

# PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE METAMATERIALES ACÚSTICOS PARA EL CONTROL DEL RUIDO

L. Onrubia-Fontangordo<sup>1</sup>, J.M. Bravo Plana-Sala<sup>1</sup>, S. Castiñeira-Ibáñez<sup>1</sup>, J.V. Sánchez-Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera s/n, 46022, València (España)

{e-mails: luonfon@doctor.upv.es, jobrapla@fis.upv.es, sercasib@fis.upv.es, jusanc@fis.upv.es}

## Resumen

Dentro de la acústica ambiental, la validación experimental de los métodos numéricos para el estudio de metamateriales para la creación de dispositivos de control del ruido, resulta fundamental. En la mayoría de los casos, la obtención de estos datos experimentales, generalmente mediante la creación de grandes prototipos en cámara anecoica, retrasa considerablemente la validación de estos modelos y, por tanto, su aplicabilidad. En este trabajo se presenta un prototipo experimental de tamaño reducido que permite la validación de la simulación numérica para la predicción del comportamiento de metamateriales acústicos formados por matrices de dispersores aislados. Este prototipo resulta versátil, siendo su uso sencillo, permitiendo obtener resultados de una manera rápida, destacando además, su competitividad económica respecto a los ensayos que pueden realizarse en una cámara anecoica. Los resultados obtenidos con el prototipo se han validado con un modelo de simulación numérica y en cámara anecoica. El uso conjunto de estas herramientas puede transformar el campo de la adquisición de datos experimentales en condiciones controladas en acústica y puede ser de gran ayuda en el diseño de dispositivos tecnológicamente avanzados para el control del ruido ambiental.

**Palabras clave:** Ruido ambiental, barreras acústicas, metamateriales, modelización.

## Abstract

The experimental validation of numerical methods for studying metamaterials to create noise control devices is fundamental within environmental acoustics. In most cases, obtaining these experimental data, generally through the creation of large prototypes in an anechoic chamber, considerably delays the validation of these models and, therefore, their applicability. In this work, we present a small experimental prototype that allows the validation of the numerical simulation to predict the behavior of acoustic metamaterials formed by arrays of isolated scatterers. This prototype is versatile and easy to use, allowing results to be obtained quickly. It is also economically competitive concerning tests that can be carried out in an anechoic chamber. The results obtained with the prototype have been validated with a numerical simulation model and in an anechoic chamber. The joint use of these tools can transform the field of experimental data acquisition under controlled conditions in acoustics. It can be of great help in designing technologically advanced devices to control environmental noise.

**Keywords:** Environmental noise, noise barriers, metamaterials, modelling.

**PACS n°.** 43.58.Ta, 43.50.Gf

## 1 Introducción

El ruido es a día de hoy un problema de salud persistente, y está documentado como tal desde hace más de 100 años. La exposición prolongada a niveles elevados de ruido ambiental es una de las principales causas de mala salud en Europa y está directamente relacionado con padecer malestar, dificultades para dormir, problemas cardiovasculares y dificultades en el aprendizaje en los niños [1]. El ruido de tráfico, clasificado como la segunda mayor amenaza para la salud ambiental después de la contaminación atmosférica [2], afecta a 113 millones de personas en toda Europa. Entre ellas, 22 millones sufren un impacto acústico grave, 6.5 millones padecen trastornos del sueño y 48000 han desarrollado enfermedades cardiovasculares [3]. Más de 420000 km de carreteras europeas, con mas de 3 millones de desplazamientos anuales, se enfrentan a problemas de ruido [2]. La Unión Europea pretende reducir el impacto del ruido del tráfico en un 30% mediante mecanismos como la electrificación, asfaltos reductores de ruido, imposición de límites de velocidad mas estrictos y el uso de barreras acústicas para 2030 [4-8].

Las barreras acústicas, cruciales cuando no es posible intervenir directamente sobre la fuente de ruido, encuentran su aplicación principal en autopistas y carreteras donde los vehículos que circulan a gran velocidad generan un ruido ambiental considerable. Las barreras tradicionales, ampliamente estudiadas y desarrolladas, consisten en obstáculos continuos colocados entre la fuente de ruido y el receptor del mismo [9]. Su eficacia depende de factores geométricos (como su longitud, espesor o altura) y de la posición relativa de la barrera en el sistema emisor-receptor. Estos factores afectan a la difracción acústica en el borde superior de la barrera [10]. Recientemente, se han ido estudiando y desarrollando barreras acústicas "no continuas" compuestas por elementos dispersores dispuestos periódicamente [11]. Estas barreras, también conocidas como barreras acústicas basadas en cristales de sonido (BACS) aprovechan el principio físico de la dispersión múltiple [12] para crear bandas de frecuencia prohibidas (o *band gaps*) donde se impide la transmisión de ondas acústicas [13]. Este concepto permite crear una barrera sintonizable para mitigar las bandas de frecuencia críticas en función de la aplicación. En las bandas prohibidas, las BACS consiguen valores de atenuación acústica mayor que las barreras convencionales [14].

