

Aplicación del método de medición de pérdida por transmisión de acuerdo a la norma ASTM E2611-09 incluyendo un quinto micrófono de medición como referencia para estimar parámetros acústicos como la pérdida por transmisión y los coeficientes de absorción y reflexión

Juan Camilo Gómez Salazar, ✉ camilo.gomez.286@gmail.com

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero de Sonido

Asesor: Santiago Ruiz Sánchez, Especialista (Esp) en Ejemplo Gerencia de la Innovación.



Universidad de San Buenaventura Colombia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Sonido

Medellín, Colombia

2017

Citar/How to cite	[1]	
Referencia/Reference	[1]	J. C Gómez Salazar, “Aplicación del método de medición de pérdida por transmisión de acuerdo a la norma ASTM E2611-09 incluyendo un quinto micrófono de medición como referencia para estimar parámetros acústicos como la pérdida por transmisión y los coeficientes de absorción y reflexión.”, Trabajo de grado Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura Medellín, Facultad de Ingeniería, 2017.
Estilo/Style: IEEE (2014)		



Grupo de Investigación (GIMSC).

Línea de investigación en acústica y procesamiento de señales.

Bibliotecas Universidad de San Buenaventura



Biblioteca Digital (Repositorio)
<http://bibliotecadigital.usb.edu.co>

- Biblioteca Fray Alberto Montealegre OFM - Bogotá.
- Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo OFM - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
- Departamento de Biblioteca - Cali.
- Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

Universidad de San Buenaventura Colombia

Universidad de San Buenaventura Colombia - <http://www.usb.edu.co/>

Bogotá - <http://www.usbbog.edu.co>

Medellín - <http://www.usbmed.edu.co>

Cali - <http://www.usbcali.edu.co>

Cartagena - <http://www.usbctg.edu.co>

Editorial Bonaventuriana - <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/>

Revistas - <http://revistas.usb.edu.co/>

Dedicatoria

Dedicado a la memoria de mi abuela, quien fue otra madre para mí y que hoy descansa en paz.

Carmen Oliva Mira de Salazar

Julio de 1938 – Noviembre del 2016

Agradecimientos

Primero que todo agradezco a mis padres por su continuo apoyo y compañía durante el desarrollo de este proyecto y a lo largo de todas las etapas de mi vida. Sus incansables esfuerzos son mi motivación para ser mejor cada día. Por otra parte quiero agradecerle a mi asesor, el docente e ingeniero Santiago Ruiz Sánchez por su disposición, aportes e interés en el transcurso de este proceso de investigación. De igual manera doy gracias al profesor MSc Héctor García Mayén por sumergirme en el mundo de la acústica, por sus enseñanzas y sus valiosos aportes y finalmente doy gracias a los compañeros que me dieron la mano en el momento que requerí de su ayuda.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRAC	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
III. JUSTIFICACIÓN.....	14
IV. OBJETIVOS	15
A. Objetivo General	15
B. Objetivos Específicos.....	15
V. MARCO TEÓRICO	16
A. Propiedades acústicas de la onda	16
Presión sonora eficaz o RMS (P_{RMS})	16
Velocidad de las partículas ($u[t]$).....	16
Impedancia acústica específica y característica (Z_s y $\delta.c$).....	17
B. Comportamiento acústico de las ondas sonoras delante de un material	17
Coeficiente de reflexión.....	17
Coeficiente de absorción.....	17
Coeficiente de transmisión.....	18
Pérdida por transmisión (TL).....	19
Pérdida por transmisión en paneles simples	19
C. Ondas en un tubo.....	21
Tubo de Kundt	23
Tubo de transmisión.....	23
D. Procesamiento de la señal	25
Función de transferencia	25

Transformada discreta de Fourier (DFT – Discrete Fourier Transform)	26
Corrección de fase y magnitud de acuerdo al estándar ASTM E2611-09	26
Matriz de transferencia	27
Coherencia entre señales	28
E. Estado del arte	28
VI. METODOLOGÍA	34
A. Modificación de tubo de transmisión (5to micrófono).....	34
B. Selección de materiales a medir	37
C. Diseño del algoritmo de matrices de transferencia	38
D. Mediciones de la pérdida por transmisión.....	39
Análisis del sistema (respuesta en frecuencia de la caja y del sistema tubo-caja).....	40
Medición de la coherencia de las señales.	40
Mediciones preliminares (caracterización del sistema)	41
Configuraciones de las pruebas preliminares	42
E. Mediciones y cálculo de otros parámetros acústicos	43
VII. RESULTADOS	45
A. Medición de la respuesta en frecuencia de la caja y del sistema caja-tubo	45
B. Medición de la coherencia entre señales	46
C. Mediciones preliminares	47
Medición sin modificación en la caja y primera configuración en el tubo	47
Mediciones con modificación en la caja y primera configuración del tubo	47
.....	48
Mediciones con modificación en la caja y segunda configuración del tubo.....	48
Medición de la implicación de la variación de nivel	49
Gráficos de magnitud y fase	49

D	Mediciones de pérdida por transmisión	51
	Pérdida por transmisión para el Black Theater	53
	Pérdida por transmisión para el Acustifibra.....	54
	Pérdida por transmisión para el Sonowall	55
	Pérdida por transmisión para materiales sólidos.....	55
E	Curva del coeficiente de absorción de cada material	56
	Coeficiente de absorción para el Black Theater de 1 pulgada	56
	Coeficiente de absorción para el Black Theater de 2 pulgadas	57
	Coeficiente de absorción para el Acustifibra de 1 pulgada.....	58
	Coeficiente de absorción para el Sonowall de 32 <i>kg/m³</i>	59
	Coeficiente de absorción para el Sonowall de 60 <i>kg/m³</i>	60
	Coeficiente de absorción para materiales sólidos	60
VIII.	DISCUSIÓN.....	62
IX.	CONCLUSIONES	73
	REFERENCIAS	75
	ANEXOS.....	79
A	Coeficientes de absorción de la Frescasa de 3 pulgadas de espesor de Fiberglass	79
B	Algoritmo desarrollado en Matlab para el cálculo de la pérdida por transmisión y otros parámetros acústicos	79
C	Algoritmo para el cálculo de la FFT para las respuestas en frecuencia	90
D	Algoritmo para el cálculo de la coherencia entre las señales	91
E	Tabla de base de datos de los materiales acústicos caracterizados	92
F	Tabla con resumen de cada método nombrado en los antecedentes	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Materiales seleccionados para la medición	37
Tabla 2. Protocolo de medición.....	52
Tabla 3. Datos del coeficiente de absorción para el Black Theater de 1 pulgada	57
Tabla 4. Datos del coeficiente de absorción para el Black Theater de 2 pulgadas	58
Tabla 5. Datos del coeficiente de absorción para la Acustifibra de 1 pulgada	58
Tabla 6. Datos del coeficiente de absorción para el Sonowall de 32 kg/m cúbico	59
Tabla 7. Datos del coeficiente de absorción para el Sonowall de 60 kg/m cúbicos.....	60
Tabla 8. Datos de los coeficientes de absorción para materiales sólidos	61
Tabla 9. Coeficiente de absorción de la Frescasa de 3” bajo el método de TOE.....	79
Tabla 10. Caracterización acústica de los materiales	92
Tabla 11. Resumen de los métodos encontrados en el estado del arte.....	94

LISTA DE FIGURAS

Fig 1. Interacción de las ondas sonoras con un material.....	19
Fig 2. Comportamiento real de la ley de masas en un panel simple	20
Fig 3. Montaje experimental para determinar parámetros acústicos bajo el método de la función de transferencia	23
Fig 4. Configuración de un tubo de transmisión	24
Fig 5. Diagrama de actividades para realizar el proyecto	34
Fig 6. Diseños propuestos para la modificación del tubo de transmisión - a) orificio a 25 cm, b) orificio a 10 cm	36
Fig 7. Configuración de la caja acústica - a) Sin modificación, b) Con modificación	37
Fig 8. Diagrama de flujo del algoritmo	39
Fig 9. Muestras implementadas en las pruebas preliminares. - a) Material poroso (Black Theater de 1 pulgada), b) Materia rígido (Yeso-cartón de 5/8 pulgadas)	41
Fig 10. Diagrama de flujo del montaje.....	42
Fig 11. Respuesta del sistema sin modificar - a) Respuesta de la caja, b) Respuesta del sistema (caja-tubo)	45
Fig 12. Respuesta del sistema modificado - a) Respuesta de la caja, b) Respuesta del sistema (caja-tubo)	45
Fig 13. Coherencia para las muestras con modificación en el sistema - a) Coherencias del Black Theater de 1 pulgas, b) Coherencia del Yeso-Cartón de 5/8 de pulgadas.....	46
Fig 14. Coherencia para las muestras sin modificación del sistema - a) Coherencia del Black Thater de 1 pulgada, b) Coherencia del Yeso-Cartón de 5/8 pulgadas.	46
Fig 15. Curvas de pérdida por transmisión para el sistema sin modificación - a) TL material poroso, b) TL material sólido	47
Fig 16. Curvas de pérdida por transmisión para segunda configuración de la caja y primera del tubo - a) TL material poroso, b) TL material sólido	48
Fig 17. Curvas de pérdida por transmisión para el sistema completamente configurado - a) TL material poroso, b) TL material sólido.....	48
Fig 18. Comparación de resultados de pérdida por transmisión a la variación del nivel.....	49

Fig 19. Magnitud y fase para el sistema sin modificación - a) Material poroso, b) Material sólido	50
Fig 20. Magnitud y fase para el sistema con modificación en la caja acústica - a) Material poroso, b) Material sólido	51
Fig 21. Terminaciones implementadas - a) Cuña semi-anecoica (terminación a), b) Cuña de madera rígida (terminación b).....	53
Fig 22. Montaje de la medición.....	53
Fig 23. Pérdida por transmisión para el Black Theater de diferentes espesores	54
Fig 24. Pérdida por transmisión para la Acustifibra de 1 pulgada	54
Fig 25. Pérdida por transmisión para el Sonowall de diferentes densidades	55
Fig 26. Pérdida por transmisión para materiales rígidos	56
Fig 27. Coeficiente de absorción para Black Theater de 1 pulgada.....	57
Fig 28. Coeficiente de absorción para el Black Theater de 2 pulgadas	58
Fig 29. Coeficiente de absorción para el Sonowall de 32 kg/m cúbico	59
Fig 30. Coeficiente de absorción del Sonowall de 60 kg/m cúbicos.....	60
Fig 31. Coeficientes de absorción para materiales sólidos.....	61
Fig 32. Comparación de coherencia del Black Theater de 2 pulgadas de espesor – a) Coherencia para el Black Theater de 2 pulgadas espesor. b) Coherencia obtenida para el Black Theater de 2 pulgadas de espesor con 5 micrófonos.....	64
Fig 33. Comparación de coherencia del Yeso-Cartón de 5/8 pulgadas de espesor – a) Coherencia para el yeso-cartón de 5/8 pulgadas de espesor, b) Coherencia obtenida para el yeso-cartón de 5/8 pulgadas de espesor con 5 micrófonos.....	65
Fig 34. Comparación del TL para material absorbente – a) Pérdida por transmisión para el Black Theater de 1 y 2 pulgadas, b) Pérdida por transmisión para el Black Theater de 1 y 2 pulgadas de espesor.....	67
Fig 35. Comparación TL para material rígido – a) Pérdida por transmisión para el Yeso-Cartón, b) Pérdida por transmisión para el Yeso-Cartón.	68
Fig 36. Comparación entre materiales porosos de ambos proyectos - a) TL de materiales porosos obtenidos en el proyecto que diseño el tubo, b) TL de materiales porosos obtenidos en el actual proyecto	69
Fig 37. TL de materiales sólidos obtenidos en el proyecto que diseño el tubo.....	71

RESUMEN

En Colombia se implementan diferentes materiales producidos en la industria nacional para el diseño acústico y control de ruido. Para el desarrollo de estos proyectos es necesario conocer el comportamiento del material al interactuar con ondas sonoras. Por ende, en este proyecto se pretende aplicar el método establecido en el estándar ASTM E2611-09 con el objetivo de presentar mediciones para obtener parámetros acústicos de los materiales como: la pérdida por transmisión, coeficientes de absorción y reflexión. Se efectuaron diferentes pruebas en el sistema del tubo de transmisión, realizando una modificación que se basó en la implementación de un quinto micrófono de medición en su etapa inicial. Se obtuvieron muestras de audio para ser procesadas en el algoritmo que permitió caracterizar los distintos materiales. Además, se realizaron variaciones en el montaje, y se llegó a que los materiales son sensibles a cambios en las variables presentes en el sistema; por ende, se llevó a cabo el diseño de un protocolo de medición para así mantener una estabilidad en la metodología y en los resultados. Los valores de pérdida por transmisión obtenidos fueron comparados con el proyecto que diseñó el sistema, encontrando que modificar el sistema permite obtener resultados próximos a la curva teórica para esta propiedad acústica y se da una mejora en la coherencia entre las señales. A partir de los valores comparados y validados, se obtuvieron los demás parámetros acústicos, en donde el coeficiente de absorción fue comparado con datos de materiales ya caracterizados. Finalmente, se concluyó que el método logra obtener diferentes parámetros acústicos, pero no describe correctamente y completamente el comportamiento de todas las propiedades como la del coeficiente de absorción. De igual forma se estableció que el método es una posible alternativa para la caracterización acústica de materiales.

Palabras clave: Estándar ASTM E2611-09, pérdida por transmisión, coeficiente de absorción acústica, caracterización acústica, tubo de transmisión, matriz de transferencia.

ABSTRAC

Different materials produced in the national industry for acoustic design and noise control are implemented in Colombia. Those materials behavior and their interactions with sound waves should be known to the well development of this project. Therefore, this paper intends to apply the method established in the standard ASTM E2611-09 with the objective of presenting measurements to obtain acoustic parameters of the materials as: transmission loss, absorption and reflection coefficients. Different tests were performed on the transmission tube system, making a modification that was based on the implementation of a fifth measurement microphone in its initial stage. Audio samples were obtained to be processed in the algorithm that allowed to characterize the different materials. Besides, variations were made in the assembly, and it was found that those materials are sensitive to changes in the variables present in the system. Additionally, the design of a measurement protocol was carried out in order to maintain a stability in methodology and results. The transmission loss values obtained were compared with the project that designed the system. It made possible to find that modifying the system allows getting results that are close to the theoretical curve and for this acoustic property it gives an improvement in the coherence between the signals. Based on the compared and validated values, the other acoustic parameters were obtained in which the absorption coefficient was compared with the materials data already characterized. Finally, it was concluded that the method achieves different acoustic parameters, but does not correctly and completely describe the behavior of all properties such as the absorption coefficient. In the same way, it was established that the method is a possible alternative for the acoustic characterization of materials.

Keywords: ASTM E2611-09 standard, transmission loss, acoustic absorption coefficient, acoustic characterization, transmission tube, transfer matrix.

I. INTRODUCCIÓN

El obtener parámetros acústicos de materiales de forma fiel permite realizar un buen acondicionamiento acústico y control de ruido, además el conocimiento sobre dichas propiedades es una clave para mejorar los procesos de diseño al momento de realizar un tratamiento acústico porque se conoce el comportamiento de los materiales al interactuar con las ondas sonoras. Lo que se pretende con el proyecto es poder evaluar una metodología económica, rápida y fiel para la caracterización acústica de materiales desarrollados en la industria nacional e implementados en los diseños acústicos.

En este proyecto se presentan mediciones para obtener valores de la pérdida por transmisión, coeficientes de referencian y absorción e impedancia del material a incidencia normal aplicando el método establecido en el estándar ASTM E2611-09. Para efectuar las diferentes pruebas se usó el sistema del tubo de transmisión, realizando una modificación que se basó en implementar un quinto micrófono de medición en una de sus etapas. Posteriormente se obtuvieron muestras de audio para ser procesadas en el algoritmo que permitió caracterizar los distintos materiales. Además, se hicieron variaciones en el montaje, y se descubrió que los resultados son sensible a cambios en las variables presentes en el sistema; por ende se llevó acabo el diseño de un protocolo de medición para así mantener una estabilidad en la metodología y en los resultados. Los valores de pérdida por transmisión obtenidos fueron comparados con el proyecto que diseño el sistema, encontrando que modificar éste permite obtener resultados próximos a la curva teórica para esta propiedad acústica y se mejora la coherencia entre las señales. A partir de los valores comparados y validados, se obtuvieron los demás parámetros acústicos, en donde el coeficiente de absorción fue comparado con datos de materiales ya caracterizados, en donde se obtuvieron resultados con errores porcentuales cerca al 10 y 20 % para materiales porosos.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existen organismos tales como ISO (*International Organization for Standardization*) y ASTM (*American Society for Testing and Materials*) que han llevado a cabo normativas para la obtención de diferentes propiedades acústicas. Entre ellas la pérdida por transmisión, el coeficiente de absorción y la impedancia acústica. Un ejemplo es la ISO 10534 [1], implementada para el cálculo del coeficiente de absorción y otro ejemplo es el estándar ASTM E2611-09 del año 2009 [2], que permite el cálculo no sólo de la pérdida por transmisión si no de diferentes parámetros al tiempo. Las normativas mencionadas anteriormente son más económicos y prácticas, lo cual al implementar las metodologías descritas en ellas se vuelven una ventaja para la industria del país, ya que las empresas podrían aplicarlas para realizar mediciones propias de sus materiales.

En el presente trabajo se pretende mostrar un estudio sobre la aplicación del método que se encuentra en el estándar ASTM E2611-09 para caracterizar materiales de forma acústica. En él se presenta una manera para obtener parámetros como el coeficiente de absorción, reflexión, transmisión, la pérdida por transmisión y la impedancia del material. Conjuntamente se pretende presentar una manera estandarizada, rápida, económica y fácil de implementar para obtener diferentes propiedades acústicas de los materiales y así poder obtener tablas de datos sobre algunos materiales implementados para soluciones acústicas en el país.

III. JUSTIFICACIÓN

En el país se están realizando continuamente proyectos de acondicionamiento acústico y control de ruido. Los materiales con propiedades acústicas son útiles para llevar a cabo este tipo de proyectos, por medio de ellos se logra mejorar el desempeño acústico de un recinto sin realizar grandes cambios estructurales. Para la correcta predicción del comportamiento acústico de un recinto después de realizar modificaciones de este tipo es necesario conocer de forma precisa las propiedades acústicas de los materiales. Entre estas propiedades están el coeficiente de absorción, de reflexión y de transmisión, la pérdida de transmisión y la impedancia del material, entre otras.

En este momento en el país existe un número considerable de empresas especializadas en la producción de materiales para el acondicionamiento acústico de espacios y el control de ruido, éstas producen materiales tradicionales como la fibra de vidrio, el yeso-cartón o *Drywall*, la lana mineral de roca y diferentes tipos de maderas. Muchas veces para las empresas que desarrollan estos materiales les implica un alto costo el caracterizar de manera adecuada sus productos, debido al envío de muestras a laboratorios en el exterior; dado que en nuestro país no existen cámaras reverberantes y/o anecóicas.

Lo que se busca es determinar los parámetros acústicos de los materiales nacionales mediante un método alternativo de medición que sea de precio moderado para la industria del país y el cual permita obtener datos fiables.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Aplicar el método de medición de transmisión de acuerdo con la norma ASTM E2611-09 haciendo uso de un quinto micrófono de medición como señal de referencia para la obtención de la matriz de transferencia y así estimar valores de transmisión, coeficientes de reflexión y absorción.

B. Objetivos Específicos

- Implementar un quinto micrófono en el tubo de transmisión como se establece en el estándar ASTM E2611-09 para obtener una señal de referencia que será usada en el cálculo de las funciones de transferencia y en las correcciones de magnitud y fase. Además, calcular el comportamiento de la coherencia de las señales bajo la modificación planteada para el sistema.
- Obtener valores de pérdida por transmisión y comparar con los obtenidos en el proyecto “Desarrollo y caracterización de un sistema de medición con base en el estándar ASTM E2611-09 para la determinación de la pérdida por transmisión de materiales de la industria colombiana”.
- Estimar valores de coeficiente de absorción y reflexión por medio del método establecido en el estándar ASTM E2611-09.
- Comparar los valores de los parámetros acústicos obtenidos con algunos materiales ya caracterizados de forma acústica.

V. MARCO TEÓRICO

En la presente sección se exponen las definiciones, conceptos, metodologías y teorías que se implementaron al realizar el proyecto.

A. *Propiedades acústicas de la onda*

Presión sonora eficaz o RMS (P_{RMS})

La presión sonora eficaz en un punto es el valor cuadrático medio de la presión sonora instantánea sobre un intervalo dado de tiempo, en el punto considerado [3]. El valor instantáneo de la presión $p(t)$ no sería adecuado para caracterizar la onda ya que presenta una variación continua con el tiempo. Por ello se usa el valor cuadrático medio de la presión. La presión RMS (del inglés *root mean square* que traduce valor cuadrático medio) se presenta en la ecuación (1) [4].

$$\overline{p^2} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p^2(x, t) dt \quad [Pa \text{ RMS}], \quad (1)$$

donde, p es el valor de la presión en un punto y τ puede no coincidir con un periodo pero es mayor a un periodo de la vibración.

El oído humano es capaz de detectar variaciones de presión acústicas entre los $20\mu Pa$ los $200.000.000\mu Pa$. Éstas se encuentran en un rango de frecuencia de 20Hz a 20kHz [5]. Para minimizar la cantidad de valores de presión sonora, se implementa el uso de la escala logarítmica y se introduce el concepto de nivel de presión sonora, que tiene unidades de decibeles (dB).

Velocidad de las partículas ($u[t]$)

El cambio de posición de las partículas que se da por medio de una onda sonora, se determina velocidad de partícula, ésta se puede ver de dos formas, la velocidad instantánea de la partícula y la velocidad eficaz. La velocidad instantánea en un punto es la velocidad debida solamente a la onda sonora, de la parte infinitesimal dada del medio en un instante determinando, mientras que la velocidad eficaz de la partícula en un punto es el valor cuadrático medio de la velocidad de la partícula. La velocidad de partícula tiene unidad de metro por segundo [3].

Impedancia acústica específica y característica (Z_s y $\delta.c$)

Es la relación compleja de la presión sonora eficaz en un punto de un medio acústico a la velocidad eficaz de las partículas en ese mismo punto. En una onda plana y progresiva (comportamiento de ondas sonoras en tubo) se da la misma relación y se denomina impedancia característica del medio. Ésta es igual al producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación del sonido en el mismo medio [3].

B. Comportamiento acústico de las ondas sonoras delante de un material

En el momento en que una onda sonora se encuentra con un material la energía incidente sufre de tres fenómenos, estos son: la reflexión de la onda, la absorción de la energía sonora y radiación de la energía a través del material [4].

Coefficiente de reflexión

“La reflexión de una onda se da por la propiedad que tiene un material de reflejar la energía sonora incidente” [6]. Se puede cuantificar su valor por medio de un coeficiente, en este caso coeficiente de reflexión que es una relación entre potencias sonoras, la reflejada sobre el incidente. El valor de la reflexión es dependiente tanto de la frecuencia como del ángulo de incidencia de la onda sobre el material [6]. El coeficiente de reflexión está dado por la ecuación (2).

$$\alpha_r = |r|^2, \quad (2)$$

donde r es el coeficiente de reflexión complejo.

Coefficiente de absorción

La absorción sonora es la propiedad que tiene un material de disipar o absorber la energía incidente. La pérdida de energía acústica o sonora en los materiales se pueden caracterizar mediante el coeficiente de absorción acústica α , siendo éste la relación entre la energía sonora absorbida por el material y la energía sonora incidente sobre dicho material, por unidad de superficie y puede variar su valor entre 0 a 1. Siendo 1 absorción total. “El coeficiente de absorción de un material depende

de la naturaleza del mismo, de la frecuencia y del ángulo de incidencia sobre la superficie”. [7]. El coeficiente de absorción puede ser definido en términos del coeficiente de reflexión complejo, la expresión es presentada en la ecuación (3) [8].

$$\alpha_a = 1 - |r|^2, \quad (3)$$

Además, de acuerdo con A.Bies y H.Hansen, “es útil usar un sólo número para describir las características de absorción de un material” [9]. Esto es práctico al momento de comprar el beneficio de absorción relativo de una serie de materiales diferentes. Con este fin, se introdujo el coeficiente de reducción de ruido (NRC, por sus siglas en inglés) de promedio en frecuencia [9]. Éste es definido como:

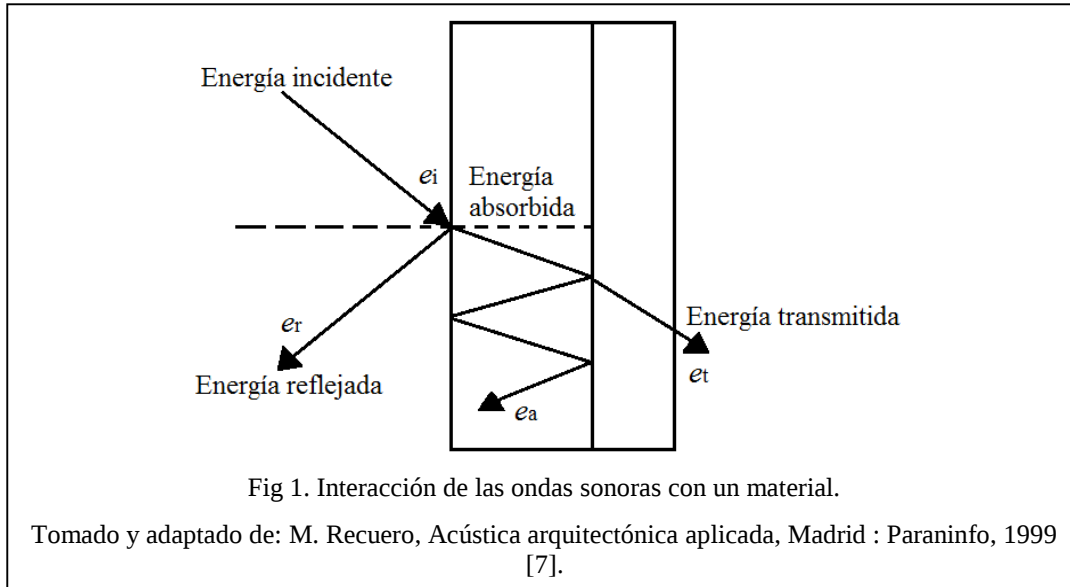
$$NRC = \frac{(\bar{\alpha}_{250} + \bar{\alpha}_{500} + \bar{\alpha}_{1000} + \bar{\alpha}_{2000})}{4} \quad (4)$$

Coefficiente de transmisión

La transmisión sonora se define como la energía que radia a través de un material. Esta propiedad se puede cuantificar mediante el coeficiente de transmisión, siendo éste la relación entre la potencia transmitida sobre la potencia incidente [10]. El coeficiente de transmisión se puede observar en la ecuación (5) [2].

$$\tau = \frac{W_{tr}}{W_{inc}}, \quad (5)$$

El comportamiento de la onda al interactuar con un material puede observarse en la Fig.1.



