

Desarrollo de un sistema para medición de coeficiente de absorción sonora por función de transferencia

*Tesis final presentada para obtener el título de Ingeniero
de Sonido de la Universidad Nacional de Tres de Febrero
(UNTREF)*

TESISTA: Maite Atín (40181613)

TUTOR: Federico Serrano 



Desarrollo de un sistema para medición de coeficiente de absorción sonora por función de transferencia

Maite Atín

1. Introducción y fundamentación.

La absorción sonora es un fenómeno de transformación de energía en la propagación de ondas, que sucede cuando una onda sonora incide sobre un determinado material. Esta capacidad de absorción se encuentra presente en todos los materiales en mayor o menor medida, y ha sido ampliamente utilizada para diferentes aplicaciones.

Una de las aplicaciones más populares que tiene el conocimiento de la absorción de los materiales, se relaciona con el estudio de la acústica en espacios cerrados. En general, es de interés para el control de la reverberación de los recintos, ya que puede causar dificultad en la comunicación, molestia auditiva. Y en salas especialmente ideadas para la escucha, controlar la reverberación hace posible la inteligibilidad del mensaje hablado o la música, como sucede en salas de conciertos, teatros, salas de conferencias, instituciones educativas, estudios de grabación, salas de ensayo, entre otros [1]. Existen materiales diseñados específicamente para su desempeño como absorbentes, y materiales que no son precisamente acústicos. Pero en ambos casos, tienen ciertas capacidades acústicas que los caracterizan. En particular, el fenómeno de absorción sonora se cuantifica en los materiales mediante el *coeficiente de absorción sonora* (α). Conocer esos valores es de interés en la industria para poder predecir el desempeño que tendrán en sus aplicaciones, proyectar trabajos a través de cálculos o simulaciones.

Para determinar el coeficiente de absorción sonora existen ensayos que se realizan sobre una muestra o sobre la totalidad de un material determinado. Hay tres métodos de medición que se encuentran normalizados en estándares nacionales y/o internacionales. Uno de ellos es la medición de materiales en sala reverberante, cuya hipótesis de ensayo es la presencia de un campo acústico difuso [2-4]. La otra posibilidad, es la medición en tubos de Kundt (también llamados tubos de impedancia), en el cual se debe cumplir que haya propagación de ondas planas en su interior para la obtención de los resultados. Existen dos técnicas en este método: una basada en las ondas estacionarias con un micrófono móvil como sensor [5], y otra de medición por función de transferencia entre dos micrófonos ubicados en posiciones fijas [6]. Por último, existe un método para la medición de absorción sonora *in situ*, que utiliza el principio de reflexión de la onda sonora y el análisis temporal [7].

El laboratorio de acústica y vibraciones del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina posee en sus instalaciones una cámara reverberante que les permite realizar mediciones de coeficiente de absorción sonora en campo difuso. Este método de ensayo usualmente requiere de un tiempo bastante prolongado, debido a la logística con el cliente, el procedimiento de medición y las necesidades de equipamiento. Existe además, un sistema de tubo de Kundt para medición por el método de ondas estacionarias con un micrófono móvil. Cuyo ensayo también conlleva un tiempo prolongado, ya que en el procedimiento se debe recorrer manualmente el interior del tubo con el micrófono, para cada frecuencia de interés. Y además depende en gran medida de la persona que lleva a cabo el ensayo.

En el presente informe se presenta un plan de investigación para llevar a cabo el desarrollo e implementación de un sistema de medición de coeficiente de absorción sonora en materiales industriales, utilizando el método de función de transferencia en tubo de Kundt (de acuerdo a la norma ISO 10534-2). Que permite realizar una medición de forma sencilla, de bajo tiempo de ensayo. Este trabajo se lleva a cabo dentro del laboratorio de acústica y vibraciones del INTI,

permitiendo volver a poner en funcionamiento un sistema, actualizado a los nuevos lineamientos de la normativa técnica. Posibilitando la expansión de las capacidades de ensayo del laboratorio y permitiendo la caracterización acústica de los materiales generados por las distintas ramas industriales.

