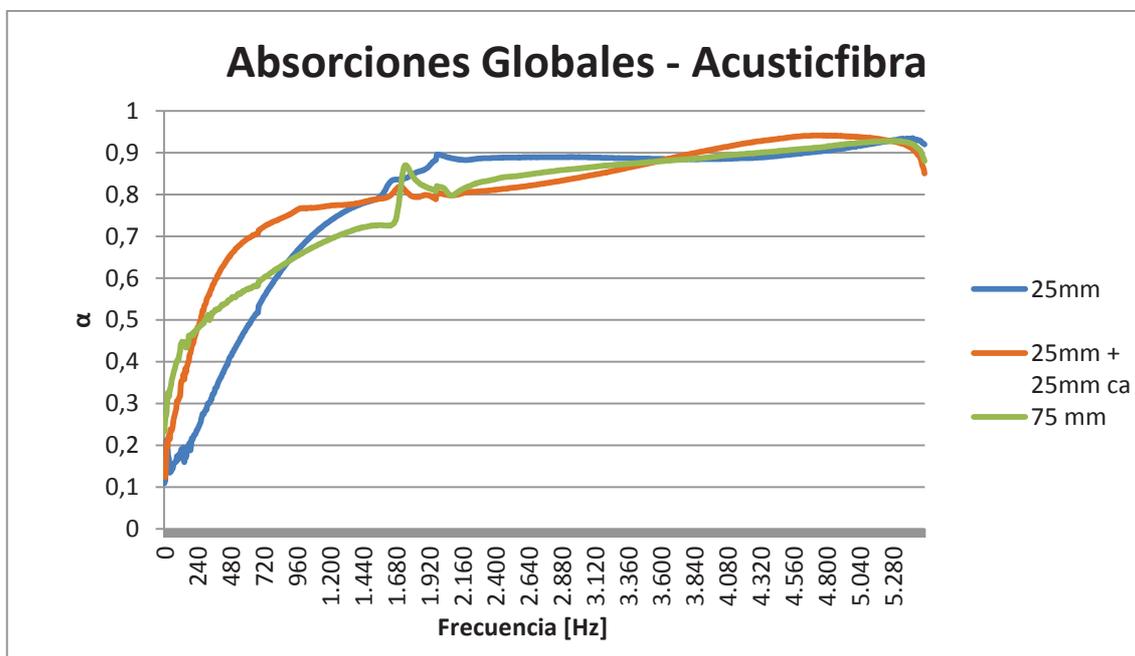
Fig.5-31 Comparación entre las funciones de transferencia con acusticfibra



Fuente: Los autores

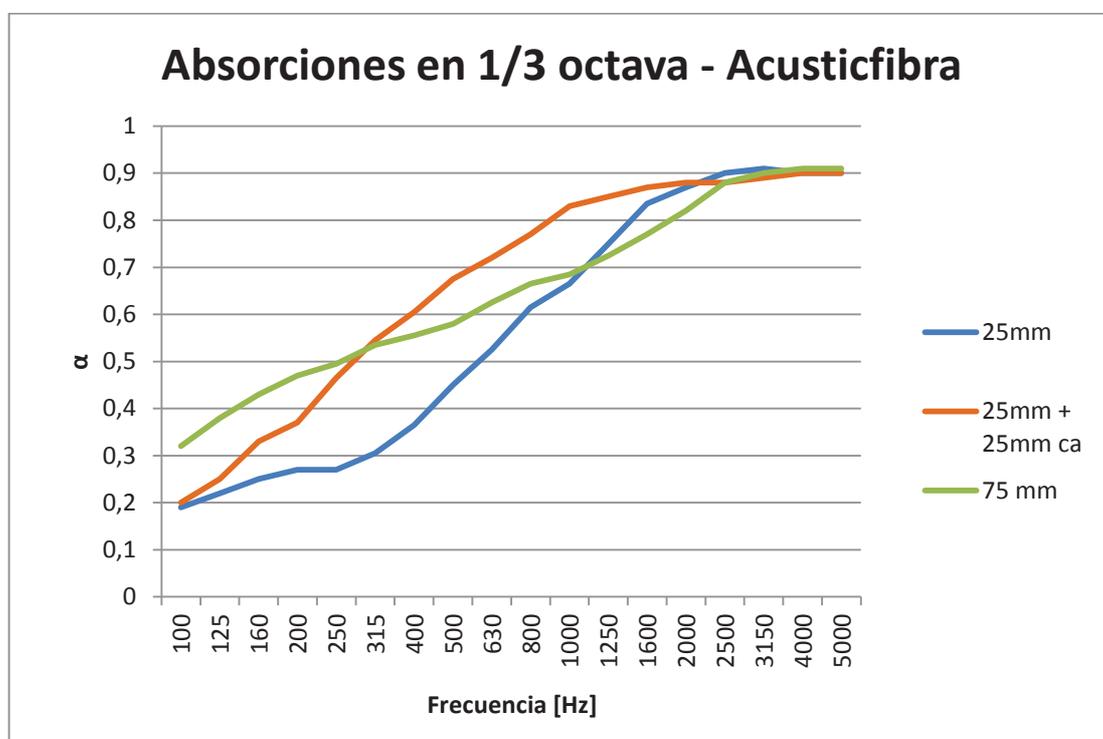
La Fig.5-31 muestra la comparación entre las funciones de transferencia en la configuración S1, de la acusticfibra (lana de vidrio). Como se puede apreciar las curvas son similares entre sí para los diferentes espesores de material, es decir la curva mantendrá su tendencia general aun cuando se hagan modificaciones al material como aumentar el espesor o colocar una cámara de aire; sin embargo el cambio de densidad si puede ser catalogado como un material diferente y por lo tanto una curva de la función de transferencia distinta.

Fig.5-32 Comparación entre las absorciones con acusticfibra



Fuente: Los autores

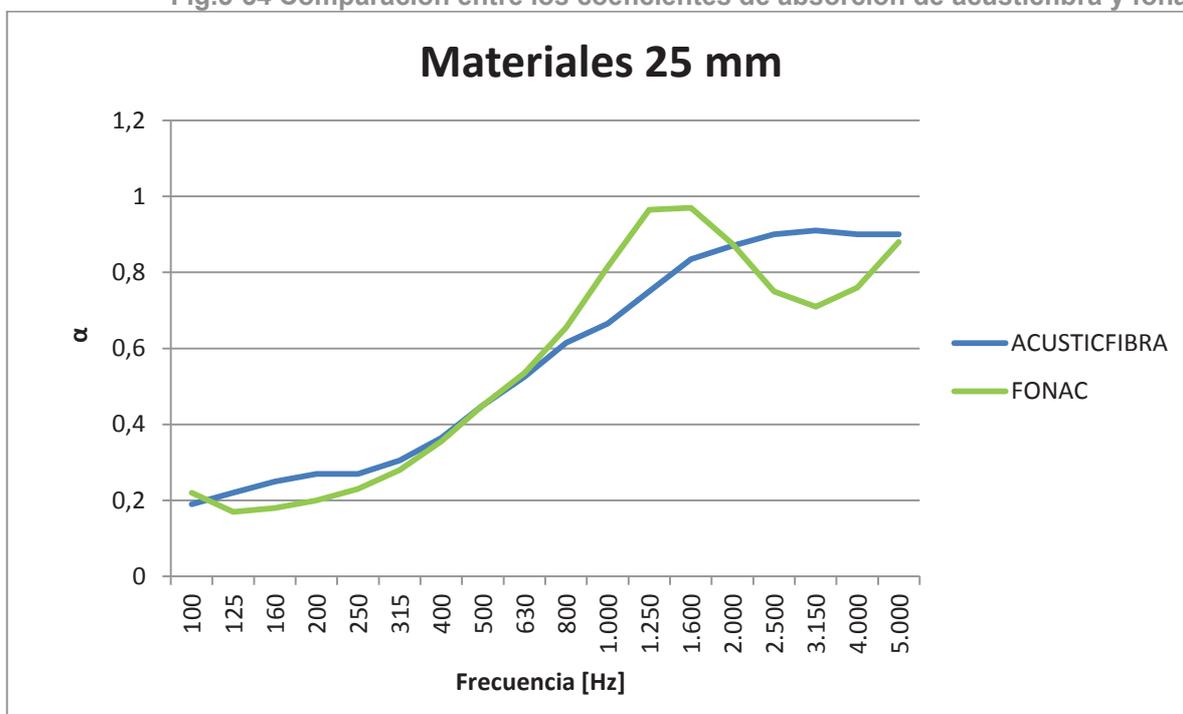
Fig.5-33 Comparación entre las absorciones en 1/3 de octava con acusticfibra



Fuente: Los autores

La Fig.5-32 y Fig.5-33 muestran las diferencias en la absorción entre los distintos espesores y disposiciones utilizados con la acusticfibra. Cuando el material tiene un mayor espesor, la absorción en bajas frecuencias es mayor, en frecuencias medias la curva con cámara de aire se incrementa por encima de las otras dos, y luego de los 3000 [Hz] las tres curvas son similares, estos comportamientos son de esperarse ya que al aumentar el espesor de este tipo de materiales la absorción aumenta en bajas frecuencias por la relación que existe entre $\lambda/4$ y el espesor del material que se establece en la teoría de materiales absorbentes porosos; aunque según los resultados obtenidos esta relación no es tan visible y directa como se pensaría.