Pérdida por transmisión (TL)

La pérdida por transmisión se manifiesta como una caída en el nivel de la potencia acústica cuando una onda sonora atraviesa un material. La pérdida de transmisión depende del coeficiente de transmisión, y se encuentra definida en la ecuación (6) [8].

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} [dB] \quad (6)$$

Pérdida por transmisión en paneles simples

Normalmente cuando una onda que se propaga de forma homogénea por un medio con una impedancia característica establecida y se encuentra con otro medio o material con propiedades diferentes, ésta podría presentar atenuaciones, es decir pérdidas por el nuevo cambio de medio.

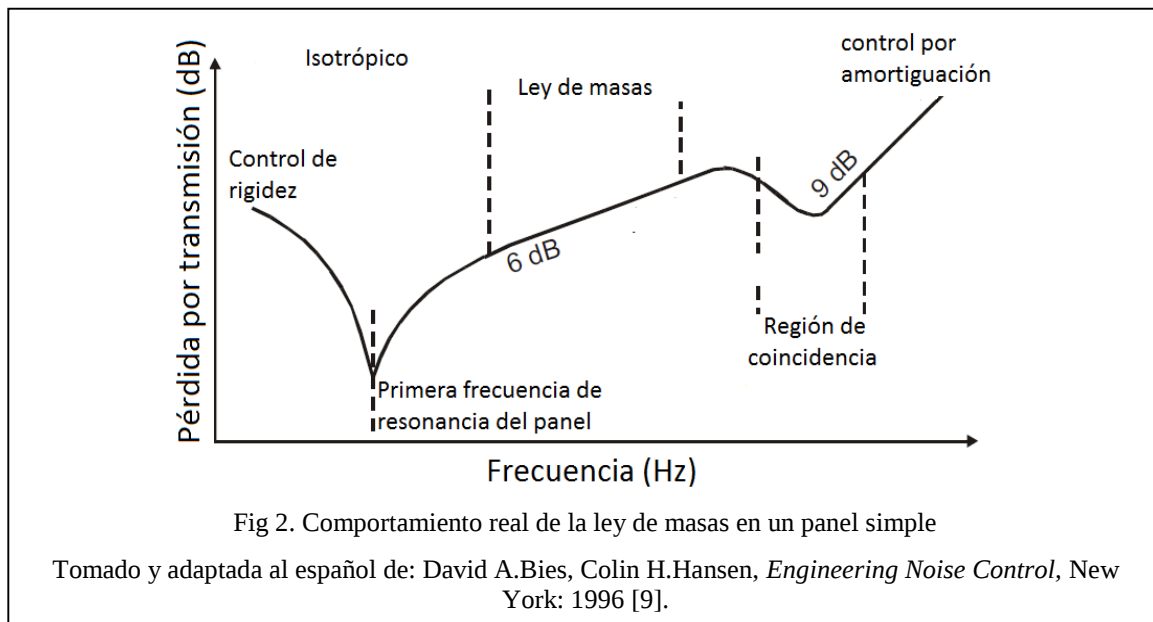
Para determinar el aislamiento acústico real dado por un panel simple (panel isotrópico) o una partición uniforme es importante conocer el cómo se dan las pérdidas por cambio de medio (pérdidas por transmisión) en todo el rango audible [9]. El ancho de banda de la respuesta del aislamiento según la ley de masas para una partición se divide en tres zonas dadas cada una por una propiedad física de la partición [4]. Estas son:

Zona I: el aislamiento es dado por la rigidez de la partición y por sus resonancias.

Zona II: el aislamiento es controlado por la ley de masas. En esta zona se da la más alta frecuencia de resonancia del panel y la mitad de la frecuencia critica.

Zona III: el aislamiento es influenciado por el amortiguamiento interno del panel.

En la Fig 2 se puede observar el comportamiento real de la ley de masas sobre un panel simple.



A bajas frecuencias, la pérdida por transmisión (TL) se encuentra controlada por la rigidez del panel (actúa en la zona I). A la primera frecuencia de resonancia del panel la transmisión es alta y en consecuencia, la pérdida de transmisión pasa a través de un mínimo determinado en parte por amortiguación que hay en el sistema [9].

En la primera zona se da decremento de 6dB por octava de la pérdida de transmisión, esto se da hasta la primera frecuencia de resonancia, que está en función de las dimensiones de la placa [11]. La ecuación (7) muestra la expresión para la primera frecuencia de resonancia [9].

$$f_{1,1} = \left(\frac{\pi}{4\sqrt{3}} \right) c_L h \left[\left(\frac{1}{a} \right)^2 + \left(\frac{1}{b} \right)^2 \right] [Hz], \quad (7)$$

De la ecuación (7) se tiene que h , a y b son el ancho, alto y espesor de la placa respectivamente. C_L es la velocidad de las ondas longitudinales. La ecuación para la velocidad de ondas longitudinales se encuentra expresada en la ecuación (8).

$$c_L = \left[\frac{E}{\rho_W(1 - \sigma^2)} \right]^{1/2} [m/s], \quad (8)$$

donde, E es el módulo de Young del material, ρ_W es la densidad del material del panel y σ es la razón de Poisson.

Para frecuencias por encima de la primera frecuencia de resonancia del panel, se encuentra un amplio rango de frecuencias donde la pérdida de transmisión es controlada por la densidad de superficie del panel [4]. En este rango de frecuencias (rango controlado por la ley de masas con dependencia aproximadamente lineal de la pérdida de transmisión en el panel) la pérdida por transmisión aumenta con la frecuencia a razón de 6 dB por cada octava [9]. Por último, en la zona III donde las frecuencias son más altas que la frecuencia crítica se da un aumento en la pérdida por transmisión de 9 dB por octava [9]. La expresión para la frecuencia crítica se encuentra en la ecuación (9).

$$f_c = \frac{\sqrt{3}c^2}{\pi c_L h} [Hz], \quad (9)$$

donde, c es la velocidad de propagación del sonido.

C. Ondas en un tubo

La propagación de las ondas sonoras dentro de un tubo toma forma de ondas estacionarias con desplazamiento en dirección al eje X . De acuerdo a las dimensiones las dimensiones del tubo, las condiciones de frontera (abierto o cerrado) y la longitud de onda se puede ver modificado el comportamiento dentro de éste [6]. Se encuentran comúnmente dos configuraciones de los tubos en donde se encuentran las ondas estacionarias. Una de ellas es el tubo abierto en ambos extremos y el otro el tubo abierto en un extremo y cerrado en el otro.

Para la configuración de un tubo abierto-cerrado, las ondas estacionarias se generan a partir de las interferencias constructivas y destructivas producidas por la superposición de la ondas incidentes y reflejadas en el extremo rígido dentro del tubo, formando así máximos y mínimos de presión sonora que varían de acuerdo con la frecuencia de la onda que se está propagando [6]. En esta configuración se origina un antinodo en el extremo abierto del tubo, y un nodo en el extremo cerrado. Esta configuración es la de un tubo de transmisión y de un tubo de impedancia.

En un tubo abierto-cerrado se tiene que la distancia entre un nodo y un antinodo es de un cuarto de la longitud de onda. Es decir que la longitud en un tubo abierto a un extremo y cerrado en el otro se puede calcular bajo la ecuación (10),

$$L_{a-c} = \frac{n * \lambda}{4} [m]; \quad n = 1, 3, 5 \dots \quad (10)$$

donde, L es el largo del tubo y n son los armónicos dentro del tubo.

Teniendo la ecuación (10), se puede obtener la frecuencia de los distintos modos de vibración, que se define como:

$$f = n * \left(\frac{c}{4L} \right) = n * \frac{20.047 * \sqrt{273.15 + T}}{4L} [Hz] \quad (11)$$

donde, c es la velocidad de propagación del sonido y T es la temperatura ambiente en grados centígrados.

Por otro lado, se tiene la configuración de un tubo abierto-abierto en ambos extremos, donde se origina un antinodo en ambos extremos. Se tiene que la distancia entre un nodo y un antinodo para este tipo de tubo es de un medio de la longitud onda [6]. Es decir que la longitud en un tubo abierto en ambos extremos se puede calcular bajo la ecuación (12),

$$L_{a-a} = \frac{n * \lambda}{2} ; \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

donde, L es el largo del tubo, y n son los armónicos dentro del tubo.

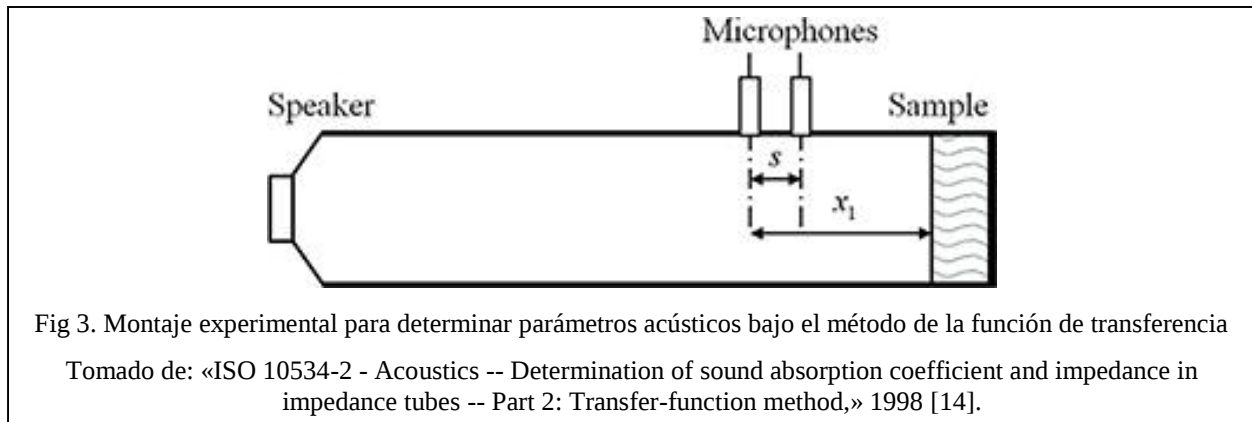
Teniendo la ecuación (12), se puede obtener la frecuencia de los distintos modos de vibración del tubo por medio de la ecuación (13),

$$f = n * \left(\frac{c}{2L} \right) \quad (13)$$

Tubo de Kundt

El tubo es un dispositivo que fue creado por el físico alemán A. Kundt, que tiene como finalidad “visualizar” las ondas estacionarias (los máximos y los mínimos) y poder estudiarlas [12], hoy en día es usado para la medición de diferentes parámetros acústicos como la impedancia y el coeficiente de absorción [13]. Las normativas ISO 10543 para 1 y 2 [1] [14], son los estándares internacionales para determinar dichos parámetros a incidencia normal por el método de onda estacionaria y por el método de función de transferencia respectivamente.

En la ISO 10543-2 [14] se enseña un montaje con el tubo de impedancia y se explica el método basado en una función de transferencia, la cual es medida por dos micrófonos incrustados en el tubo y separados una distancia “s” que se encuentra dada por el rango útil del tubo y una distancia “x” entre el segundo micrófono y la muestra como se ve en la Fig 3.

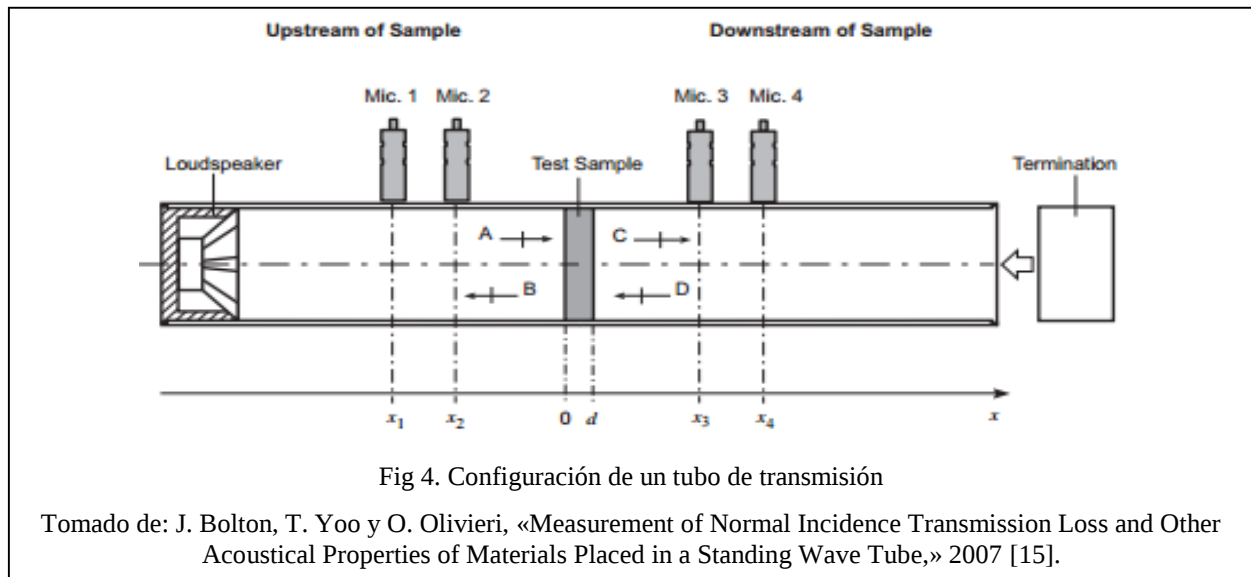


Tubo de transmisión

Se realizó otra configuración del tubo de Kundt, fue realizada con base a una metodología estandarizada por ASTM E2611-09, se da para medir la pérdida de transmisión a incidencia normal [2]. La configuración se basa en la implementación de cuatro micrófonos distribuidos en los

soportes, dos de ellos antes de la muestra a medir (*upstream segment*) y los otros dos después de ella (*downstream segment*), el quinto se establece cerca a la fuente (micrófono de referencia). Al tener un sistema de varios micrófonos, unos antes y otros después de la muestra, se puede aplicar una función de transferencia para conocer el comportamiento del sistema [2].

En la Fig 4 se puede observar la configuración del tubo de trasmisión.



Representación del campo acústico.

Se asume que el campo sonoro en el segmento *upstream* y *downstream* del tubo de onda estacionaria (Fig 4) puede ser aproximado a superposiciones de ondas planas en dirección positiva y negativa [16].

Estando en el dominio de la frecuencia el campo acústico podría ser representado por medio de la ecuación (14) y (15)

Para el segmento *upstream*:

$$P_{up} = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} \quad (14)$$

Para el segmento *downstream*:

$$P_{down} = C e^{-jkx} + D e^{jkx} \quad (15)$$

donde; k es el número de onda en el fluido, P_{up} y P_{down} son presiones sonoras complejas y descomponen el campo acústico (la onda inciden, la onda que refleja en el material, la onda que se transmite y la que se refleja o absorbe en la terminación del tubo). Los coeficientes $A - D$ se representan por medio de las ecuaciones (16) a la (19) [2] [17].

$$A = j \frac{H_{1,ref} e^{-jkl_1} - H_{2,ref} e^{-jk(l_1+s_1)}}{2 \sin ks_1} \quad (16)$$

$$B = j \frac{H_{2,ref} e^{+jk(l_1+s_1)} - H_{1,ref} e^{-jkl_1}}{2 \sin ks_1} \quad (17)$$

$$C = j \frac{H_{3,ref} e^{+jk(l_2+s_2)} - H_{4,ref} e^{+jkl_2}}{2 \sin ks_2} \quad (18)$$

$$D = j \frac{H_{4,ref} e^{-jkl_2} - H_{3,ref} e^{-jk(l_2+s_2)}}{2 \sin ks_2} \quad (19)$$

donde; las $H_{i,ref}$ son las diferentes funciones de transferencia de los micrófonos con respecto a una señal de referencia, k es el correspondiente número de onda, l_1 y l_2 Son las distancias de la muestra al micrófono más cercano en la primera parte del tubo y la segunda respectivamente, s_1 y s_2 Son las distancias entre micrófonos 1 y 2, 3 y 4 respectivamente.

En la Fig 4 se puede observar el esquema general del tubo de transmisión con cada una de sus partes.

D. Procesamiento de la señal

Función de transferencia

El trabajar en el dominio de Laplace es útil para representar el concepto de la función de transferencia. En general se parte desde un sistema lineal e invariable en el tiempo que recibe una entrada $U(t)$ y produce una salida $Y(t)$, luego tanto salida como entrada se llevan al dominio de La

place para tener una entrada $U(s)$ que una salida $Y(s)$ [18]. La relación entre salida con respecto a la entrada se denomina función de transferencia $H(s)$ como se puede ver en la ecuación (20).

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (20)$$

Transformada discreta de Fourier (DFT – Discrete Fourier Transform)

La DFT es una herramienta matemática que permite obtener la representación en el dominio de la frecuencia de una función original que se encuentra en el dominio del tiempo [19]. La DFT requiere una función de entrada, la cual puede ser una secuencia discreta y de duración finita, estas funciones de entrada se generan a partir del muestreo de una función continua [18]. La implementación de una DFT implica que el segmento que se analiza es un único período de una señal periódica que se extiende de forma infinita; si esto no se cumple, se debe utilizar una ventana para reducir la dispersión en el espectro [19]. La DFT puede ser calculada mediante la aplicación de un proceso de FFT (*Fast Fourier Transform* o transformada rápida de Fourier) [18]. La DFT posee una serie de propiedades que son útiles en la reducción de la complejidad de los problemas de análisis de frecuencia en muchas aplicaciones prácticas. Las propiedades de la DFT son la linealidad, simetría, desplazamiento, consolución, correlación, Parseval y Zero padding [18] [19].

Corrección de fase y magnitud de acuerdo al estándar ASTM E2611-09

Para realizar la corrección de magnitud y fase usando un micrófono que penetra el tubo, es necesario obtener dos funciones de transferencia, usando un algoritmo computacional. La primera función de transferencia se adquiere relacionando dos micrófonos (donde uno de ellos es el micrófono de referencia) en su posición. Y la segunda, se obtiene relacionando esos mismos micrófonos pero haciendo un cambio en su posición [2].

En las ecuaciones (21) y (22) se pueden observar las dos funciones de transferencia que se logran con esta metodología.

$$H'_{n,ref} = |H'|e^{(j\phi')} = H'r + jH'i \quad (21)$$

$$H''_{n,ref} = |H''|e^{(j\phi'')} = H''r + jH''i \quad (22)$$

Finalmente, la función de transferencia de corrección H^c representa la amplitud $|H^c|$ y la fase ϕ^c para cada par de transferencia y está determinada por la siguiente ecuación.

$$H^c_{n,ref} = (H'.H'')^{1/2} = |H^c|e^{j\phi'} \quad (23)$$

Matriz de transferencia

Los coeficientes complejos de “A” a “D” (amplitudes de la onda) pueden ser implementados para el cálculo de las presiones sonoras y las velocidades de partícula en las dos superficies de la muestra ($x=0$ y $x=d$). Estas dos variables se pueden calcular para cada punto con las ecuaciones (24) a (27) [15].

$$P|_{x=0} = A + B \quad (24)$$

$$U|_{x=0} = \frac{A - B}{\rho c} \quad (25)$$

$$p|_{x=d} = Ce^{-jkd} + De^{+jkd} \quad (26)$$

$$U|_{x=d} = \left(\frac{Ce^{-jkd} - De^{+jkd}}{\rho c} \right) \quad (27)$$

Estas variables pueden ser relacionadas en una matriz de transferencia de dos por dos. Los valores de la matriz son propiedades acústicas de la muestra. Estas propiedades son determinadas con base en las mediciones de presión sonora de cada micrófono que está cerca de la muestra [15].

Con base en los elementos de la matriz de transferencia se puede ser determinada la pérdida por transmisión de la muestra. Por lo tanto una matriz de transferencia es utilizada para relacionar los

valores de la presión sonora y la velocidad de partícula normal de las dos caras de una muestra que van desde $x=0$ a $x=d$ [17]. La matriz de transferencia para relaciones P y U se puede ver en la ecuación (28)

$$\begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{x=d}, \quad (28)$$

Por medio de elementos que representan en la matriz es posible calcular otros parámetros acústicos como el coeficiente de reflexión y por medio de este hallar el coeficiente de absorción.

Coherencia entre señales

La coherencia de magnitud al cuadrado, es una función que expresa el grado de dependencia lineal entre una señal $x(n)$ e $y(n)$, en el dominio de la frecuencia [9]. La coherencia se expresa mediante la ecuación (29)

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}, \quad (29)$$

donde, $G_{xy}(f)$ es el espectro cruzado entre dos señales $x(t)$ y $y(t)$, mientras que $G_{xx}(f)$ y $G_{yy}(f)$ son los auto espectros de las respectivas señales. El cociente presentado en la ecuación (29) da como resultado un número real entre 0 y 1. Donde 1 es el grado mayor de coherencia.

E. Estado del arte

En el siglo XIX el físico experimental W. Sabine dedicó sus investigaciones sobre la absorción acústica de numerosos materiales y los efectos de esos en los tiempos de reverberación de los recintos para acondicionar acústicamente los espacios y así, dio paso a la acústica arquitectónica moderna [21].

Para el aislamiento acústico es necesario conocer diferentes propiedades acústicas de los materiales, entre ellas está el coeficiente de absorción, el coeficiente de reflexión y la pérdida por transmisión [22]. A lo largo de los años se han creado métodos para obtener dichas propiedades y estos han sido llevados a estándares para así tener valores equívocos en las mediciones que sean realizadas con ellos, esto ha llevado a lograr una caracterización acústica de los materiales.

En 1996 ISO (*International Organization for Standardization*) realizó el estándar 10543-1 para efectuar mediciones de una muestra y determinar el coeficiente de absorción en incidencia normal y la impedancia acústica de un material por medio del tubo de Kundt o tubo de impedancia [1]. El tubo de Kundt es un dispositivo que fue creado en 1866 por físico alemán A. Kundt, quien fue exitoso en el campo de la luz y el sonido, el tubo tiene como finalidad visualizar las ondas estacionarias (los máximos y los mínimos) y poder estudiarlas [12], hoy en día es usado para la medición de diferentes parámetros acústicos como la impedancia y el coeficiente de absorción [13] y reflexión. En 1998 surgió la normativa ISO 10543-2, en donde aparecía un montaje similar con el tubo de impedancia y se explicó el método basado en una función de transferencia [14], la cual era medida por dos micrófonos incrustados en el tubo.

En 1997 J. Bolton desarrolló y planteó un nuevo método de laboratorio que se usaba para evaluar propiedades acústicas de los sellantes de automoción expansibles. El nuevo método consistía en el diseño de un tubo con un nuevo soporte de muestras, un soporte de micrófono que proporciona dos ubicaciones adicionales para estos y una terminación anecoica. Estas adiciones permitían la medición de la pérdida de transmisión por incidencia normal así como la absorción [16]. Posteriormente en el 2006 se publicó un método similar al de 1997 de J. Bolton y O. Oliveiro, en éste se usaban cuatro micrófonos y tres separaciones del tubo, la diferencia de este método radicaba en el uso de dos condiciones para las terminales del tubo [15], una abierta y la otra aproximadamente anecoica [23]. Del método pudieron concluir que la potencia del sonido transmitido a través de una muestra en el tubo depende tanto de sus propiedades como de la terminación del tubo [17]. Este método utilizaba una matriz de transferencia que caracteriza la muestra que se encontraba bajo prueba y los elementos encontrados dentro de ella eran usados para calcular la pérdida por transmisión y otras propiedades acústicas de la muestra [16].

En el año 2003 apareció la normativa ISO 354 la cual explicaba un método para medir el coeficiente de absorción acústica en incidencia aleatoria de los materiales acústicos implementados como tratamiento de paredes, techos, o áreas de absorción acústica equivalente a objetos en una cámara reverberante [24], los resultados obtenidos de las mediciones normalmente eran utilizados para comparación y cálculo en los diseños para el control de ruido y la acústica de salas. Además, en el año 2004 la organización *American Society for Testing Materials* (ASTM) publicó el estándar ASTM E90-04, el cual titulaba *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements*. El estándar mostraba un método para medir la pérdida de transmisión de ruido aéreo en las particiones de una construcción, tales como ventanas, pisos, puertas, techos, paneles, entre otros elementos [25].

A mediados de los años 90 la ISO estableció una norma para la medición del aislamiento acústico para ruido aéreo en elementos de construcción de grandes tamaños, ésta era la ISO 140-3 [26], pero en el año 2010 se realizó una revisión y apareció la normativa ISO 10140-1, donde se especificaban los requisitos de prueba para los elementos y productos de construcción [27], para así obtener datos para el acondicionamiento acústico.

En el año 2009 se estandarizó el método de medición para la incidencia normal de la transmisión del sonido en materiales, basados en la técnica de la matriz de transferencia. El método fue estandarizado como el ASTM E2611-09 [2]. En el mismo año de haber salido el estándar se realizó una comparación entre éste y el método E-1050-08 que utilizaba una técnica de dos micrófonos para calcular propiedades acústicas de los materiales [28]. En el trabajo “A Comparison of Two and Four Microphone Standing Wave Tube Procedures for Estimating the Normal Incidence Absorption Coefficient” se pudieron concluir que los resultados de las mediciones mostraron un buen acuerdo para materiales fibrosos y un acuerdo de forma razonable para los materiales de espuma. Esta razón de diferencia estaba dada por las condiciones de contorno aplicadas a la muestra en el interior del tubo [29].

Después de diferentes modificaciones del tubo por parte de J. Bolton y la estandarización del método en la ASTM E2611-09, se llevaba a prueba una nueva configuración en el año 2012 por parte de Olivier Doutres, Raymond Panneton y Yacoubou Salissou, quienes publicaron “An additional configuration to standard ASTM E2611-09 for measuring the normal incidence sound

transmission loss in a modified impedance tube”. El método (3M2L) presentado en su trabajo mostraba cómo se da una reducción del segundo soporte con dos micrófonos por un soporte móvil con un solo un micrófono y el cambio de las dos terminales por dos cavidades de aire, por esto el método usa tres micrófonos y menos funciones de transferencia, llegando a ser comparado con el método presentado en la ASTM E2611-09, método que usa cuatro micrófonos y dos terminaciones (4M2L) [30].

Para el año 2013, X. Hua y D. W. Herrin realizaron pruebas cambiando los adaptadores que tiene el tubo para medir silenciadores, el cambio se basó en la forma geométrica y el tamaño de éstos, su forma era cónica y se demostró que el efecto que generó fue significativo para bajas frecuencias, en especial si los adaptadores cónicos eran de una corta longitud. Además examinaron el efecto de seleccionar el micrófono de referencia de forma experimental, encontraron que la elección de un micrófono *downstream* como referencia mejora la calidad de las mediciones [31].