~~Se releva el estado del arte sobre la medición de coeficiente de absorción sonora planteado hasta el momento actual, y una revisión de la literatura para conformar el marco teórico que dará sustento a la investigación llevada a cabo. Se elabora el plan de investigación para definir los objetivos generales y específicos a alcanzar, establecer de manera metódica las etapas de trabajo, plazos, y variables implicadas en el proceso.~~

2. Objetivo general y específicos

El objetivo general de esta investigación es desarrollar, construir y caracterizar un sistema de medición de coeficiente de absorción sonora de materiales, mediante el método de función de transferencia en tubo de impedancia (ISO 10534-2). Dicho sistema será parte del laboratorio de acústica y vibraciones del INTI, y busca expandir sus capacidades de ensayo.

Se pretende cumplir los siguientes objetivos específicos a lo largo del proyecto:

- Estudiar las formas de medición de coeficiente de absorción sonora en profundidad incluyendo el procesamiento implicado en cada una de ellas.
- Relevar y caracterizar el sistema completo del tubo de Kundt existente, desde el punto de vista acústico, electrónico y electroacústico.
- Realizar una propuesta de adaptación y acondicionamiento del sistema a los nuevos lineamientos de la normativa técnica.
- Llevar a cabo las modificaciones y desarrollos pertinentes. Incluyendo la etapa constructiva, la adquisición y procesamiento de las señales.
- Caracterizar el sistema obtenido y hacer una comparación de resultados con otro método dentro de las limitaciones que se presenten.

3. Estado del arte

Para la medición de coeficiente de absorción sonora el método más utilizado, y para muchos el más útil, es ~~el método~~ de medición en incidencia aleatoria, llevado a cabo en cámara reverberante. De hecho, fue el primer ~~método~~ en ser implementado como normativa en 1985 por la Organización Internacional de Normalización (ISO) [2]. Este procedimiento se basa en las formulaciones de Sabine sobre el campo reverberado [8], cuyas condiciones no son triviales de asegurar y pueden arrojar resultados de coeficientes de absorción ilógicos. Varios estudios muestran análisis de resultados y comparaciones con diferentes tipos de materiales respecto al método de incidencia aleatoria [9, 10].

Como alternativa, se plantea el uso de un tubo de impedancia. También llamado tubo de Kundt, ya que tiene sus inicios en el experimento del tubo de polvo publicado por Kundt en 1868, como una revisión a formulaciones iniciales establecidas por Kirchhoff para la propagación de ondas planas en tubos anchos [11]. Se establece este ensayo por ondas estacionarias en tubo [5, 6], como un ambiente de medición más controlado, estandarizado en 1998. ~~Cuya~~ limitación es que representa únicamente un resultado en incidencia normal, y en el rango de frecuencias que el tubo es apto para propagación de ondas planas. Sin embargo tiene la ventaja de ser un ensayo que requiere poco tiempo (en particular el método por función de

transferencia), se utiliza sólo una pequeña muestra de material, y permite además medir la impedancia superficial de dicha muestra. [12].

Otros métodos se han desarrollado para resolver necesidades prácticas de la industria, como por ejemplo los instrumentos para la medición *in situ*. Estos son tubos de impedancia que utilizan el principio de reflexión, registrando la respuesta al impulso [13]. Una técnica alternativa utilizando una sonda intensométrica fue desarrollada para la medición de coeficiente de absorción aplicando una señal de banda ancha como excitación. Pudiendo ser aplicada en tubo de impedancia en laboratorio o mediciones *in situ* con una comparación por el método de transferencia [14].