El diseño de una BACS implica tener que realizar previamente simulaciones numéricas para adaptar la barrera al espectro de ruido que se desea atenuar [15]. Tras esta etapa de diseño, se procede a la validación experimental en un entorno controlado (como por ejemplo una cámara anecoica) donde se verifican los resultados obtenidos por los modelos numéricos. Sin embargo, no todo el mundo puede realizar este tipo de pruebas. Incluso con cámaras adecuadas, la complejidad y los costes de instalación plantean problemas a la hora de desarrollar este tipo de soluciones de control de ruido. En circunstancias como a la hora de realizar la ejecución de una BACS a escala real, como muestra el trabajo de Qin et al. [16], se ponen de manifiesto los elevados gastos materiales y de tiempo asociados a la implantación de este tipo de barreras en casos reales. El uso de un modelo numérico 3D, como el propuesto en este trabajo, ayuda a desarrollar prototipos experimentales. En este trabajo, se presenta un prototipo que emplea dispersores de diámetro real, consiguiendo resultados de pérdidas por inserción (IL) en concordancia con los que proporciona una cámara anecoica. Este prototipo versátil se puede adaptar a tamaños de dispersores más pequeños (manteniendo siempre el diámetro real de los mismos, sin escalarlo) y permite el uso de impresión 3D para lograr diseños y especificaciones de dispersor complejas y precisas. El prototipo experimental propuesyo se validará para su funcionamiento en disposiciones de dispersores en cuadrada y triangular, que son las que se utilizan habitualmente en los diseños de BACS [17-19].

## 2 Materiales y métodos

El primer paso para el diseño de una BACS consiste en simular el cristal de sonido (CS). Para ello se emplean herramientas numéricas de probada eficacia por la comunidad científica, como el método de los elementos finitos (FEM), el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) o el método de los elementos de contorno (BEM). Estas simulaciones permiten explorar de forma rentable y versátil los diseños de BACS. Una vez identificado un diseño óptimo enfocado a la atenuación del espectro de ruido problemático, se somete a validación en una cámara anecoica —un entorno más realista—. En este trabajo, se propone un nuevo modelo de simulación como base para un prototipo experimental.

El objetivo principal de esta investigación es simplificar y reducir costes en la validación de barreras basadas en CS. Para lograrlo, se centra la atención en diseñar y construir un prototipo experimental compacto. En esta sección se describe la configuración inicial, que presenta una disposición de un CS en cuadrada dentro de una cámara anecoica —una referencia para la validación—. A continuación, se presenta un nuevo modelo numérico en 3D. Por último, se presentará un nuevo prototipo asequible y sencillo para verificar modelos teóricos.

### 2.1 Medidas de referencia en cámara anecoica

Para validar los resultados de las simulaciones numéricas, los investigadores suelen utilizar un entorno controlado, como una cámara anecoica. En este entorno, se pretende reproducir el comportamiento real de una barrera tal y como ocurriría en el exterior (in-situ).

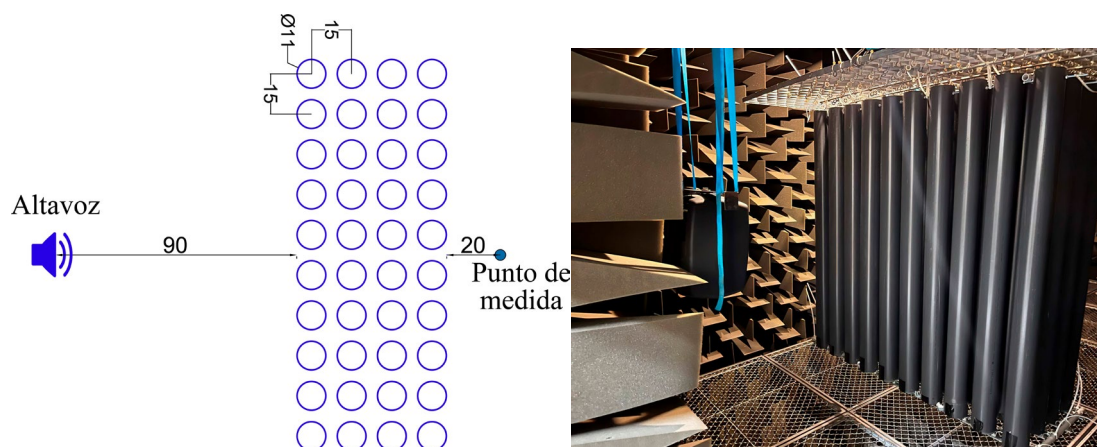


Figura 1: (Izquierda) Diagrama de vista superior del CS dentro de la cámara anecoica, destacando el punto de emisión y el punto de medida, con dimensiones en cm. (Derecha) Una fotografía muestra el CS colgado dentro de la cámara anecoica, frente a la fuente de sonido.