Por otra parte, en 1980, J. Chung y D. Blaser desarrollaron un método de función de transferencia de la medición en conducto de propiedades acústicas. I y II, donde presentaban la teoría de la función de transferencia para un método de medición de propiedades acústicas en incidencia normal en un conducto. El método se basaba en la descomposición de una onda estacionaria (acústica) en forma matemática, se extraía su incidente y reflejada por medio de una función de transferencia de la presión acústica generada por la onda en dos ubicaciones del tubo. Por medio de la descomposición se podía estimar el coeficiente de reflexión complejo, el que permite calcular el coeficiente de absorción (acústica) de un material y la pérdida por transmisión por un silenciador [32]. Otro estudio evaluó el segundo artículo que se basaba en la medición y análisis de los resultados y la verificación de la exactitud del método. Los resultados obtenidos presentaban un acuerdo entre los datos teóricos y los experimentales para las variables acústicas evaluadas [33].

Al pasar de los años se fueron desarrollando métodos y formas de medir los parámetros acústicos de materiales o comportamiento de silenciadores, que van desde cámaras reverberantes hasta llegar a métodos que se implementaba en un tubo, micrófonos y un sistema de análisis de frecuencia digital, el método se encuentra en el estándar ASTM E1050 que se publicó en el año 1998 con actualizaciones en el 2010 y 2012, en donde los parámetros medidos con esta metodología son útiles en investigación y desarrollo de productos como materiales absorbente [34] y a los métodos

basados en simulación y modelización para la caracterización acústica de materiales que serán implementados en el acondicionamiento acústico [35].

Los desarrollos en la temática han permitido la caracterización de materiales, el desarrollo en el control de ruido y acondicionamiento acústico como el avance de nuevos enfoques para la predicción y evaluación de las propiedades acústicas de los tratamientos de varias capas de materiales usados en control de ruido (materiales híbridos), propiedades tales como la absorción y pérdida por transmisión [36]. También la estimación del rendimiento de los coeficientes de absorción de sistemas de paneles con múltiples capas perforados, donde se usa el método de la matriz de transferencia para la estimación del parámetro acústico [37]. Además los tratamientos para silenciadores como en los que trabajó J. Bolton [16]. Entre otras aplicaciones para los tratamientos acústicos.

Posteriormente, en el año 2011, F.A. Machuca diseñó un tubo de transmisión, presentando resultados de pérdida por transmisión para diferentes materiales y con diferentes métodos de implementación del dispositivo. Para el segundo método aplicado (4M2L) concluyo que: “el procedimiento podría llegar a ser confiable únicamente para materiales poroso, siempre y cuando el tubo fuera lo suficientemente absorbente para evitar que las reflexiones sucesivas dentro del tubo fueran de un orden similar a las ondas de excitación primarias” [38]. Además entre su trabajo se presentaron incoherencias en las mediciones de materiales sólidos, la causa de esto se debió a que los valores de coherencia entre micrófonos con respecto a la frecuencia presentaban caídas que indicaban que los resultados obtenidos para dichos materiales no podrían ser considerados como confiables [38].

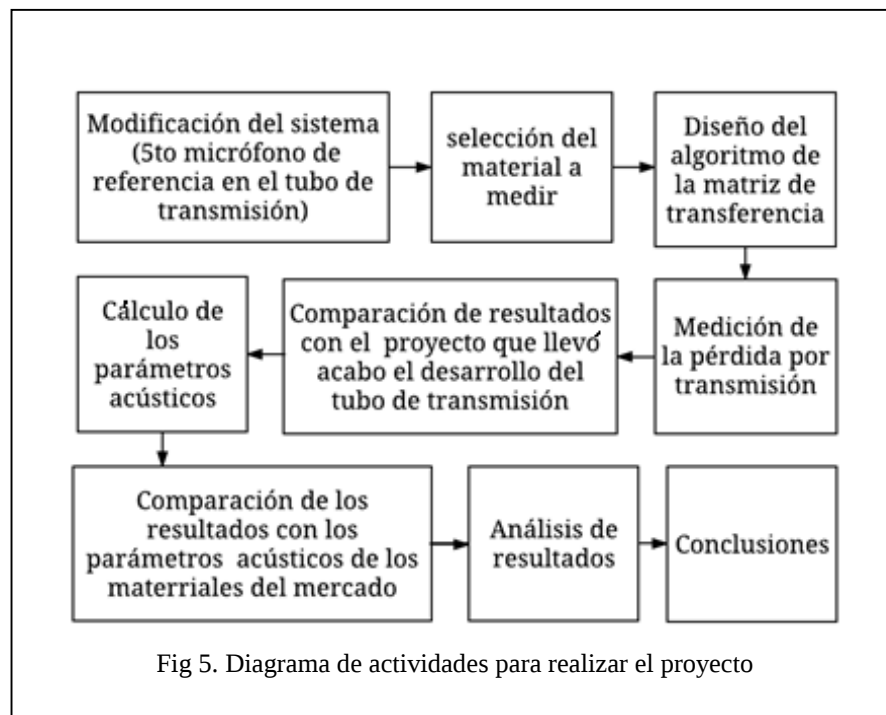
Finalmente en año 2015 en la universidad de San Buenaventura seccional Medellín, específicamente en el semillero de investigación de Caracterización acústica de materiales, A. Montoya realizó el proyecto “Desarrollo y caracterización de un sistema de medición con base en el estándar ASTM E2611-09 para la determinación de la pérdida por transmisión de materiales de la industria colombiana” [39], en el cual se diseñó y utilizó un tubo de transmisión con el que se midieron valores de pérdida por transmisión para diferentes materiales aplicando método 4M2L que se encuentra en la normativa ASTM E2611-09. Los resultados obtenidos en el trabajo fueron similares a los del proyecto de F.A. Machuca, donde, para materiales porosos, absorbentes o con

un coeficiente de reflexión bajo se presentaba un comportamiento adecuado en los valores de TL, mientras que en los materiales sólidos se apreciaban comportamientos atípicos en la curva de pérdida por transmisión en la zona de 100 a 400Hz; además, por medio del análisis de la coherencia de las señales, A. Montoya analizó que los datos obtenidos en los materiales sólidos eran poco confiables [39].

VI. METODOLOGÍA

Para las etapas de mejora del tubo, medición, comprobación de valores y cálculo de nuevos parámetros, se siguieron los procedimientos descritos en el estándar ASTM E2611-09. Siendo esta la guía para llevar a cabo todo el proceso.

En la Fig 5 se expone un diagrama de flujo en el que se muestran las actividades que se realizaron para llevar a cabo este proyecto.



A. *Modificación de tubo de transmisión (5to micrófono)*

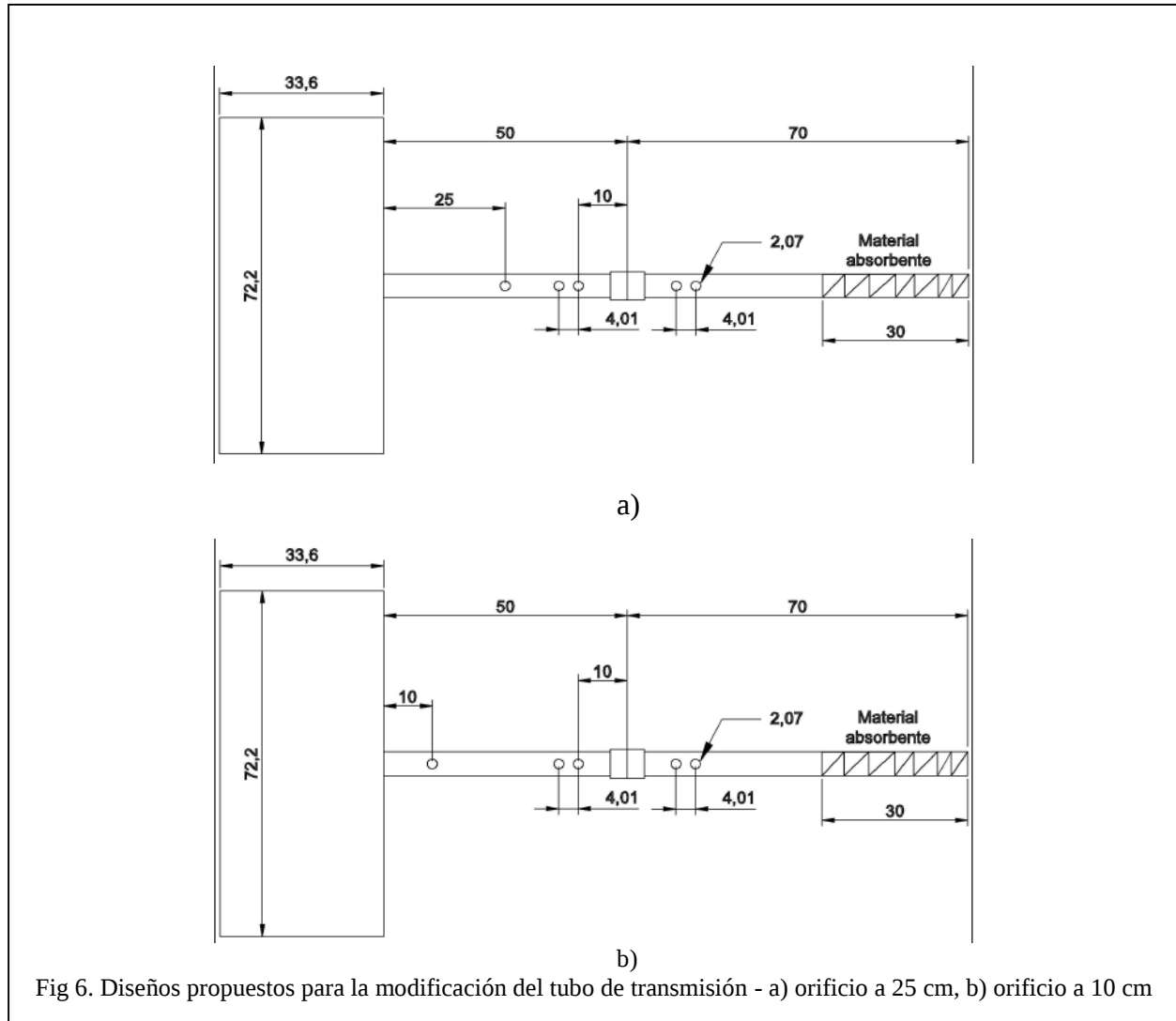
El estándar ASTM E2611-09 establece parámetros de diseño enfocados a la respuesta en frecuencia deseada [2]. El tubo de transmisión diseñado en la universidad de San Buenaventura realizado en el proyecto “Desarrollo y caracterización de un sistema de medición con base en el estándar ASTM E2611-09 para la determinación de la pérdida por transmisión de materiales de la industria colombiana” tiene un rango de operación en frecuencia definido de 88Hz a 3350Hz [39]. Dado este rango en frecuencia se pudieron definir variables de diseño como el diámetro de la sección transversal del tubo que fue de 5 cm y la distancia entre pares de micrófonos (1-2 y 3-4), además

del largo de cada una de las partes del tubo, siendo el *upstream* (etapa del tubo antes del porta muestra) de 50 cm y el *downstream* (etapa del tubo después del porta muestra) de 70 cm. Obteniendo en total un tubo de 120 cm de largo [39] [2].

Para la etapa de modificación del tubo se empleó la teoría de ondas estacionarias en un ducto, en este caso se tenía un tubo abierto en un extremo y cerrado en el otro [6]. Con los fundamentos de esta teoría se encontró el primer modo que se tendría para la frecuencia más baja del rango operacional del sistema, es decir para la frecuencia de 88Hz.

Se calculó un cuarto de la longitud de onda de dicha frecuencia por medio de las ecuaciones (10) y (11) [6], donde, a partir de la velocidad de propagación del sonido, calculada para una temperatura ambiente de 22 °C, se obtuvo un resultado de 0,98 m. En este punto se tenía un mínimo de presión sonora o un nodo [6], por lo tanto, se decidió realizar el nuevo orificio del tubo en una posición distante a dicho valor, teniendo en cuenta que éste debía ir situado antes del porta muestra y de los dos micrófonos iniciales (1-2), para así poder realizar la función de micrófono de referencia en una posición cero o inicial [2]. La distancia seleccionada fue la mitad de la longitud del *upstream* (primera etapa del tubo), es decir a una longitud de 25 cm con respecto al comienzo del tubo. Posteriormente se realizó otro orificio con el fin de realizar diferentes pruebas en la medición, en este caso la modificación fue situada a 10 cm del origen.

En la Fig 6, se pueden observar los diseños de cada una de las modificaciones propuestas para el tubo de transferencia.



De igual manera, se modificó la caja acústica con el fin de disminuir el efecto de anomalías encontradas en las pruebas iniciales. El procedimiento consistió en implementar material poroso (absorbente) al interior de la caja, en frente y detrás de los altavoces, con el fin de reducir la distancia aparente entre los altavoces y equilibrar la energía dentro de la caja para disminuir el efecto de resonancias en la columna de aire del tubo. Para este procedimiento se usó Fresca de Fiberglass de 3 pulgadas de espesor y con una densidad de 2.86 kg/m^3 . Ésta redujo la distancia aparente entre los altavoces a 10 cm aproximadamente.

En el anexo A se pueden observar los coeficientes de absorción del material implementado en la dentro de la caja y en la Fig 7 se puede observar el antes y después para la configuración de la caja.



B. Selección de materiales a medir

Los materiales se seleccionaron de acuerdo con los caracterizados en el trabajo que desarrolló el sistema [39], para posteriormente comparar el efecto que produce la nueva posición de un micrófono referencia en el tubo de transferencia. No todos los materiales de la lista de dicho proyecto fueron medidos, pero sí la mayoría y otros materiales añadidos de iguales usos.

En la Tabla 1 se encuentra la lista de los materiales seleccionados los cuales son parte de la industria nacional, estos cuentan con diferentes propiedades físicas y acústicas como el espesor, la densidad, la absorción y la rigidez. Para efectuar las mediciones se tuvieron en cuenta las anteriores características y la clasificación del material.

Tabla 1. Materiales seleccionados para la medición

Material	Clasificación	Espesor	Densidad [kg/m^3]
<i>Black Theater</i>	Poroso	1"	13.72
<i>Black Theater</i>	Poroso	2"	8.55
Acustifibra	Poroso	1"	-
Sonowall	Poroso	2 ½"	32
Sonowall	Poroso	2 ½"	60
Yeso-cartón	Sólido	5/8"	630,25

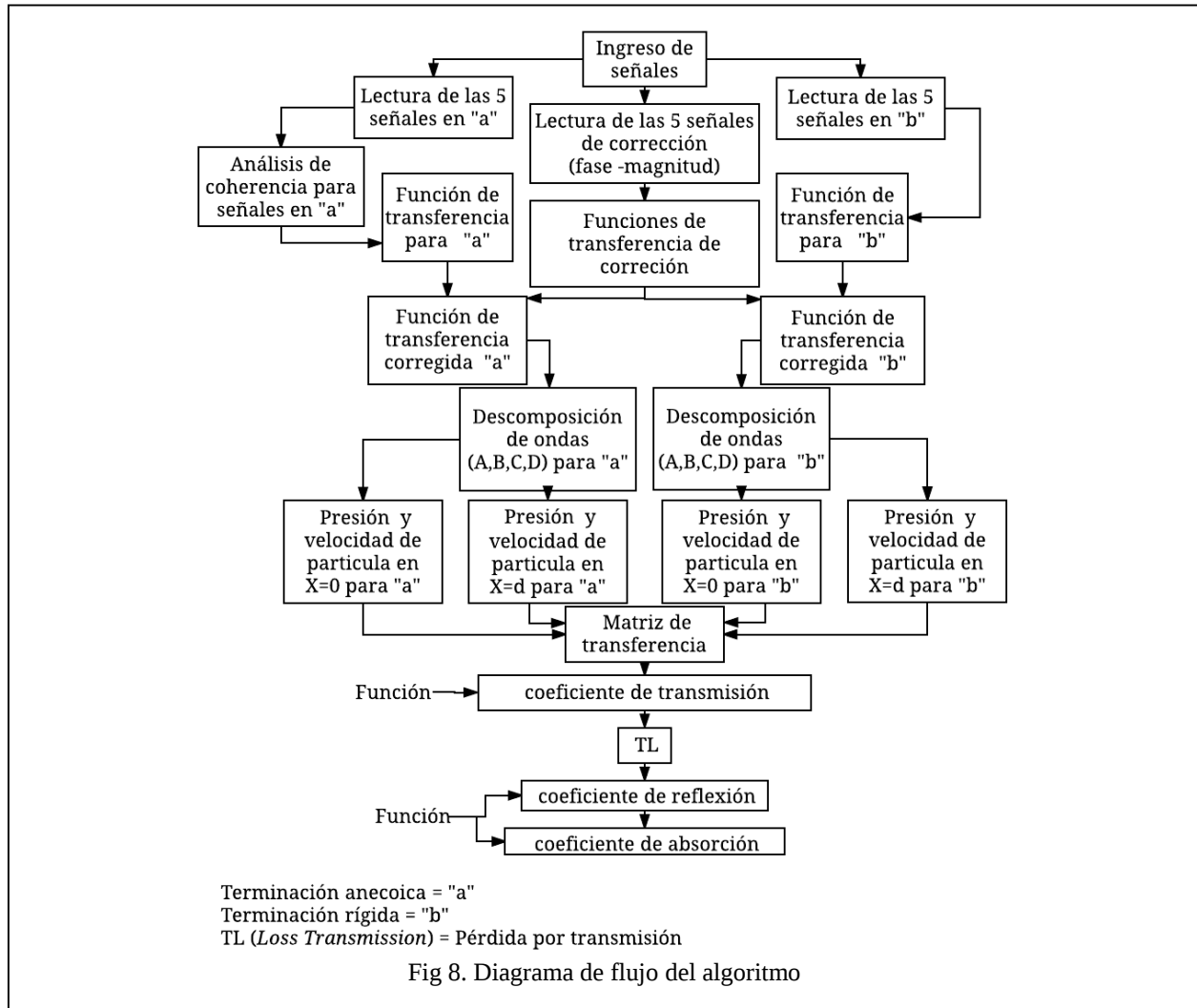
Material	Clasificación	Espesor	Densidad [kg/m^3]
Contrachapado con recubrimiento liso	Sólido	15mm	797,90
Madera lisa	Sólido	15mm	.-
Lámina de acero	Sólido	Calibre 22	7000

C. Diseño del algoritmo de matrices de transferencia

El algoritmo para el procesamiento de las muestras de audio captadas por los micrófonos se desarrolló con base en el algoritmo presentado en el anterior proyecto, éste fue diseñado en MATLAB y en él se tuvieron en cuenta las correcciones de fase y magnitud especificadas en el estándar y los procedimientos para obtener la matriz de transferencia que suministrara la pérdida por transmisión y demás parámetros calculados.

El código cuenta con veintitrés entradas, éstas son las muestras capturadas por cada micrófono con diferente variación en terminación del *downstream* (terminación “a” y “b”) y las muestras obtenidas al comienzo de cada medición para realizar la calibración del sistema. Posteriormente, se calculaban las funciones de transferencia de la terminación “a” (anecoica o con poca reflexión) y “b” (bloqueada o reflectora), y las funciones de transferencia de corrección, luego se descomponía el campo acústico tanto de “a” como de “b” en las ondas A, B, C y D, así se encontraban los valores de la velocidad de partícula y la presión sonora para ambas caras de la muestra ($x = 0$ y $x = d$), y finalmente se podía obtener una matriz de transferencia para el cálculo de la pérdida por transmisión (TL) y otros parámetros acústicos establecidos en el estándar [2].

En la Fig 8 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado y en el anexo B el código del algoritmo.



D. Mediciones de la pérdida por transmisión

Para obtener comportamientos similares de la pérdida por transmisión bajo el método establecido en el estándar con respecto a la curva teórica expuesta en la Fig 2 se llevaron a cabo diferentes pruebas que permitieron entender el comportamiento del sistema, hallando las anomalías presentes en éste. Las pruebas realizadas consistieron en un análisis del sistema, basado en la respuesta tanto de la caja acústica, como del sistema caja-tubo, medición de la coherente entre las señales, y mediciones preliminares en las cuales se variaban las diferentes configuraciones de la caja y del tubo, además una comparación entre diferentes niveles y las implicaciones de estos en los resultados.

Análisis del sistema (respuesta en frecuencia de la caja y del sistema tubo-caja)

El análisis del sistema se realizó por medio de las respuestas en frecuencia de cada una de las partes. Primero, se midió el comportamiento de la caja en su estado inicial, es decir, recubierta por Sonowall de Calorcol de 2 ½ pulgadas de espesor y densidad de 60 kg/m^3 como fue planteada en el anterior proyecto [39], luego se mide la caja modificada como un sistema aislado (caja con Frescasa de Fiberglass de 3 pulgadas de espesor y de 2.86 kg/m^3 de densidad para crear un sistema). Para la medición de la respuesta en frecuencia usó un micrófono de medición dBx RTA-M, un amplificador de potencia Crown XLS-202, una interfaz de audio (*m-track Eigh*) y ruido blanco generado desde Pro Tools 10HD y un algoritmo de procesamiento de señales para una transformada de Fourier (FFT). El proceso de medición se realizó en un cuarto con bajo ruido de fondo, se excitó la caja con ruido blanco y se ubicó el micrófono a un metro de distancia de la boquilla de ésta, se configuró la interfaz y el amplificador con el fin de obtener una buena relación señal a ruido, finalmente se procesó la muestra de audio mediante el algoritmo de FFT.

La segunda medición consto en medir el tubo de transmisión, acoplando caja y tubo para formar un solo sistema. Se ubicó el micrófono de medición en el extremo del tubo, formando un tubo abierto de 120 cm. Nuevamente la muestra de audio se procesó mediante un algoritmo de FFT.

Para obtener la respuesta en frecuencia del sistema se usó la función *tffestimate* de Matlab con su configuración de valores predeterminados. El código implementado para obtener los resultados de la respuesta en frecuencia se puede observar en el anexo C.

Medición de la coherencia de las señales.

La evaluación de la coherencia de las señales se realizó con dos muestras, tanto una porosa como una sólida para comparar con respecto al análisis de coherencia realizado en el anterior proyecto [39]. En este caso las muestras a evaluar fueron el *Black Theater* de 1 pulgada de espesor y el Yeso-Cartón de 5/8 pulgadas. En la Fig 9 se pueden observar las muestras de prueba.



La coherencia se calculó entre el micrófono de referencia (micrófono en localización 0) y el último micrófono a lo largo del tubo (micrófono en posición cuatro). Esto se realizó con el fin de verificar si las nuevas referencias propuestas permitían mejoras en la relación entre las señales captadas entre este par de micrófonos [38].

Para obtener los valores de coherencia se usó la función *mscohere* de Matlab y nuevamente se configuró con los valores predeterminados. El código con que se procesó la coherencia se puede observar en el anexo D.

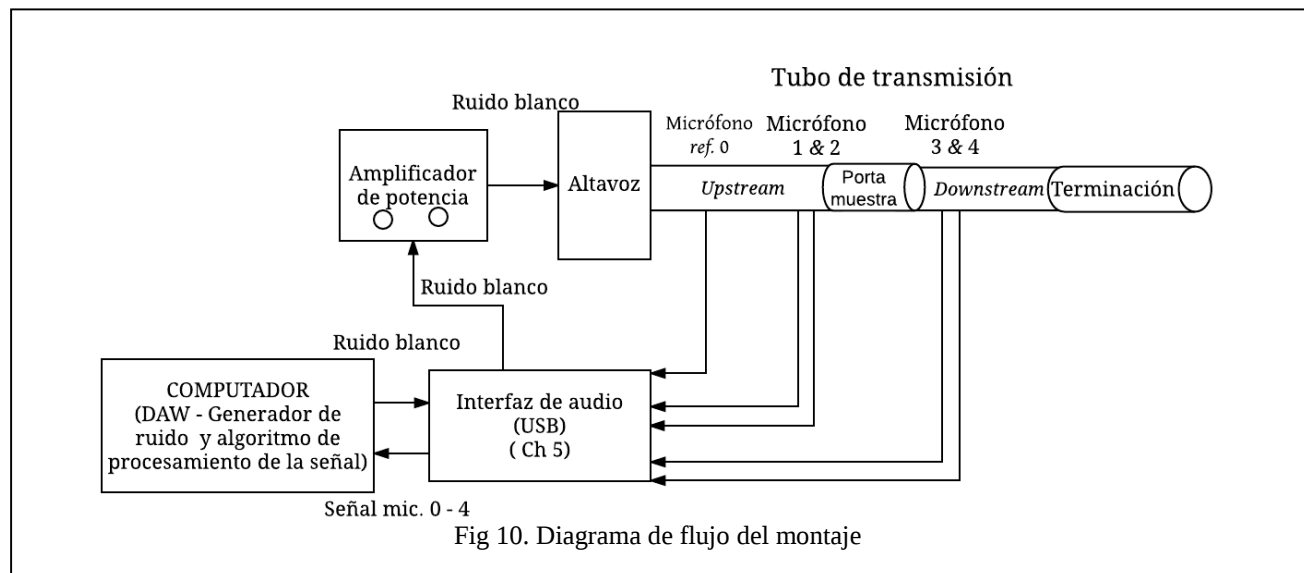
Mediciones preliminares (caracterización del sistema)

Para las mediciones preliminares se analizaron dos muestras (Fig 9) con diferentes configuraciones, esto con el fin de obtener resultados similares a los presentados en la teoría. Las configuraciones fueron:

- Mediciones con primera configuración de caja y tubo
- Medición con primera configuración del tubo y segunda de la caja
- Medición con segunda configuración de caja y tubo
- Implicaciones de la variación de nivel
- Magnitud y fase

Para realizar las mediciones iniciales se siguieron las recomendaciones establecidas en el estándar, éste recomienda que se garantice un nivel por encima de 10dB del ruido de fondo y los micrófonos de medición, en especial el micrófono más alejado de la muestra [2]. La señal con que se excitó el sistema es un ruido blanco proporcionado por el plug-in *Signal Generator* de Pro Tools 10HD. Se usó un amplificador de potencia, el cual iba conectado a los altavoces internos de la caja acústica. Para el registro de las señales se usó el DAW (*Digital Audio Workstation*) Pro Tools 10HD, y la interfaz de audio *m-audio Track Eight* de la marca *m-audio*, para obtener así la captura de 5 micrófonos de medición de manera simultánea. La captura de los datos se realizó con una frecuencia de muestreo de 44100Hz a 16 Bits, con una duración de audio de 10 segundos. Teniendo en cuenta que en el procesamiento se pueden cortar las muestras al tiempo deseado.

