

Dispositivo de medición de bajo coste para la determinación de propiedades de aislamiento acústico



Luis Suárez; María del Mar Espinosa

Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Madrid, España

lsuarez220@alumno.uned.es

PACS: 43.20.Ye; 43.20.Hq; 43.50.Gf

Resumen

El presente artículo trata sobre el desarrollo de un sistema de medición de pérdidas por inserción de bajo coste para la caracterización acústica de materiales aislantes y atenuadores del sonido. El objetivo es la definición de un procedimiento asequible y sencillo para el análisis comparativo de nuevos materiales y metamateriales empleados en el desarrollo de dispositivos de aislamiento y atenuación de ruido. Frente a los sistemas de ensayos convencionales, tales como tubos de impedancia y cámaras reverberantes, se propone un método de medición directa para la evaluación de la eficiencia acústica que reduzca los requerimientos de instalaciones complejas y formación avanzada para su manejo e interpretación de resultados. El dispositivo de ensayo para la determinación de pérdidas por inserción permite obtener datos de medición confiables y comparables entre sí para una caracterización básica preliminar del comportamiento de los materiales aislantes frente a las ondas de sonido.

Palabras clave: aislamiento, atenuación, reducción de ruido, pérdida por inserción, sistema de medición.

Abstract

This paper deals with the development of a low cost insertion loss measurement system for the acoustic characterization of sound insulating and attenuating materials. The objective is the definition of an affordable and simple procedure for the comparative analysis of new materials and metamaterials used in the development of isolation and noise attenuation devices. Compared to conventional test systems, such as impedance tubes and reverberant chambers, a direct measurement method is proposed for the evaluation of acoustic efficiency that reduces the requirements of complex installations and advanced training for its handling and interpretation of results. The test device for the determination of insertion losses allows reliable and comparable measurement data to be obtained for a preliminary basic characterization of the behaviour of insulating materials against sound waves.

Keywords: insulation, attenuation, noise reduction, insertion loss, measurement system.

1. Introducción

La contaminación acústica constituye uno de los problemas ambientales más importante que afecta a la sociedad actual en diferentes ámbitos. La generación de niveles de ruido producidos, directa o indirectamente por la actividad humana (industria, transporte, ocio), que superan los umbrales máximos admitidos, representa un grave problema para la salud y calidad de vida de las personas, así como para el medio ambiente en el que tales actividades se desarrollan. Esta circunstancia, indudablemente vinculada con el desarrollo de los modelos de sociedad industrial y urbana, hace que sea imprescindible la implementación de medidas y mecanismos de control que contribuyan a paliar los efectos nocivos del

ruido sobre la población y el medio ambiente, reduciendo sus niveles de emisión o interponiendo barreras que atenuen su intensidad en los lugares de influencia de los mismos.

En los últimos años se han experimentado notables avances en la investigación de materiales innovadores para aplicaciones de control y acondicionamiento acústico motivados por circunstancias tales como la necesidad de reducir las implicaciones ambientales y de salud de los materiales convencionales, como la sustitución de absorbentes producidos con fibras de vidrio por otros más sostenibles [1], [2], o el avance en nuevos procesos productivos, como el uso de tecnologías de fabricación aditiva [3]–[8]. Estos trabajos de investigación para el

desarrollo de nuevos materiales y metamateriales acústicos requieren de herramientas y metodologías de medición que permitan la caracterización de su comportamiento frente a las ondas sonoras.

La instalación de elementos para el aislamiento o atenuación acústica entre una fuente emisora de sonido (ruido) y un sujeto receptor puede producir diferentes efectos sobre la transmisión de las ondas originalmente emitidas en función del material, la geometría y la disposición del elemento que actúa como aislante acústico (cerramiento, pantalla, silenciador, etc.). Al contactar con la superficie de la barrera acústica las ondas de sonido pueden ser reflejadas o absorbidas, total o parcialmente, en función de las características acústicas del material. Además, el sonido puede atravesar el obstáculo (ondas transmitidas) o verse desviado por este (ondas difractadas) tomando nuevas direcciones y rebotando sobre otras superficies (ondas reflejadas) antes de llegar al receptor, tal y como se muestra en la Figura 1.

Existen varios parámetros que describen el rendimiento acústico de los materiales y dispositivos de atenuación y aislamiento; el glosario de términos publicado por la Sociedad Española de Acústica recoge, entre otros, los siguientes [9]:

- Aislamiento acústico a ruido aéreo: capacidad de un dispositivo o elemento separador entre espacios o recintos para reducir el nivel de presión sonora entre emisor y receptor.
- Atenuación acústica: disminución del nivel de presión acústica entre dos puntos determinados de un sistema de transmisión acústica.
- Coeficiente de absorción acústica, α : fracción de la intensidad acústica absorbida por un determinado

medio o material, dependiente de la frecuencia y del ángulo de incidencia.