En este estudio, las medidas se realizaron en la cámara anecoica del Centro de Tecnologías Físicas de la Universitat Politècnica de València. El diseño de CS escogido se ha planteado para trabajar en el ruido del ruido tráfico rodado [20]. El CS consiste en una red cuadrada de dispersores cilíndricos hechos de PVC de 1.5 m de altura, se cuenta con una red de 4 filas y 10 columnas. Estos dispersores tienen un diámetro exterior de 11 cm y un parámetro de red de 15 cm (véase la Figura 1). Esta configuración produce una frecuencia de Bragg de 1145 Hz, considerando una velocidad de propagación de 343 m/s. En las medidas, se utiliza como fuente un altavoz de respuesta plana GENELEC 8040A que emite ruido blanco continuo sobre la parte delantera del CS. Se adquiere el espectro sonoro no ponderado entre 100

Hz y 1700 Hz utilizando un micrófono de campo libre prepolarizado de  $\frac{1}{4}$ " Brüel & Kjær type 4189. Mediante este proceso se puede observar el primer *band gap* alrededor de la frecuencia de Bragg. Para poder evaluar las pérdidas por inserción de la BACS, son necesarias dos medidas: una con la barrera presente y otra sin ella, lo que permite calcular el parámetro IL de la siguiente manera:

$$IL = L_{vacío} - L_{CS} \quad (1)$$

Donde  $L_{vacío}$  es el nivel de presión sonora sin ponderar (dB) en función de la frecuencia sin CS presente y  $L_{CS}$  el nivel de presión sonora sin ponderar (dB) en función de la frecuencia con CS presente en la medida.

Las pérdidas por inserción medidas en cámara anecoica proporcionan una representación más realista del comportamiento del CS en comparación con los modelos numéricos ideales. Esto se debe a que en las cámaras anecoicas se producen efectos de difracción en los bordes, que no se tienen en cuenta en los modelos numéricos ideales.

## 2.2 Modelo numérico

En los últimos tiempos, se han empleado modelos ideales simplificados en 2D y 3D para diseñar BACS. Estos modelos describen la propagación de una onda plana incidente en un CS con condiciones de contorno de periodicidad lateral y sin difracción en los bordes [21-23]. El nuevo modelo numérico tiene una doble finalidad. En primer lugar, pretende mejorar la precisión de las predicciones en comparación con las mediciones en cámara anecoica. En segundo lugar, sirve de guía para desarrollar un prototipo que permita realizar mediciones comparables a menor escala, sin instalaciones complejas. Este modelo se aleja de las condiciones ideales sustituyendo la periodicidad lateral por contornos rígidos paralelos y utilizando una fuente puntual (asimilable a un altavoz) para ajustarse mejor a las condiciones anecoicas medidas. Las dimensiones de los dispersores y la topología de red se ajustan a los mostrados en la anterior sección 2.1 que se han medido en la cámara anecoica.

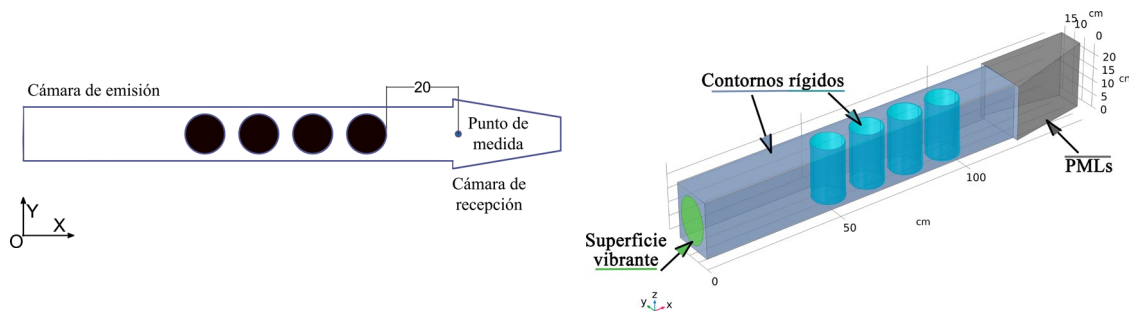


Figura 2: (Izquierda) Vista superior 2D mostrando las dimensiones (en cm) del modelo numérico. (Derecha) Vista 3D del modelo numérico junto con las condiciones de contorno empleadas.