El diagrama de flujo de la señal puede observarse en la Fig 10.



Configuraciones de las pruebas preliminares

- Mediciones con primera configuración de caja y tubo.

Una de las pruebas a realizar es medir con las configuraciones iniciales, tanto para la caja como para el tubo, en este caso, se mide con el tubo perforado a 25 cm del origen (Fig 6.a) y la caja solamente acondicionada con el Sonowall.

- Medición con primera configuración del tubo y segunda de la caja.

Para la segunda medición se modifica la caja con un material absorbente con el fin de reducir anomalías presentadas en pruebas preliminares en rangos de frecuencia baja.

- Medición con segunda configuración de caja y tubo.

Para la tercera medición de prueba se modifica el tubo, en este caso el tubo tiene un orificio a 10 cm a partir del origen (Fig 6.b) y la caja ya se encuentra modificada con el material absorbente que reduce esos picos salidos del comportamiento teórico.

- Implicaciones de la variación de nivel.

Se midió el comportamiento de la variación de nivel y se mostraron las implicaciones de esta acción en los resultados de la pérdida por transmisión en la caja modificada y el tubo con primera configuración. Para esta medición se hicieron tres variaciones de nivel, estas diferenciaciones van entre el valor próximo a los 10 dB por encima del ruido de fondo, un nivel medio entre éste y la distorsión y finalmente uno próximo al punto de saturación. Estos se definieron respectivamente como bajo, medio y alto. Para esta prueba se utilizó yeso-cartón como muestra a evaluar.

- Gráficos de magnitud y fase

Por medio del coeficiente de transmisión se realizaron análisis del comportamiento de la magnitud y la fase de las señales procesadas para verificar si había anomalías con respecto a las curvas resultantes de pérdida por transmisión.

E. Mediciones y cálculo de otros parámetros acústicos

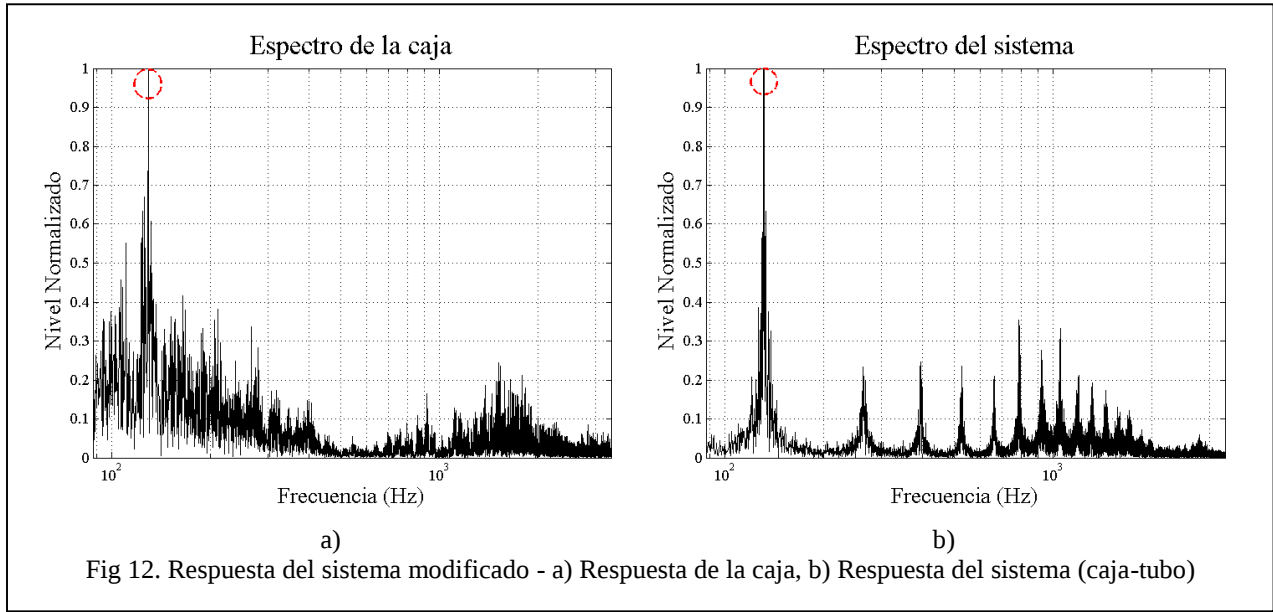
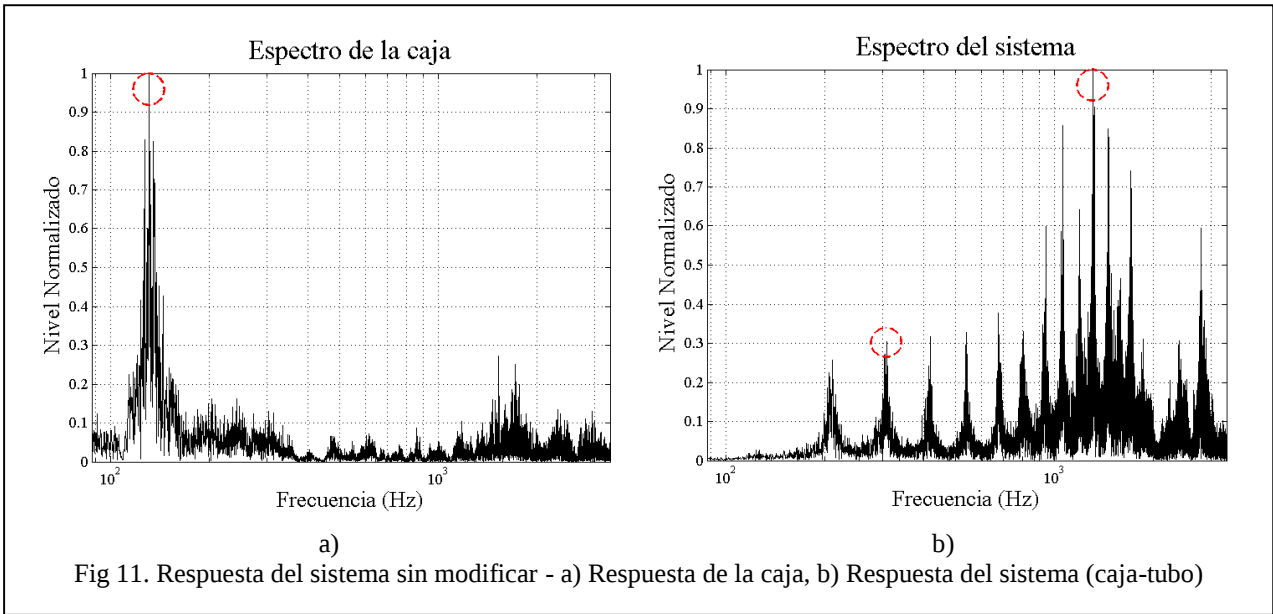
Luego de caracterizar el sistema, se diseñó un protocolo de medición establecido en la Tabla 2 para obtener valores de pérdida por transmisión y se realizaron las mediciones de los diferentes materiales que se encuentran en la Tabla 1. Las mediciones se llevaron a cabo con la primera configuración del tubo y la segunda configuración de la caja, esto se establece por medio de las evaluaciones preliminares.

Posteriormente, con los datos obtenidos en las mediciones de la pérdida por transmisión, se obtuvieron los demás parámetros acústicos. En este caso se compara la curva de absorción obtenida bajo el tubo de transmisión (TTL) con respecto a valores obtenidos bajo el método del tubo de ondas estacionarias (TOE) [40], siendo también estos coeficientes de absorción a incidencia normal, y para finalizar, se calculó el error porcentual entre ambos datos. La tabla de datos con los demás parámetros obtenidos se puede observar en el anexo E.

VII. RESULTADOS

A. Medición de la respuesta en frecuencia de la caja y del sistema caja-tubo

En las Figs 11 y 12 se presentan los resultados y comparaciones de las FFT de la caja y del sistema en conjunto (caja-tubo) antes y después de la modificación de la caja.



B. Medición de la coherencia entre señales

En la Fig 14 y Fig 13 se pueden observar los resultados obtenidos para la coherencia entre el micrófono de referencia en localización 0 con respecto al cuarto micrófonos para un material poroso y otro rígido antes y después de las modificaciones en la caja y en el tubo respectivamente.

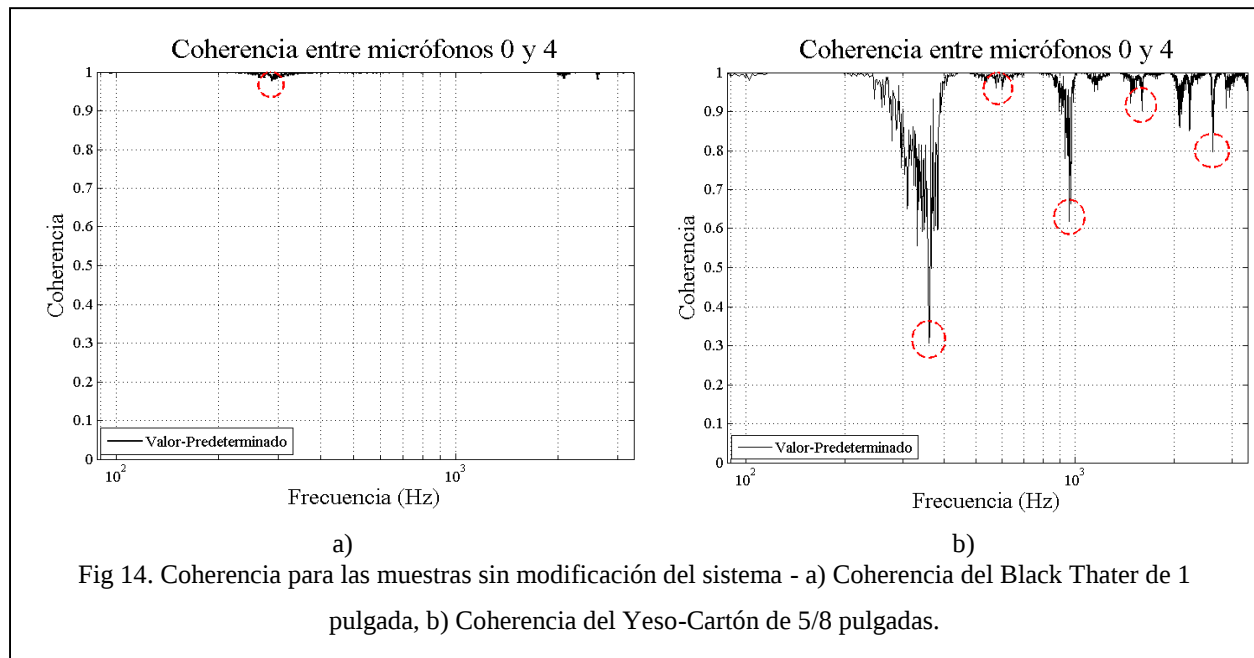


Fig 14. Coherencia para las muestras sin modificación del sistema - a) Coherencia del Black Thater de 1 pulgada, b) Coherencia del Yeso-Cartón de 5/8 pulgadas.

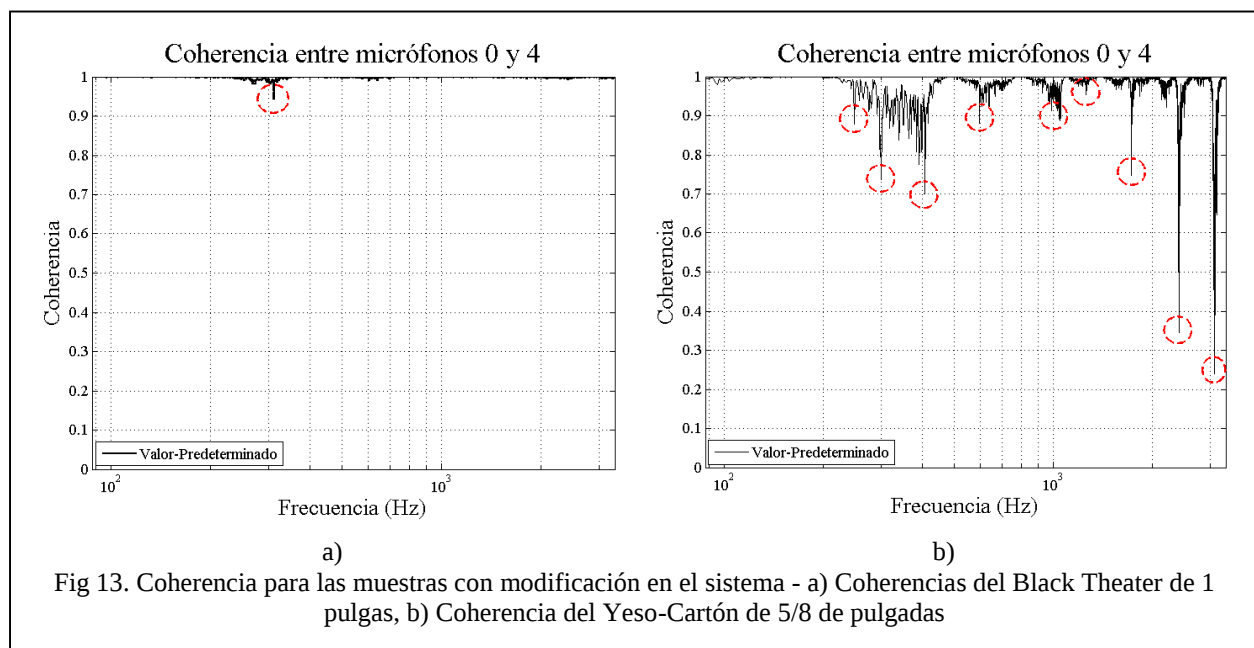


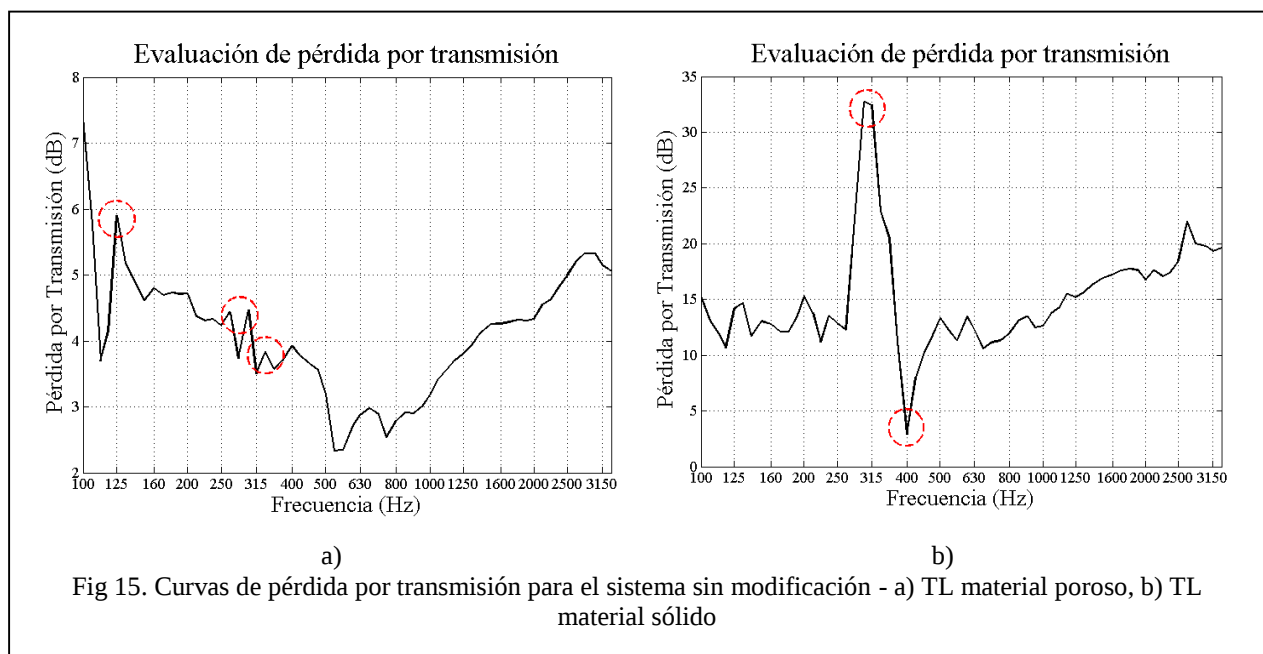
Fig 13. Coherencia para las muestras con modificación en el sistema - a) Coherencias del Black Theater de 1 pulgas, b) Coherencia del Yeso-Cartón de 5/8 de pulgadas

C Mediciones preliminares

En las secciones 6.3.1 a la 6.3.5 se presentan los diferentes resultados obtenidos tanto para el *Black Theater* como para el Yeso-cartón con las variaciones del sistema anteriormente mencionadas.

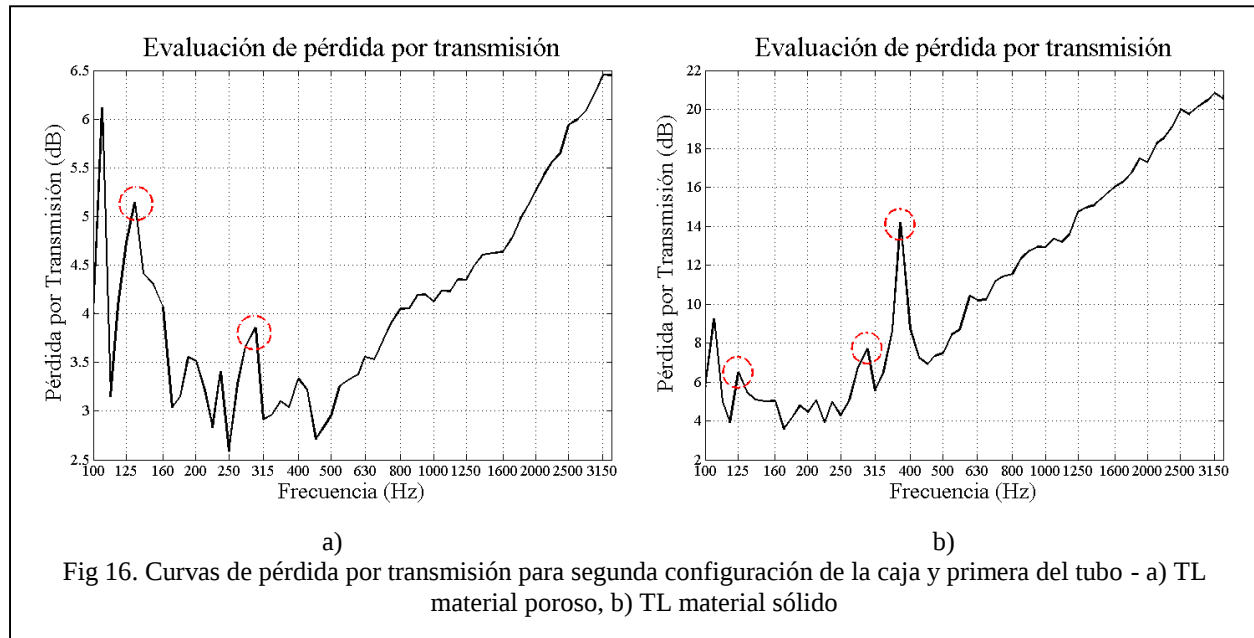
Medición sin modificación en la caja y primera configuración en el tubo

En la Fig 15 se pueden observar los valores obtenidos de pérdida por transmisión para ambos materiales con la primera configuración tanto de la caja como del tubo.



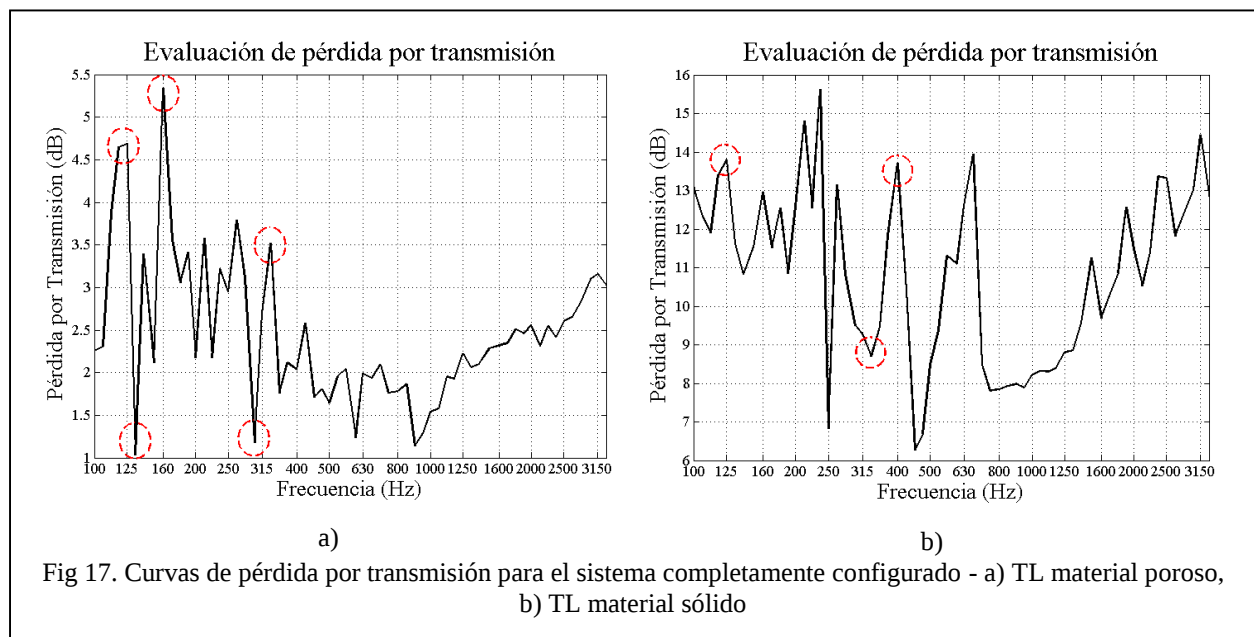
Mediciones con modificación en la caja y primera configuración del tubo

En la Fig 16 se pueden observar los valores obtenidos de pérdida por transmisión para ambos materiales con la segunda configuración en la caja y la primera en el tubo.



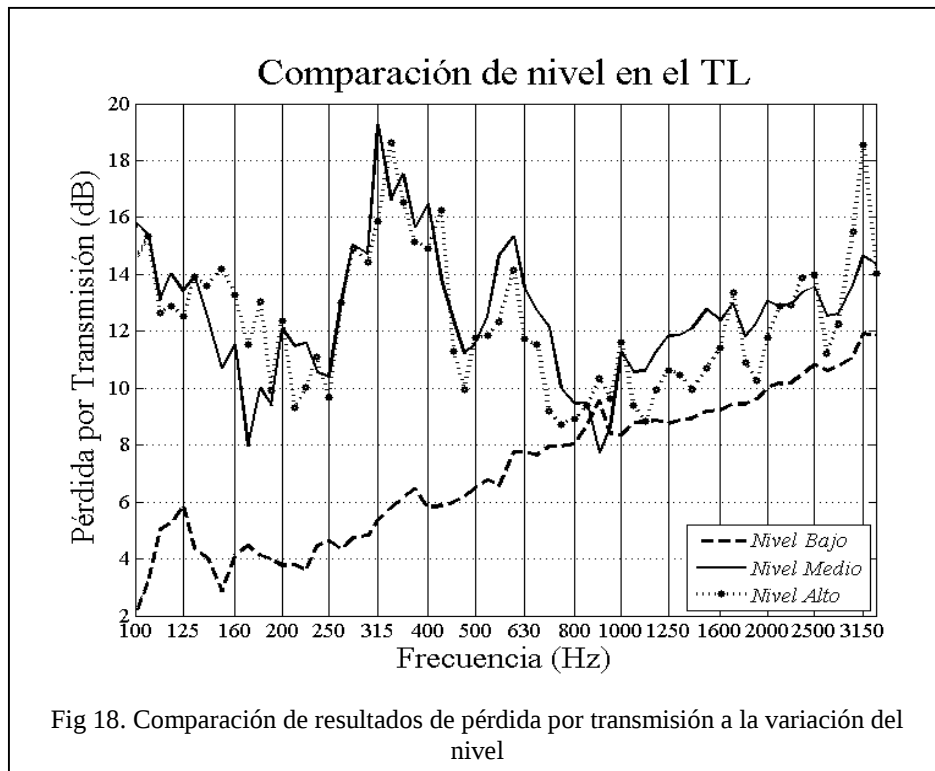
Mediciones con modificación en la caja y segunda configuración del tubo

En la Fig 17 se pueden observar los valores obtenidos de pérdida por transmisión para ambos materiales con la segunda configuración en la caja y en el tubo.



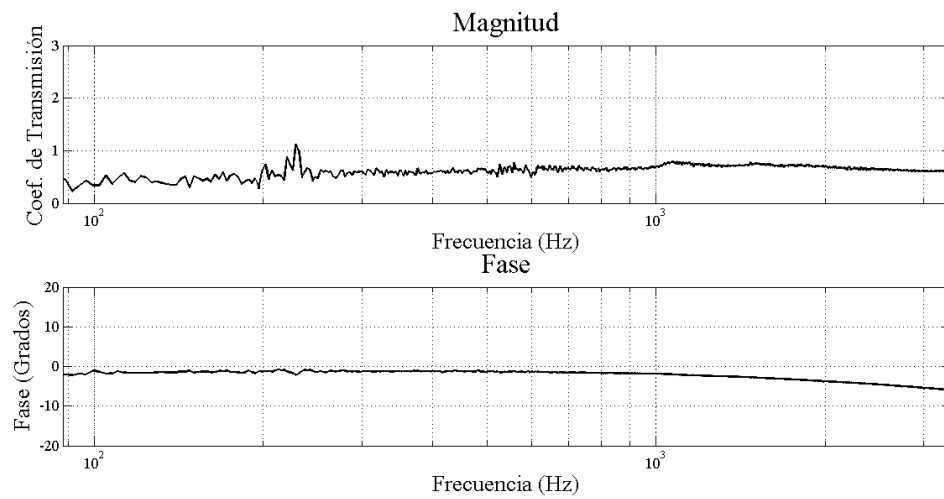
Medición de la implicación de la variación de nivel

En la Fig 18 se puede observar la comparación entre las curvas de pérdida por transmisión para el Yeso-cartón a niveles bajos, medios y altos.