Sobre el método de medición en tubo de impedancia mediante función de transferencia que se usará en el desarrollo del presente trabajo, existen estudios sobre la influencia de las condiciones de montaje de la muestra ~~en la medición~~ [15, 16]. También una propuesta metodológica para corregir el error introducido por la ubicación de la muestra de material dentro del tubo, utilizando un tercer micrófono en el final del mismo. En el cual se obtiene una mejor precisión que con el método convencional [17]. Otra corrección para mejorar la precisión de los resultados se basa en utilizar múltiples micrófonos ~~para la medición~~, y a partir de ello obtener la función de transferencia de diferentes combinaciones, y realizar un ajuste por cuadrados mínimos que optimice el par de micrófonos finalmente utilizados ~~para la medición~~ [18].

Todas las propuestas anteriores implican un cambio en el diseño y el montaje del sistema de medición, o en la calibración, y quedan por fuera de la normativa técnica vigente. Sin embargo también existen técnicas de optimización basadas en el procesamiento de las señales que podrían ser implementadas para la mejora de los problemas de medición [19], como algoritmos Firefly [20], Artificial Bee Colony (ABC) [21], entre otros. Una combinación de uso del algoritmo de optimización Particle Swarm Optimization (PSO) y redes neuronales se aplica para la reducción de errores en la medición por función de transferencia de coeficientes de absorción, con resultados satisfactorios en un rango limitado de frecuencias [19].

4. Marco teórico

El desarrollo del trabajo se fundamenta en la teoría de propagación de ondas sonoras planas en el interior de tubos, y en la propiedad de absorción de los materiales que se detalla a continuación.

4.1. Propagación de ondas planas

Dentro de las soluciones a la ecuación de la acústica lineal, una solución simple que reúne características importantes para el campo de aplicación de la acústica son las ondas planas. Si en principio son consideradas como propagativas, este tipo de ondas se caracterizan por variar en función del tiempo, pero de manera independiente a la posición. Si bien varían en ciertos valores sobre el eje de propagación (en torno a las dimensiones de la longitud de onda), su valor es independiente del punto de análisis a lo largo de planos normales a la dirección de propagación [22]. Es decir que su frente de onda es plano, la cantidad de energía en cada una de esas secciones transversales es invariante con la ubicación de las mismas respecto a la fuente sonora (no hay divergencia).

Considerando estas características, una onda plana propagativa, es decir, que viaja en el espacio libremente, sin reflexiones ni absorciones propias del medio, se puede definir matemáticamente según la ecuación 1, considerando que está compuesta de una única componente de frecuencia ($\omega = 2\pi f$).

$$p(x, t) = p(x) \cdot \text{Re}\{e^{j\omega t}\} \quad (1)$$

La ecuación anterior puede ser independizada del tiempo, a través de la solución a la ecuación de Helmholtz (obtenida de las derivadas parciales de $p(x,t)$). Dando como resultado la expresión de la ecuación 2, donde k es el número de onda definido en la ecuación 3.

$$p(x) = p \cdot e^{-jkx} \quad (2)$$

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (3)$$

La principal manera de asegurar y controlar la propagación de ondas planas, es limitar el medio de propagación a un espacio de forma tubular, en el cual se cumple que la sección transversal es constante en toda su extensión. Esta condición ha sido utilizada en muchas aplicaciones para aprovechar el fenómeno de las ondas planas.

Si en este caso se considera un tubo de con uno de sus extremos cerrados, la onda plana propagativa incidente en este extremo será reflejada, y el campo de presión estará definido por dos términos: uno en el sentido positivo de propagación en x , y otro en sentido contrario, como muestra la ecuación 4.

$$p(x) = p_i \cdot e^{-jkx} + p_r \cdot e^{jkx} \quad (4)$$

Si el extremo cerrado del tubo es completamente reflectante, entonces la magnitud de la presión incidente y la presión reflejada es la misma, y el módulo del coeficiente de reflexión de presiones complejo (R) toma su mayor valor (ecuación 5).