- Pérdida por inserción: diferencia entre el nivel de potencia acústica o nivel de presión acústica con y sin un dispositivo de control de ruido interpuesto entre la fuente de ruido y el punto de observación (UNE-EN ISO 11690).
- Pérdida por transmisión: diferencia entre los niveles de potencias acústicas incidentes en y transmitidos a través del objeto de ensayo (UNE-EN ISO 7235).
- Índice de reducción acústica, R: un descriptor de la pérdida por transmisión definido como diez veces el logaritmo en base 10 de la razón entre la potencia acústica incidente sobre un elemento de ensayo y la transmitida a través de dicho elemento (UNE-EN ISO 7235).

Además, se encuentra que en diversos ámbitos de la ingeniería y en distintas regiones geográficas se emplean diferentes parámetros para la designación y clasificación del aislamiento acústico. Así se especifican, por ejemplo, el índice de reducción sonora global (R_w) que surge de la familia de normas internacionales ISO 140 para definir el aislamiento acústico de los elementos constructivos mediante un índice de valor único; o los índices STC y OITC (del inglés, *Sound Transmission Class* y *Outdoor-Indoor Transmission Class*, respectivamente) desarrollados en Estados Unidos con la misma finalidad, si bien parametrizados bajo diferentes condiciones de ensayo [10].

2. Marco teórico

El coeficiente de absorción acústica, α , es uno de los índices más ampliamente utilizados para la clasificación de

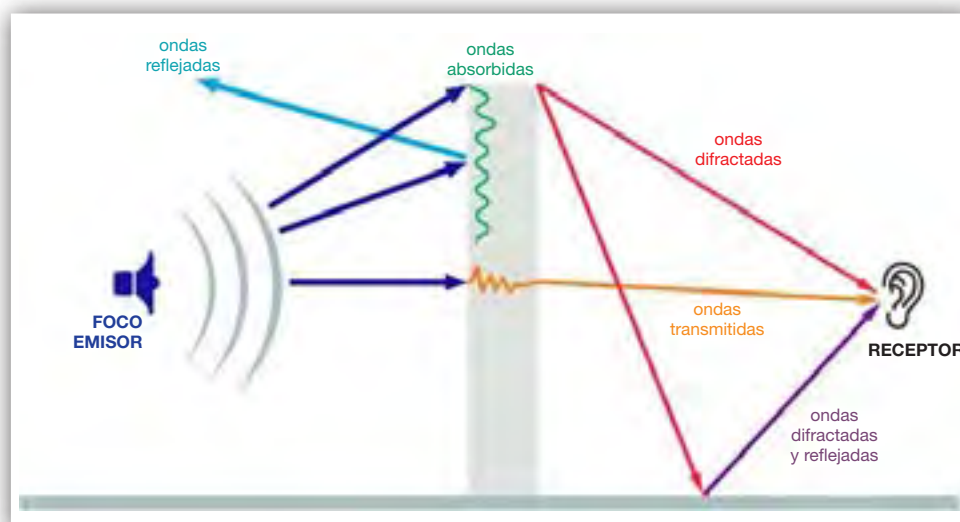


Figura 1. Efecto de las barreras acústicas en la propagación de ondas de sonido.

los materiales en función de su comportamiento frente a las ondas de sonido [11]. Los métodos estandarizados empleados para la medición de dicha propiedad son los realizados mediante tubo de impedancia (UNE EN-ISO 10534) y cámara reverberante (UNE EN-ISO 354). El método del tubo de impedancia se basa en el procesamiento de las señales de onda incidente y reflejada por una muestra pequeña del material, a través del cálculo de la función de transferencia acústica compleja, para determinar la cantidad de energía disipada en el material y el desfase de onda producido. Una fuente sonora situada en uno de los extremos del tubo emite ondas planas de incidencia normal sobre la muestra situada en el otro extremo [12] y un conjunto de micrófonos, normalmente situados entre el emisor y la muestra, registran las señales acústicas para ser analizadas. Por su parte, la medición en cámara reverberante consiste en la medición y comparación de los tiempos de reverberación en el interior de un recinto de gran volumen ($>150 \text{ m}^3$) con y sin material absorbente. En este caso se requieren muestras de ensayo de mayor tamaño ($>10 \text{ m}^2$) para su determinación [13].