El modelo se compone de dos partes diferenciadas. En primer lugar, una cámara de emisión donde se colocan los dispersores, que consisten en contornos rígidos situados a 50 cm de la superficie de emisión. Esta superficie, ilustrada en la Figura 2 representa la membrana de un altavoz que se mueve con una aceleración normal de  $1 \text{ m/s}^2$  a lo largo de la dirección positiva del eje OX. Por el contrario, la cámara de recepción está recubierta por materiales absorbentes, modelados mediante capas perfectamente acopladas (PML) [24]. Su geometría está diseñada para minimizar el paralelismo y reducir la influencia de modos propios. Dentro de esta cámara de recepción, los puntos de medida se sitúan a 20 cm de la

superficie del último dispersor, en el centro de gravedad de la superficie transversal. Esta configuración reproduce la estructura de medición de una cámara anecoica.

Para la simulación, se emplea el método de elementos finitos utilizando el software COMSOL® Multiphysics en su versión 6.1 con el módulo de acústica [25]. La simulación se realiza en el rango de frecuencias de 100 a 1700 Hz, utilizando una malla con 6 elementos por longitud de onda. Esto da como resultado un total de 41500 grados de libertad. El cálculo completo tarda aproximadamente 9 minutos en el ordenador del que se dispone para realizar la modelización.

Para validar aún más el prototipo experimental, se introduce un modelo adicional en red triangular de dispersores (véase la figura 3). Este modelo se parece mucho al anterior, pero con dispersores dispuestos en un red triangular.

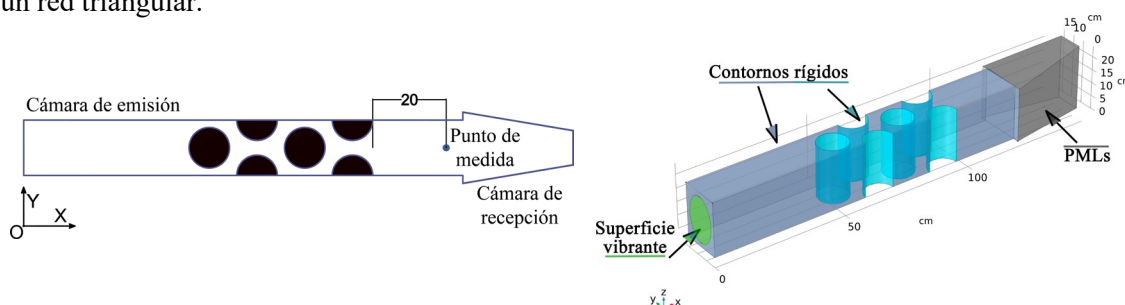


Figura 3: (Izquierda) Vista superior en 2D del modelo de red triangular. (Derecha) Vista en 3D del mismo modelo junto con las condiciones de contorno empleadas.

El modelo conserva la misma geometría y dimensiones mostradas en la Figura 2 tanto para la cámara de emisión como para la de recepción. Además, la posición del primer dispersor con respecto a la superficie de emisión no varía. El punto de medida se sitúa a la misma distancia de 20 cm de la superficie del último dispersor. La simulación cubre el mismo rango de frecuencias de 100 a 1.700 Hz que anteriormente, utilizando un mallado con 6 elementos por longitud de onda. El resultado es un total de 42100 grados de libertad, el cálculo completo tarda aproximadamente 7 minutos en nuestro ordenador. En este caso, se emplean semicilindros perfectos para mantener unas condiciones de periodicidad en las paredes laterales del dominio.

### 2.3 Prototipo experimental

La validación de las medidas de IL en una cámara anecoica supone un importante reto logístico así como costoso en término de horas de trabajo necesarias. La colocación de grandes cantidades de dispersores de tamaño real dentro de la cámara anecoica, así como la complejidad del montaje y sus costes plantean inconvenientes. Además, no todo el mundo tiene acceso a una cámara anecoica. Para solucionar este problema, se ha desarrollado un prototipo experimental como alternativa. Partiendo de la base del modelo numérico descrito en la sección anterior, el objetivo es asegurar que el comportamiento del prototipo se alinea con los resultados de las pruebas en cámara anecoica.