$$p_i = p_r \rightarrow |R| = \left| \frac{p_r}{p_i} \right| = 1 \quad (5)$$

4.2. Absorción sonora

Por definición, la absorción sonora es la transformación de energía mecánica de la onda que se propaga, en energía térmica (calor). Para entender el fenómeno ~~de absorción sonora de los materiales~~, es importante comprender cuáles son las variables de la onda que se propaga y del material absorbente en cuestión, que están implicadas en el desarrollo teórico ~~del fenómeno~~. Partiendo el análisis desde un cambio de medio, se caracteriza cada uno de los medios según su densidad (ρ_i), y la velocidad de propagación del sonido asociada (c_i). Estos dos parámetros definen la impedancia característica del medio según la ecuación 6.

$$z_i = \rho_i \cdot c_i \quad (6)$$

Tal como se muestra en la Figura 1, cuando una onda sonora se propaga desde el medio 1 hacia el medio 2, e incide sobre la superficie límite, parte de su energía es reflejada nuevamente hacia el medio 1 en otra dirección, y parte es transmitida hacia el medio 2 [1]. Analizando en la interfaz de los materiales ($x = 0$), se debe cumplir la conservación de la energía entre la energía incidente (E_i), reflejada (E_r) y transmitida (E_t). En particular, si estamos estudiando la absorción del medio 2, podemos considerar que la energía transmitida corresponde a la energía absorbida (E_a), y por lo tanto el balance energético queda definido según la ecuación (7).

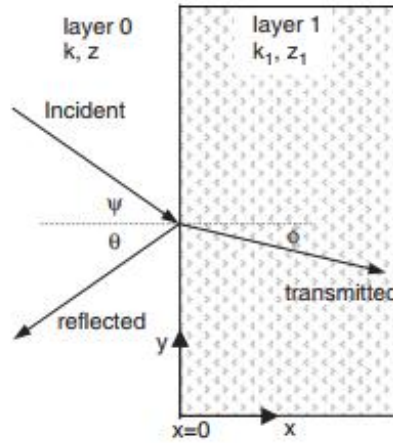


Figura 1. Cambio de medio para una onda sonora [1].

$$E_i = E_r + E_a \quad (7)$$

Por definición, el coeficiente de absorción sonora (α), es el cociente entre la potencia sonora reflejada e incidente como se detalla en la ecuación 8.

$$\alpha = \frac{W_{absorbida}}{W_{incidente}} \quad (8)$$

4.3. Tubo de impedancia

Los tubos de impedancia, ~~también llamados tubos de Kundt~~, son comúnmente utilizados para la medición de impedancia acústica específica y coeficiente de absorción sonora de una muestra de material [23]. La teoría que subyace en este sistema es la propagación de ondas planas y la reflexión y transmisión de energía en un cambio de medio.

Una onda de presión incidente y una reflejada viajan en el interior de un tubo de dimensiones finitas, con una muestra de material colocada en el final del tubo como se muestra en la Figura 2. Un parlante colocado en el extremo opuesto a la muestra genera un frente de onda que se propaga en el interior del tubo hasta reflejarse parcialmente en la muestra de material. Se considera que las dimensiones transversales del tubo son pequeñas en relación a la longitud de onda de las señales que se propagan, para asegurar que en el interior se propagan ondas planas. La frecuencia límite superior (f_u) de uso del tubo establecida en la norma está dada por la ecuación 9, donde d expresa el diámetro interior de un tubo circular en metros.

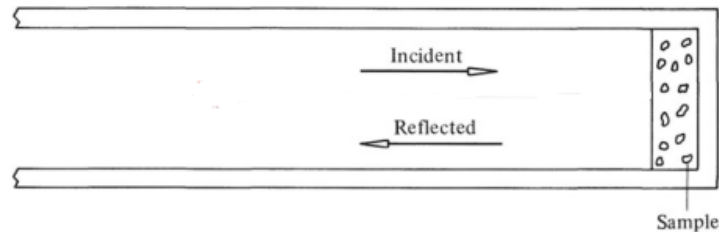


Figura 2. Onda incidente y reflejada en el interior de un tubo de impedancia [22].

$$f_u \cdot d \leq 200 \quad (9)$$

De acuerdo al sistema planteado, y según la ecuación (4), la relación entre la onda incidente y reflejada dará un coeficiente de reflexión de presiones tal que $0 < R < 1$ según la cantidad de energía que sea absorbida por la muestra. La interferencia entre cada una de las señales, resulta en un campo de presión con valores máximos y mínimos conocido como ondas casi-estacionarias.