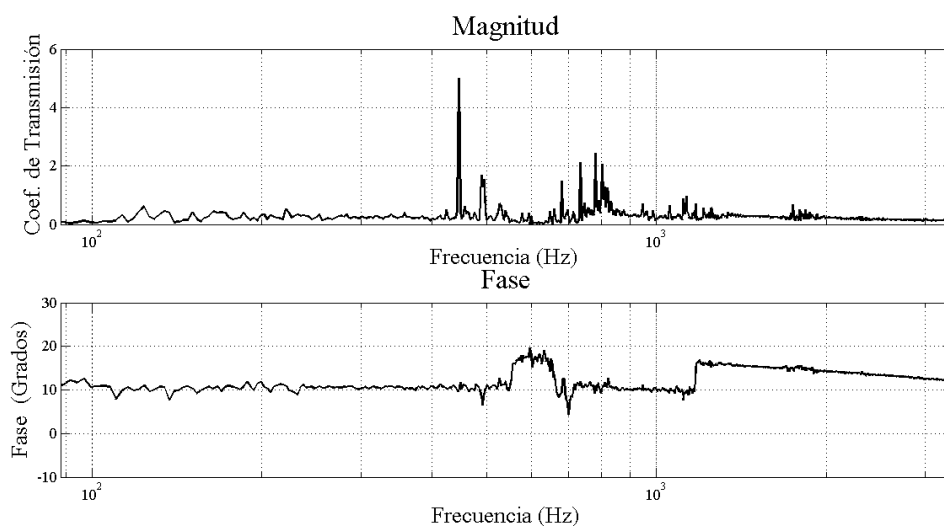


Gráficos de magnitud y fase

De acuerdo con las mediciones y resultados anteriormente expuestos se obtuvieron los gráficos de magnitud y fase para las dos primeras pruebas iniciales. Los resultados pueden verse en la Fig 19 y Fig 20.

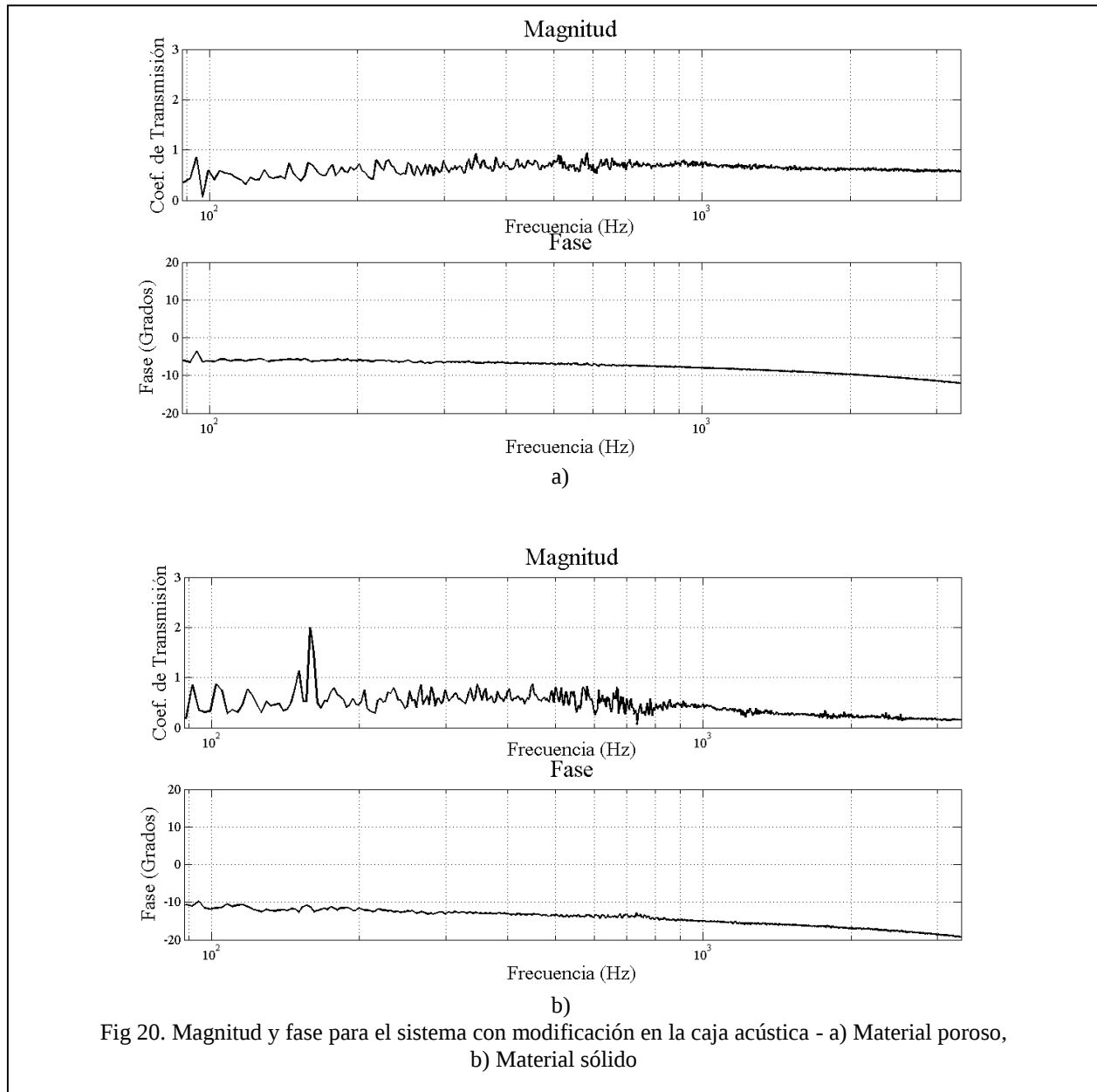


a)



b)

Fig 19. Magnitud y fase para el sistema sin modificación - a) Material poroso, b) Material sólido



D Mediciones de pérdida por transmisión

Por medio de las pruebas preliminares se desarrolló un protocolo de medición, este se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Protocolo de medición

Parámetro	Valor
Elementos	- Interfaz de audio (<i>m-track Eight</i>). - Amplificador de potencia Crown XLS-202. - 5 micrófonos de medición dbx. - DAW – Pro Tools 10HD. - Plug-in <i>Signal Generator</i> - Muestras con las mismas secciones transversales del tubo (sólidas y porosas).
Señal	Ruido blanco.
Terminación “a”	Material anecoico, terminación tipo AAR (anecoica sin respaldo – rígida) de Frescasa de Fiberglass de 1 pulgada + Sonowall de Calorcol de 2 ½ pulgadas.
Terminación “b”	Material rígido, terminación reflejante de madera de 15 mm de espesor.
Duración del archivo de audio	10 segundos.
Duración del procesamiento del audio	3 segundos.
Nivel	10 dB por encima del ruido de fondo para cada micrófono.
Frecuencia de muestreo	44100 Hz.
Temperatura ambiente	22 °C.
Densidad del aire	1.01 kg/m ³ .

El montaje utilizado en el proyecto y las diferentes terminaciones implementadas en las mediciones se pueden observar en las Figs 21 y 21 respectivamente.



Fig 22. Montaje de la medición



a)



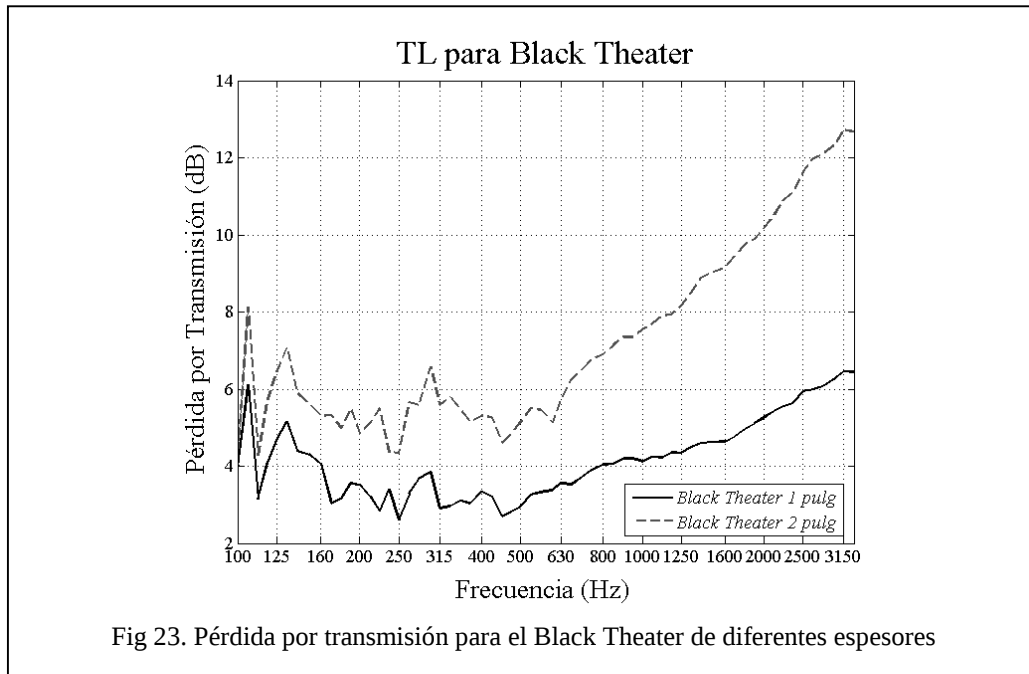
b)

Fig 21. Terminaciones implementadas - a) Cuña semi-anecoica (terminación a), b) Cuña de madera rígida (terminación b)

En la secciones de la 6.4.1 a la 6.4.4 se exponen los resultados de las mediciones de la pérdida por transmisión para los materiales de la industria colombiana encontrados en la Tabla 1 de la sección 5.2, obtenidos bajo el protocolo descrito en la Tabla 2. Los resultados se dividen en dos grupos, los resultados de materiales porosos y sólidos.

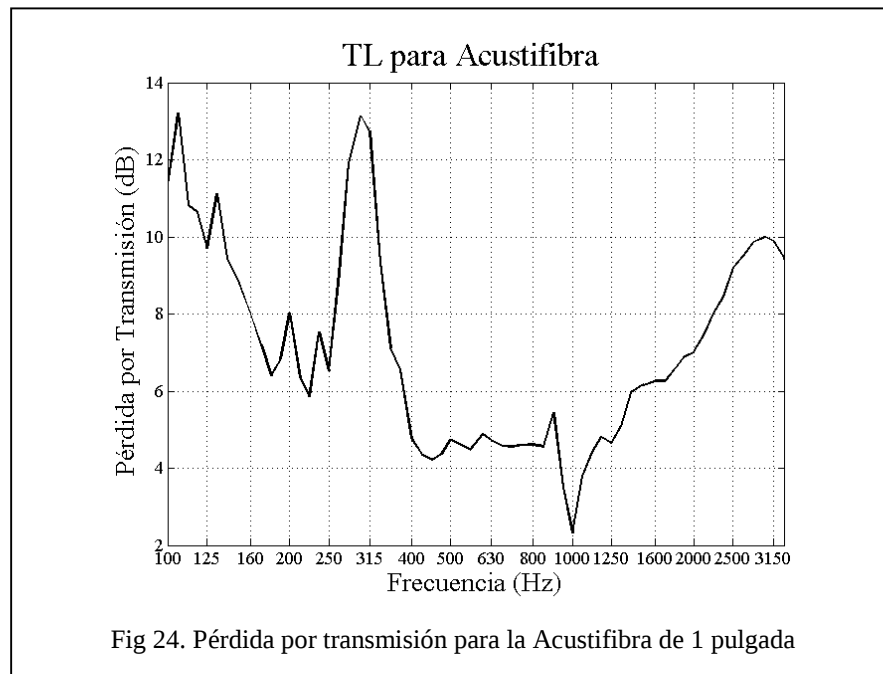
Pérdida por transmisión para el Black Theater

En la Fig 23 se encuentra la comparación entre las curvas de pérdida por transmisión medidas para el *Black Theater*, el cuál es un material absorbente que es presentado en la industria Colombia con dos espesores: 1 y 2 pulgadas.



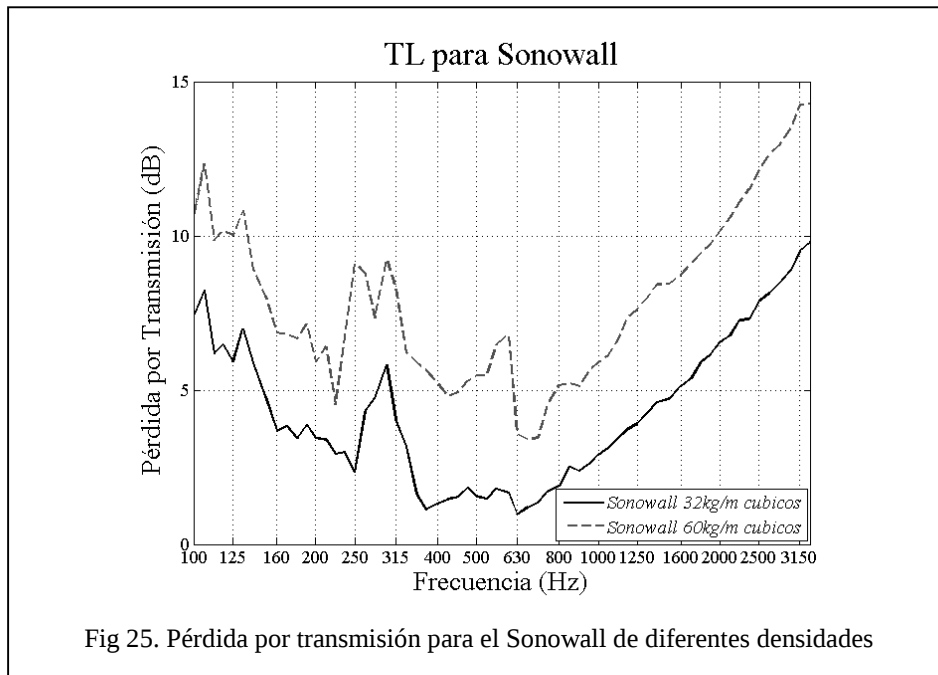
Pérdida por transmisión para el Acustifibra

En la Fig 24 se encuentra la curva de la pérdida por transmisión medida para la Acustifibra de 1 pulgada. Éste es presentado en la industria colombiana como un material absorbente pero denso.



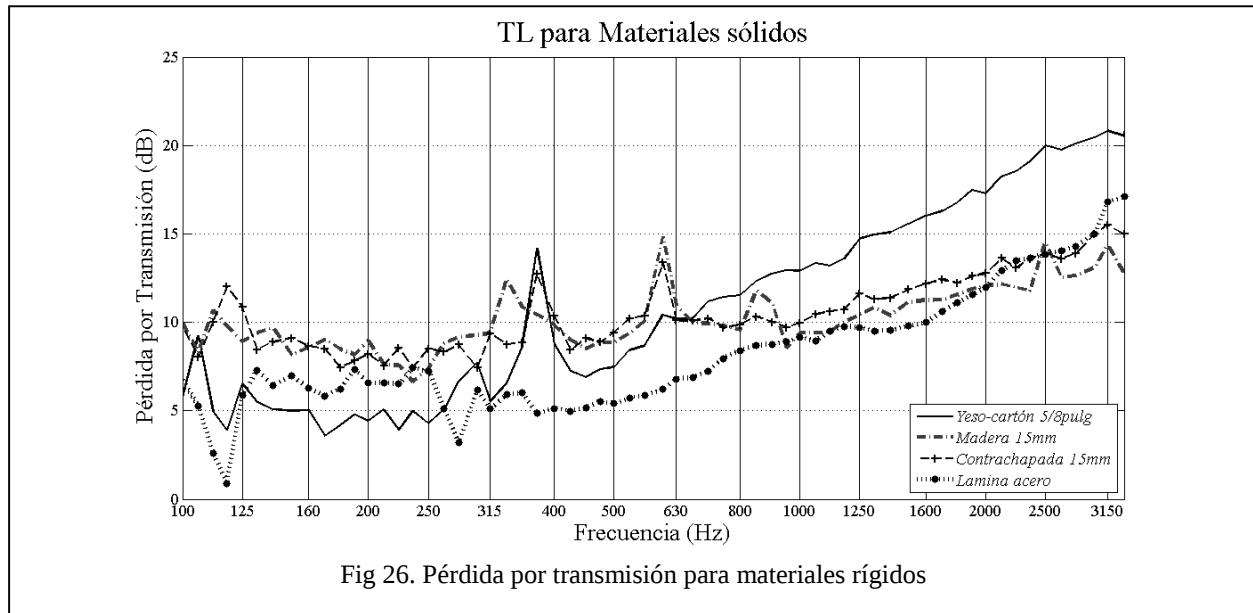
Pérdida por transmisión para el Sonowall

En la Fig 25 se encuentra la comparación entre las curvas de pérdida por transmisión medidas para el Sonowall. Éste es un material absorbente que es presentado en la industria Colombia con dos densidades: 32 y 60 kg/m³.



Pérdida por transmisión para materiales sólidos

En la Fig 26 se presenta la comparación entre las curvas de pérdida por transmisión medidas para los materiales sólidos. Entre estos están: madera de 15 mm de espesor, madera contrachapada con superficie lisa de 15 mm de espesor, yeso-cartón de 5/8 pulgadas, y lámina de acero de 0.22 mm de espesor.



E Curva del coeficiente de absorción de cada material

Por medio de la matriz de transferencia obtenida en cada medición se calculó el coeficiente de absorción para cada material. Los coeficientes de materiales porosos fueron comparados con los datos obtenidos mediante el método del tubo de ondas estacionarias,

Coefficiente de absorción para el Black Theater de 1 pulgada

En la Fig 27 se presentan las curvas del coeficiente de absorción medidos bajo la metodología del TOE y del TTL para el *Black Theater* de 1 pulgada, y en la Tabla 3 se pueden observar los datos de cada curva con el error porcentual entre estas.

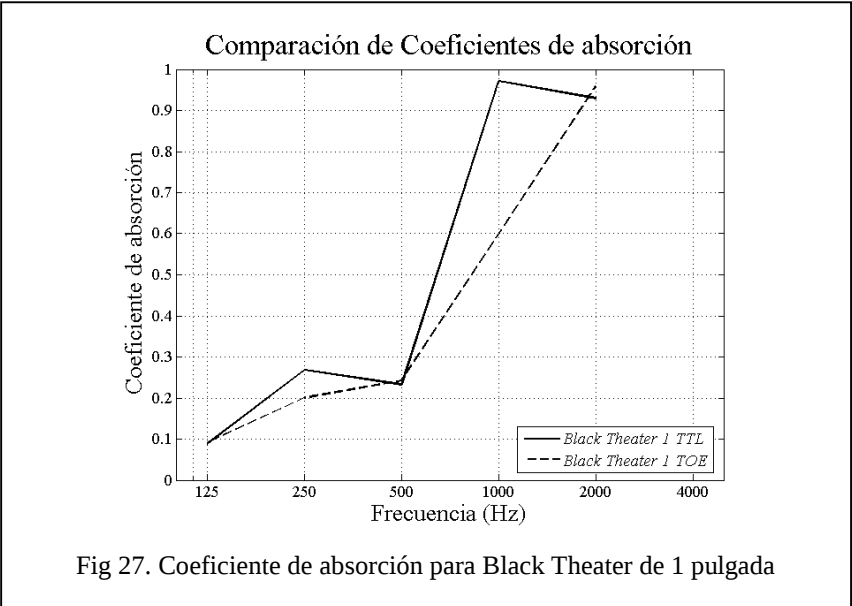


Tabla 3. Datos del coeficiente de absorción para el Black Theater de 1 pulgada

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
TOE	0,092	0,201	0,243	0,598	0,959	-	0,500
TTL	0,089	0,268	0,233	0,971	0,930	0,988	0,601
Diferencia porcentual (%)	3,3	33,5	4,1	62,3	3,0	-	20,0

Coeficiente de absorción para el Black Theater de 2 pulgadas

En la Fig 28 se presentan las curvas del coeficiente de absorción medidos bajo la metodología del TOE y del TTL para el *Black Theater* de 2 pulgadas, y en la Tabla 4 se pueden observar los datos de cada curva con el error porcentual entre estas.

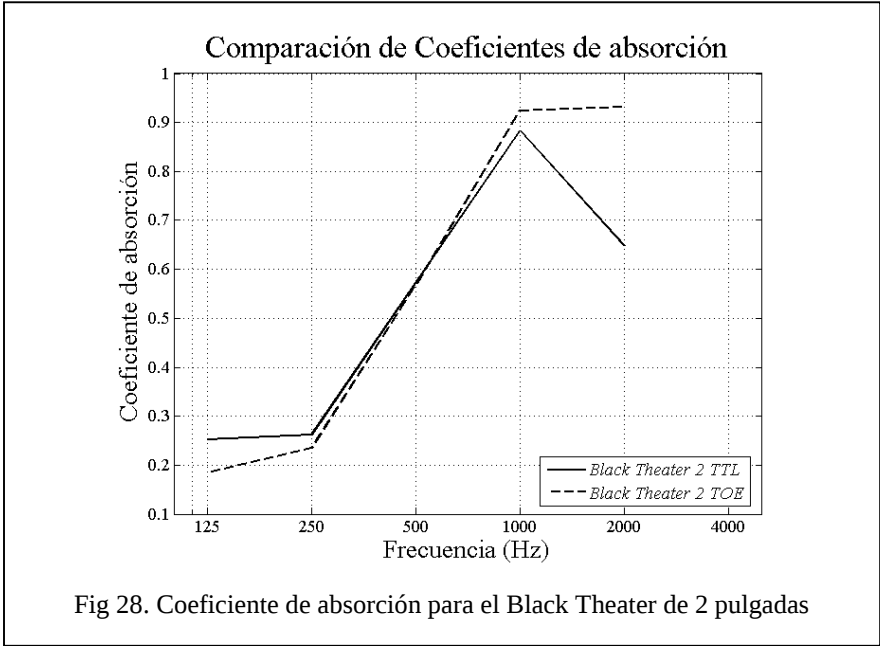


Tabla 4. Datos del coeficiente de absorción para el Black Theater de 2 pulgadas

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
TOE	0,185	0,235	0,567	0,924	0,932	-	0,665
TTL	0,252	0,262	0,572	0,882	0,648	0,871	0,591
Diferencia porcentual (%)	36,1	11,4	0,9	4,5	30,5	-	11,1

Coeficiente de absorción para el Acustifbra de 1 pulgada

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las curvas del coeficiente e absorción medidos bajo la metodología del TOE y del TTL para el Acustifibra de 1 pulgada, y en la Tabla 5

Tabla 5. Datos del coeficiente de absorción para la Acustifibra de 1 pulgada

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
TOE	0,093	0,132	0,291	0,598	0,692	-	0,428
TTL	0,075	0,183	0,146	0,649	0,625	0,922	0,401
Diferencia porcentual (%)	19,7	38,8	49,9	8,5	9,7	-	6,4

Coefficiente de absorción para el Sonowall de 32 kg/m³

En la Fig 29 se presentan las curvas del coeficiente de absorción medidos bajo la metodología del TOE y del TTL para el Sonowall de 32 kg/m³ de densidad, y en la Tabla 6 se pueden observar los datos de cada curva con el error porcentual entre estas.

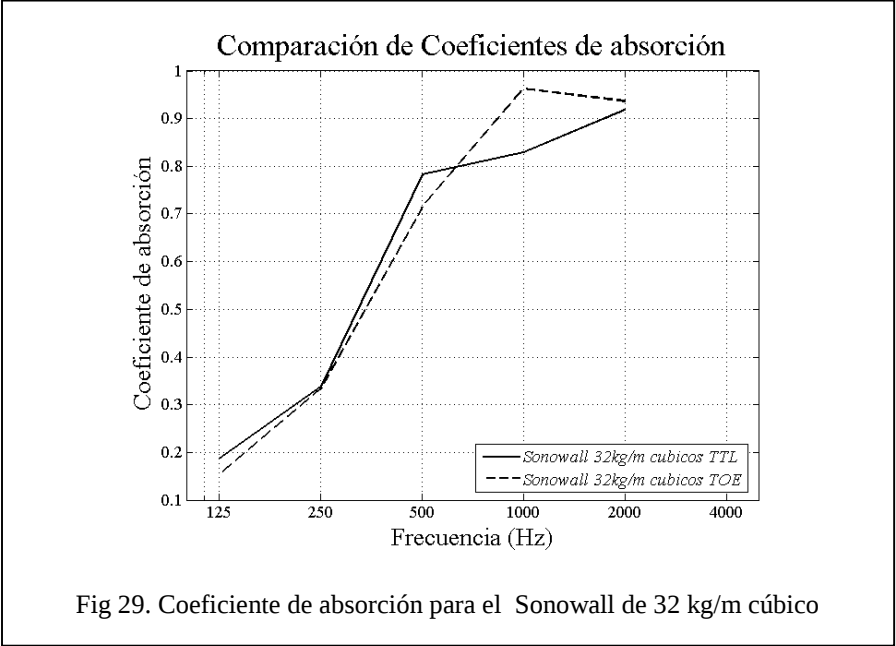


Tabla 6. Datos del coeficiente de absorción para el Sonowall de 32 kg/m cúbico

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
TOE	0,153	0,334	0,714	0,963	0,937	-	0,737
TTL	0,187	0,338	0,783	0,829	0,918	0,910	0,717
Diferencia porcentual (%)	22,0	1,3	9,6	14,0	2,0	-	2,7

Coefficiente de absorción para el Sonowall de 60 kg/m³

En la Fig 30 se presentan las curvas del coeficiente de absorción medidos bajo la metodología del TOE y del TTL para el Sonowall de 60 kg/m³ de densidad, y en la Tabla 7 se pueden observar los datos de cada curva con el error porcentual entre estas.