Originalmente, el modelo numérico imponía condiciones de contorno rígidas en todas las superficies laterales, el suelo y la parte superior de la cámara de emisión. Se reproducen estas condiciones utilizando un marco exterior rígido de madera MDF de 17 mm de grosor (paredes, suelo y techo desmontable). Para que el prototipo se pueda ajustar al parámetro de red del CS medido en la cámara anecoica, se añade un tablero plano de roble mazico de 22 mm de grosor a las paredes laterales interiores. Gracias a esto, se mantiene el paralelismo de las paredes laterales, que están separadas a una distancia constante

de 15 cm (véase la figura 4). Además, si se varía el grosor del tablero interior, se puede variar el parámetro de red o insertar dispersores de diámetros mayores/menores.

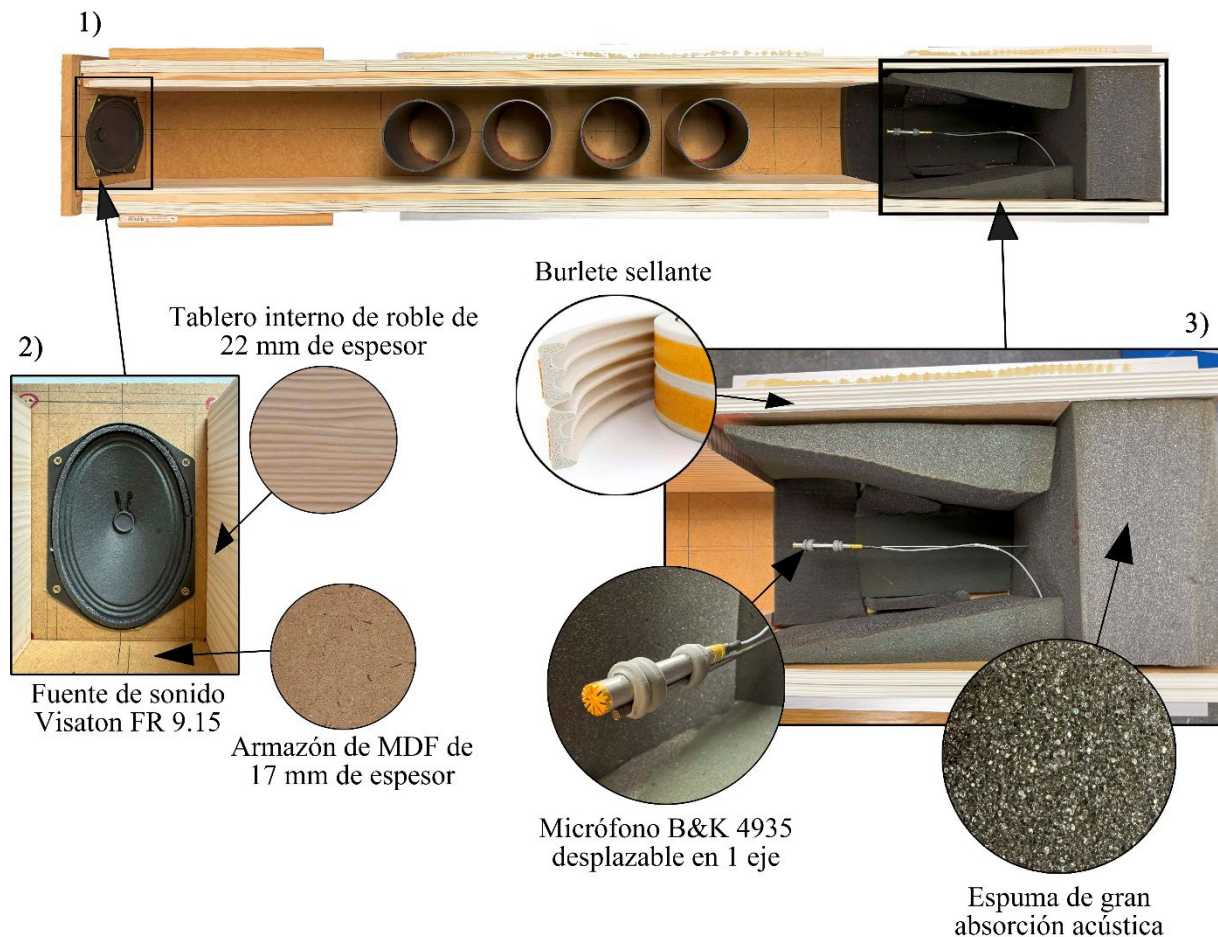


Figura 4: (1) Vista superior del prototipo experimental. (2) Detalle de la fuente de sonido dentro del prototipo. (3) Varios aspectos del área de recepción en el prototipo. (4) Prototipo cerrado con tapas superiores durante una medida.