Fig.5-34 Comparación entre los coeficientes de absorción de acusticfibra y fonac



Fuente: Los autores

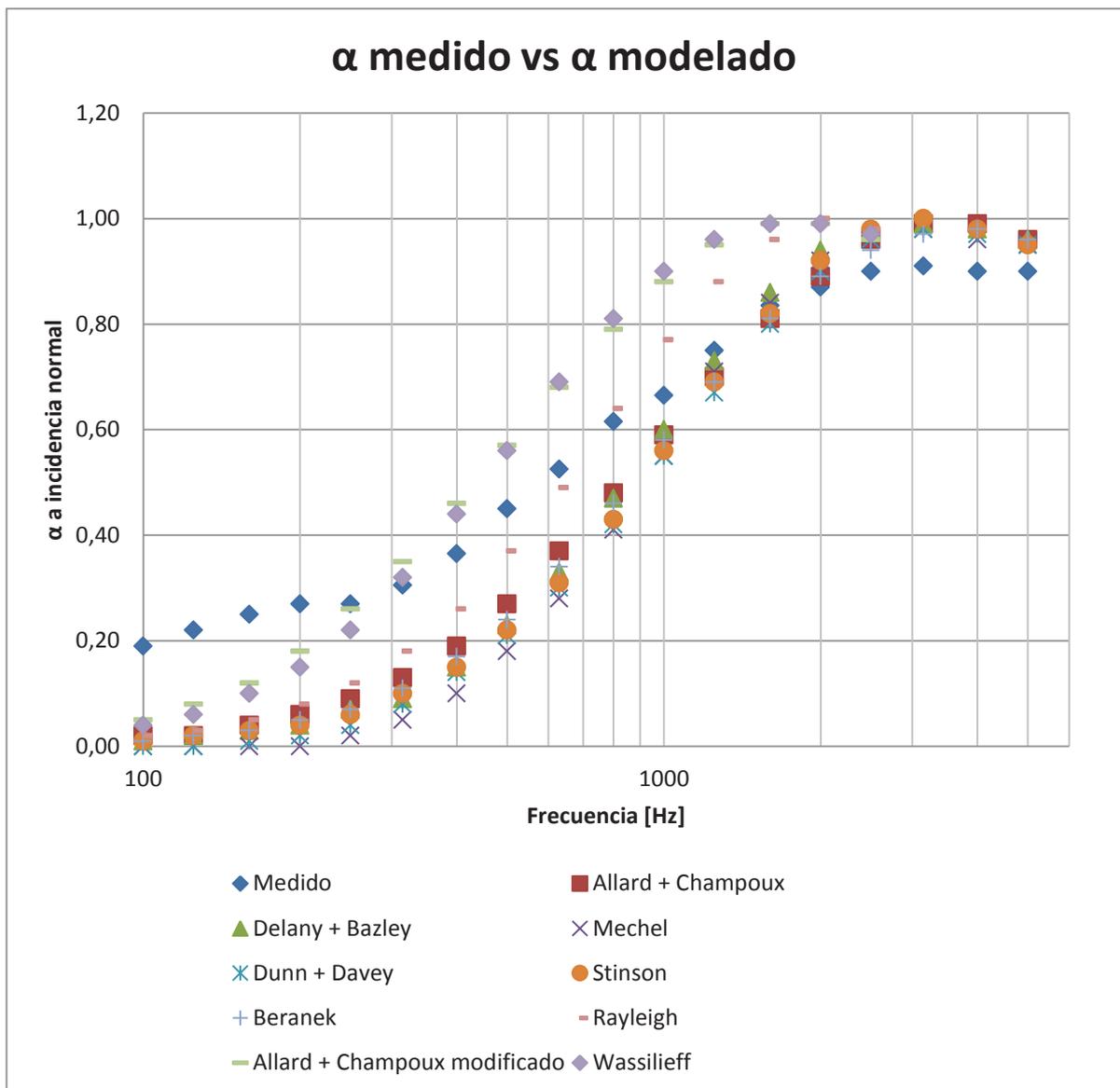
La Fig.5-34 muestra las diferencias en las absorciones entre la acusticfibra (lana de vidrio) y el fonac (poliester). Se aprecia que el fonac en ciertas zonas posee una mayor absorción, pero su curva posee mayor variación, en cambio la acusticfibra posee un incremento más estable. Se presume que la diferencia se debe a la capa de film plástico que recubre al poliéster (fonac), causando este tipo de curva de absorción, donde se podría pensar que estos valores se

deben a la deformación de la superficie debido al film plástico en donde se producen vibraciones.

5.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

ACUSTICFIBRA 25mm de espesor y cámara de aire de 0mm.

Fig.5-35 Comparación entre el α medido y el α modelado



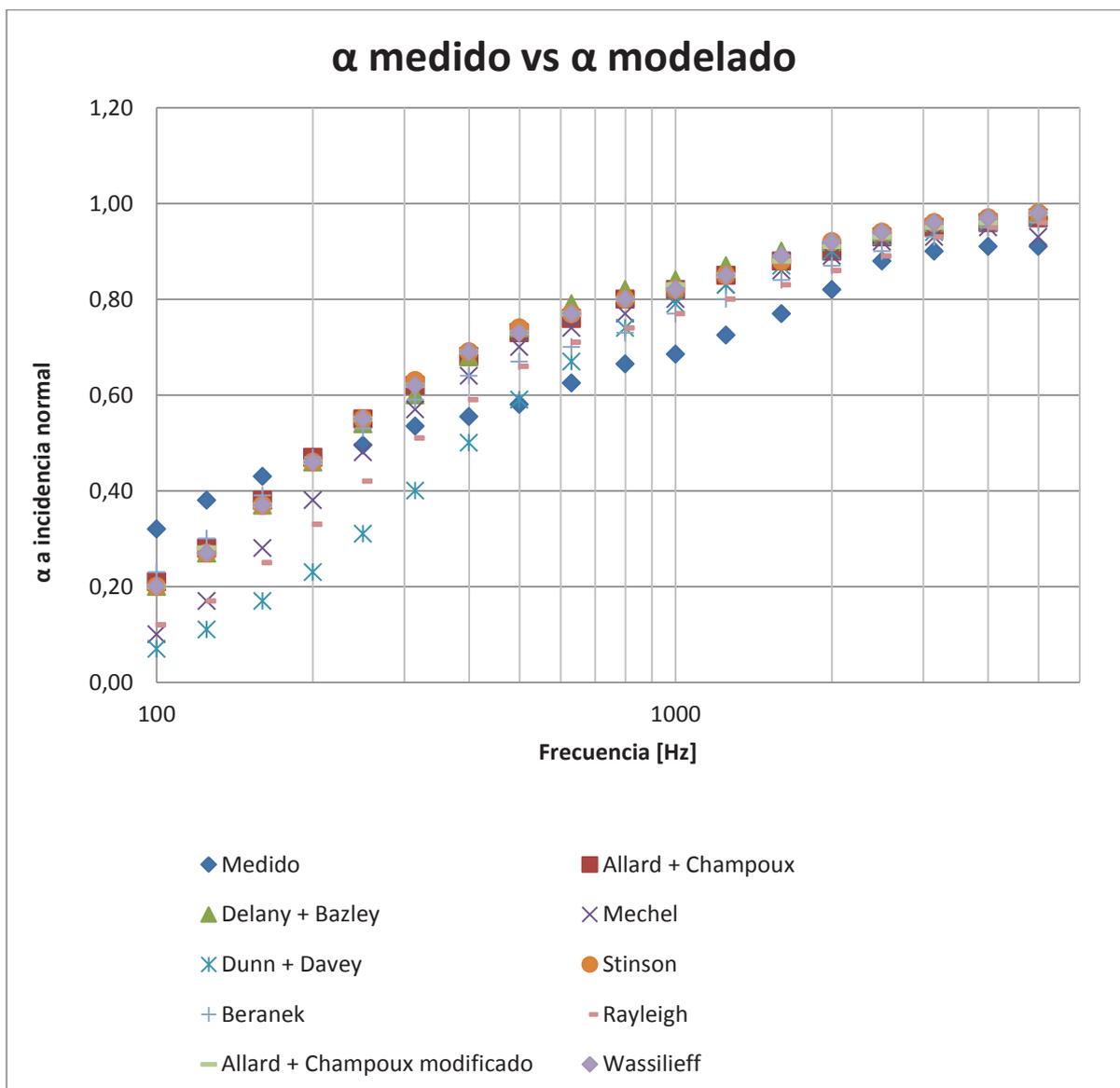
Fuente: Los autores

La Fig.5-35 muestra la comparación entre el α medido y el α obtenido con diferentes modelos matemáticos elaborados por varios grupos de investigación.

Estos modelos son usados ampliamente para estudios acústicos. Existe un desfase de alrededor del 12% en bajas frecuencia respecto de los modelos utilizados. Si bien esta diferencia no es tan grande puede ser objeto de análisis para mejorarla efectividad del tubo en bajas frecuencias. Una opción para mejorar este problema podría ser el uso de más promediaciones al momento de realizar la medición, ya que esto suaviza la curva y podría mejorar el resultado.

ACUSTICFIBRA 75mm de espesor y cámara de aire de 0mm.