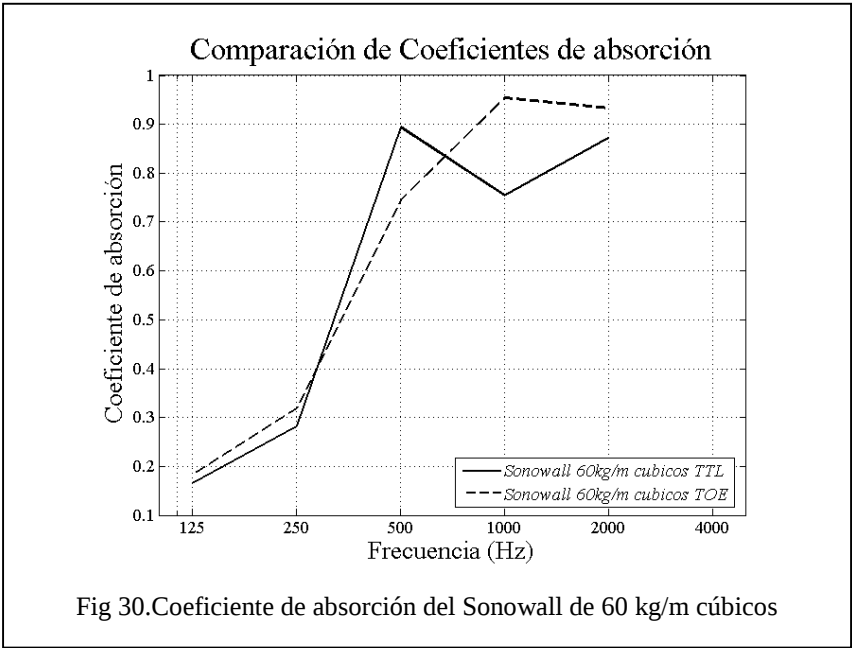


Tabla 7. Datos del coeficiente de absorción para el Sonowall de 60 kg/m³ cúbicos

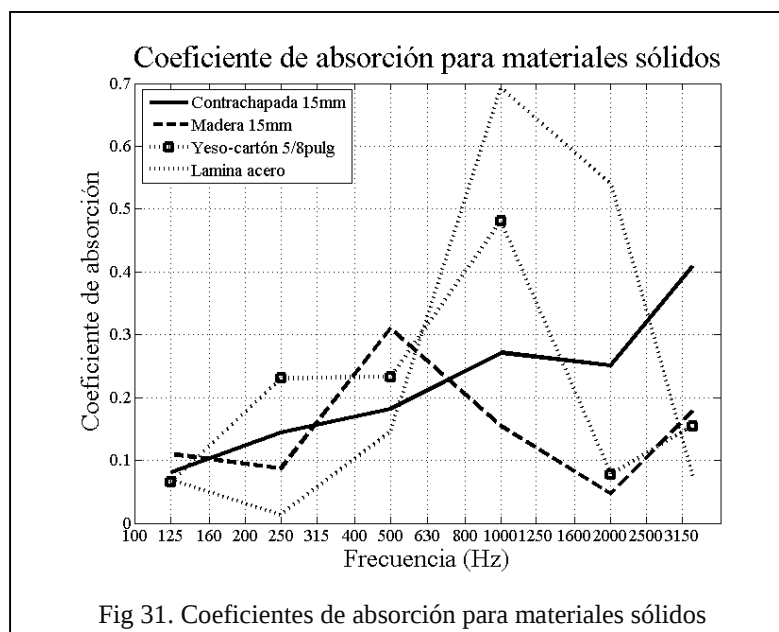
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
TOE	0,183	0,319	0,744	0,954	0,933	-	0,738
TTL	0,165	0,282	0,894	0,755	0,872	0,954	0,701
Diferencia porcentual (%)	9,8	11,6	20,2	20,8	6,6	-	5,0

Coefficiente de absorción para materiales sólidos

En la Fig 31 se presentan las curvas del coeficiente de absorción para los materiales sólidos obtenidas bajo la metodología del TTL, y en la Tabla 8 se pueden observar los datos de cada curva.

Tabla 8. Datos de los coeficientes de absorción para materiales sólidos

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	3350
Material	<i>Madera contrachapada con cubierta lisa de 15 mm</i>					
α	0,081	0,144	0,182	0,271	0,251	0,409
Material	<i>Madera de 15 mm</i>					
α	0,110	0,087	0,310	0,155	0,047	0,179
Material	<i>Yeso-Cardón de 5/8 pulgadas</i>					
α	0,065	0,231	0,233	0,481	0,078	0,155
Material	<i>Lamina de acero de 0.22 mm</i>					
α	0,068	0,013	0,146	0,693	0,540	0,073



VIII. DISCUSIÓN

En la Fig 11.a y Fig 12.a se tienen las respuestas en frecuencia de la caja antes y después de su modificación. Se puede observar que al haber añadido un material absorbente para reducir aparentemente la distancia entre los altavoces y disminuir la energía en los extremos, el comportamiento en frecuencia de la caja es similar al de la caja sin modificar. Ambas respuestas presentan un pico en 131,3 Hz para la caja sin modificación y de 129,3 Hz para la caja modificada. Estas frecuencias con picos altos de energía aparecen en los gráficos de pérdida por transmisión tanto para materiales porosos como sólidos, por lo que asume que la calibración de magnitud y fase no tiene efecto sobre dichas frecuencias.

Al observar las respuestas en frecuencia en los espectros de ambas configuraciones del sistema presentes en las Fig 11.b y Fig 12.b, se ve que el comportamiento del sistema antes y después de la modificación de caja-tubo es diferente, se observa que la energía se ha desplazado, esto se da por el cambio en el uso de un material que no tiene mucha absorción en baja frecuencia, pero alta a partir de 300 Hz y por el desplazamiento del orificio en el tubo. Por otro lado, en la Fig 12.b se ve un pico de energía en frecuencias bajas al igual que el de la caja. Esto puede ser motivo por el cual hay irregularidades de nivel en frecuencias bajas en los resultados de las mediciones de pérdida por transmisión obtenidos con la caja y el tubo modificados (Fig 17).

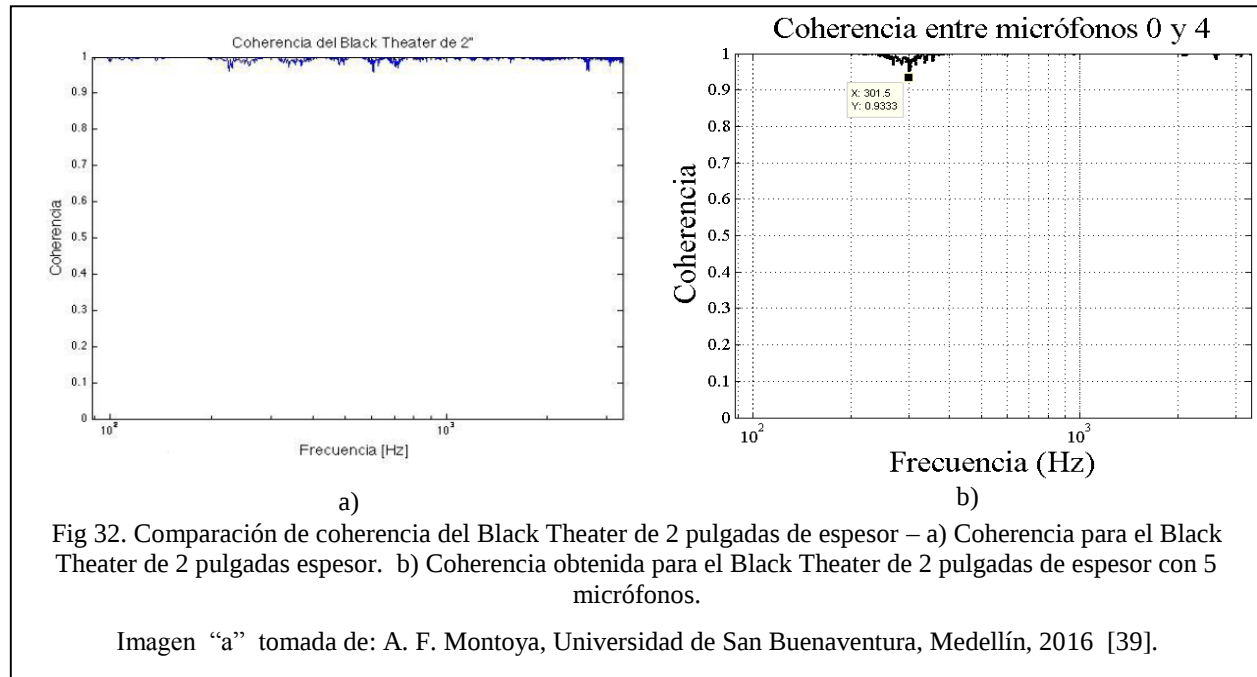
Inicialmente la coherencia se presenta baja en algunas frecuencias que se encuentran alrededor de 300 a 400 Hz y sus armónicos aproximadamente, estas irregularidades presentes y tan marcadas en los valores de coherencia expuestos en las gráficas de la Fig 14 se deben a un factor de distancia, en este caso es la que separa los altavoces dentro de la caja, dicha distancia es de 0,25 m, la cual se encuentra dentro del rango de un cuarto de longitud de onda de las frecuencias con problemas de coherencia, este rango va desde 301,5 Hz hasta 359,3 Hz aproximadamente (valores tomados en las gráficas de la Fig 14), dando un rango en longitud de 0,24 m a 0,28 m en el que se pueden presentar modos dentro del sistema caja-tubo. Se analizó que en cada cara del altavoz se poseen máximos de presión sonora y en el punto donde se conecta el tubo (punto medio entre ambas caras) recibe un mínimo de presión para dicho rango de frecuencias. Este caso se solucionó mediante

uso de material absorbente al interior de la caja para reducir la distancia aparente. De esto viene el desarrollo de las diferentes configuraciones para el sistema.

Para la alteración de la caja se tiene un cambio de 0,25 m a aproximadamente 0,127 m con una relación de reducción en distancia de 0,508. Como se mencionó, la coherencia al comienzo presenta irregularidades en frecuencias alrededor de la banda 300 Hz y sus armónicos, pero al ser comparados con respecto a los datos dados por el cambio realizado en el sistema estas anomalías se disminuyen y se aumenta la coherencia tanto para materiales porosos como sólidos (comparación entre la Fig 14 y Fig 13).

En la Fig 14 se encuentran las gráficas obtenidas para la coherencia del sistema sin alteración alguna tanto para material absorbente como rígido, y en la Fig 13 se observan igualmente la coherencia pero en este caso para caja acústica modificada. Al comparar las imágenes para los materiales porosos de ambas figuras se notan valores de incoherencias, éstas se dan en frecuencias bajas medias, alrededor de 250 a 310 Hz. En la Fig 14.a se observa un valor de coherencia mínima de 0.979 en 288 Hz y para la gráfica de coherencia del mismo material de la Fig 13, se tiene un valor de 0.944 en 310.9 Hz. De igual forma al comparar las gráficas de materiales sólidos de cada figura se tienen incoherencias en el rango de frecuencias de 250 a 400 Hz y en los armónicos de los picos máximos. Para el material rígido presente en la Fig 14 se tiene un pico máximo de 0.307 de incoherencia en la frecuencia de 359.3 Hz y para el mismo material en la Fig 13 se tienen dos valores próximos, uno de 0.737 en la frecuencia de 300.1 Hz y otro de 0.701 en la frecuencia de 407.8 Hz. Por medios de las relaciones se puede decir que el uso de material absorbente con coeficientes de absorción mayor al 50% en las frecuencias entre 300 Hz en adelante en la caja permite una mejora en la coherencia de ambos materiales pero el efecto de reducción es más notable en materiales sólidos.

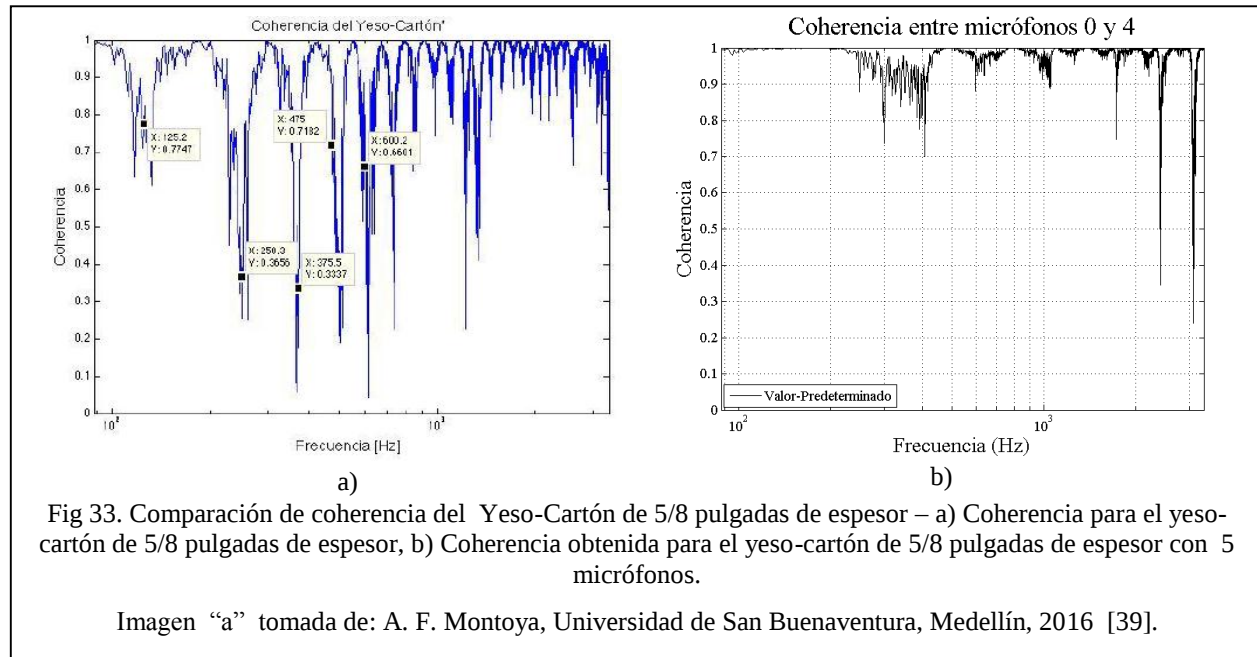
Al comparar el *black theater* de 2 pulgadas con el del trabajo que llevo a cabo el diseño del sistema [39], se puede observar que se tienen respuestas similares con respecto a la coherencia entre el micrófono de referencia en posición cero y el cuarto micrófono obtenida bajo el sistema con modificación en la caja acústica.



En la Fig 32 se puede observar que el comportamiento de la coherencia entre las señales para el *Black Theater* de 2 pulgadas se encuentra reducida para la mayor parte del espectro, excepto para la banda de 300 Hz, exactamente en 301.5 Hz, en ésta se encuentra una incoherencia más representativa siendo esta de 0.933, un valor próxima al valor esperado de 1.

Para los materiales sólidos se observó que la coherencia entre las señales ha mejorado al compararse con los resultados obtenidos en anterior proyecto [39]. La mejora se presenta en la reducción de valores incoherentes en las gráficas, en este caso se logró tener más señal directa (sin reflexiones) para luego compararla con la señal que era captada por el micrófono en la posición 4, es decir, luego de que la señal se transmitiera al otro lado del material.

También se realizó la comparación gráfica de la coherencia obtenida en materiales sólidos, en este caso la muestra utilizada es el yeso-cartón. En la Fig 33 se ve la comparación entre la respuesta obtenida en el proyecto que diseñó el sistema [39] y la gráfica obtenida mediante el método de cinco micrófonos en el tubo de transmisión.



La comparación de las gráficas de la Fig 33 muestra picos en la respuesta que se alejan del valor esperado de 1. En el caso del anterior proyecto los principales valores de baja coherencia se daban en las frecuencias de 125,2Hz, 250Hz, 375.5Hz, 475Hz y 600Hz. En cambio para los resultados obtenidos en este proyecto las incoherencias provenían de los primeros valores de incoherencia presentes y en algunos de sus armónicos. Estos valores iniciales eran 249 Hz, 300.1 Hz y 407.8 Hz. De esta forma se puede ver que el rango de frecuencias afectadas disminuye y éstas que contienen irregularidades en la coherencia pueden generar anomalías para los resultados de pérdida por transmisión.

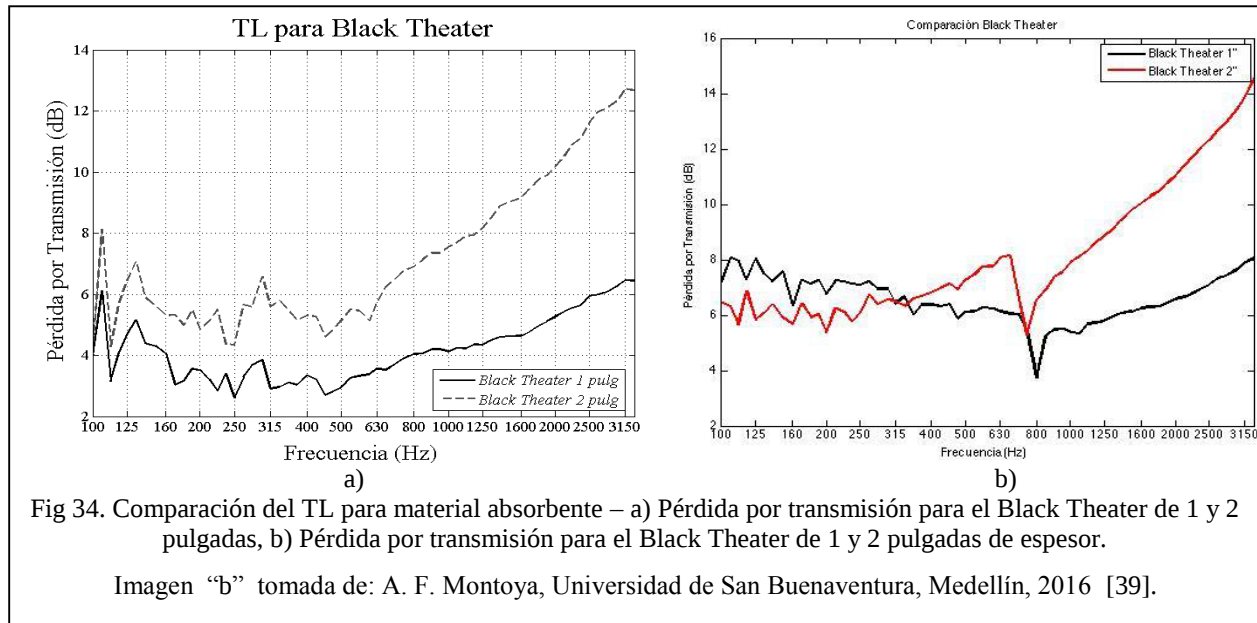
En las gráficas de pérdida por transmisión obtenidas en el sistema sin modificación se pueden observar alteraciones entregadas por el sistema y que también se resaltaron en el análisis de coherencia. Las gráficas anteriormente mencionadas se pueden observar en la Fig 15. En donde la Fig 15.a muestra la pérdida por transmisión para el material absorbente, éste presenta un comportamiento aproximado al propuesto en la teoría (véase Fig 2). Aunque en la gráfica de pérdida por transmisión se observa un comportamiento extraño en frecuencias aproximadas a la frecuencia con mayor energía generada por la caja y en frecuencias obtenidas con incoherencia. De igual forma para la Fig 15.b tiene una irregularidad notoria, ésta se aproximadamente en la

frecuencia con mayor incoherencia encontrada en la Fig 14.b. Esta puede darse por la igualdad en la longitud de onda que se tienen para estas frecuencias afectadas con respecto a la distancia entre los altavoces en la caja y la localización de micrófono de referencia. Por esto mismo se recomendaron y realizaron las modificaciones al sistema, para lograr reducir dichas anomalías presentes para el material rígido.

La gráfica para el material absorbente presenta nuevamente anomalías, pero en este caso disminuidas. Las frecuencias en donde presenta estos comportamientos son en la de 132 Hz y 300 Hz, las cuales se encuentran presentes en la respuesta de la caja y la gráfica de coherencia para dicho material. Por otro lado, en la muestra rígida se contraen los picos encontrados en la Fig 15.b

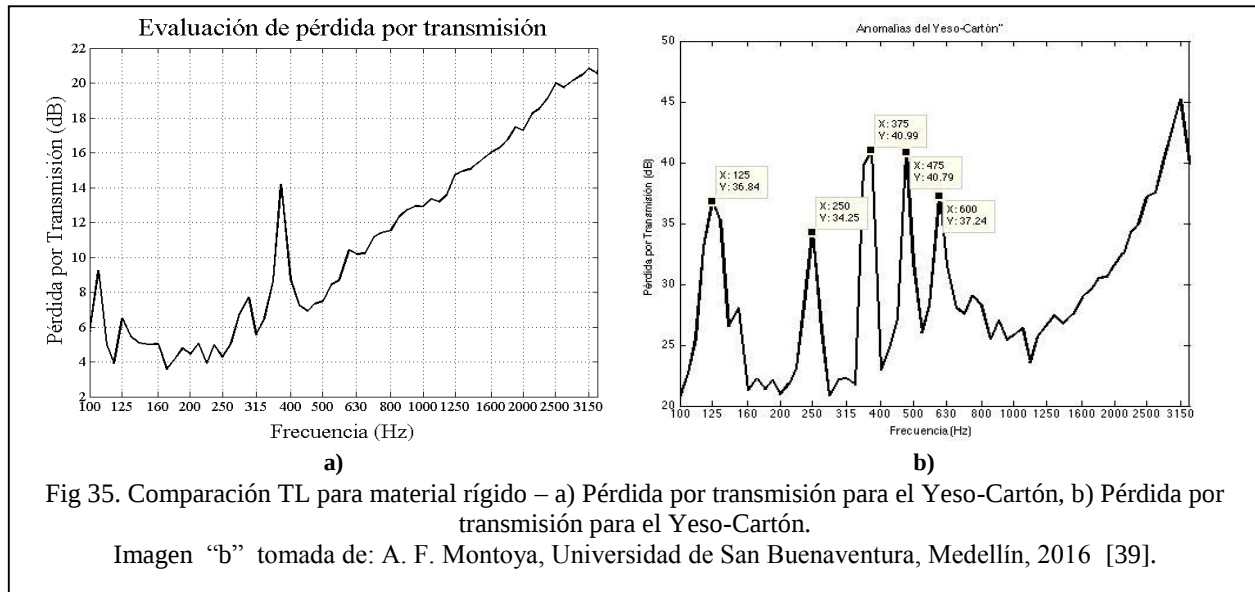
Para la última medición de prueba con cambios en el sistema se obtuvieron los resultados de la Fig 17. Las mediciones se realizaron teniendo un sistema modificado tanto en la caja como en el tubo. Para el material absorbente se presentan nuevamente anomalías en frecuencias medias bajas, de igual forma se presenta un comportamiento aproximado al teórico, aunque se siguen notando las afectaciones generadas por las frecuencias fundamentales y los armónicos obtenidas en el análisis de la coherencia y del sistema; la gráfica obtenida del material rígido se presenta un comportamiento irregular con respecto al teórico. Al comparar con el análisis de coherencia, se observa nuevamente que las frecuencias afectadas más sus armónicos se ven representadas en los resultados de pérdida por transmisión para los materiales rígidos con la tercera configuración del sistema.

Al momento de comparar los resultados, se puede decir que las gráficas que presentan menos número de alteraciones son las obtenidas bajo mediciones con modificación únicamente de la caja acústica. Estas son comparadas con los resultados obtenidos en el anterior proyecto [39].



En la Fig 34 se tiene una comparación entre los resultados obtenidos entre el proyecto que diseñó el sistema y el actual proyecto, en ésta se ve que en frecuencias bajas alrededor de 132 Hz y 300 Hz se presenta poca estabilidad en los datos obtenidos actualmente, mientras que para frecuencias altas se da una inclinación con mayor pendiente por octava con respecto a la referencia del anterior proyecto. Con respecto al nivel de la pérdida de transmisión, se observó que el nivel es menor, en este caso se aproximan más las frecuencias altas, específicamente de 1 kHz hasta 3150 Hz, se presenta una diferencia alrededor de 2 dB, mientras que para frecuencias bajas entre los 100 Hz y 250 Hz, se dan cambios aproximados de 4 dB. Para frecuencias medias entre 315 Hz a 800 Hz se presentan diferentes variaciones de nivel entre las gráficas de ambos proyectos.

Además de los materiales absorbentes, también se comparan los materiales rígidos. Dicha comparación se puede observar en la Fig 35.



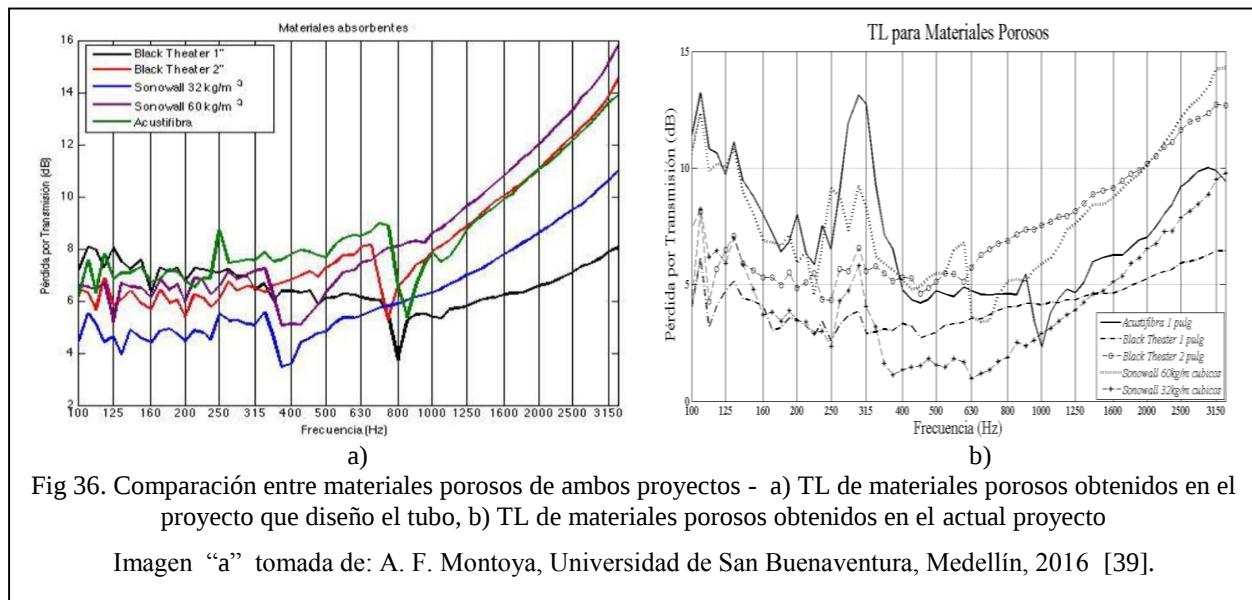
Se puede observar que la pérdida por transmisión obtenida en el actual proyecto para un material rígido presenta un comportamiento más parecido al esperado. Al comparar las dos gráficas obtenidas en la Fig 35 se ve que el nivel de la Fig 35.a presenta menos picos con respecto a la Fig 35.b. En la pérdida de transmisión obtenida actualmente se presenta una irregularidad debida a una igualdad de cuartos de longitud de onda de la caja y el tubo. Mientras que la pérdida por transmisión del anterior proyecto tiene variaciones en las frecuencias entre 100 Hz a 600Hz, es decir anomalías en un rango de frecuencias más amplio (frecuencias bajas y medias). Y con respecto al nivel se observa que las dos gráficas presentan valores diferentes, con variaciones entre los 20 y 30 dB, dependiendo la banda de frecuencia.