La sección final del prototipo sirve de cámara de recepción. Mientras que el modelo numérico utilizaba capas perfectamente acopladas en sus contornos, se recrean estas condiciones utilizando cuñas gruesas de espuma acústica de poro cerrado de alta absorción. Este diseño asimétrico, ya considerado en el modelo, minimiza la influencia de los modos propios. El modelo numérico considera las características de emisión de una superficie vibrante con la misma geometría que el altavoz del prototipo. Para alinearlo con el punto de medida (situado a 20 cm del último dispersor), una varilla posiciona con precisión el micrófono (ver Figura 5).

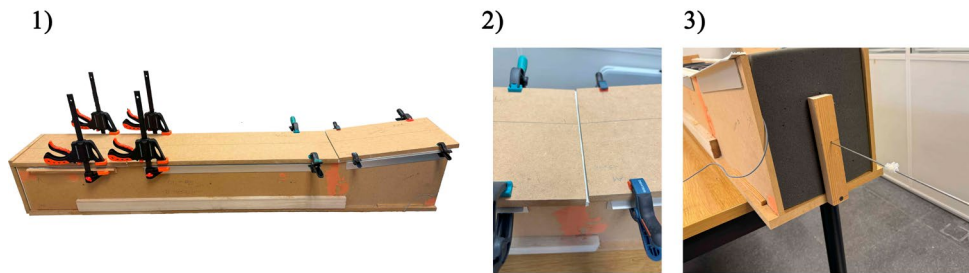


Figura 5: (1) Prototipo experimental cerrado con tapas superiores para tomar medidas. (2) Detalle de las tiras de sellado colocadas entre dos secciones de la tapa superior. (3) Detalle del conjunto varilla-micrófono; obsérvese que la varilla puede deslizarse para adaptarse a la distancia deseada hasta el último dispersor.

Durante las medidas, el sistema se sella con tapas superiores que utilizan burlete adhesivo para garantizar la estanqueidad. Los dispersores del prototipo se ajustan a la geometría del modelo numérico, con el primer dispersor situado a 50 cm del altavoz. Estos dispersores, fabricados en PVC, se ajustan a las condiciones de rigidez y tienen una altura de 20 cm (frente a los 150 cm de los colocados en la cámara anecoica). Su altura coincide exactamente con la de la cámara del prototipo para evitar huecos entre los dispersores y el techo/suelo. Este enfoque logra el objetivo inicial reduciendo el uso de material en un 98.6% en comparación con las medidas realizadas en cámara anecoica. Se simplifica el montaje y se mejora el control de los dispersores en comparación a una cámara anecoica, por lo que podría resultar adecuado para los equipos de diseño de barreras acústicas basadas en CS. Además del ahorro en costes, el prototipo es compatible con la impresión 3D de dispersores dado su tamaño, lo cual ofrece la ventaja de poder diseñar dispersores con geometrías complejas y avanzadas.

Para las medidas experimentales realizadas con el prototipo, se utiliza la plataforma Brüel & Kjær PULSE type 3560-C, que permite tanto la emisión de señal como su recepción. La adquisición de la señal se realiza con un micrófono Brüel & Kjær type 4935 de  $\frac{1}{4}$ ". Para mantener las condiciones de régimen estacionario, se emite una señal continua de ruido blanco desde una fuente de sonido Visaton FR 9.15 durante las medidas. Cada medida dura aproximadamente un minuto, con un promedio de 1000 FFTs de la señal recogida por el micrófono (véase la Figura 6).



Figura 6: Diagrama de conexiones de los equipos utilizados en la medición del prototipo experimental.

### 3 Resultados y discusión

El primer resultado de interés está relacionado con la concordancia obtenida entre el modelo numérico propuesto y el prototipo experimental construido con respecto a las medidas anecoicas.

Antes de mostrar el primer resultado, es de interés observar los modelos numéricos propuestos trabajando a la frecuencia de Bragg en la Figura 7. Obsérvese que, a pesar de que la generación de la señal actúa como una fuente puntual, en la primera sección de los modelos se forma una onda plana debido a su geometría en forma de conducto. Obsérvese también que la transmisión de la onda se reduce mucho a la frecuencia de Bragg debido a los fenómenos de dispersión múltiple que se producen en el CS, la transmisión es menor en la topología de red cuadrada que en la triangular.