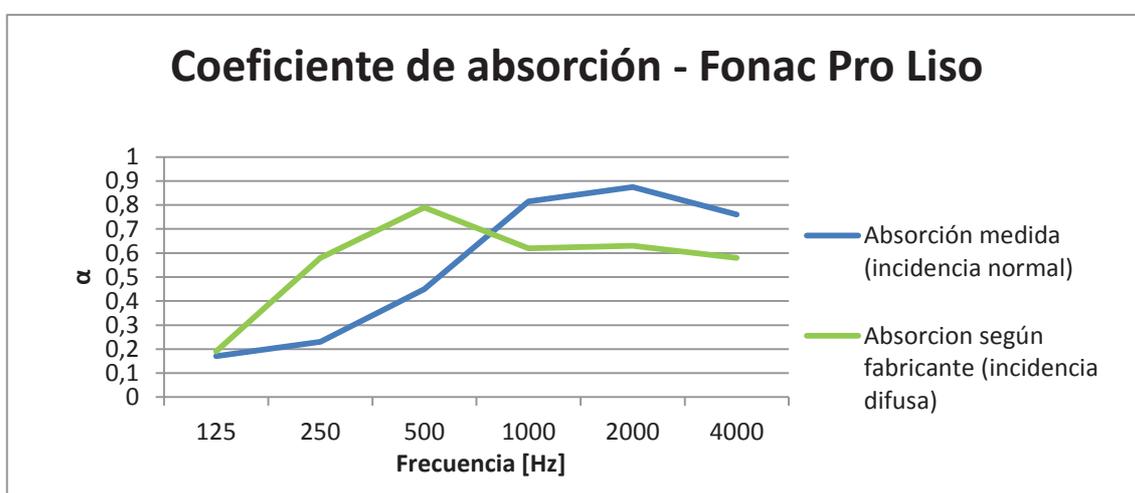
Fig.5-36 Comparación entre el α medido y el α modelado



Fuente: Los autores

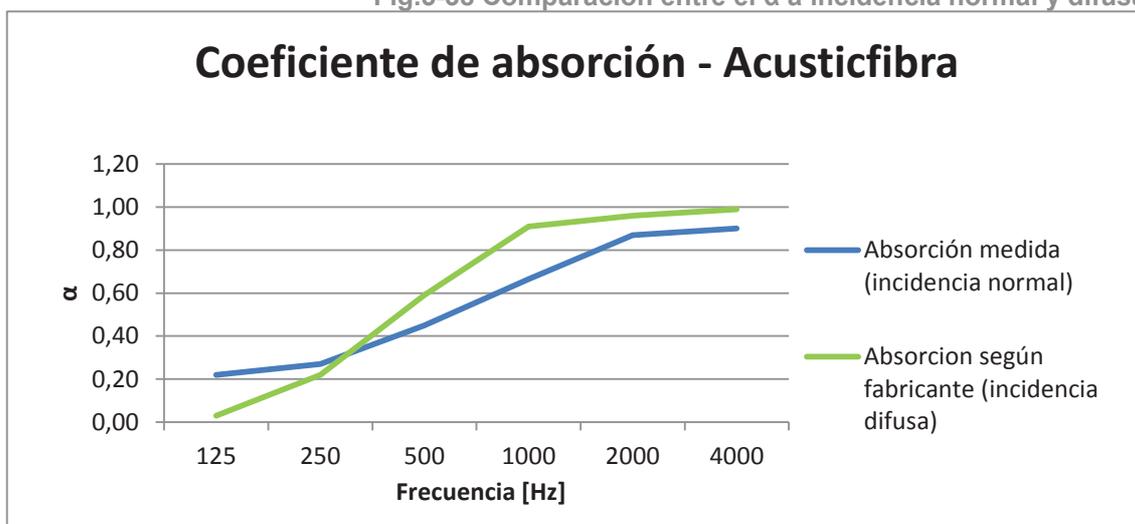
La Fig. 5-36 muestra la comparación entre las absorciones medida y modeladas vía software en donde se observa que estas mantienen una misma tendencia, sin embargo, el α medido en bajas frecuencias presenta una mayor absorción, la cual se encuentra en alrededor del 5%. En frecuencias medias la curva medida está por debajo de las modeladas en alrededor del mismo porcentaje. No se puede determinar un modelo matemático lo suficientemente cercano a la curva medida ya que en altas frecuencias existe una mayor correlación con el modelo realizado por Rayleigh pero en bajas frecuencias el método más cercano es el de Allard + Champoux.

Fig.5-37 Comparación entre el α a incidencia normal y difusa



Fuente: Los autores

Fig.5-38 Comparación entre el α a incidencia normal y difusa



Fuente: Los autores

Las Fig.5-37 y Fig.5-38 muestran las comparaciones realizadas entre el coeficiente de absorción a incidencia normal (α medido) y en incidencia difusa (entregado por el fabricante). La Fig.5-37 muestra una curva con resultados bastante comunes, es decir que presenta la tendencia general que poseen las curvas en la mayoría de los materiales fibrosos (ver Fig.5-7) lo que significa que la curva de incidencia normal es menor que la curva en incidencia difusa (medido en cámara reverberante) en bajas frecuencias.

En la Fig.5-36 se puede observar un comportamiento distinto, sin embargo en bajas frecuencias la curva tiende a desviarse (ver Fig.5-33).

6 ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación se presenta la tabla con los costos asociados a la construcción del tubo de impedancia:

Tabla 6-1 Costos tubo de impedancia

COSTOS PARA CONSTRUCCIÓN DE TUBO DE IMPEDANCIA				
MATERIALES Y EQUIPOS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Tubo principal	U	1	30	30
Porta muestras	U	1	15	15
Porta micrófono	U	4	5	20
Base	U	3	8	24
Émbolo	U	1	25	25
Micrófono	U	2	200	400
Driver de compresión	U	1	200	200
Tapón	U	2	1	2
Cable	U	2	20	40
Pintura electrostática	U	1	25	25
MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Soldador	Hrs	4	8	32
Mecánico	Hrs	4	8	32
Arrendamiento torno	Hrs	1	15	15
Arrendamiento fresadora	Hrs	3	15	45
TOTAL				905

Fuente: Los autores

Adicionalmente a estos costos se debe poner un valor referencial del costo de desarrollar el software, con el que tenemos la siguiente tabla:

Tabla 6-1 Costo total

COSTO TOTAL				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Tubo de impedancia	U	1	905	905
Software	U	1	800	800
TOTAL				1705

Fuente: Los autores

Los costos producto de la realización del tubo de impedancia podrían resultar muy atractivos, comparados con los precios a los que se suelen vender estos dispositivos en el mercado, ya que estos costos oscilan entre los 8000 y 10000 euros.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Las normativas existentes sobre el tubo de impedancia y el método de la función de transferencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.
- El éxito del diseño ha sido involucrar áreas como la programación con el uso de Labview y el diseño mecánico usando Solidworks, además de los componentes propios de la ingeniería acústica.
- La construcción ha sido consistente con el proceso de diseño, aunque existieron pequeñas imperfecciones que disminuyeron la efectividad y precisión del tubo de impedancia. Las normas que gobiernan las diferentes áreas de ingeniería son fundamentales, por ejemplo todas las reglas de dibujo para los planos, los diagramas gráficos que representan el lenguaje de programación en Labview, o toda la normatividad en acústica como las normas ISO y ASTM. Estas normas deben ser una guía dentro de las diferentes áreas pero no deben ser una restricción para la creatividad e inventiva que debe tener el ingeniero.
- La herramienta Labview es un lenguaje de programación gráfico que facilita la programación a usuarios no expertos en informática. Además de tener muchas facilidades para las interfaces gráficas y pantallas para muestra de resultados.
- Según las mediciones realizadas se pudo comprobar que mientras la función de transferencia sea más limpia y no presente desviaciones a su tendencia, el resultado de absorción acústica también poseerá estas características.
- Mientras más alejado esté el micrófono de referencia de la muestra aparecerán más picos en la función de transferencia que generan caídas bruscas en los resultados de la absorción acústica, ocasionados por frecuencias similares a $\lambda/2$ de la distancia entre los micrófonos (S). La cantidad de caídas obtenidas en la curva de la absorción serán las

mismas que los picos encontrados en la gráfica de la función de transferencia, a excepción del primer pico.

- En la configuración de medición S1 se pudo observar que la curva de absorción sonora obtenida abarca todo el rango sonoro esperado, es decir desde los 86 Hz hasta los 5600 Hz; es por esta razón que puede ser utilizado como un análisis preliminar, sin embargo para lograr mayor precisión en los resultados se deberá medir en la configuración S2 y S3 para frecuencias medias y bajas.
- El procedimiento de montaje de la muestra puede variar los resultados obtenidos, ya que si existen fugas, compactación del material, espacios de aire, así como una superficie no plana, estos podrían causar errores en el plano de referencia.
- El montaje de la muestra es el que ocasiona los errores más comunes, es por esto que se debe tener un cuidado especial en este paso del procedimiento.
- La efectividad del tubo de impedancia es aceptable, debido a que los resultados obtenidos con el método son aproximados a los encontrados en las tablas de coeficientes de absorción con las que se compararon. En algunos casos se presentan diferencias mayores, que rompen con las tendencias de las curvas, sin embargo los valores obtenidos poseen una gran aproximación a los resultados esperados, basados en principios teóricos.
- El tiempo que se emplea para realizar la medición y obtener los resultados es relativamente corto, menos de 10 minutos.
- La cantidad de promedios afecta al resultado y sobre todo tiende a mejorar la definición de la misma en bajas frecuencias.
- Los niveles de operación del tubo son de 60dB a 130dB, aquí los resultados presentan pequeñas variaciones. Sin embargo al aumentar el nivel (volumen) la coherencia empieza a decaer y por lo tanto los resultados pierden definición.
- Según los resultados obtenidos se puede concluir que la configuración más idónea para un material absorbente poroso es con un tipo de

montaje que considere una cámara de aire, ya que se obtiene con poco espesor una buena absorción en el rango audible.

7.2 RECOMENDACIONES

- La mejora en los diferentes elementos del tubo siempre es posible y se debe tomar en cuenta lo siguiente:

El aislamiento acústico del tubo (espesor).

La forma de sujeción de la muestra en el porta muestra.

El elemento aislante para las cavidades en el porta micrófono.

Mejorar la concentricidad (tolerancia).

- Los procesos acústicos deberían tender a ser representados con gráficas, diagramas, etc., que con el tiempo deberían volverse estándares para el área de estudio y la industria.
- Así como en otras áreas tecnológicas, la ingeniería acústica debe beneficiarse de los procesos que se manejan en otras ramas de la ingeniería, en este sentido todo proceso en ingeniería acústica debería tener las siguientes etapas:

Recopilación de requerimientos (necesidades).

Diseño.

Construcción.

Pruebas y control de calidad.