Varios autores han desarrollado tubos de impedancia de bajo coste [11], [14]-[16] y cámaras reverberantes a escala [17]-[21] para su uso con fines científicos y académicos. Si bien la construcción de estos dispositivos de ensayo puede ser más o menos económica y sencilla, los procedimientos de medición, basados en métodos de análisis de ondas complejas, requieren de conocimientos específicos para su calibración y manejo, así como para la correcta interpretación de los datos obtenidos, lo que limita su accesibilidad.

Frente a esta circunstancia, el sistema de medición propuesto en este trabajo trata de ofrecer un método asequible para la caracterización acústica de materiales aislantes que permita la obtención directa de datos de medición, sin necesidad de cálculos complejos ni requerimientos de formación específica. El sistema de ensayo presentado se basa en la determinación de las características de atenuación acústica de pequeñas muestras de material mediante la cuantificación de las pérdidas por inserción. Este parámetro, dependiente de la frecuencia y expresado en decibelios, se emplea para evaluar el rendimiento acústico de cerramientos, pantallas, silenciadores, protectores auditivos, etc. [9]. La obtención directa de datos de medición hace posible que cualquier usuario, sin requisitos de formación específica ni la necesidad de costosas instalaciones, pueda analizar y comparar el comportamiento de diferentes muestras de material frente a las ondas de sonido como una primera aproximación para el desarrollo de nuevos materiales acústicos y mecanismos de control de ruido.

Conviene resaltar la diferencia entre absorbentes y aislantes acústicos. La absorción acústica hace referen-

cia a la absorción de la energía de un campo acústico por medio de su propagación a través de dispositivos, objetos y obstáculos o por las superficies que limitan dicho campo [9]; la disipación se produce al transformar la energía del sonido en energía calorífica (materiales porosos) o mecánica (resonadores) a través de dichos obstáculos [22]. La utilización de materiales y dispositivos absorbentes permite, por ejemplo, acondicionar el confort acústico en el interior de los recintos mediante la atenuación de la intensidad sonora; las ondas incidentes son amortiguadas al chocar contra las superficies absorbentes de las barreras de control de ruido. Por su parte, el aislamiento acústico se refiere a la capacidad de un dispositivo o elemento separador para reducir o evitar el paso de las ondas de sonido desde una fuente o recinto emisor hacia un individuo o recinto receptor [9]. Los materiales aislantes convencionales se caracterizan por su masa, siendo en general densos y blandos, o bien presentándose en forma de paneles tipo sándwich que combinan materiales más ligeros e incluyen rellenos absorbentes [22]. Los absorbentes acústicos actúan sobre las ondas reflejadas, mientras que los aislantes acústicos intervienen sobre las ondas transmitidas. La capacidad de aislamiento cobra especial importancia en el diseño de dispositivos de control de ruido como pantallas acústicas, silenciadores, encapsulamientos o equipos de protección auditiva, entre otros.

La pérdida por inserción (referida como IL, por sus siglas en inglés, *insertion loss*) hace referencia a la reducción del nivel de ruido en una ubicación dada debido a la colocación de un dispositivo de aislamiento entre la fuente de sonido y dicha ubicación, generalmente es clasificada en bandas de octava o de tercios de octava. Se comparan, por tanto, los niveles de presión sonora antes (SPL_1) y después (SPL_2) de la colocación del aislamiento, para obtener el valor de la pérdida por inserción para cada frecuencia central, indicándose la reducción de la presión acústica en decibelios (dB):

$$IL = SPL_1 - SPL_2$$

3. Diseño y construcción del dispositivo de medición

El diseño del dispositivo propuesto toma como referencia la instalación de ensayo estandarizada por la norma UNE-EN ISO 11691 para la medición de las pérdidas por inserción de silenciadores en conducto sin flujo. Se plantea una configuración básica similar, si bien se contempla una reducción de escala, entre otras variaciones. De manera general, el sistema se compone de una fuente de sonido, un conducto de transmisión de ondas, en cuyo extremo se coloca la muestra de ensayo, y un

micrófono situado al otro lado de esta, ubicado en el interior de una cámara receptora anecoica (Figura 2). El dispositivo se completa con la conexión a un equipo informático encargado de procesar las señales de sonido emitidas y recibidas. La magnitud objeto de medición será la diferencia de presión sonora registrada antes y después de la colocación del material aislante entre la fuente emisora (altavoz) y el micrófono receptor en el rango de frecuencias de interés, que se ha considerado entre 150 y 3500 Hz.