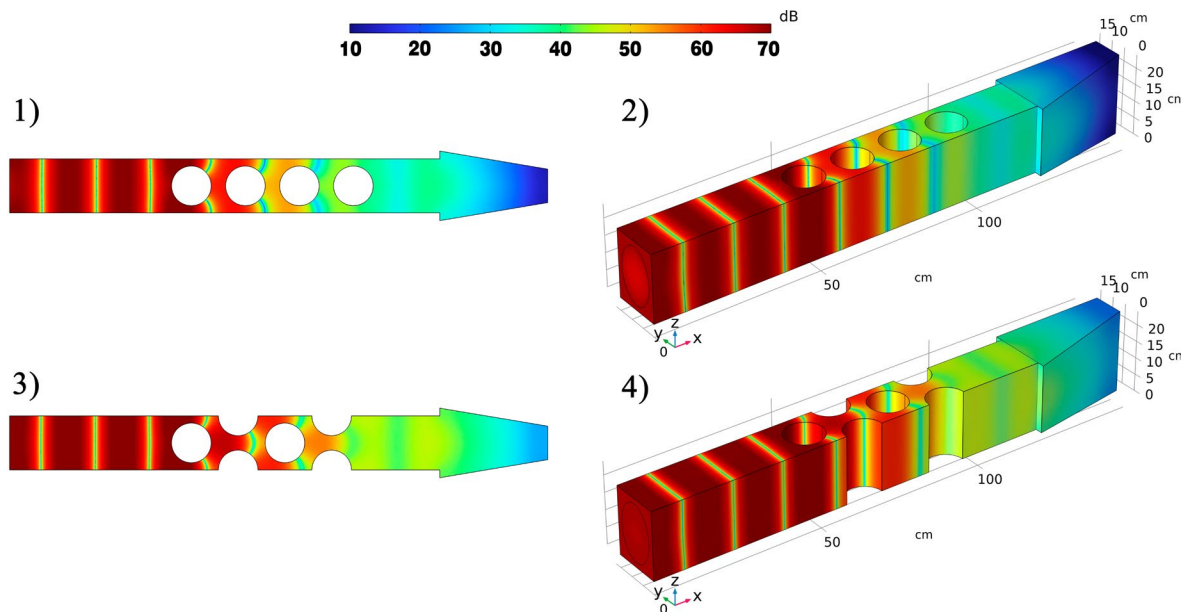


Figura 7: (1) Mapa del nivel de presión sonora a la frecuencia de Bragg en un plano XY en  $z=10$  cm del modelo de red cuadrada. (2) Mapa 3D del nivel de presión sonora a la frecuencia de Bragg del modelo de red cuadrada. (3) Mapa del nivel de presión sonora a la frecuencia de Bragg en un plano XY en  $z=10$  cm del modelo de red triangular. (4) Mapa 3D del nivel de presión sonora a la frecuencia de Bragg del modelo de red triangular.

La Figura 8 representa el espectro de IL entre 100 y 1700 Hz en el punto de medida del CS en la cámara anecoica con una línea negra discontinua, el espectro de IL del modelo numérico se representa con una línea azul continua y el prototipo experimental con una línea morada discontinua.

En la Figura 8, se observa una concordancia significativa entre los resultados numéricos calculados y las medidas realizadas en el prototipo implementado. Aunque los resultados experimentales muestran cierta desviación respecto a la función numérica, se asemejan a la curva medida en la cámara anecoica. Los resultados experimentales de pérdidas por inserción del prototipo se alinean bien con los de la cámara anecoica tanto en la forma de la curva como en los valores medidos.

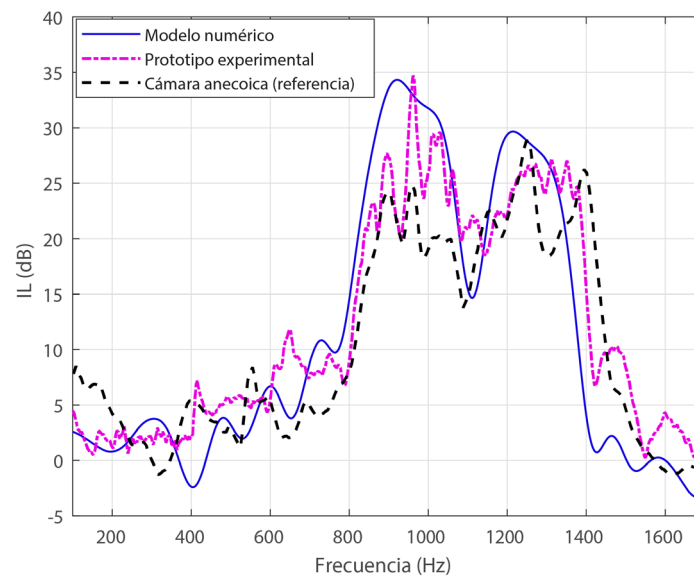


Figura 8: Espectros de pérdidas por inserción obtenidos a partir del modelo numérico propuesto y medidos experimentalmente en el prototipo, comparados con las medidas de referencia realizadas en la cámara anecoica.