- Los equipos e instrumentos utilizados deben ser de la mejor calidad posible, para que no alteren los resultados.
- Se deben cumplir a cabalidad los primeros procesos, estos son: la calibración del sistema, revisar el cumplimiento de la relación señal ruido, realizar un montaje lo más exacto posible de la muestra del material a evaluar, para que de esta manera la medición sea precisa.
- Para lograr tener buenas muestras de los materiales es necesario un molde de corte, que sea del mismo diámetro del tubo y que además entregue superficies homogéneas y lisas, logrando evitar fugas sonoras que generen error en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ASTM E1050-98**, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System", Volume 04.06, 1998.
2. **ISO 10534-2**, "Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer-Function Method", TC43 Acoustics /SC2, Etapa 90.93, 1998.
3. **ISO 11654**, "Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – rating of sound absorption", TC43 Acoustics /SC2, Etapa 90.93, 1997.
4. **Jurado Orellana**, Carlos, "Estudio experimental de la impedancia acústica en conductos y silenciadores bajo diferentes condiciones de borde", Tesis – Universidad Austral de Chile, 2004
5. **Chung**, J. Y., **Blaser**, D. A., "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory", J. Acoust. Soc. Am, September 1980
6. **Chung**, J. Y., **Blaser**, D. A., "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment", J. Acoust. Soc. Am, Septiembre 1980
7. **Bodén**, Hans, **Abom**, Mats, "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts". Department of Technical Acoustic, Royal Institute of Technology, Stockholm Sweden, J. Acoust. Soc. Am 79 (2), February 1986.
8. **Ryu**, Yunseon. "The acoustic impedance measurement system using two microphones", Bruel&Kjaer sound and vibration measurement A/S, Denmark.
9. **Bruel&Kjaer**. "Material Testing – Determination of acoustic properties", Bruel&Kjaer sound and vibration measurement A/S, Denmark, 1999.
10. **Seybert**, Andrew F. "Notes on Absorption and Impedance Measurements", University of Kentucky.

11. **Seybert**, Andrew F., **Ross**, D. F., "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique", Acoustical Society of America, 1977
12. **Chu**, **W. T.** "Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone", J. Acoust. Soc. Am, Ottawa, Canada , August 1986
13. **Alvarez**, Jorge D. "In-situ measurements of the Complex Acoustic Impedance of materials for automobile interiors", Master's thesis 2006, DTU, Technical University of Denmark.
14. **O'Malley**, Sean P., "Construction and testing of a modern acoustic impedance tube", Tesis - Naval Postgraduate school, Monterey California, June 2001.
15. **Sanchis**, Ernesto J., "Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para sus uso en acústica arquitectónica", Tesis Doctoral – Universidad Politécnica de Valencia, España, 2008.
16. **Vissamraju**, Krishnasudha, "Measurement of absorption coefficient of road surfaces using impedance tube method", Tesis – Auburn University, Alabama, August 2005.
17. **Suhanek**, M., **Jambrosic**, K., **Domitrovic**, H., "Student Project of building an impedance tube", SFA - Acoustics 08 Paris, Zagerb Croatia. 2008
18. **Lefebvre**, A., **Scavone**, G., "Input impedance measurement of conical acoustic systems using the two – microphone technique", SFA - Acoustics 08 Paris, CRMMT, Canada. 2008
19. **Katz**, Brian F., "Method to resolve microphone and sample location errors in the two-microphone duct measurement method", Acoustics Department, The Pennsylvania State University, State College, Pennsylvania, 2000
20. **Morgans**, Rick C., **Li**, Xun, **Zander** Anthony, **Hansen** Colin H., "Statistics and the two microphone method for the measurement of sound absorption coefficient", Acoustic 2004, University of Adelaide, Australia, November 2004

21. **Beranek, Leo L.** "Precision measurement of acoustic impedance", Cruft Laboratory Harvard University, Cambridge Massachusetts, J.A.S.A, Volúmen 12, Julio 1940.
22. **Kunze, Jr. Robert K.** "Portable acoustic impedance measurement system", United States Patent, Patent number 6,134,968; 24 Octubre 2000
23. **Schultz, Todd, Cattafesta III, Louis N., Nishida, Toshikazu, Sheplak Mark,** "Uncertainty Analysis of the Two-Microphone Method for Acoustic Impedance Testing", AIAA 2002-2465, University of Florida, June 2002
24. **Horoshenkov, Kirill V., Sgard, Franck,** "Reproducibility experiments on measuring acoustical and related non-acoustical parameters of porous media (round-robin tests)", ICSV13, Vienna, Austria, July 2-6, 2006.
25. **Akustik Forschung,** "AcoustiTube Manual – Analysis Software AFD 1001 (Measurement of sound Absorption Coefficient) ", www.akustikforschung.de
26. **Farina, Angelo,** "Measurement Of the sound absorption coefficient of materials with a new sound intensity technique", University of Parma, <http://pcfarina.eng.unipr.it>
27. **Suarez Gonzalez,** "Comparative analysis of several acoustic impedance measurements", Departamento de Física de E.T.S, España.
28. **Muehleisen, Ralph T.,** "Measurement of the Acoustic Properties of Acoustic Absorbers". Illinois Institute of technology
29. **Pérez, Santiago J.,** extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancia del centro de instrumento, UNAM", Revista mexicana de física 46 (5) 478-484, México, Octubre 2009.
30. **Heinrich Kuttruff - Taylor&Francis,** "Acoustics", 2 Edición (Ingles) - Capitulo 4 - pág. 48
31. **Anónimo,** The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows/CVI, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4278>
32. **SpectraPLUS,** FFT Spectral Analysis System, Version 5.0, Users Guid
33. **Finn, Jacobsen,** "Propagation of sound waves in ducts", Technical University of Denmark. April 2010

ANEXOS

ANEXO A - PROCEDIMIENTO PARA LA TÉCNICA DE UN SOLO MICRÓFONO

La precisión de la técnica de un solo micrófono depende de la forma de la implementación. Debe asegurarse que el campo sonoro en las dos localizaciones sean evaluadas secuencialmente con una fuente sonora estable, para lo cual se recomienda usar una señal determinística de alimentación. Como es únicamente utilizado un micrófono no se necesita la corrección respecto a los errores del micrófono en la evaluación de la función de transferencia. Existen dos formas diferentes de aplicar el método:

Localizaciones fijas de micrófono: Usa la misma configuración descrita para la técnica utilizada para los dos micrófonos. Sin embargo las funciones de transferencia entre las presiones en las dos posiciones, es calculada de dos mediciones de funciones de transferencia de una manera secuencial:

$$H_{12} = \frac{H_{x2}}{H_{x1}} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

x = Generador de señal

El contenedor del micrófono que no esté siendo usado debe estar bien sellado.

Localizaciones variables de micrófono: Se utiliza un micrófono de sonda móvil; el campo sonoro en las dos localizaciones es muestreado de una manera secuencial; es esencial que se determine el centro acústico y la atenuación del tubo. Se prefiere la generación de un tono puro; para conservar la alta precisión, es necesario escoger la localización del micrófono cercano al primero o al segundo mínimo (no necesariamente exacto), respetando la distancia mínima necesaria del espécimen. La otra localización deberá ser aproximadamente un cuarto de la longitud de onda. Esta elección de la localización del micrófono es requerida para cada frecuencia de excitación.

ANEXO B – DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CON INCIDENCIA DIFUSA α_{st} DE ABSORBENTES DE REACCIÓN LOCAL DESDE LOS RESULTADOS DEL MÉTODO.

El coeficiente de absorción α_{st} para un sonido con incidencia difusa (omnidireccional) puede ser calculado para absorbentes del tipo “localmente reactivos” (la propagación del sonido dentro del absorbentes de forma paralela a su superficie) desde la impedancia normalizada $z = z' + jz''$.

La relación es:

$$\alpha_{st} = 8 \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \left[1 - \frac{z'}{z'^2 + z''^2} * \ln(1 + 2z' + z'^2 + z''^2) + \frac{1}{z''} * \frac{z'^2 - z''^2}{z'^2 + z''^2} * \tan^{-1} \frac{z''}{1 + z'} \right]$$

(B.1)

Donde:

$z = Z/\rho c_0$ Es la impedancia normalizada

$z' = R/\rho c_0$ La parte real de la impedancia normalizada

$z'' = X/\rho c_0$ La parte imaginaria de la impedancia normalizada

Si $z'' = 0$ entonces el último termino dentro del corchete seria $1/(1 + z')$. El valor máximo de α_{st} que puede ser obtenido luego de esta fórmula es 0.96.

ANEXO C – PARÁMETROS DE DISEÑO PARA UN TUBO RECTANGULAR

RESTRICCIONES Y RECOMENDACIONES

El espesor debe ser similar al 10% de la dimensión transversal del tubo. (Los vértices deben ser lo suficientemente rígidos para evitar distorsiones de las paredes laterales). Se prefieren secciones cuadradas o como máximo relaciones de 1:2.

Dimensiones del tubo

Secciones rectangulares:

$$d < 0.5\lambda_u = f_u d < 0.5 C_0 \quad (C.1)$$

Donde:

d = Longitud más grande del tubo [m]

f_u = Frecuencia superior [Hz]

C_0 = Velocidad del sonido [m/s]

Distancia entre la muestra y los micrófonos

Material plano: 1/2 de la longitud más larga.

Material no homogéneo: 1 de la longitud más larga.

Material profundamente asimétrico: 2 de la longitud más larga.

Soporte de la muestra

Para tubos rectangulares se recomienda que se integre el porta muestras al tubo de impedancia y sea la muestra la que salga, además se recomienda el uso de vaselina para que las dos partes encajen a presión y evitar posibles fugas. También se recomienda instalar la muestra desde un lado al tubo y no empujarla de forma axial dentro del tubo, de esta forma es posible verificar la posición del material dentro del mismo. De esta manera también se evitaría la compresión en materiales suaves sin estructura.

ANEXO D – CAVIDAD EN LA TERMINACIÓN DEL PORTA MUESTRAS

Algunas veces una cavidad en la terminación del porta muestras es requerida, para lo cual se debe dejar un espacio de aire entre la superficie final de la muestra y la superficie rígida de la placa posterior del porta muestras. La profundidad de la cavidad debe ser exactamente $\lambda_0/4$ de la frecuencia que quiere ser evaluada. Por esta razón se recomienda usar placas rígidas móviles (émbolo), como terminación rígida del porta muestra, sin embargo estas placas a veces presentan pequeñas fugas en los bordes y por lo tanto dejan de ser acústicamente rígidas, produciendo un error que ya no puede ser cuantitativamente tomado en cuenta.