El conducto utilizado para la transmisión de las ondas de sonido debe ser suficientemente largo para permitir el desarrollo de ondas planas entre la fuente y la muestra. Para su dimensionamiento se siguen las consideraciones establecidas para el diseño de tubos de impedancia [12], de modo que la determinación del diámetro y la longitud se definen en función del rango de frecuencias en el que se realizarán las mediciones. La frecuencia superior de funcionamiento (f_u) y el diámetro interior del tubo (d) pueden ser calculados teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

$$d < 0.58 \lambda_u \Rightarrow f_u d < 0.58 C_0$$

Donde,

d = Diámetro interior del tubo [m]

f_u = Frecuencia superior [Hz]

λ_u = Longitud de onda superior [m]

C_0 = Velocidad del sonido [m/s]

Por su parte, la longitud del conducto (l) desde la posición del altavoz hasta la cara frontal de la muestra, viene determinada por el límite de frecuencia inferior (f_0) del rango de trabajo y se establece según la siguiente relación:

$$l \geq \frac{3 \lambda_0}{4}$$

Donde,

l = Longitud del tubo [m]

λ_0 = Longitud de onda inferior [m]

A partir de estas condiciones, para la fabricación del banco de ensayos prototipo se selecciona un tubo de PVC de 57 mm de diámetro interior, 3 mm de espesor de pared y longitud superior a 1.8 m, que permite la generación de ondas planas en el intervalo de frecuencias seleccionado, de 150 a 3500 Hz; se considera una velocidad del sonido en el aire (C_0) de 343.2 m/s a una temperatura de 20 °C.

Como fuente sonora se utiliza un altavoz (Trust Polo Compact 2.0), de 4 W de potencia y respuesta en frecuencia de 150 a 20000 Hz. El transductor electroacústico cuenta con un diafragma de 2 pulgadas que se adapta perfectamente a las dimensiones del diámetro interno del tubo. El altavoz se instala en el interior de una caja hermética construida con fibropanel de densidad media, de 19 mm de espesor. Se coloca espuma acústica en su parte posterior para eliminar posibles efectos de reverberación e interferencias acústicas externas, y se alinea coaxialmente con el conducto de transmisión a través de una pieza de acoplamiento insertada en el orificio frontal de la caja emisora. Se presta especial atención para evitar la transmisión de vibraciones que puedan perturbar la medida.

Al otro lado del dispositivo se sitúa una cámara receptora a la que llega el sonido emitido desde la fuente de sonido a través del tubo y en cuyo interior se ubica el micrófono de medición. La cámara receptora consiste en un recinto anecoico con un volumen de 0.91125 m³ construido con paredes de fibropanel de 19 mm y forrado interiormente con paneles de absorción acústica de geometría piramidal con objeto de simular condiciones de campo libre en el punto de medición (Figura 3). El recinto receptor cuenta con un orificio en el centro de una de sus caras que se alinea con el conducto de transmisión y la fuente acústica a través de un elemento de acople. Además, dicho elemento de acople, empleado para la inserción del tubo en la cámara receptora, cumple la función de portamuestras permitiendo la colocación de las piezas de ensayo perpendicularmente al eje de transmisión de las ondas. Los especímenes de ensayo a emplear para la determinación de sus propiedades de aislamiento acústico por medio de este dispositivo de medición deben consistir

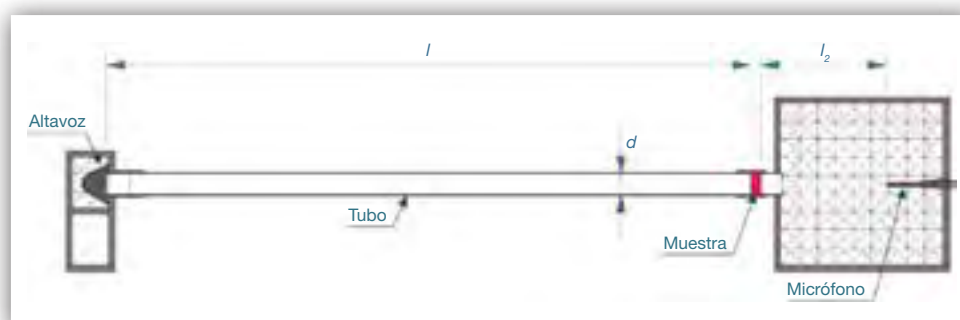


Figura 2. Esquema constructivo del sistema de medición de pérdidas por inserción.