También se llevó acabo el análisis de la influencia de los cambios de nivel al medir las muestras para el cálculo de la pérdida por transmisión. En la Fig 18 se observa una comparación entre tres niveles diferentes y de la cual se puede decir que al aumentar el nivel, mucho más allá de los 10 dB encima del ruido de fondo, los resultados se irán viendo afectados, ya que resaltarán frecuencias que tienen alteraciones generadas por el sistema. Es por esto que el nivel aproximado a los 10 dB del ruido fondo fue el más apropiado para realizar las mediciones.

Por otro parte, se analizó la magnitud y fase de cada uno de los materiales con las modificaciones del sistema y sin ellas. De esto se pudo observar que la fase en el caso de ambos materiales con el

sistema modificado se encuentra alterada por el comportamiento de las ondas dentro del tubo y las posiciones de cada uno de los micrófonos que captan las señales a analizar. Estos cambios en la fase también se presentan en la magnitud del coeficiente de transmisión con el cual se calcula posteriormente la pérdida por transmisión. Se puede decir que la corrección de ambas variables que se realizó no fue totalmente acertada. Ya que en los resultados finales de pérdida por transmisión se encuentran comportamientos fuera de lo común para algunas frecuencias dados por el sistema y no corregidas por la calibración inicial de cada medición.

Para los resultados de pérdida por transmisión se realizaron gráficas para materiales porosos por cada uno de ellos y su par. De estos se obtuvo que la Fig 34, la cual contiene las curvas de pérdida por transmisión para el *Black Theater* de 1 y 2 pulgadas de espesor tiene un comportamiento similar con la obtenida en el anterior proyecto. En ambas gráficas se muestra que al aumentar una propiedad física como el espesor de la muestra, se aumenta su nivel de pérdida por transmisión, este efecto también se evidencia en la Fig 25, donde se encuentra las curvas de pérdida por transmisión para el Sonowall de diferentes densidades. Otro factor que se analizó en el *Black Theater* es la comparación con respecto al nivel, las curvas de transmisión tienen una variación en frecuencias altas-medias de 2 dB aproximadamente y en frecuencias bajas-medias entre 3 a 4 dB.



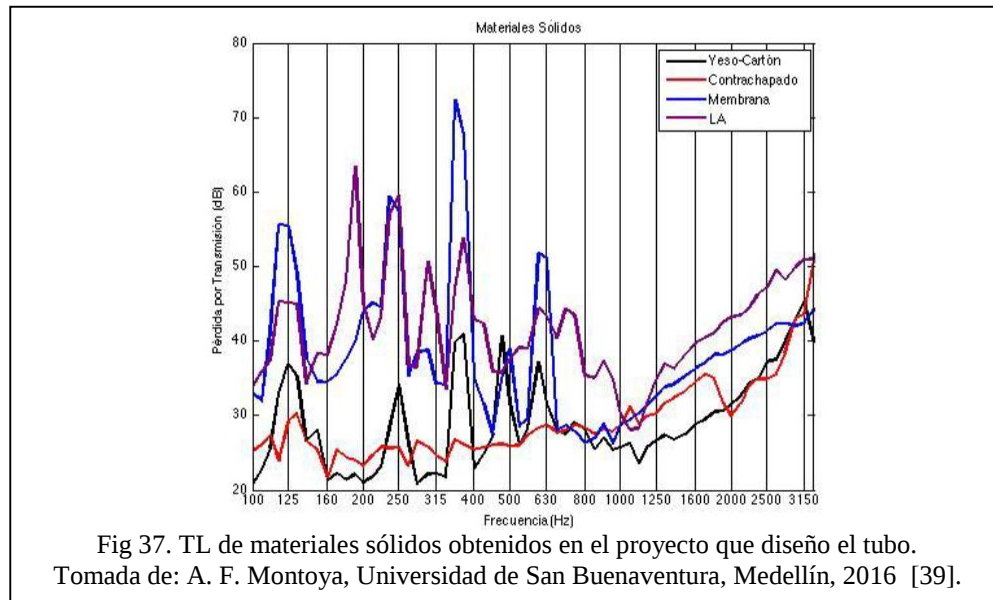
La comparación de todos los resultados de los materiales porosos con respecto al proyecto que diseño el tubo puede verse en la Fig 36.

De acuerdo con los resultados de la Fig 36 se puede decir que las curvas presentan comportamientos similares, donde se dan variaciones de nivel entre 2 a 4 dB dependiendo del rango de frecuencia que se esté analizando. Como es el caso de las frecuencias a partir de 400 Hz a los 3150 Hz y de 100 Hz a 250 Hz. En el rango entre los 250Hz y 400, se presenta una regularidad entre la mayoría de los materiales, la única curva que se presenta con un comportamiento extraño, es la Acustifibra, la cual presenta un realce notable en el nivel de la pérdida por transmisión para la frecuencia alrededor de la banda de 315 Hz con respecto a las demás curvas de la Fig 36.b, teniendo en cuenta que cada curva de la gráfica presenta el mismo realce de una forma más moderada. Esto puede deberse a deformaciones internas del material, ya que la muestra se dividió en medio de las mediciones.

Posteriormente, se realizó el mismo análisis para materiales sólidos. Las curvas de pérdida por transmisión de los materiales sólidos del actual proyecto pueden verse en la Fig 26 y los resultados del proyecto que diseño el sistema se encuentran en la Fig 37. Se puede observar que las gráficas obtenidas bajo la nueva metodología planteada de una nueva señal de referencia y modificaciones en el sistema permiten obtener valores más suavizados en frecuencias bajas y medias, teniendo una tendencia de aproximación a la curva teórica. En algunos materiales se ven anomalías dadas por el comportamiento del sistema y visualizadas en el análisis de coherencia como es el caso del yeso-cartón y la madera contrachapada, estos presentaron un realce en el nivel de pérdida por transmisión en la frecuencia de 375 Hz, de igual forma pasa con la madera, para ésta la frecuencia con problemas se encuentra en los 335 Hz y se repite en aproximaciones de su primer armónico en 600 Hz al igual que para la madera contrachapada. En el caso de la lámina de acero la resonancia no se da de una forma tan notoria pero de igual manera se encuentra presente en la frecuencia de 300 Hz.

En la Fig 37 se dan niveles de hasta 70 dB y 60 dB en el caso de algunos materiales en sus rangos de frecuencia medio-bajos. Para las curvas de Fig 26 se presentan niveles máximos de 20.52 dB en la frecuencia más alta y en frecuencias medias y bajas se dan valores aproximados entre los 5 y 10

dB. Otra observación que se puede realizar es que las curvas de la Fig 26 se encuentran similares entre ellas, mientras que las de la Fig 37 son más dispersas.



Se obtuvieron también parámetros acústicos, entre ellos el coeficiente de absorción a incidencia normal. Éste fue comparado bajo un análisis de diferencia porcentual con coeficientes de absorción acústica obtenidos bajo el método del tubo de onda estacionaria [40]. Para los materiales porosos se presentaron porcentajes por debajo del 50% para todas las frecuencias. En la mayoría de los casos los datos obtenidos para frecuencias altas se presentaban más confiables o similares a las muestras de referencia. Las frecuencias bajas mostraban mayor porcentaje de error, especialmente entre las bandas de 250 y 500 Hz, las cuales contienen el rango de frecuencias con irregularidades dadas por el sistema. Analizando coeficiente de reducción acústica, se tienen valores entre el 2,7% y 20%, el material que mejores resultados presenta es el *Sonowall* de ambas densidades y el material que presenta el comportamiento más variado es el *Black Theater* de 1 pulgadas, las variaciones en el material pueden darse por fugas dentro de éste, deformación o desplazamiento de la muestra durante la medición. Por otro lado, los datos para los materiales sólidos presentados en la Fig 31 tienen bajos coeficientes de absorción por sus altas densidades y superficies rígidas o lisas que presentan altos coeficientes de reflexión (véase Tabla 10). En materiales como la lámina de acero que se presenta un incremento en el coeficiente de absorción para frecuencias altas entre 1k

Hz y 2k Hz puede ser debido al poco espesor de la muestra y desplazamiento de ésta dentro del porta muestra.

IX. CONCLUSIONES

La modificación del sistema en general permitió obtener resultados de pérdida por transmisión aproximados al comportamiento teórico (curva teórica presentada en la Fig 2). La mejora se da en frecuencias medias-bajas, logrando suavizar el comportamiento de este parámetro acústico principalmente en materiales de tipo sólido con respecto a los datos alcanzados en el proyecto que llevo a cabo el desarrollo el sistema. La modificación también llevó a obtener un cambio en la coherencia de señales de los micrófonos con la implementación del quinto micrófono como una nueva referencia, esto permitió una mejora en las funciones de transferencia que estimaron los parámetros acústicos de los diferentes materiales. De igual manera los materiales porosos o absorbentes siguieron presentando una coherencia mayor con respecto a los materiales sólidos, los cuales poseen coeficientes de reflexión altos que alteraban o cambiaban la señal de referencia que se encontraba en los primeros micrófonos. También se dieron alteraciones en un rango de frecuencias entre los 300 a 400 Hz, las cuales fueron atribuidas al comportamiento del sistema caja-tubo, el cual se modificó logrando así la reducción de anomalías en las curvas de pérdida de transmisión.

Se implementó un protocolo de medición que permitió mantener la trazabilidad en las mediciones y así evitar los efectos que traen los cambios de las variables como el nivel, el tiempo de captura y procesamiento, la temperatura y la densidad del aire en las mediciones de la respuesta del sistema y en la curvas de pérdida por transmisión de los diferentes materiales.

El método de medición permitió calcular diferentes parámetros acústicos, entre ellos se obtuvo la pérdida por transmisión, la impedancia característica del material y los coeficientes de transmisión, reflexión y absorción. El coeficiente de absorción fue comparado con respecto a los datos obtenidos en un tubo de onda estacionaria, obteniendo una diferencia alrededor del 2,7 % al 20 % para materiales absorbentes en sus bandas de frecuencias medias (valores de NRC). Además, se tiene que el comportamiento de ésta variable en los materiales rígidos se encuentra acorde a lo esperado, donde se presentan altos coeficientes de reflexión y bajos de absorción por las propiedades físicas de cada material como la densidad, espesor y tipo superficie.

El método de la matriz de transferencia pudo relacionarse con diferentes parámetros acústicos, por ejemplo la pérdida por transmisión en los materiales que se presenta de forma confiable por medio de la aplicación del método, de igual éste permite calcular coeficientes de absorción para materiales porosos con porcentajes de error no muy elevados en la totalidad de su espectro, asemejándose a los obtenidos con otros métodos estandarizados.

REFERENCIAS

- [1] International Organization for Standardization , «ISO 10534-1 - Acoustics -- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 1: Method using standing wave ratio,» 1996.
- [2] Association for Testing Materials, «ASTM E2611 - 09 : Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method,» 2009.
- [3] L. L. Beranek, acústica (acoustics), Buenos Aires : Hispano Americana S. A. , 1969 .
- [4] P. F. Pereira, Manual de acústica, ruido y vibraciones, Barcelona : Creado en traspaso del hp, 1990.
- [5] P. K. Musso, «Análisis de la eficiencia de la ponderación "A" para evaluar efectos del ruido en el ser humano,» Universidad Astral de Chile, Valdivia , 2004.
- [6] L. E. Kinsler, a. R. Frey, a. B. Coppens y j. V. Sanders, Fundamentals of acoustics, New Jersey: Ohn Wiley and Sons, inc., 2000.
- [7] M. R. López, Acústica arquitectónica aplicada, Madrid : Paraninfo , 1999.
- [8] M. Long, Architectural acoustics, San Diego, California : Elsevier Academic Press, 2006.
- [9] D. A.bies y c. H.hansen, Engineering noise control - Theory and practice - Second edition, New York : Spon Press, 1996.
- [10] D. T. Blackstock, Fundamentals of physical acoustics, New Jersey: John wiley and Sons, inc, 2000.
- [11] F. F. Y. P. Gardonio, Sound and structural vibration: rdiation, transmission and response, 2 ed., Oxford: Academic Press, 2006.

- [12] D. Cahan, «From dust figures to the kinetic theory of gases: august kundt and the changing nature of experimental physics in the 1860s and 1870s,» *Annals of science*, vol. 47, nº 2, pp. 151-172, 1990.
- [13] J. Ramisa, r. D. Reyb, j. Albab, l. Godinhoc y j. Carbajoa, «A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber,» Universidad de Alicante; Universitat Politècnica de València; University of Coimbra, 2013.
- [14] International Organization for Standardization, «ISO 10534-2 - Acoustics -- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 2: Transfer-function method,» 1998.
- [15] J. S. Bolton, t. Yoo y o. Olivieri, «Measurement of normal incidence transmission loss and other acoustical properties of materials placed in a standing wave tube,» 2007.
- [16] J. S. Bolton, r. Yun, j.pope y d. Apfel, «Development of a new sound transmission test for automotive sealant materials,» 1997.
- [17] J. S. Boltonb y o. Olivier, «Measurement of transmission loss of materials using a standing wave tube,» Inter-Noise, Honolulu, 2006.
- [18] P. A. Moya, Sistemas y señales, fundamentos matemáticos, Cartago, 2010.
- [19] J. G. Proakis y d. G. Manolakis, Digital signal processing, principles, algorithms, and applications. Third edition, New Jersey : Prentice-Hall inc, 1996.
- [20] D. A. Bies y c. H. Hansen , Engineering noise control: Theory and practice, 4 ed., New York: crc press, 2009.
- [21] A. Chodos, «aps.org,» American Physical Society, [en línea]. Available: <https://www.aps.org/publications/apsnews/201101/physicshistory.cfm>.
- [22] A. C. Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona : UPC, 1998 .

- [23] D. Cueva y c. García, «Desarrollo de una metodología de medición para la determinación de coeficientes de absorción y σ de materiales para la construcción en ecuador, por medio de un tubo de impedancia y mediciones in situ.,» Quito , 2014.
- [24] International Organization for Standardization , «ISO 354 - Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room,» 2003.
- [25] American Society for Testing Materials , «ASTM E90-04: Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements.,» 2004.
- [26] International Organization for Standardization , «ISO 140-3: Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements,» 1995.
- [27] International Organization for Standardization , «ISO 10140-1: Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements -- Part 1: Application rules for specific products,» 2010.
- [28] Association for Testing Materials, «ASTM E1050 - 08: Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System,» 2008.
- [29] J. Kunio, t. Yoo, k. Hou y j. Enok, «A comparison of two and four microphone standing wave tube procedures for estimating the normal incidence absorption coefficient,» Inter-Noise, Ottawa, 2009.
- [30] O. Doutres, r. Panneton y y. Salissou, «An additional configuration to standard astm e2611-09 for measuring the normal incidence sound transmission loss in a modified impedance tube,» Acoustics, Nantes, 2012.
- [31] X. Hua y d. Herrin, «Practical considerations when using the two-load method to determine the transmission loss of mufflers and silencers,» 2013.

- [32] J. Chung y d. Blaser, «Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory,» *Acoustical Society of America*, vol. 68, nº 3, p. , 1980.
- [33] J. Chung y d. Blaser, «Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. Ii. Experiment,» *Acoustical Society of America*, vol. 68, nº 3, 1980.
- [34] Association for Testing Materials, «ASTM E1050-98,-10,-12 - Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system,» 1998, 2010, 2012.
- [35] E. J. Sanchis, «Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica,» Universidad Politécnica de Valencia , Alcoy, 2008.
- [36] C. Lee y y. Wang, «A prediction method of the acoustical properties of multilayered noise control materials in standing wave-duct systems.,» *Journal of Sound & Vibration.* , vol. 298, nº 16, pp. 350-365, 2006.
- [37] D. Leea y y. Kwonb, «Estimation of the absorption performance of multiple layer perforated panel systems by transfer matrix method,» *Journal of Sound and Vibration*, 2004.
- [38] F. A. Machuca tzili, «desarrollo de un sistema de medición de aislamiento sonoro en incidencia normal,» Facultad de Ingeniería UNAM, México D.F., 2011.
- [39] A. F. Montoya, «Desarrollo y caracterización de un sistema de medición con base en el estándar astm e2611-09 para la determinación de la pérdida por transmisión de materiales de la industria colombiana.,» Universidad de San Buenaventura, Medellín, 2015.
- [40] A. M. Jaramillo, «Reporte de práctica sobre la caracterización de materiales acústicos,» Universidad de San Buenaventura, Medellín, 2015.

ANEXOS

A Coeficientes de absorción de la Frescasa de 3 pulgadas de espesor de Fiberglass

En la Tabla 9 se presentan los coeficientes de absorción de la Frescasa de 3 pulgadas de la marca Fiberglass obtenidos bajo la metodología del tubo de ondas estacionarias (TOE) [40].

Tabla 9. Coeficiente de absorción de la Frescasa de 3" bajo el método de TOE

Frecuencia (Hz)	α (TOE)
125	0,224
160	0,377
200	0,348
250	0,357
315	0,548
400	0,696
500	0,864
630	-
800	0,981
1000	0,995
1250	0,992
1600	0,952
2000	0,964
2500	0,949
3150	-

B Algoritmo desarrollado en Matlab para el cálculo de la pérdida por transmisión y otros parámetros acústicos

```
% CÁLCULO DE LA MATRIZ DE TRANSFERENCIA Y PÉRDIDA POR TRANSMISIÓN (TL)
%-----
%Reiniciar variables
clear all
clc
%-----
% Elección del folder
disp('Seleccione el material de la muestra');
```

```

disp('1) Black Teather de 1 pulgada');
disp('2) Black Teather de 2 pulgadas');
disp('3) Acustifibra de 1 pulgada');
disp('4) Sonowall con densidad de 32 kg/m^3');
disp('5) Sonowall con densidad de 60 kg/m^3');
disp('6) Madera Contrachapada de 15 mm');
disp('7) Madera de 15 mm');
disp('8) Yeso-Carton de 5/8 pulgadas');
disp('9) Acero de calibre 22');

material = input('Registre número correspondiente a la muestra: ');

% Se obtiene las diferentes muestras de acuerdo con el material a evaluar
% cd('NewFolder') Change current folder

if material == 1
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda vez\BLACK
    TEATHER 1\black theater 1 1')

elseif material == 2
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda vez\BLACK
    TEATHER 2\Black Theater 2 1')

elseif material == 3
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda
    vez\ACUSTIFIBRA\acustifibra 1')

elseif material == 4
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda
    vez\SONOWALL d32\sonowall 32 1')

elseif material == 5
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda
    vez\SONOWALL d60\sonowall d60')

elseif material == 6
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda vez\MADERA
    CONTRACHAPADA CON RECUBIERTA LISA\Madera C lisa 1')

elseif material == 7
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda
    vez\MADERA\Madera')

elseif material == 8
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda vez\YESO -
    CARTÓN\Yeso carton 1')

elseif material == 9
    cd('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda vez\ACERO 22')

end
%-----
% Datos de entrada y variables del montaje

```

```

Seg = input('Valor en segundos para la duración de la muestra (1s a 6s): ');
fs = 44100; % Frecuencia de muestreo
Largo_Muestra = fs*Seg; % Se obtiene un tiempo x muestra para trabajar con vectores de igual longitud

Temperature = input('Valor en grados de la temperatura del ambiente: ');

C = 20.047*((273.15 + Temperature)^(1/2)); % Velocidad de propagación del sonido en función de la temperatura

densidad = input('Valor de la densidad del aire para la presente medición: ');

s1=0.041; % Distancia entre micrófonos 1 y 2
l1=0.025; % Distancia entre micrófono 2 y muestra

d= input('Valor en metros del espesor de la muestra: '); % Espesor de la muestra

l2=l1; % Distancia entre micrófono 3 y muestra
s2=s1; % Distancia entre micrófonos 3 y 4

%-----% Muestras obtenidas para la terminación a - con
material

% Capturas con muestra en terminación anecoica.
M0Ca = wavread('M0Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 0 con muestra terminación a
M1Ca = wavread('M1Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 1 con muestra terminación a
M2Ca = wavread('M2Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 2 con muestra terminación a
M3Ca = wavread('M3Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 3 con muestra terminación a
M4Ca = wavread('M4Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 4 con muestra terminación a

% Igual en la longitud para cada muestra.
M0Ca = M0Ca(1:Largo_Muestra);
M1Ca = M1Ca(1:Largo_Muestra);
M2Ca = M2Ca(1:Largo_Muestra);
M3Ca = M3Ca(1:Largo_Muestra);
M4Ca = M4Ca(1:Largo_Muestra);

%-----
% Muestras obtenidas para la terminación b - con material

% Capturas con muestras en terminación rígida.
M0Cb = wavread('M0Cb.wav'); %Lectura de señal micrófono 0 con muestra terminación b
M1Cb = wavread('M1Cb.wav'); %Lectura de señal micrófono 1 con muestra terminación b
M2Cb = wavread('M2Cb.wav'); %Lectura de señal micrófono 2 con muestra terminación b
M3Cb = wavread('M3Cb.wav'); %Lectura de señal micrófono 3 con muestra terminación b
M4Cb = wavread('M4Cb.wav'); %Lectura de señal micrófono 4 con muestra terminación b
% Igual en la longitud para cada micrófono.
M0Cb = M0Cb(1:Largo_Muestra);
M1Cb = M1Cb(1:Largo_Muestra);
M2Cb = M2Cb(1:Largo_Muestra);
M3Cb = M3Cb(1:Largo_Muestra);
M4Cb = M4Cb(1:Largo_Muestra);

%-----
%Cambio de Folder

```

```

cd ('D:\Usuario\Desktop\Mediciones proyecto de grado\Medicion TL - caja modificada segunda vez')
%se cambia de folder para obtener los datos en común (datos de calibración)

%-----
% Muestras obtenidas para la terminación a - sin material

% Capturas sin muestras en terminación anecoica.
M0Sa = wavread('M0Sa.wav'); %Lectura de señal micrófono 0 con muestra
M1Sa = wavread('M1Sa.wav'); %Lectura de señal micrófono 1 con muestra
M2Sa = wavread('M2Sa.wav'); %Lectura de señal micrófono 2 con muestra
M3Sa = wavread('M3Sa.wav'); %Lectura de señal micrófono 3 con muestra
M4Sa = wavread('M4Sa.wav'); %Lectura de señal micrófono 4 con muestra

% Igual en la longitud para cada muestra.
M0Sa = M0Sa(1:Largo_Muestra);
M1Sa = M1Sa(1:Largo_Muestra);
M2Sa = M2Sa(1:Largo_Muestra);
M3Sa = M3Sa(1:Largo_Muestra);
M4Sa = M4Sa(1:Largo_Muestra);

%-----
% Muestras con respecto al micrófono en la posición 0 (referencia)

% Capturas sin muestras con cambios de posición para realizar la corrección de magnitud y fase.
M0_P1a= wavread('M0P1.wav'); %Lectura de señal del micrófono 0 en la posición 1 Sin muestra
M1_P0a= wavread('M1P0.wav'); %Lectura de señal del micrófono 1 en la posición 0 Sin muestra
M0_P2a= wavread('M0P2.wav'); %Lectura de señal del micrófono 0 en la posición 2 Sin muestra
M2_P0a= wavread('M2P0.wav'); %Lectura de señal del micrófono 2 en la posición 0 Sin muestra
M0_P3a= wavread('M0P3.wav'); %Lectura de señal del micrófono 0 en la posición 1 Sin muestra
M3_P0a= wavread('M3P0.wav'); %Lectura de señal del micrófono 1 en la posición 0 Sin muestra
M0_P4a= wavread('M0P4.wav'); %Lectura de señal del micrófono 0 en la posición 4 Sin muestra
M4_P0a= wavread('M4P0.wav'); %Lectura de señal del micrófono 4 en la posición 0 Sin muestra

% Igualdad en longitud para cada par de micrófonos
M0_P1a = M0_P1a(1:Largo_Muestra);
M1_P0a = M1_P0a(1:Largo_Muestra);
M0_P2a = M0_P2a(1:Largo_Muestra);
M2_P0a = M2_P0a(1:Largo_Muestra);
M0_P3a = M0_P3a(1:Largo_Muestra);
M3_P0a = M3_P0a(1:Largo_Muestra);
M0_P4a = M0_P4a(1:Largo_Muestra);
M4_P0a = M4_P0a(1:Largo_Muestra);

%-----
% Funciones de transferencia de corrección de magnitud y fase
% correcciones del estándar ASTM E2611-09

% tfestimate(x,y), encuentra una función de estimación de transferencia,
% Txy, dada una señal de entrada, X, y una señal de salida, Y.