La razón para el uso de las cavidades de aire es usualmente para determinar la impedancia característica compleja Z_a , así como la constante de propagación compleja característica τ_a , de los materiales absorbentes homogéneos como la fibra mineral o el foam.

Si la capa del material que está siendo usado para la evaluación tiene un espesor delgado b , la impedancia de la superficie de estas capas es rígida Z_r (terminación rígida), y si la impedancia de la superficie de las capas es suave Z_s (terminación con cavidad de aire) entonces la impedancia característica y la constante de propagación están dados por:

$$Z_a = \sqrt{Z_r Z_s} \quad ; \quad \Gamma_a = \frac{1}{a} * \tanh^{-1} \left(\sqrt{\frac{Z_s}{Z_r}} \right) \quad (D.1)$$

El problema de una impedancia de carga cero, puede ser evitado por otro método: la profundidad t de la cavidad de aire no debe ser exactamente $\lambda_0/4$ pero debe ser cercano a este valor. Entonces la impedancia de carga de la parte trasera del absorbente es:

$$Z_1 = -jZ_0 * \cot k_0 t \quad (D.2)$$

Y los datos característicos del material absorbente son obtenidos por:

$$Z_a = [Z_r * Z_s + Z_1 * (Z_s - Z_r)]^{1/2} \quad ; \quad \Gamma_a = \frac{1}{b} * \tanh^{-1} \left(\frac{Z_a}{Z_r} \right)$$

(D.3)

Donde:

Z_r = Impedancia de la superficie para una terminación rígida.

Z_s = Impedancia de la superficie con una cavidad de aire.

El segundo término debajo de la raíz indica el error que es introducido al primer método por una impedancia de carga Z que no es exactamente 0. Esto puede hacer al cálculo bastante largo.

En aplicaciones prácticas del segundo método una profundidad dada t de la cavidad de aire debe ser aplicada para todas las frecuencias para las cuales es aproximadamente un múltiplo impar de λ_0 , y para frecuencias que están alrededor de un tercio de octava de distancia en cada uno de los lados. Por lo tanto todo el rango de frecuencias puede ser cubierto únicamente con pocas configuraciones de la profundidad t . Esta profundidad, la velocidad del sonido y la frecuencia deben ser determinadas lo más precisamente posible.

ANEXO E – MEDICIONES Y CALIBRACIONES PRELIMINARES Y PERIÓDICAS

1. ANTES DE CADA MEDICIÓN:

a. Calibración de la amplitud del micrófono

La precisión del micrófono debe ser calibrada a ± 0.3 dB o mejor respecto a una fuente de sonido estable sobre el rango de frecuencias en los que trabaja. Una prueba con una sola frecuencia, por ejemplo, va a proveer una estimación suficiente y el micrófono debe ser conocido por tener una respuesta lineal sobre todo en el rango de frecuencias en el que trabaja.

b. Medición de la temperatura

Se debe medir la temperatura con un dispositivo obteniendo una precisión ± 0.5 K o mejor, para reportar la temperatura del aire.

c. Medición de la presión del aire

Se debe medir y reportar la presión del aire dentro del tubo de impedancia.

d. Relación señal ruido

El espectro de la presión del sonido debe ser medido en cada posición del micrófono, con la fuente de ruido prendida y apagada. La fuente de ruido debe ser por lo menos 10 dB superior que el ruido de fondo en todas las frecuencias que van a ser medidas. Las frecuencias que no cumplan con la condición deben ser notificadas en el reporte de la medición.

2. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DEL SISTEMA

a. Especificación del plano de referencia

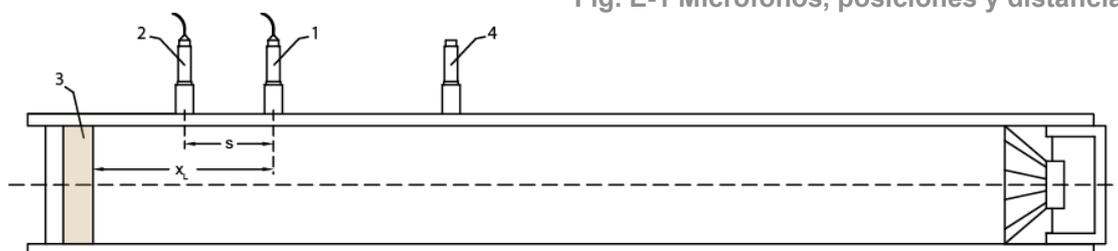
El primer paso para la medición de las propiedades acústicas, luego del montaje de la muestra, es la especificación del plano de referencia²⁸ ($x=0$).

²⁸ Es la sección transversal del tubo de impedancia para la cual el factor de reflexión r o la impedancia Z son determinadas.

Típicamente este coincide con la superficie de la muestra a evaluar si esta es plana. Pero en el caso, de que la muestra tenga un perfil o una estructura lateral (Superficie no homogénea o asimétrica), el plano de referencia deberá ser colocado a una distancia en frente del objeto de prueba.

La distancia desde el plano de referencia al micrófono más cercano debe determinarse por la localización del plano de referencia en relación al primer micrófono; como esta descrito en la fig.E-1, esta localización debe ser puesta con una precisión de $\pm 5\text{mm}$ o mayor. La localización exacta del plano de referencia no es requerida si solo se mide el coeficiente de absorción, pero podría tener implicaciones en la impedancia o admitancia acústica.

Fig. E-1 Micrófonos, posiciones y distancias



- 1 MICROFONO A
- 2 MIROFONO B
- 3 MUESTRA
- 4 MICROFONO DUMMY

Fuente: Los autores

b. Determinación de la velocidad del sonido, longitud de onda e impedancia característica

Se debe determinar la velocidad del sonido C_0 en el tubo de impedancia, para lo cual se debe conocer la temperatura del aire dentro del tubo; posteriormente se calculará la longitud de onda de las frecuencias de la medición. Finalmente conociendo la presión del aire dentro del tubo y en conjunto con la temperatura se puede obtener la impedancia característica del aire en el tubo.

c. Selección de la amplitud de la señal

La amplitud de la señal deberá ser seleccionada por lo menos 10 dB por encima del ruido de fondo en todas las frecuencias de interés, las cuales deberán ser medidas en cada punto de localización de los micrófonos.

La respuesta de frecuencia del altavoz debe ser idealmente ecualizada en la presencia de una terminación anecoica en el porta muestras acoplado al tubo, para de esta manera aplanar la respuesta de presión medida en las posiciones de los micrófonos. Durante una prueba cualquier frecuencia que tenga un valor de respuesta por debajo a 60 dB del valor de la frecuencia máxima debe ser rechazada.

d. Selección del número de promedios de mediciones

Los errores de ruido pueden ser cancelados usando promedios del espectro medido de las posiciones de los micrófonos. El número de promedios necesario depende del material medido y del requerimiento de precisión de la función de transferencia estimada.

e. Corrección por errores de micrófono

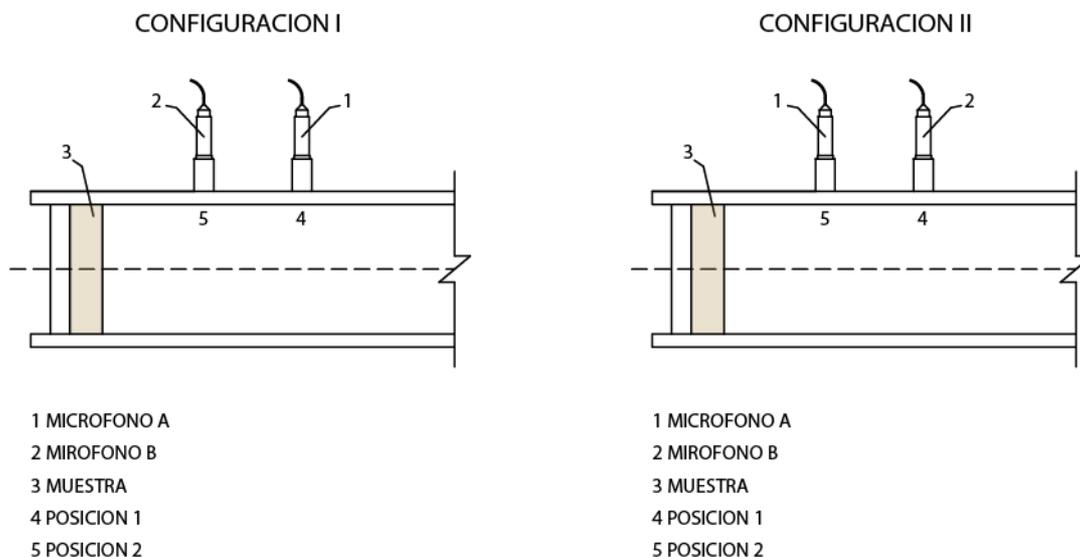
Cuando se usa la técnica de dos micrófonos, se deberá repetir las mediciones intercambiando la posición de los canales²⁹, o predeterminedar el factor de calibración para corregir los errores en los datos de la función de transferencia a medir.

i. Mediciones repetidas con los micrófonos cambiados

La corrección para los errores de micrófono se da al cambiar canales para cada medición en un espécimen de prueba. Se debe colocar la muestra en el tubo como se describe en la Fig.E-1 y medir las dos funciones de transferencia H_{12}^I y H_{12}^{II} , usando las mismas funciones matemáticas para las dos. Para realizar esto se deben ubicar los micrófonos con la configuración I (ver Fig.E-0-2), y se almacena la función de transferencia H_{12}^I . Posteriormente intercambiar los dos micrófonos A y B como en la configuración II, para medir la función de transferencia H_{12}^{II} .

²⁹Un canal consiste de un micrófono, un amplificador y un analizador del canal.