Figura 3. Fuente emisora y cámara receptora.

en discos o piezas de geometría exterior cilíndrica, de 63 mm de diámetro. Debe existir un buen ajuste dimensional en la colocación de la muestra de ensayo en el interior del portamuestras con objeto de asegurar su posición, perpendicularmente al eje del conducto, evitando holguras y aprietos excesivos. Se emplea vaselina para facilitar el montaje y el sellado de las juntas de ensamble con el fin de reducir las posibilidades de que se produzcan fugas y vibraciones que puedan distorsionar los resultados.

Para la determinación de los niveles de presión sonora se emplea un micrófono de condensador omnidireccional (Behringer ECM8000) con un rango de respuesta ultra-lineal de 15 Hz a 20 kHz. El micrófono se sitúa a una distancia de 350 mm desde la cara posterior de la muestra y se orienta coaxialmente con la fuente de sonido y, por tanto, con el conducto de transmisión de ondas y la muestra de ensayo. La conexión del altavoz y el micrófono al equipo informático se realiza por medio de una interfaz de audio USB (Behringer U-Phoria UMC22).



Figura 4. Aplicación informática empleada para la generación de señales y medición de los niveles de presión sonora.

Por último, para la realización de las mediciones se emplea la aplicación Room EQ Wizard (REW), un programa gratuito de medición y análisis acústico de salas que se ejecuta bajo los sistemas operativos de Windows, Mac y Linux [23]. Se utiliza la herramienta de generación de señales de audio para la emisión de ondas sinusoidales a las frecuencias de ensayo y la de medición del nivel de presión sonora para registrar el sonido recogido por el micrófono (Figura 4). Las mediciones de pérdida por inserción se realizan en bandas de tercio de octava dentro del intervalo de medición. Las frecuencias centrales para las bandas de 1/3 de octava, en el rango fijado son las siguientes:

Tabla 1. Frecuencias de medición.

Frecuencias (Hz)													
160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150

Tabla 2. Resumen de materiales para la construcción del dispositivo de medición acústica.

Concepto	Descripción	Cantidad	Coste
Fuente de sonido	Altavoz de 4 W y 150-20000 Hz (Trust Polo Compact 2.0)	1	14.00 €
Micrófono	Micrófono de condensador de medición omnidireccional (Behringer ECM8000),	1	29.50 €
Interfaz de audio	Interfaz de audio USB de 16-bit 48kHz, 2 entradas y 2 salidas (Behringer U-Phoria UMC22)	1	31.90 €
Tubo	Tubo de PVC (10 atm) de 63 mm diámetro y espesor de 3 mm	2 m	3.20 €
Acoplamiento	Manguito de PVC H-H de 63 mm para el acoplamiento del tubo en ambos extremos	2	1.90 €
Tablero de fibras	Tablero MDF de 19 mm de espesor cortado a medida para la construcción de las cajas emisora y receptora	1.8 m ²	18.00 €
Absorbente acústico	Panel absorbente de geometría piramidal, 43 mm de espesor (ChovACUSTIC Deco Piramide)	1.4 m ²	18.90 €
Otros	Tornillería, herrajes y otros accesorios de montaje	–	20,00 €
TOTAL			137.40 €

Los niveles de presión sonora registrados para cada frecuencia, con y sin atenuador acústico, se anotan en una hoja de cálculo para la determinación y representación gráfica de los valores de pérdida por inserción.

En la Tabla 2 se detalla el desglose de materiales necesarios para la construcción del banco de ensayos prototipo mostrado en la Figura 5. Su coste de fabricación se sitúa por debajo de los 150 euros (excluyendo el equipo informático), lo que lo convierte en una herramienta asequible para su uso con fines docentes en entornos académicos y su aplicación en la investigación básica de materiales acústicos para aplicaciones específicas por parte de pequeñas organizaciones con recursos limitados o que se estén iniciando en el campo de la acústica, así como en países en vías de desarrollo.

4. Procedimiento de medida

La utilidad del dispositivo propuesto se encuentra en la posibilidad de determinar las propiedades de atenuación acústica de pequeñas muestras de material de diferente naturaleza; desde materiales sólidos y densos a metamateriales avanzados, tales como resonadores y cristales sónicos, pasando por materiales compuestos o espumados, entre otros. El dispositivo consiste principalmente en una herramienta de análisis básico para facilitar las etapas iniciales de investigación para el desarrollo de nuevas aplicaciones específicas de control de ruido (silenciadores, protectores auditivos, barreras acústicas, etc.). De manera análoga podría ser útil para el estudio

de estructuras que pretendan un efecto contrario en la propagación de ondas de sonido.