Se puede obtener el coeficiente de absorción de la muestra bajo análisis en el tubo de impedancia desarrollando el cociente de las intensidades de cada una de las ondas, considerando que el tubo tiene sección uniforme en toda su extensión. A partir de esto se obtiene que el coeficiente de absorción se puede calcular según la ecuación 10.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (10)$$

En este sentido, resta encontrar el valor del coeficiente R de manera práctica en el tubo de impedancia para finalmente tener el valor de absorción. La norma ISO 10534 prescribe dos métodos para la determinación de dicho valor y de la impedancia o admitancia de superficie de la muestra:

- ISO 10534. Parte 1: Método del rango de onda estacionaria [5]: se realiza el ensayo mediante la medición de los valores máximos y mínimos de presión sonora de la onda casi-estacionaria dentro del tubo con un micrófono móvil, utilizando el rango de onda estacionaria (s).
- ISO 10534. Parte 2: Método de la función de transferencia [6]: se utilizan dos micrófonos en posiciones fijas (o un solo micrófono sucesivamente en posiciones) y un procesamiento de las señales basado en la transformada rápida de Fourier (FFT).

4.4. Procesamiento de las señales

En la Figura 3 se muestra un esquema del sistema de medición completo en donde se indican cada una de las etapas del mismo según lo establecido en la normativa ISO 10534-2.

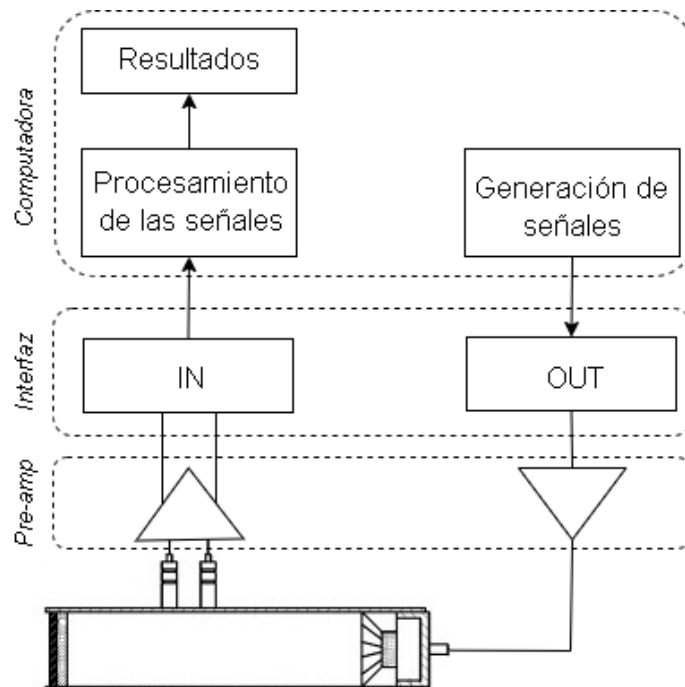


Figura 3. Diagrama en bloques de las etapas del sistema completo para la medición de coeficientes de absorción sonora.

La implementación del procedimiento de la norma ISO 10534-2, implica el cálculo de la función de transferencia entre los dos micrófonos en posiciones fijas del tubo. Cuya expresión

resultante, teniendo en cuenta la ecuación 4, es la que se muestra en la ecuación 11. Donde p_1 y p_2 son las señales registradas en cada uno de los micrófonos, y a partir de esta función puede ser despejado R , el coeficiente de reflexión, para luego obtener el coeficiente de absorción.

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jkx_2+R} \cdot e^{-jkx_2}}{e^{jkx_1+R} \cdot e^{-jkx_1}} \quad (11)$$

Para obtener esta función, el procesamiento debe estar basado en un procesador bicanal de transformada rápida de Fourier (FFT) a partir de las señales registradas en cada sensor. Y por supuesto, un generador de señales para generar la excitación dentro del tubo.