Fig.E-2 Configuraciones



Fuente: Los autores

Cuando se intercambian los micrófonos debe asegurarse que el micrófono A en la configuración II, (Micrófonos intercambiados), ocupe la localización precisa que el micrófono B en la configuración I, y viceversa. No se deben cambiar las conexiones de los micrófonos al amplificador o al analizador de señal.

Con los datos obtenidos se computa la función de transferencia utilizando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = (H_{12}^I * H_{12}^{II})^{1/2} = |H_{12}|e^{j\phi} \quad (\text{E.1})$$

Si el analizador es solamente capaz de medir la función de transferencia en una sola dirección H_{12} puede ser computada usando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = \left(\frac{H_{12}^I}{H_{12}^{II}} \right)^{1/2} = |H_{12}|e^{j\phi} \quad (\text{E.2})$$

ii. Predeterminar factor de calibración

Este es un procedimiento de calibración usando un espécimen especial, su corrección es válida para todas las mediciones posteriores. Este procedimiento debe ser hecho antes de una serie de mediciones de varias muestras. Luego de cada calibración los micrófonos se mantienen en su lugar.

Ubicar el espécimen absortor en el tubo para prevenir fuertes reflexiones acústicas y medir las dos funciones de transferencia H_{12}^I y H_{12}^{II} , usando la mismas expresiones matemáticas para las dos. Ubicar los micrófonos en la configuración I, y medir la función de transferencia H_{12}^I , intercambiar los dos micrófonos, y medir la función de transferencia H_{12}^{II} ; se debe proceder de igual forma que el punto descrito anteriormente.

Completar el factor de calibración H_c usando la siguiente ecuación:

$$H_c = \left(\frac{H_{12}^I}{H_{12}^{II}} \right)^{1/2} = |H_c| e^{j\phi_c} \quad (\text{E.3})$$

Donde:

H_c (Factor de calibración) = Es el factor usado para corregir errores de amplitud y fase entre los micrófonos.

Si el analizador es solamente capaz de medir la función de transferencia en una sola dirección H_c puede ser computada usando la siguiente ecuación:

$$H_c = (H_{12}^I * H_{12}^{II})^{1/2} = |H_c| e^{j\phi_c} \quad (\text{E.4})$$

Para las subsecuentes mediciones se debe ubicar los micrófonos en la configuración I. Luego se inserta el espécimen de evaluación y se mide la función de transferencia.

$$\hat{H}_{12} = |\hat{H}_{12}| e^{j\hat{\phi}} = \hat{H}_r + j\hat{H}_i \quad (\text{E.5})$$

Donde:

\hat{H}_{12} = Función de transferencia sin corregir

$\hat{\phi}$ = Ángulo de fase sin corrección

\hat{H}_r = Parte real de \hat{H}_{12}

\hat{H}_i = Parte imaginaria de \hat{H}_{12}

Se deben corregir los errores en la respuesta del micrófono usando la siguiente ecuación:

$$H_{12} = |H_{12}| e^{j\phi} = \frac{\hat{H}_{12}}{H_c} \quad (\text{E.6})$$

3. CALIBRACIÓN PERIÓDICA

a. Corrección por la atenuación en el tubo

La onda incidente $P_i(x)$ y la onda reflejada $P_r(x)$ son generalmente atenuadas durante la propagación debido a pérdidas por rozamiento. El principal efecto de esta atenuación es una disminución que va en aumento en la amplitud de la presión sonora, al incrementarse la distancia. Normalmente esto no influye en los resultados obtenidos, si se ha llevado a cabo las consideraciones anteriormente descritas. Sin embargo, cuando la distancia desde la superficie de la muestra al micrófono más cercano es más larga que 3 diámetros o 3 veces la máxima dimensión transversal del tubo de impedancia, las siguientes correcciones deben ser aplicadas para la medición:

Determinación de las correcciones por la atenuación en el tubo

La atenuación puede ser descrita analíticamente a través de un reemplazo del número de la onda real K_o por un número de onda complejo.

$$K_o = K_o' - jK_o''K_o' = 2\pi/\lambda_o K_o' \quad (\text{E.7})$$

Donde:

K_o'' = Atenuación en Nepers por unidad de longitud

La atenuación en el tubo de impedancia es determinada de mejor forma experimentalmente, sin embargo se pueden obtener estos valores utilizando los siguientes métodos:

La atenuación en el tubo de impedancia es determinada mejor de una forma experimental, utilizando los siguientes métodos:

- **Método de dos presiones mínimas:** Requiere del conocimiento de por lo menos dos presiones mínimas (SWR).
- **Método aproximado:** Usado al no tener la información anterior.
- **Método estimado:** Usado al no tener la información anterior.

Sin embargo se puede obtener esta propiedad de acuerdo a fórmulas empíricas desarrolladas por Beranek, siendo utilizadas según la norma ASTM E-1050, donde se consigue los valores de base que servirán para calcular la atenuación producida por un tubo de impedancia acústica en su interior y viene dada por:

$$k'' = 0.02203 \frac{\sqrt{f}}{cd} \quad (\text{E.8})$$

Cabe recalcar que dicha fórmula se preferirá si la distancia existente entre la muestra y el micrófono más cercano es mayor a tres veces el diámetro, y que mientras menor sea esta distancia se esperaría que sea más despreciable la atenuación producida por el tubo de impedancias

b. Determinación del centro acústico del micrófono

El centro acústico del montaje lateral del micrófono puede ser diferente del centro geométrico causando errores en la colocación del mismo y consecuentemente causando errores en la asignación de las propiedades acústicas. El centro acústico real debe conocerse.

En el caso del montaje lateral y los micrófonos montados dentro del tubo, no existe un método de calibración. Estos errores deben ser considerados parte de las incertidumbres asociadas a este método. Es altamente probable que la orientación de este montaje con respecto a la longitud axial del tubo sea mantenida entre prueba y prueba. Escoger un micrófono con diafragmas pequeños en relación al espaciamiento entre los micrófonos también reduce este error.

ANEXO F – ERRORES DE FUENTE - REPRODUCIBILIDAD Y REPETITIVIDAD

Errores de Fuente

Los errores de fuente deben ser considerados en dos grandes categorías:

1. Errores de Bias

Los errores de Bias incluyen errores potenciales tanto en la medición como en el análisis (Post-producción), por ejemplo errores aliasing o fugas, junto con errores de micrófono y/o errores en la medición por longitud o distancia. La frecuencia de estos errores va a ser minimizada utilizando una buena adquisición de señal y buenos métodos para procesar la misma.

a. Tiempo de Aliasing (Señales no periódicas)

El error en señales no periódicas (aliasing) surge cuando la duración de cada grabación es similar o es más pequeña que una señal de impulso del sistema que está siendo investigado, causando crosstalk en la señal procesada. El tiempo de aliasing debe ser evitado seleccionando la duración para cada medición que debe ser mucho más larga que los tiempos de propagación acústica dentro del sistema del tubo de impedancia, que es:

$$t \gg \frac{2x_1}{c_0} \quad (\text{F.1})$$

Donde:

t = Duración de la muestra grabada [segundos]

x_1 = Distancia desde la muestra al micrófono más lejano [m]

c_0 = Velocidad de sonido [m/s]

b. Errores de fase (Falta de coincidencia)

Cuando se usa la técnica de dos micrófonos, el error de fase entre estos es inevitable y debe ser compensado. Esto se debe conseguir siguiendo los procedimientos requeridos y descritos en el anexo E (sección 2, e: corrección por errores de micrófono).

c. Errores de amplitud

Cuando se usan dos micrófonos, puede existir un error debido a la sensibilidad de los mismos, por lo general no es importante siempre y cuando este error sea constante, y se lo debe corregir por el procedimiento descrito en el anexo E; Así se asegurará lecturas de amplitud consistentes durante toda la secuencia de medición. Cuando se usa la técnica de los dos micrófonos, se ganan ventajas teniendo los micrófonos calibrados de tal forma que sus amplitudes no difieran en más de 0.3 dB.

2. Errores aleatorios

Los errores aleatorios surgen usualmente del procesamiento de la grabación del ruido aleatorio de longitud finita, pero también involucra ruido eléctrico en la instrumentación o señales acústicas extrañas. Los errores randomicos son mantenidos en bajos niveles, por promedios adecuados y también son minimizados utilizando señales determinísticas. La selección del ancho de banda y la longitud de la señal para conseguir un promedio en el espectro del micrófono es usualmente efectiva limitando este error para cada canal.

La longitud y el ancho de banda de la grabación pueden ser seleccionados para conseguir un estándar particular relativo de la desviación para la medición RMS del nivel de la señal randomica. Típicamente un producto del ancho de banda de la frecuencia y el tiempo promedio total de 50 a 100 va a mantener el error aleatorio bajo. Alternadamente el número de promedios requerido para conseguir un error estándar particular para las mediciones en una localización de un micrófono en particular está dado por:

$$n = (1/2 \sigma)^2 \quad (F.2)$$

Donde:

n = Número de promedios de espectro independiente (no solapados)

σ = Error estándar

Reproducibilidad y repetitividad

Precisión de la función de transferencia

La repetitividad (r) se refiere a mediciones efectuadas bajo condiciones que pueden considerarse como constantes, es decir, en un mismo lugar, por un mismo operador y con el mismo arreglo experimental. La reproducibilidad (R), se refiere a mediciones efectuadas bajo condiciones variables, diferentes lugares, diferentes operadores y diferentes arreglos experimentales. De este modo, la repetitividad y la reproducibilidad representan dos valores extremos; el primero, r , representa el mínimo y el segundo, R , representa el máximo de la variabilidad en el resultado. (ISO 5725)

Se requiere de un estimado de promedios para lograr un error normalizado estándar para la magnitud de la función de transferencia, estimada en una frecuencia en particular que está dada por:

$$n = \frac{1}{2\varepsilon^2} \left[\frac{1}{\gamma^2} - 1 \right] \quad (\text{F.3})$$

Donde:

n = Número de promedios

ε = Error estándar normalizado

γ^2 = Función de coherencia

La función de coherencia está determinada por:

$$\gamma^2 = \frac{|S_{12}|^2}{(S_{11} S_{22})} \quad (\text{F.4})$$

Nota: La determinación de la función de coherencia está sujeta al error de Bias asociado con la longitud grabada (o frecuencia de resolución) y el efecto de reverberación en el tubo. Se espera que la coherencia entre los micrófonos sea mayor que el 0.9, excepto para casos con terminaciones reflectivas muy altas, la coherencia va a ser menor que el 0.5 para frecuencias donde haya un nodo de presión en cualquiera de los dos micrófonos.