Recientes avances en la investigación de metamateriales acústicos han demostrado la posibilidad de generar estructuras para la atenuación de ruido manteniendo la permeabilidad al aire. En este apartado, se toma como referencia el trabajo de Ghaffarivardavagh y colaboradores [8] para el estudio de un silenciador metamaterial con dichas características. Se adapta la geometría presentada por los investigadores de la Universidad de Boston sin mayor pretensión que la validación experimental del método de medición de pérdidas por inserción propuesto empleando el sistema prototipo fabricado. Con esta premisa, se modela una estructura de tipo metamaterial ultra-abierta en forma de anillo ($r_{ext} = 31.5$ mm, $r_{int} = 17.5$ mm, $t = 20$ mm) con seis canales helicoidales de sección rectangular ($s = 8.0 \times 1.7$ mm, $\Theta = 6.49^\circ$) distribuidos radialmente según se muestra en la Figura 6. El silenciador diseñado es fabricado mediante impresión 3D empleando la tecnología de fabricación por filamento fundido (FFF) y material termoplástico, PLA.

Tras la fabricación del modelo de ejemplo se realizan las pruebas de medición siguiendo el siguiente protocolo:

En primer lugar se ejecuta la calibración del sistema mediante la opción habilitada por la herramienta de medición de niveles de presión sonora del programa informático REW. La calibración se realiza con el dispositivo en vacío, esto es sin muestra de ensayo en el interior del



Figura 5. Sistema de medición de pérdidas por inserción (instalación prototipo).



Figura 6. Geometría de silenciador metamaterial y prototipo fabricado mediante impresión 3D.

Tabla 3. Medidas de nivel de presión sonora y pérdida por inserción.

Frecuencia (Hz)	Nivel de presión sonora (dB)				Pérdida por inserción (dB)
	En vacío (SPL ₁)		Con muestra (SPL ₂)		
	Promedio	Desviación (σ_{SPL1})	Promedio	Desviación (σ_{SPL2})	
160	48,7	0,25	48,8	0,21	-0,2
200	53,3	0,25	52,1	0,21	1,1
250	60,7	0,21	59,2	0,15	1,5
315	65,4	0,13	64,5	0,11	0,9
400	53,7	0,11	50,3	0,11	3,4
500	40,7	0,00	42,2	0,09	-1,5
630	45,9	0,00	45,6	0,08	0,3
800	57,4	0,13	53,2	0,12	4,2
1000	59,9	0,12	55,8	0,11	4,1
1250	62,9	0,05	62,9	0,04	0,0
1600	61,5	0,07	56,4	0,04	5,1
2000	59,8	0,08	53,5	0,04	6,3
2500	59,9	0,08	49,5	0,05	10,3
3150	54,1	0,11	48,8	0,00	5,3
Promedio	56,0		53,1		2,9

tubo. Seguidamente se lleva a cabo la medición de los niveles de presión sonora (dB) a las frecuencias de ensayo indicadas de manera secuencial, fijando un tiempo de incidencia de 30 segundos para cada frecuencia central. Los niveles registrados por el sonómetro son anotados en la hoja de cálculo. A continuación se coloca la muestra de ensayo en el interior del portamuestras y se efectúa la misma operación. Se toman las dos series de medidas de manera consecutiva y bajo las mismas condiciones ambientales de humedad y temperatura. Si bien el recinto donde se realizan las pruebas de medición no cuenta con ningún tipo de acondicionamiento acústico, se procura la realización de los ensayos durante horas de poca actividad con el fin de evitar ruidos de fondo que pudieran interferir en los resultados.

Para la validación del método se realiza un estudio de repetibilidad de la medida, tomando cinco veces las mediciones de ambas series. El coeficiente de variación promedio encontrado en la toma de medidas de nivel de presión sonora con y sin aislamiento acústico se sitúa en torno al 0,2%, demostrando una aceptable fiabilidad del equipo. Una vez registrados los niveles de presión sonora para cada frecuencia central de tercios de octava en el intervalo de estudio, se determinan las pérdidas por inserción mediante el cálculo de la diferencia algebraica de cada par de datos. En la Tabla 3 se muestran los datos obtenidos incluyendo los niveles de presión sonora promedio, desviaciones típicas de ambas series de ensayo y pérdidas por inserción para cada frecuencia.

Los valores obtenidos se representan gráficamente para una mejor interpretación (Figura 7).