5. Diseño de la investigación.

El trabajo propuesto es una investigación tecnológica, se trata del desarrollo y la implementación de un sistema de medición de coeficientes de absorción sonora para materiales industriales utilizando el método de función de transferencia en tubo de Kundt según la normativa técnica ISO 10534-2 para el laboratorio de acústica y vibraciones del INTI. El alcance del mismo es expandir las capacidades de medición del laboratorio, dando la oportunidad de realizar un ensayo rápido y con una pequeña muestra de material.

Para el desarrollo de la investigación se plantean las siguientes etapas de trabajo, sujetas a modificaciones conforme avanza el proyecto:

- **1° etapa: Planteo y definición del proyecto.**
Se inicia el trabajo definiendo los objetivos del trabajo, con sus respectivas etapas a desarrollar. Se realiza una revisión de literatura para la fundamentación y de normativa técnica para la implementación.
- **2° etapa: Puesta en funcionamiento del tubo de Kundt existente.**
Se debe realizar un relevamiento de la condición de funcionamiento del sistema electroacústico y las características constructivas del sistema existente en el laboratorio para hacer una caracterización inicial del mismo. Con esta información se propone realizar una evaluación para definir la posibilidad de funcionamiento de los lineamientos normativos.
- **3° etapa: Propuesta de adaptación para el nuevo método.**
Se propone la manera de posicionar e instalar el sistema basado en dos micrófonos fijos basado en la literatura consultada, estado del arte, normativa, modelado y conveniencia constructiva. Por otro lado se definen las etapas de diseño, construcción, y desarrollo del sistema físico y el procesamiento de las señales.
- **4° etapa: Desarrollo del sistema.**
A partir de los planteos definidos en la tercera etapa, se lleva a cabo la adaptación del sistema, con la elección de los componentes necesarios y la posterior puesta en funcionamiento del sistema electroacústico. En paralelo, se desarrolla el procesamiento de las señales para la obtención de los resultados.
- **5° etapa: Obtención de los resultados.**
Finalmente, se hace una caracterización teórica y empírica del sistema obtenido. Se realiza la medición de ciertos materiales absorbentes para probar el desempeño que tiene según las muestras tomadas.

6. Análisis de los resultados y validación

Se realizarán mediciones de diferentes materiales industriales comerciales disponibles, de mayor y menor absorción para poner a prueba el sistema. Cuyos resultados serán comparados con la medición de los mismos materiales en cámara reverberante, bajo incidencia aleatoria según la normativa ISO 354 (o su equivalente IRAM 4065). Teniendo en consideración las diferencias teóricas que subyacen en cada uno de los métodos.

Dentro de las mediciones realizadas con el sistema desarrollado, se propone repetir reiteradas veces el ensayo con cada muestra para analizar la dispersión de los resultados obtenidos.

7. Líneas futuras de investigación.

A partir de lo planteado, se espera obtener un sistema apto para la medición de coeficientes de absorción sonora bajo incidencia normal con el método de función de transferencia, utilizando dos micrófonos fijos. Cuyo sistema quede precisamente caracterizado y calibrado para su uso. Que sea posible utilizarlo para caracterizar materiales a partir de una pequeña muestra de material, y en un lapso de tiempo corto.

Al finalizar el desarrollo, de acuerdo a los resultados alcanzados, habrá una noción más definida de las limitaciones que se tienen y las ventajas obtenidas. A partir de las cuales se pueden definir mejoras constructivas en el modelo desarrollado, optimización desde el punto de vista del procesamiento y la instalación del sistema en el laboratorio.

Como una propuesta de expansión del desarrollo, se puede definir una nueva adaptación del sistema con múltiples micrófonos para mejorar los errores mencionados en estudios del estado del arte, que si bien quedan fuera de la normativa, pueden ser una forma de control de los resultados.

8. Cronograma.

El siguiente diagrama de Gantt enuncia el cronograma de actividades y tareas previstas al momento de la realización de la investigación en un plazo total no menor a 8 meses.