```

% H0_1 de corrección

```
H0_1sa = tfestimate(M0Sa,M1Sa);
H0_1vpa = tfestimate(M1_P0a,M0_P1a);
H0_1c = (H0_1sa.*H0_1vpa).^(1/2);
```

% H0_2 de corrección

```
H0_2sa = tfestimate(M0Sa,M2Sa);
H0_2vpa = tfestimate(M2_P0a,M0_P2a);
H0_2c = (H0_2sa.*H0_2vpa).^(1/2);
```

% H0_3 de corrección

```
H0_3sa = tfestimate(M0Sa,M3Sa);
H0_3vpa = tfestimate(M3_P0a,M0_P3a);
H0_3c = (H0_3sa.*H0_3vpa).^(1/2);
```

% H0_4 de corrección

```
H0_4sa = tfestimate(M0Sa,M4Sa);
H0_4vpa = tfestimate(M4_P0a,M0_P4a);
H0_4c = (H0_4sa.*H0_4vpa).^(1/2);
```

%-----

% Funciones de transferencia para ambas terminaciones

% Funciones de transferencia terminación a

```
H0_1ca= tfestimate(M0Ca,M1Ca);
H0_2ca= tfestimate(M0Ca,M2Ca);
H0_3ca= tfestimate(M0Ca,M3Ca);
H0_4ca= tfestimate(M0Ca,M4Ca);
```

% Funciones de transferencia terminación b

```
H0_1cb= tfestimate(M0Cb,M1Cb);
H0_2cb= tfestimate(M0Cb,M2Cb);
H0_3cb= tfestimate(M0Cb,M3Cb);
H0_4cb= tfestimate(M0Cb,M4Cb);
```

%-----

% Funciones de transferencia corregidas para ambas terminaciones

% Funciones de transferencia corregidas para la terminación a

```
H01ac=(H0_1ca./H0_1c);
H02ac=(H0_2ca./H0_2c);
H03ac=(H0_3ca./H0_3c);
H04ac=(H0_4ca./H0_4c);
```

% Funciones de transferencia corregidas para la terminación b

```
H01bc=(H0_1cb./H0_1c);
H02bc=(H0_2cb./H0_2c);
H03bc=(H0_3cb./H0_3c);
H04bc=(H0_4cb./H0_4c);
```

%-----

```
% Cálculo del campo acústico para ambas terminaciones
```

```
% Descomposición del campo acústico en las ondas A, B, C y D - terminación a
```

```
Aa=zeros(length(H01ac),1);
```

```
Ba=zeros(length(H01ac),1);
```

```
Ca=zeros(length(H01ac),1);
```

```
Da=zeros(length(H01ac),1);
```

```
posicionA=1;
```

```
for i= 0:(fs/(2*length(H01ac))):(fs/2)-(fs/(2*length(H01ac)))
```

```
k=((2*pi*i)/C); % número de onda
```

```
Aa(posicionA,1)=1j*((H01ac(posicionA,1).*exp(-1j*k*l1))-(H02ac(posicionA,1).*exp(-1j*k*(l1+s1))))/(2*sin(k*s1));
```

```
Ba(posicionA,1)=1j*((H02ac(posicionA,1).*exp(1j*k*(l1+s1)))-(H01ac(posicionA,1).*exp(1j*k*l1)))/(2*sin(k*s1));
```

```
Ca(posicionA,1)=1j*((H03ac(posicionA,1).*exp(1j*k*(l2+s2)))-(H04ac(posicionA,1).*exp(1j*k*l2)))/(2*sin(k*s2));
```

```
Da(posicionA,1)=1j*((H04ac(posicionA,1).*exp(-1j*k*l2))-(H03ac(posicionA,1).*exp(-1j*k*(l2+s2))))/(2*sin(k*s2));
```

```
posicionA= posicionA+1;
```

```
end
```

```
% Descomposición del campo acústico en las ondas A, B, C y D - terminación b
```

```
Ab=zeros(length(H01bc),1);
```

```
Bb=zeros(length(H01bc),1);
```

```
Cb=zeros(length(H01bc),1);
```

```
Db=zeros(length(H01bc),1);
```

```
posicionB=1;
```

```
for i= 0:(fs/(2*length(H01bc))):(fs/2)-(fs/(2*length(H01bc)))
```

```
k=((2*pi*i)/C); % número de onda
```

```
Ab(posicionB,1)=1j*((H01bc(posicionB,1).*exp(-1j*k*l1))-(H02bc(posicionB,1).*exp(-1j*k*(l1+s1))))/(2*sin(k*s1));
```

```
Bb(posicionB,1)=1j*((H02bc(posicionB,1).*exp(1j*k*(l1+s1)))-(H01bc(posicionB,1).*exp(1j*k*l1)))/(2*sin(k*s1));
```

```
Cb(posicionB,1)=1j*((H03bc(posicionB,1).*exp(1j*k*(l2+s2)))-(H04bc(posicionB,1).*exp(1j*k*l2)))/(2*sin(k*s2));
```

```
Db(posicionB,1)=1j*((H04bc(posicionB,1).*exp(-1j*k*l2))-(H03bc(posicionB,1).*exp(-1j*k*(l2+s2))))/(2*sin(k*s2));
```

```
posicionB= posicionB+1;
```

```
end
```

```
%-----
```

```
% Presión y velocidad de partícula en los puntos x=0 y x=d para a y b
```

% Obtener a Presión y la velocidad de partícula - terminación a

% En x=0 para a

P0a= Aa+Ba;

U0a= (Aa-Ba)/(densidad*C);

% En x=d para a

Pda= zeros(length(H01ac),1);

Uda= zeros(length(H01ac),1);

posicion_d= 1;

for i= 0:(fs/(2*length(H01ac))):(fs/2)-(fs/(2*length(H01ac)))

k=((2*pi*i)/C); % número de onda

Pda(posicion_d,1)= Ca(posicion_d,1).*exp(-1j*k*d) + Da(posicion_d,1).*exp(1j*k*d);

Uda(posicion_d,1)= (Ca(posicion_d,1).*exp(-1j*k*d) - Da(posicion_d,1).*exp(1j*k*d))/(densidad*C);

posicion_d= posicion_d+1;

end

% Obtener a Presión y la velocidad de partícula - terminación b

% En x=0 para b

P0b= Ab+Bb;

U0b= (Ab-Bb)/(densidad*C);

% En x=d para b

Pdb= zeros(length(H01ac),1);

Udb= zeros(length(H01ac),1);

posicion_d= 1;

for i= 0:(fs/(2*length(H01bc))):(fs/2)-(fs/(2*length(H01bc)))

k=((2*pi*i)/C); % número de onda

Pdb(posicion_d,1)= Cb(posicion_d,1).*exp(-1j*k*d) + Db(posicion_d,1).*exp(1j*k*d);

Udb(posicion_d,1)= (Cb(posicion_d,1).*exp(-1j*k*d) - Db(posicion_d,1).*exp(1j*k*d))/(densidad*C);

posicion_d= posicion_d+1;

end

%-----

% Cálculo de la matriz de transferencia

T=[(((P0a.*Udb)-(P0b.*Uda))./((Pda.*Udb)-(Pdb.*Uda))) (((P0b.*Pda)-(P0a.*Pdb))./((Pda.*Udb)-(Pdb.*Uda)));(((U0a.*Udb)-(U0b.*Uda))./((Pda.*Udb)-(Pdb.*Uda))) (((Pda.*U0b)-(Pdb.*U0a))./((Pda.*Udb)-(Pdb.*Uda)))];

```
%Elementos de la matriz
```

```
T11=T(1:length(H01ac),1);
T12=T(1:length(H01ac),2);
T21=T((length(H01ac)+1):(2*(length(H01ac))),1);
T22=T((length(H01ac)+1):(2*(length(H01ac))),2);
```

```
%-----
```

```
%Cálculo del coeficiente de transmisión
```

```
Valores_MT = [T11 T12 T21 T22];
[t] = coef_transmission(Valores_MT,d,C,densidad);
```

```
%-----
```

```
%Cálculo de la pérdida por transmisión
```

```
TL= 20.*log10(abs(1./t));
```

```
%Filtro de 12/8
```

```
%Filtro por doceavos de octava
```

```
f=fs*(0:(1/(2*length(H01ac))):1-(1/(2*(length(H01ac)))));
Frec=[90;95;100;106;112;118;125;132;140;150;160;170;180;190;200;212;224;236;250;265;280;300;315;335;355;375;400;425;450;475;500;530;560;600;630;670;710;750;800;850;900;950;1000;1060;1120;1180;1250;1320;1400;1500;1600;1700;1800;1900;2000;2120;2240;2360;2500;2650;2800;3000;3150;3350;3550];
```

```
x=size(Frec);
Nmax=(x(1));
```

```
for aux = 1:Nmax
```

```
fu=Frec(aux)/2^(1/24);
fo=fu*2^(1/12);
```

```
index = find((f<=fo)&(f>fu));
```

```
x = size(index);
Ndatos = x(2);
```

```
TL12_8(aux)=10*log10(sum(10.^(TL(index)/10))/Ndatos);
```

```
end
```

```
Frec1 = Frec';
```

```
figure (1)
```

```
%axes1 =
```

```
axes('Parent',figure1,'XMinorTick','on','Xscale','log','xtick',[100;125;160;200;250;315;400;500;630;800;1000;1250;1600;2000;2500;3150]);
```

```
axes1 =
```

```
axes('XMinorTick','off','Xscale','log','xtick',[100;125;160;200;250;315;400;500;630;800;1000;1250;1600;2000;2500;3150]);
```

```
box(axes1,'on');
```

```

hold(axes1,'all');
plot(Frec1,abs(TL12_8),'LineWidth',2,'Color',[0 0 0])
xlim([100 3350])
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Pérdida por Transmisión (dB)');
title('Evaluación de perdida por transmisión')
grid on

%-----
% Guardar la variable de TL

if material == 1
    save ('TL_BT1','TL12_8','Frec1')
elseif material == 2
    save ('TL_BT2','TL12_8','Frec1')
elseif material == 3
    save ('TL_AcFi','TL12_8','Frec1')
elseif material == 4
    save ('TL_SW32','TL12_8','Frec1')
elseif material == 5
    save ('TL_SW60','TL12_8','Frec1')
elseif material == 6
    save ('TL_MadCon','TL12_8','Frec1')
elseif material == 7
    save ('TL_Madera','TL12_8','Frec1')
elseif material == 8
    save ('TL_Y-C','TL12_8','Frec1')
elseif material == 9
    save ('TL_AC22','TL12_8','Frec1')
end

%-----
%Parámetros acústicos

[R_c,a_c,k_pw,z] = parametros_acusticos(Valores_MT,densidad,d,C);

f2=fs*(0:(1/(length(H01ac))):1-(1/(length(H01ac)))));

f2 = f2';

figure (2)
axes('XMinorTick','off','Xscale','log','xtick',[125;250;500;1000;2000;4000]);
axes2 = axes('XMinorTick','off','Xscale','log','xtick',[125;250;500;1000;2000;4000]);
box(axes2,'on');
hold(axes2,'all');
plot(f2,abs(a_c))
xlim([100 4000])
ylim ([0 1])
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Coeficiente de Absorción');
title('Evaluación del coeficiente de absorción')
grid on

```

```

%Filtro por tercio de octava para parámetros acústicos
Frec2=[100;125;160;200;250;315;400;500;630;800;1000;1250;1600;2000;2500;3150;4000];
% x2=size(Frec2);
% Nmax2=(x2(1));
% for aux2 = 1:Nmax2
% fu2=Frec2(aux2)/2^(1/6);
% fo2=fu2*2^(1/3);
% index2 = find((f<=fo2)&(f>fu2));
% x2 = size(index2);
% Ndatos2 = x2(2);
% a_c3_8(aux2) = (sum((a_c(index2))/(Ndatos2)));
% end
%
% a_c3_8 = abs(a_c3_8);
% Frec3 = Frec2';
%
% figure (2)
% %axes('XMinorTick','off','Xscale','log','xtick',[125;250;500;1000;2000;4000]);
% axes2 = axes('XMinorTick','off','Xscale','log','xtick',[125;250;500;1000;2000;4000]);
% box(axes2,'on');
% hold(axes2,'all');
% plot(Frec3,abs(a_c3_8),'LineWidth',2,'Color',[0 0 0])
% xlim([100 4000])
% ylim ([0 1])
% xlabel('Frecuencia (Hz)');
% ylabel('Coeficiente de Absorción');
% title('Evaluación del coeficiente de absorción')
% grid on

%-----
%Cálculo de magnitud y fase

f=fs*(0:(1/(length(H01ac))):1-(1/(length(H01ac)))));
f = f';

%número imaginario (a + bi)
t_r = real(t); % real = a
t_i = imag(t); % imag = b

t_mag = sqrt((t_r.^2)+(t_i.^2));
t_fase = atan2(t_i,t_r); % Four-quadrant inverse tangent

v=[88 3350 0 3]; %PARA T EN MAGNITUD

figure(3)

subplot (2, 1, 1)
semilogx(f,t_mag,'k') %PARA T EN MAGNITUD
grid
axis(v)
title('Magnitud')
xlabel('Frecuencia Hz')
ylabel('Coef. de Transmisión (Magnitud)')

```

```

t_f=unwrap(t_fase); % Correct phase angles to produce smoother phase plots

b=[88 3350 -20 20];

subplot (2, 1, 2)
semilogx(f,t_f,'g')
grid
axis(b)
title('Fase')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Coef. de transmisión Fase (Grados)')

```

Función “coef_transmission”

```

function [t] = coef_transmission(Valores_MT,d,C,densidad)

MT11 = Valores_MT(:,1); % Valor F1C1 de la matriz de transferencia
MT12 = Valores_MT(:,2); % Valor F1C2 de la matriz de transferencia
MT21 = Valores_MT(:,3); % Valor F2C1 de la matriz de transferencia
MT22 = Valores_MT(:,4); % Valor F2C2 de la matriz de transferencia
t = zeros(length(MT11),1); %LONGITUD DE t
pos=1;

for i= 0:(44100/(2*16285)):22050-(44100/(2*16385))

k=(2*pi*i)/C;

t(pos,1)=
((2*exp(1j*k*d))./(MT11(pos,1)+(MT12(pos,1)./(densidad*C))+(MT21(pos,1).*(densidad*C))+MT22(pos,1)));
pos=pos+1;

end

end

```

Función “parametros_acusticos”

```

function [R_c,a_c,k_pw,z] = parametros_acusticos(Valores_MT,densidad,d,C)

MT11 = Valores_MT(:,1); % Valor F1C1 de la matriz de transferencia
MT12 = Valores_MT(:,2); % Valor F1C2 de la matriz de transferencia
MT21 = Valores_MT(:,3); % Valor F2C1 de la matriz de transferencia

% Coeficiente de reflexión
R_c = (((MT11-((densidad*C).*(MT21)))/((MT11+((densidad*C).*(MT21))))));

% Coeficiente de absorción
a_c = 1-((abs(R_c)).^2);

% Propagación del número de onda en el material

```

```

k_pw = (1/d).*(acos(MT11));

% Impedancia característica en el material
z = (MT12./MT21).^(1/2);

end

```

C Algoritmo para el cálculo de la FFT para las respuestas en frecuencia

```

%Respuesta de la caja y del tubo
x1 = wavread('Mic_Respt_Caja.wav'); %Muestra de la caja a 1m
x2 = wavread('Mic_respt_Tubo _03.wav'); %Muestra del sistema con tubo abierto

Fs = 44100;
Ts=1/Fs;
Seg = 3;
LM = Fs*Seg;

x1 = x1(1:LM);
x2 = x2(1:LM);

N1 = length(x1);
N2 = length(x2);

X1=fft(x1)*Ts;
X2=fft(x2)*Ts;

MAGX1=abs(X1);
MAGX2=abs(X2);

MAGXNORM1=MAGX1/max(MAGX1);
MAGXNORM2=MAGX2/max(MAGX2);

K1=0:N1-1;
K2=0:N2-1;
F1=K1*Fs/(N1-1);
F2=K2*Fs/(N2-1);

figure (1)
semilogx(F1,MAGXNORM1,'r');
title('Espectro de la caja')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Nivel Normalizado')
axis([80 3350 0 1])

figure (2)
semilogx(F2,MAGXNORM2,'r');
title('Espectro del sistema')
xlabel('Frecuencia (Hz)')

```

```
ylabel('Nivel Normalizado')
axis([80 3350 0 1])
```

D Algoritmo para el cálculo de la coherencia entre las señales

```
% Análisis inicial (coherencia entre señales)
```

```
% Capturas con muestra en terminación anecoica.
```

```
M0Ca = wavread('M0Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 0 con muestra terminación a
M1Ca = wavread('M1Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 1 con muestra terminación a
M2Ca = wavread('M2Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 2 con muestra terminación a
M3Ca = wavread('M3Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 3 con muestra terminación a
M4Ca = wavread('M4Ca.wav'); %Lectura de señal micrófono 4 con muestra terminación a
```

```
Seg = input('Valor en segundos para la duración de la muestra (1s a 6s): ');
fs = 44100; % Frecuencia de muestreo
Largo_Muestra = fs*Seg;% Se obtiene un tiempo x muestra para trabajar con
vectores de igual longitud
```

```
M0Ca = M0Ca(1:Largo_Muestra);
M1Ca = M1Ca(1:Largo_Muestra);
M2Ca = M2Ca(1:Largo_Muestra);
M3Ca = M3Ca(1:Largo_Muestra);
M4Ca = M4Ca(1:Largo_Muestra);
```

```
figure
[Pxy41,F] = mscohere(M0Ca,M4Ca,[],[],[],fs);
S41 = semilogx(F,Pxy41,'r');
legend(S41,'Valor-Predeterminado','Location','southwest')
title('COHERENCIA ENTRE LOS MICROFONOS 0 Y 4')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Coherencia')
axis([80 3350 0 1])
```

E Tabla de base de datos de los materiales acústicos caracterizados**Tabla 10. Caracterización acústica de los materiales**

Material	<i>Black Theater de 1 pulgada</i>						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de absorción	0,089	0,268	0,233	0,971	0,930	0,988	0,601
Coeficiente de reflexión	1,044	0,855	0,876	0,171	0,264	0,108	
Coeficiente de transmisión	0,336	0,550	0,506	0,387	0,298	0,200	
Pérdida por transmisión (dB)	4,735	2,594	2,956	4,125	5,257	7,000	
Impedancia acústica del material ($kg/m^2 \cdot s$)	54,94	294,40	349,80	410,10	341,10	471,20	
Material	<i>Black Theater de 2 pulgadas</i>						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de absorción	0,252	0,262	0,572	0,882	0,648	0,871	0,591
Coeficiente de reflexión	0,865	0,859	0,654	0,343	0,594	0,359	
Coeficiente de transmisión	0,224	0,368	0,306	0,176	0,096	0,042	
Pérdida por transmisión (dB)	6,489	4,344	5,140	7,554	10,160	13,740	
Impedancia acústica del material ($kg/m^2 \cdot s$)	372,70	789,00	499,30	306,00	322,00	485,40	
Material	<i>Acustifibra de 1 pulgada</i>						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de absorción	0,075	0,183	0,146	0,649	0,625	0,922	0,401
Coeficiente de reflexión	0,962	0,904	0,881	0,592	0,590	0,313	
Coeficiente de transmisión	0,107	0,222	0,336	0,587	0,199	0,086	
Pérdida por transmisión (dB)	9,715	6,530	4,741	2,315	7,018	10,640	
Impedancia acústica del material ($kg/m^2 \cdot s$)	200,60	422,70	969,60	281,20	222,10	337,90	
Material	<i>Sonowall de 32 kg/m cúbicos</i>						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de absorción	0,187	0,338	0,783	0,829	0,918	0,910	0,717
Coeficiente de reflexión	1,089	1,157	0,950	0,593	0,286	0,301	
Coeficiente de transmisión	0,256	0,582	0,700	0,512	0,222	0,105	
Pérdida por transmisión (dB)	5,910	2,352	1,552	2,906	6,538	9,794	
Impedancia acústica del material ($kg/m^2 \cdot s$)	115,70	139,30	398,40	243,40	363,60	425,50	

Material	Sonowall de 60 kg/m ³ cúbicos						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de absorción	0,165	0,282	0,894	0,755	0,872	0,954	0,701
Coeficiente de reflexión	0,914	0,847	0,325	0,495	0,358	0,214	
Coeficiente de transmisión	0,100	0,123	0,283	0,257	0,097	0,037	
Pérdida por transmisión (dB)	10,020	9,115	5,478	5,897	10,130	14,270	
Impedancia acústica del material (kg/m ² .s)	299,00	466,90	509,30	174,00	377,40	538,10	

Material	Madera contrachapada con cubierta lisa de 15 mm						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	3350	
Coeficiente de absorción	0,081	0,144	0,182	0,271	0,251	0,409	
Coeficiente de reflexión	0,959	1,069	0,904	0,854	0,865	0,769	
Coeficiente de transmisión	0,082	0,141	0,114	0,101	0,053	0,032	
Pérdida por transmisión (dB)	10,860	8,506	9,423	9,977	12,760	14,980	
Impedancia acústica del material (kg/m ² .s)	238,40	321,60	783,90	387,90	115,20	640,00	

Material	Madera de 15 mm						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	3350	
Coeficiente de absorción	0,110	0,087	0,310	0,155	0,047	0,179	
Coeficiente de reflexión	0,943	0,812	1,144	0,975	0,979	0,906	
Coeficiente de transmisión	0,152	0,184	0,130	0,114	0,062	0,053	
Pérdida por transmisión (dB)	8,170	7,361	8,853	9,421	12,060	12,750	
Impedancia acústica del material (kg/m ² .s)	156,30	250,70	810,10	357,20	191,90	459,10	

Material	Yeso-Cartón de 5/8 pulgadas						
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	3350	
Coeficiente de absorción	0,065	0,231	0,233	0,481	0,078	0,155	
Coeficiente de reflexión	1,032	0,877	0,876	0,721	0,960	0,919	
Coeficiente de transmisión	0,224	0,374	0,179	0,051	0,019	0,009	
Pérdida por transmisión (dB)	6,504	4,274	7,471	12,920	17,280	20,520	
Impedancia acústica del material (kg/m ² .s)	250,60	443,30	955,60	566,70	150,20	676,80	

Material	Lamina de acero de 0.22 mm					
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	3350
Coeficiente de absorción	0,068	0,013	0,146	0,693	0,540	0,073
Coeficiente de reflexión	0,965	1,007	0,924	0,554	0,678	0,963
Coeficiente de transmisión	0,258	0,190	0,287	0,121	0,063	0,019
Pérdida por transmisión (dB)	5,879	7,214	5,427	9,168	12,000	17,120
Impedancia acústica del material ($kg/m^2.s$)	90,07	517,10	543,40	476,90	87,75	998,40

F Tabla con resumen de cada método nombrado en los antecedentes

Tabla 11. Resumen de los métodos encontrados en el estado del arte

Método	Uso y diseño	Resultados	Observación
Tubo de Kundt	El diseño cuenta con un altavoz, un tubo de vidrio y un diafragma que vibra con respuesta al sonido del altavoz y un tubo de admisión de gases. El tubo se coloca de forma horizontal y se añade una cantidad de polvo en su interior, se excita el gas dentro del tubo con una onda sonora y el polvo dentro de éste tiende a acumularse en nodos, formando ondas estacionarias en su interior.	Visualización y análisis de ondas estacionarias (máximos y mínimos) [12]. Obtención de la velocidad de las ondas sonoras en distintos gases y sólidos [12].	La desventaja del método es que sólo se puede analizar una frecuencia a la vez.
Tubo de impedancia u onda estacionaria	El diseño cuenta con un tubo, un micrófono, una sonda de micrófono, un altavoz y una terminación rígida donde se ubicará una muestra [1]. En el método un altavoz emite una señal de prueba, una onda plana se	Permite el análisis de la onda estacionaria que se produce dentro del tubo. Permite el cálculo del coeficiente de absorción a una frecuencia [1] [13].	En método presenta una desventaja práctica ya que la medición se debe realizar frecuencia por frecuencia. Esto genera un incremento

Método	Uso y diseño	Resultados	Observación
	propaga a lo largo del tubo hasta chocar con una muestra ubicada en el extremo en la cual se refleja, creando una onda estacionaria en el tubo. La muestra altera la forma en que se refleja el sonido. Posteriormente la sonda del micrófono captura el comportamiento de la onda dentro del tubo y por medio de la medición se pueden calcular parámetros acústicos [23].	Impedancia acústica de la muestra a una frecuencia [1] [13].	en el tiempo de medición de un material [23].
Función de transferencia con dos micrófonos	El diseño cuenta con un tubo, dos micrófonos, un altavoz y una terminación rígida donde se ubicará una muestra [23]. El método implementa dos micrófonos, facilitando el proceso de medición en comparación al método del tubo de impedancia. En el método se usa una señal de prueba que contenga información de un determinado rango de frecuencia. Se captan las ondas dentro del tubo y se procesa la información utilizando una función de transferencia [14].	Se obtiene la magnitud y la fase del coeficiente de reflexión. Cálculo del coeficiente de reflexión a incidencia normal [23]. Cálculo del valor de la impedancia acústica específica de la muestra a incidencia normal [13] [36] Cálculo del coeficiente de absorción del material a incidencia normal [13] [36]	Los errores generados por la inadecuada posición de los micrófonos se evidencian fácilmente ya que se obtienen valores que no tienen representación física [23]. Por medio de la separación de los micrófonos se puede calcular el rango útil de frecuencias del tubo [23].
Tubo de transferencia (J. Bolton, 1997)	El diseño cuenta con dos soportes de micrófonos, un soporte para muestras y una terminación anecoica y cuatro micrófonos [16].	Cálculo de la pérdida por transición a incidencia normal [16] [29].	Permite tener un rango útil de frecuencias más amplio [23].

Método	Uso y diseño	Resultados	Observación
	El método consiste en captar el campo sonoro que se encuentra antes y después de la muestra para realizar un análisis por medio de funciones de transferencia [16].	Calculo del coeficiente de absorción a incidencia normal [16] [32] [33]	Implementa cuatro micrófonos de medición [29] [16]
Tubo de transferencia (J.Bolton, 2006) – ASTM E2611-09 con cuatro micrófonos	El diseño utiliza tres separaciones para el tubo, la primera es el soporte para micrófonos, luego viene un soporte para la muestra y al final una terminación. La diferencia es que usa una terminación abierta y otra aproximadamente anecoica [15] [23]. El método utilizado es el 4M2L, que implica cuatro micrófonos que capturan el campo sonoro que se genera para cada una de las terminaciones del tubo. Posteriormente realiza un análisis por medio de funciones de transferencia para obtener finalmente una matriz de transferencia que caracteriza la muestra que se encuentra bajo prueba. [2] [15] [17]	Valores de perdida por transmisión bastante coherentes para materiales absorbentes (fibrosos y de espuma) en incidencia normal en un rango de 50Hz a 1.6kHz [39] [38]. Permite el cálculo del coeficiente de absorción y reflexión a incidencia normal [2] Calcula el coeficiente de transmisión a incidencia normal. [2] Calcula la impedancia característica del material a incidencia normal [2] Permite obtener el número de onda de propagación dentro del material a incidencia normal [2]	Del método se pudo concluir que la potencia del sonido transmitido a través de una muestra en el tubo depende tanto de sus propiedades como de la terminación del tubo [17]. El método muestra que para materiales con alta pérdida se ha hallado muy buen margen el coeficiente de transmisión [39]. El método presenta procedimientos alternativos para cuando se tiene una menor cantidad de micrófonos y una sola terminación [2]. Se presentan anomalías en las mediciones de

Método	Uso y diseño	Resultados	Observación
			materiales sólidos. Su causa es debido a la poca coherencia entre las señales de los micrófonos [39] [38]. Los valores atípicos se presentan en el rango de 100 a 400 Hz en las curvas que se obtienen de pérdida de transmisión [38].
Tubo de transferencia con 5 micrófonos (ASTM E2611-09)	El diseño también utiliza tres separaciones para el tubo, como el método anterior, la diferencia es que en éste se implementan 5 micrófonos [2]. El método implica cinco micrófonos, cuatro que capturan el campo sonoro que se genera para cada una de las terminaciones del tubo y el último micrófono es utilizado como señal de referencia para el cálculo y correcciones que se realizaran en el análisis de las funciones de transferencia y de la matriz de transferencia [2].	Valores de pérdida por transmisión bastante coherentes para materiales absorbentes y sólidos en incidencia normal en un rango de 50Hz a 1.6kHz [38]. Permite el cálculo del coeficiente de absorción y reflexión a incidencia normal [2] Calcula el coeficiente de transmisión a incidencia normal [2]. Calcula la impedancia característica del material a incidencia normal [2].	Se presenta coherencia en los valores de pérdida por transmisión tanto para materiales absorbentes como sólidos. Siendo esta la ventaja que se tiene sobre el método 4M2L [38].

Método	Uso y diseño	Resultados	Observación
		Permite obtener el número de onda de propagación dentro del material a incidencia normal [2].	