De acuerdo con los resultados obtenidos, el silenciador diseñado alcanza una atenuación máxima de 10.3 dB para la frecuencia de 2500 Hz, obteniendo un promedio de reducción de ruido de 2.9 dB en el rango de frecuencias analizado.

5. Conclusiones

La atenuación de ruido continua siendo un factor de interés en la investigación y desarrollo de nuevas soluciones para hacer frente a la contaminación acústica. Los avances logrados en el uso de materiales más sostenibles y la aplicación de nuevas técnicas de producción han abierto nuevas perspectivas para el desarrollo de mecanismos de control de ruido más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. Con la implementación del sistema de medición de pérdidas por inserción de bajo coste que se presenta en este artículo, se ofrece una herramienta accesible para la profundización en el estudio de materiales y dispositivos de atenuación de ruido incluso por organizaciones con recursos limitados y sin formación específica.

La metodología y el dispositivo de medición propuestos facilitan la caracterización de las propiedades de aislamiento acústico de nuevos materiales y metamateriales destinados a la producción de dispositivos de reducción

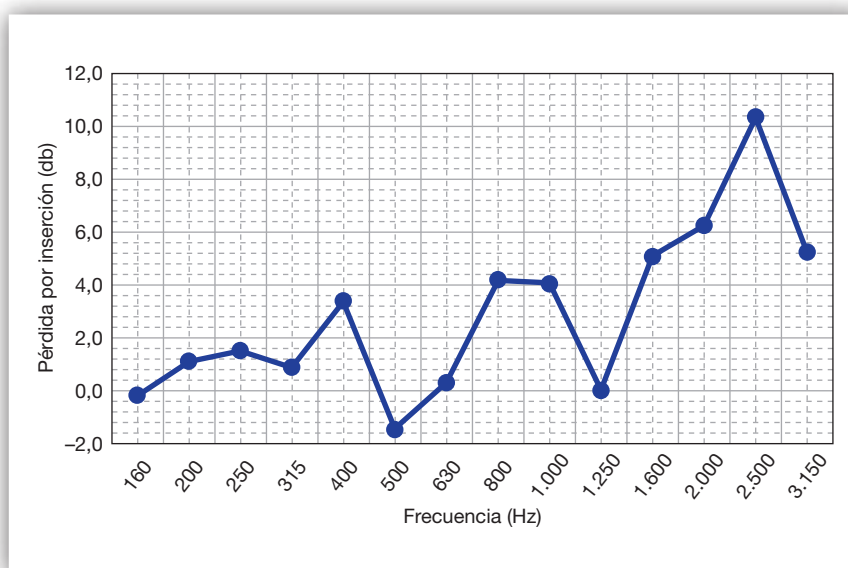


Figura 7. Representación gráfica de las pérdidas por inserción del modelo de ejemplo.

de ruido como silenciadores, protectores auditivos, pantallas de cerramiento, etc. La obtención directa de valores de atenuación acústica simplifica el estudio para una caracterización básica preliminar, obteniendo datos confiables y comparables entre sí.

Se ha comprobado el funcionamiento del método de medición propuesto mediante la fabricación de un banco de ensayos prototipo y la caracterización de un novedoso tipo de silenciador metamaterial. Si bien se ha verificado una convergencia adecuada en la repetibilidad de los ensayos que permiten calificar los datos medidos como comparables, son necesarios ensayos interlaboratorio para la determinación de la desviación típica de reproducibilidad. El uso del sistema de medición en diferentes proyectos de investigación para el estudio de diversas clases de materiales y metamateriales acústicos permitirá un mejor análisis de su potencial y la detección de características o procedimientos susceptibles de mejora.

Así, por ejemplo, se podría plantear la posibilidad de añadir uno o varios micrófonos más en el sistema que permitan la medición de otros parámetros de comportamiento frente a las ondas de sonido y definir procedimientos de correlación entre los valores de pérdida por inserción y otros índices de parametrización acústica normalizados. Otro aspecto a considerar es la capacidad de ampliar el rango de frecuencias de ensayo mediante la sustitución del altavoz por uno con espectro de respuesta más amplio y mayor potencia acústica, así como incluyendo la posibilidad de utilizar conductos intercambiables, de menor diámetro para ampliar la frecuencia superior y mayor longitud para reducir el límite inferior.