Etapas	Actividad	Quincenas															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
E1	Definición del proyecto	X															
E1	Revisión de la literatura	X	X														
E2	Relevamiento del sistema existente		X	X													
E2	Evaluación de la adaptación		X	X													
E3	Propuesta de montaje de nuevo sistema			X	X	X	X										
E3	Definición de etapas de desarrollo siguientes						X										
E4	Adaptación del sistema							X	X	X	X	X	X				
E4	Desarrollo del procesamiento							X	X	X	X	X	X	X	X		
E5	Obtención de resultados															X	X



9. Bibliografía.

- [1] Cox, T. J., and D'Antonio, P., Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application, Spon Press (2004).
- [2] ISO 354:2003, Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room, International Organization for Standardization, Geneva (2003).
- [3] IRAM 4065:1995, Acústica. Medición de absorción sonora en sala reverberante, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina (1995).
- [4] ASTM C-423:2007, Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method, American Society for Testing Materials, United States of America (2007).
- [5] ISO 10534-1:1996, Acoustics, Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio, International Organization for Standardization, Geneva (1996).
- [6] ISO 10534-2:1998, Acoustics, Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method, International Organization for Standardization, Geneva (1998).
- [7] ISO 13472:2002, Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in-situ, International Organization for Standardization, Geneva (2002).
- [8] Kuttruff, H., Room acoustics, fifth edition, Spon Press, New York (2009).
- [9] Cops, A., Vanhaecht J., and Leppens, K., Sound absorption in a reverberant room: Causes of discrepancies on measurement results, Applied acoustics, 46, 215-232 (1995).
- [10] Carvalho, A. P. O., and Sousa, M. R. M., Effect of sample area in reverberant chamber measurements of sound absorption coefficients, Proceedings of the 22th International Congress on Acoustics, Buenos Aires, Argentina (2016).
- [11] Weston, D. E., The theory of the propagation of plane sound in waves in tubes, Physics department, Imperial College, London (1953).
- [12] Komkin, A. I., Methods of measuring the acoustic characteristics of sound-absorbing materials, Measurements techniques, 46(3), 290-295 (2003).
- [13] Cobo, P., Fernández, A., Palacios, R., de la Colina, C., and Siguero, M., In situ absorption measurement of antinoise devices using pre-determined pulse waveforms, Acústica, Portugal (2004).
- [14] Farina, A., Torelli, A., Measurement of the sound absorption coefficient of materials with a new sound intensity technique, (1997).
- [15] Pilon, D., Panneton, R., Behavioral criterion quantifying the effects of circumferential air gaps on porous materials in the standing wave tube, Acoustical Society of America, 116(1), 344-356 (2004).
- [16] Cummings, A., Impedance tube measurements on porous media: The effects of air-gaps around the sample, Journal of Sound and Vibration, 151(1), 63-75 (1991).
- [17] Katz, B. F. G., Method to resolve microphone and sample location errors in the two microphone duct measurement method, Acoustical Society of America, 108(5), 2231-2237 (2000).
- [18] Cho, Y. and Nelson, P. A., Least squares estimation of acoustic reflection coefficient, Institute of Acoustic Spring Conference, (2002).
- [19] Nireesh, J., Neelakrishnan, S., and Subha Rani, S., Investigation and correction of error in impedance tube using intelligent techniques, Journal of Applied Research and Technology, (2016).

- [20] Nasiri, B., and Meybodi, M. R., Speciation based firefly algorithm for optimization in dynamic environments, *International Journal Artificial Intelligence*, 8, 118-132 (2012).
- [21] Karaboga, D., and Basturk, B., Artificial Bee Colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems, *Lectures Notes in Computer Science*, 4529, 789-798 (2007).
- [22] Pierce, A.D., *Acoustics. An introduction to its physical principles and applications*, third edition, ASA Press, United States of America (2019).
- [23] Rossing, T. D., *Springer handbook of acoustics*, Springer, New York (2007).