La estimación de la incertidumbre en la medición de un parámetro puede ser hecha a través de una pequeña cantidad de mediciones, si se asume que la distribución subyacente es normal, la media real puede ser estimada mediante:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (\text{F.5})$$

Donde:

x_j = Valor de la j^{th} medición

n = Número de mediciones tomadas

Un estimado de la variancia real de la distribución puede ser tomado por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{F.6})$$

Si se hicieron muchas mediciones, y se constató la presencia de una distribución normal la estimación es igual a la real.

ANEXO G – CLASIFICACIÓN DE ABSORBENTES SONOROS³⁰

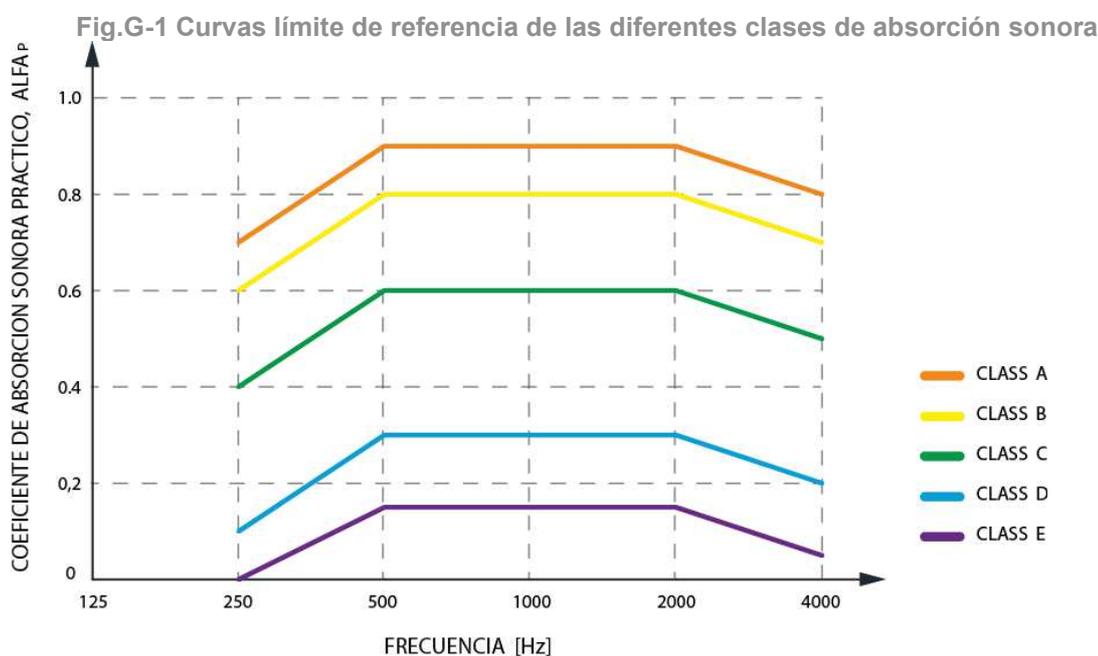
ASTM C423

NRC (Noise Reduction Coefficient): Promedio aritmético de coeficientes de absorción para bandas de frecuencia en 250, 500, 1000 y 2000 Hz, $0 < \text{NRC} < 1$.

SAA (Sound Absorption Average): Promedio de 12 bandas de frecuencia de los coeficientes de absorción del material ensayado medido en bandas de tercio de octava, desde 200 a 2500 Hz, $0 < \text{SAA} < 1$.

ISO 11654 (Absorbentes acústicos en la construcción)

Coefficiente de absorción ponderado α_w : Es un único valor independiente de la frecuencia que es igual al valor en 500 Hz de la curva de referencia. Posee los indicadores (L, M, H) que muestran excesos en la curva de la frecuencias por 0.25 o más en bajas (250 Hz), medias (500 - 1000 Hz) y altas (2000 - 4000 Hz) respectivamente. (Ej. $\alpha_w = 0.7$ (MH)). Ver fig.G-3.



Fuente: Los autores

³⁰ Clasificación entregada para materiales comúnmente usados en la construcción, para el uso o descripción de materiales más especializados y/u otros usos no se deben entregar ni leer estas clasificaciones. No entrega resultados en bajas frecuencias, por lo cual es aconsejable si se requiere solicitar la curva del coeficiente de absorción sonora.

ANEXO H – REPORTE DE LA MEDICIÓN E INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

REPORTE DE LA MEDICIÓN

LABORATORIO:	LUGAR:
SOLICITANTE:	FECHA:

NOMBRE - MUESTRA	FABRICANTE	NÚMERO
DESCRIPCIÓN { Información estructural, planicidad Capas - numero, arreglo y espesor incluyendo cavidad de aire Descripción de cubrimientos }	DIAMETRO	
	ESPESOR	
	DENSIDAD	
PREPARACIÓN / MONTAJE { Tipo de montaje Conexiones de las capas }	SUPERFICIE / ESTRUCTURA { Dimensiones de las unidades estructurales, como resonadores y sus arreglos - posiciones de los cortes de la muestra }	

DATOS AUXILIARES	
DISTANCIA S	OPERADOR
DISTANCIA Z1	NOTAS / OBSERVACIONES
DIAMETRO	
TEMPERATURA [C]	
PRESIÓN ATM. [Kpa]	

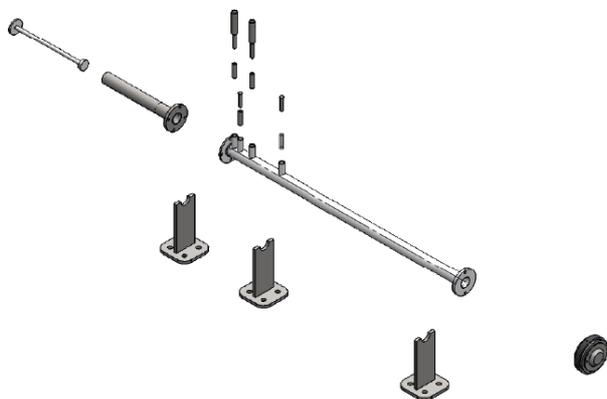
{ Dibujo
Esquema }





TUBO DE IMPEDANCIA ACÚSTICA

SISTEMA DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES ACÚSTICAS DE MATERIALES



BENEFICIOS

- Determinación de parámetros a incidencia normal
- Mediciones fáciles y precisas
- Amplio rango de frecuencias
- Fácil montaje
- Uso de muestras pequeñas

CARACTERÍSTICAS

- Medición basada en la norma ISO 10534-2 ; ASTM E1050
- Función de transferencia con dos micrófonos
- Posee varias posiciones de micrófonos para alcanzar mejor precisión en el rango de frecuencias completo
- Realiza mediciones considerando cámaras de aire

HARDWARE

- ALTAVOZ
- TUBO
- ADAPTADOR
- MICRÓFONO
- MICRÓFONO
- PORTAMUESTRAS
- PLACA - PISTÓN

BENEFICIOS

- Fácil manejo
- Programación por pasos
- Exportación de datos
- Rating acústico del material según ISO 11654 ; ASTM C423

CARACTERÍSTICAS

- Visualización gráfica de resultados
- Sistema operativo Windows
- Determinación de:
 - Absorción acústica
 - Reflexión acústica
 - Impedancia acústica
- Clasificación ISO, NRC, SAA

SOFTWARE

- ADQUISICIÓN
- CALIBRACIÓN
- MEDICIÓN
- ANÁLISIS
- VISUALIZACIÓN
- EXPORTACIÓN



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

De acuerdo a normas: ISO 10534-2, ASTM E1050-98

Rango en frecuencia: 88Hz - 5700 Hz
S1: 1500 Hz - 5700 Hz
S2: 350 Hz - 1500 Hz
S3: 88 Hz - 350 Hz

Altavoz Integrado: BMS 4550 (80 Wrms) Nivel máximo en tubo : 140 dB
Nivel Ruido de fondo dentro del tubo: <30 dBA
Absorción dentro del tubo: < 4%

Longitud: 1,30 m (incluyendo portamuestras)
Diámetro exterior / interior: 38.1 mm / 35.1 mm
Peso: 5 kg
Portamuestras: Longitud máxima de muestra de 25 cm
Tipo de micrófonos: 1/4" (2)

Distancia entre los micrófonos S
- s1: 25 mm
- s2: 75 mm
- s3: 200 mm

Distancia entre los micrófonos y la muestra z1
- z11: $25 + 20 = 55$ mm
- z12: $75 + 20 = 95$ mm
- z13: $200 + 20 = 220$ mm