6. Referencias

- [1] F. Asdrubali, S. Schiavoni, and K. V Horoshenkov, "A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications," *Build. Acoust.*, vol. 19, no. 4, pp. 283–311, 2013.
- [2] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, and S. Schiavoni, "A review of unconventional sustainable building insulation materials," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 4, pp. 1–17, Jul. 2015.
- [3] O. B. Godbold, R. C. Soar, and R. A. Buswell, "Implications of solid freeform fabrication on acoustic absorbers," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 5, pp. 298–303, 2007.
- [4] F. Setaki, M. Tenpierik, M. Turrin, and A. van Timmeren, "Acoustic absorbers by additive manufacturing," *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 188–200, 2014.
- [5] Z. Liu, J. Zhan, M. Fard, and J. L. Davy, "Acoustic measurement of a 3D printed micro-perforated panel combined with a porous material," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 104, pp. 233–236, Jul. 2017.
- [6] M. D. Guild, M. Rothko, C. F. Sieck, C. Rohde, and O. Gregory, "3D printed acoustic metamaterial sound absorbers using functionally-graded sonic crystals," in *Euronoise 2018*, 2018.
- [7] A. Arjunan, "Targeted sound attenuation capacity of 3D printed noise cancelling waveguides," *Appl. Acoust.*, vol. 151, pp. 30–44, 2019.
- [8] R. Ghaffarivardavagh, J. Nikolajczyk, S. Anderson, and X. Zhang, "Ultra-open acoustic metamaterial

- silencer based on Fano-like interference,” *Phys. Rev. B*, vol. 99, 2019.
- [9] S. E. de Acústica, *Glosario de Términos Acústicos*. Madrid: Sociedad Española de Acústica, 2012.
- [10] N. Garg, A. Kumar, and S. Maji, “Technical Notes: Practical concerns associated with single-number ratings in measuring sound transmission loss properties of partition panels,” *Arch. Acoust.*, vol. 38, no. 1, pp. 115–124, 2013.
- [11] G. C. C. da Silva, M. A. de Araújo Nunes, R. V. Lopes, and A. B. A. Júnior, “Design and construction of a low cost impedance tube for sound absorption coefficients measurements,” in *Proceedings of the 22nd international congress of mechanical engineering (Cobem 2013)*, 2013, pp. 105–115.
- [12] AENOR, “UNE-EN ISO 10534-2. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.” Madrid, p. 34, 2002.
- [13] AENOR, “UNE-EN ISO 354. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.” Madrid, p. 27, 2004.
- [14] S. P. Deshpande and M. D. Rao, “Development of a Low Cost Impedance Tube To Measure Acoustic Absorption and Transmission Loss of Materials,” in 121st ASEE Annual Conference & Exposition, 2014.
- [15] B. Arunkumar and S. Jeyanthi, “Design and analysis of impedance tube for sound absorption measurement,” *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 1400–1405, 2017.
- [16] N. Palella and G. J. Binkley, “Impedance Tube Alternative via the Transfer Function Method,” 2018.
- [17] J. R. Veen and P. Saha, “Feasibility of a Standardized Test Procedure for Random Incidence Sound Absorption Tests Using a Small Size Reverberation Room,” *SAE Trans.*, vol. 112, pp. 1891–1897, 2003.
- [18] M. Sola Pérez, “Caracterización acústica de materiales en cámaras de ensayo ‘a escala’,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [19] A. Teira Arnosó, “Adecuación y validación de una cámara reverberante a escala para ensayos de pantallas acústicas,” Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [20] M. M. Kanase and M. B. Chaudhari, “Design, Manufacturing and Validation of Low Cost, Miniature Acoustic Chamber,” *Noise Vib. Worldw.*, vol. 46, no. 7, pp. 24–35, 2015.
- [21] R. Del Rey, J. Alba, L. Bertó, A. Gregori, and A. Gregori, “Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption,” *Mater. Construcción*, vol. 67, no. 328, p. 139, Sep. 2017.
- [22] R. Arce Recio, C. Hoppe Atienza, B. Arce Pascual, and C. Hoppe Olea, “Control del ruido en aislamiento acústico,” in VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008, 2008, pp. 1–11.
- [23] J. Mulcahy, “REW - Room EQ Wizard Room Acoustics Software,” *RoomEQWizard.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.roomeqwizard.com/>. [Accessed: 11-Sep-2019].

TA120 SENSOR DE RUIDO



CESVA
50
1969-2019

MUCHAS GRACIAS A TODOS
NUESTROS CLIENTES Y COLABORADORES
POR ESTOS 50 AÑOS

www.cesva.com

Solución para la monitorización de ruido en SMART CITIES



Noiseplatform

Plataforma online de monitorización de ruido
www.noiseplatform.com