ANEXO I– ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS

MICRÓFONOS

beyerdynamic

MM 1

Measurement Microphone

TECHNICAL SPECIFICATIONS

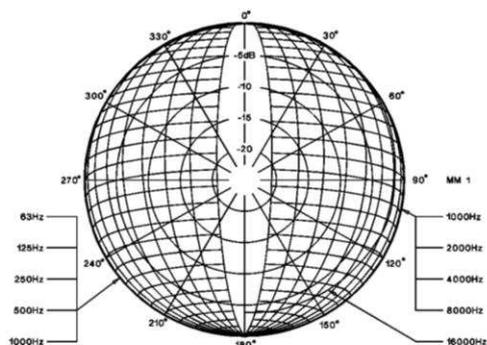
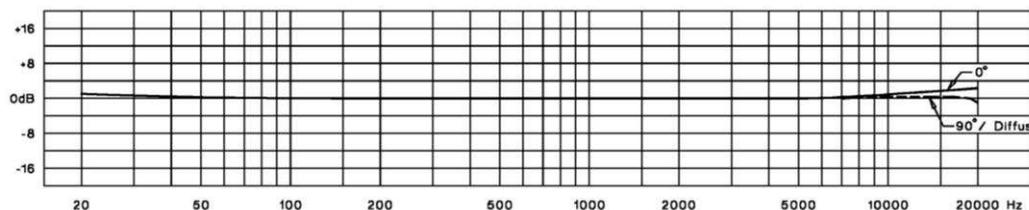
Transducer type	Condenser (back electret)
Operating principle	Pressure
Frequency response	20 - 20,000 Hz (50 - 16,000 Hz \pm 1.5 dB)
Polar pattern	Omnidirectional, diffuse field calibrated
Open circuit voltage at 1 kHz	15 mV/Pa ($\hat{=}$ -36.5 dBV) \pm 1 dB
Nominal impedance	330 Ω
Nominal load impedance	\geq 2.2 k Ω
Max. SPL at f = 1 kHz, k = 1%, R _L = 2.2 k Ω	128 dB _{SPL}
S/N ratio rel. to 1 Pa	> 57 dB
A-weighted equivalent SPL	approx. 28 dB(A)
Power supply	12 - 48 V phantom supply
Current consumption	approx. 3.4 mA
Output	transformer balanced
Connection	3-pin XLR male
Dimensions	Length: 133 mm Shaft diameter: 19/9 mm Head diameter: 9 mm
Weight (w/out cable)	88 g



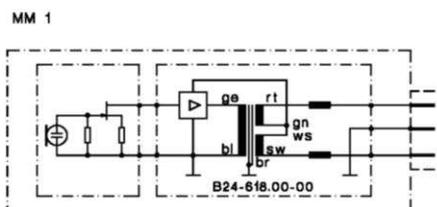
FREQUENCY RESPONSE & POLAR PATTERN

This polar pattern and frequency response curve (measuring tolerance \pm 1.5 dB) correspond to a typical production sample for this microphone.

Frequency response \pm 1.5 dB 0 dB $\hat{=}$ 15 mV/Pa MM 1



WIRING DIAGRAM



Fuente: <http://www.beyerdynamic.com>

DRIVER DE COMPRESIÓN

BMS

1" Compression Drivers

4550

1" High frequency compression driver

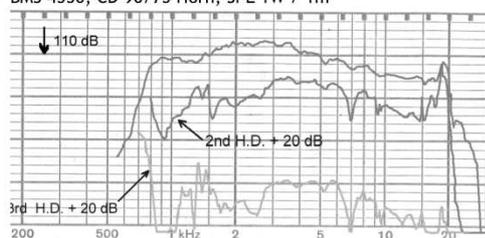

Features:

- Unique patented design
- 113dB sensitivity 1W/1m
- 800 Hz Crossover
- Extended high frequency response up to 20 kHz
- Small size and low weight
- 44.4 mm sandwich in- and outside voice coil

Compression Drivers

BMS 4550 is a powerful 1" professional compression driver that delivers outstanding sonic quality in a small package. It has an exceptional dynamic range and produces even the most complex music signals with depth and definition. The BMS exclusive voice coil technology employs a light weight Copper Clad Aluminium wire wound inside and outside of the Kapton™ former to improve the heat dissipation, dramatically increasing the acoustic output and reliability of the driver while minimising the power compression. The BMS 4550 - 1" compression driver is designed for a wide variety of applications in high quality, high power professional reinforcement systems and stage monitors where low crossover frequency is needed.

BMS 4550, CD 90/75 Horn, SPL 1W / 1m



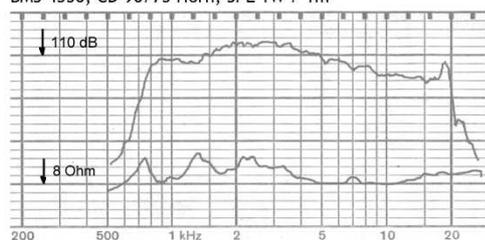
SPECIFICATIONS

Throat diameter	1" (25.4 mm)
Nominal impedance	8 or 16 Ohm
Power capacity (AES)	80 W
Peak Power	450 W

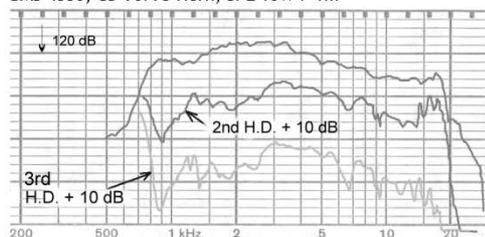
Sensitivity	
CD Horn 90°x75°, 1W/1m	113 dB
Plane wave tube, 1mW	118 dB
Maximal SPL (cont.)	132 dB at 80 W
Frequency range	500 - 20000 Hz
Recommended crossover	800 Hz
Voice coil diameter	1.75" (44.4 mm)
Magnet material	Ceramic
Flux density (Tesla)	2.0
Voice coil material	Copper Clad Aluminium
Voice coil former	Kapton™
Diaphragm material	Polyester

MOUNTING INFORMATION		
Overall diameter	mm	123
Depth	mm	52
Net weight	kg	2.25
2x M6 holes, 180° on 76.2 mm diameter		

BMS 4550, CD 90/75 Horn, SPL 1W / 1m



BMS 4550, CD 90/75 Horn, SPL 10W / 1m


 Fuente: <http://www.bmsspeakers.com>

TUBO

FUJINOX / ACERO INOXIDABLE AISI 304

Para uso estructural y decorativo producidos bajo norma
ASTM A554

1. DIMENSIONES (mm) Y PESO

DIÁMETRO NOMINAL	DIÁMETRO NOMINAL (mm)	ESPESOR NOMINAL (mm)	PESO Kg / m
5/8"	15.90	0.80	0.30
		1.00	0.37
		1.20	0.44
		1.50	0.53
3/4"	19.10	0.80	0.36
		1.00	0.45
		1.20	0.53
		1.50	0.65
7/8"	22.20	1.00	0.52
		1.20	0.62
		1.50	0.77
1"	25.40	1.00	0.60
		1.20	0.72
		1.50	0.88
		2.00	1.15
1 1/4"	31.80	1.00	0.76
		1.20	0.91
		1.50	1.12
		2.00	1.47
1 1/2"	38.10	1.00	0.91
		1.20	1.09
		1.50	1.35
		2.00	1.78
1 2/3"	42.20	1.20	1.21
		1.50	1.51
		2.00	1.98
1 3/4"	44.40	1.20	1.28
		1.50	1.59
		2.00	2.09
1 7/8"	48.20	1.20	1.39
		1.50	1.73
		2.00	2.27
2"	50.80	1.20	1.47
		1.50	1.82
		2.00	2.41
2 1/8"	54.00	1.50	1.94
		2.00	2.57
2 3/8"	60.30	1.50	2.17
		2.00	2.87
2 1/2"	63.50	1.50	2.30
		2.00	3.03
2 7/8"	70.50	1.50	2.55
		2.00	3.37

* 1 tubo por atado

2. MATERIA PRIMA

Acero laminado en frío. CALIDAD AISI 304
Norma: ASTM A 240



Los tubos se producen en longitudes de 6 m. Diferentes medidas, previa consulta de fábrica.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS

Resistencia a la tracción: Min 53 kg/mm²
Resistencia a la fluencia: Min 205 N/mm²
Elongación: Min 40%
Doblamiento: Rad. mín. de Curvatura= 2.3 ϕ del tubo
Dureza: Brinel max 192 / Rockwell B max 90

4. TOLERANCIA

Diámetro: ± 0.13 mm Longitud: ± 12.7 mm
Espesor: $\pm 10.00\%$ Peso: $\pm 10\%$

5. ACABADOS

Medio Decorativo: N° 3
Super Fino: S F

*Otros acabados: bajo pedido

INTERFAZ

MobilePre USB

Características técnicas

Características del hardware

Entradas analógicas:

- Entradas de micro y de instrumento/línea: 2, entrada a USB y USB a salida analógica estéreo
- Entrada de micro XLR: 2, balanceadas, con alimentación phantom conmutable (+48 V)
- Entrada de micro minijack: estéreo - Entrada instrumento/línea: 2, jack 1/4" balanceados de alta impedancia (para guitarras y bajos eléctricos)
- Control de ganancia de entrada: +40 dB máx.
- Indicadores LED de entrada: saturación (rojo) y presencia de señal (verde)

Salidas analógicas:

- Salidas no balanceadas: 2, jack 1/4" (-10 dBV nominal, +1.7 Dbv máx.)
- Salida de línea estéreo: minijack (-10 dBV nominal, +1.7 dBV máx.)
- Salida de auriculares: minijack estéreo con control de nivel

Alimentación: a través de USB (no es necesario utilizar alimentadores externos o baterías)

Características del driver:

Resolución admitida: 16 bits, entrada y salida

Monitorización directa por hardware: monitorización directa con latencia cero, control de nivel mediante software (estéreo o mono Canal 1, definido por software)

Niveles de salidas de grabación/reproducción y monitorización directa:

Control mediante software (Silenciado/ +12 a -50 dB, en incrementos de 2 dB)

Control de volumen de salida master:

Control mediante software (Silenciado/ +0 a -62 dB, en incrementos de 2 dB)

Características audio:

Frecuencias de muestreo (Hz): 8000, 9600, 11025, 12000, 16000, 22050, 24000, 32000, 44100 & 48000

Salidas, jack 1/4" y salida de línea estéreo:

Rango dinámico: 91 dB (típico, entrada -60 dB, ponderado A)

Relación señal/ruido: 91 dB (típico, ponderado A)

Distorsión armónica total (THD): -87 dB (típico)

Entradas de micro XLR:

Rango dinámico: 91 dB (típico, entrada -60 dB, ponderado

Fuente: <http://www.m-audio.com>

ANEXO J – PROCESO CONSTRUCTIVO

Fig.J-1 Proceso constructivo



Fuente: Los autores