Tras validar tanto el nuevo modelo de predicción numérica como el prototipo experimental, se estudia un CS en red triangular con el mismo parámetro de red.



Figura 9: CS en red triangular en el prototipo experimental.

Para crear la red triangular en el prototipo, se parten por la mitad los mismos dispersores cilíndricos de PVC de 20 cm de altura utilizados anteriormente y se fijan firmemente a las paredes laterales con cinta adhesiva de doble cara, como puede verse en la Figura 9. El posicionamiento preciso de los dispersores garantiza la correcta alineación con el modelo numérico.

Las pérdidas por inserción del prototipo experimental muestran similitud con la predicción del modelo numérico, confirmando la localización de la frecuencia de Bragg. La anchura de la banda prohibida disminuye como se esperaba, y se observan valores de pérdida de inserción inferiores a los de una red cuadrada, en consonancia con trabajos de investigación anteriores [23].

La Figura 10 representa el espectro IL entre 100 y 1700 Hz en el punto de medida del modelo numérico en disposición de red triangular con una línea sólida azul, y el prototipo experimental en la misma disposición con una línea punteada morada.

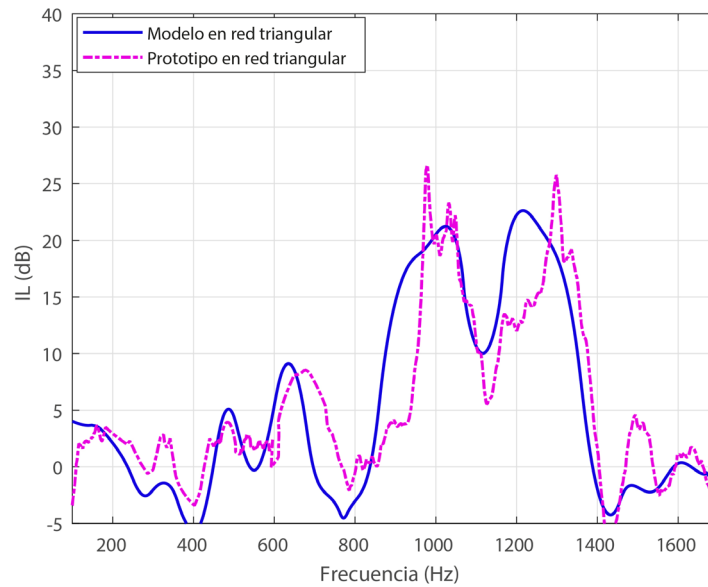


Figura 10: Espectros de pérdidas por inserción tanto para el modelo numérico de red triangular como para el prototipo en misma configuración de red.

Sin embargo, es esencial señalar que el prototipo tiene limitaciones: sólo permite la medida en un punto receptor, que puede ajustarse en relación con la última superficie de dispersión, pero no admite la medición simultánea en varios puntos.

## 4 Conclusión

Este estudio presenta un nuevo modelo numérico y un prototipo experimental acorde al mismo para evaluar las barreras acústicas basadas en CS. Para validar los resultados, se han realizado medidas de referencia en cámara anecoica sobre el mismo modelo de CS, asumiendo que la cámara anecoica se aproxima al comportamiento de la barrera en el mundo real.

Nuestro modelo numérico propuesto se aleja de los modelos ideales utilizados habitualmente para la predicción acústica de BACS. Funciona en incidencia normal, evaluando el primer band gap del CS. En concreto, se centra la atención en la frecuencia de Bragg dentro de la problemática banda espectral del ruido del tráfico rodado. Utilizando este modelo de predicción, se ha construido y probado un CS equivalente en un prototipo experimental. Los resultados muestran una gran precisión, y se ha verificado la fiabilidad tanto para CS en red cuadrada como triangular.

Sorprendentemente, se han conseguido predicciones de IL robustas sustituyendo una configuración de 40 dispersores (cada uno de 150 cm de altura) por sólo 4 dispersores (cada uno de 20 cm de altura). Este enfoque de eficiencia en cuanto a materiales ha supuesto un ahorro de más del 98% en nuestro experimento, reduciendo significativamente los costes y la complejidad del montaje.

Los resultados obtenidos permiten una validación experimental rentable de los modelos teóricos, eliminando la necesidad de extensas pruebas en cámara anecoica. Además, la sencilla implementación del prototipo beneficia a los grupos de investigación que no tienen acceso a cámaras anecoicas, ya que proporciona una perspectiva realista de sus diseños. Al probar el prototipo, se han considerado diámetros

de dispersores reales (no versiones a escala), lo que permite explorar dispersores impresos en 3D con diseños complejos en un futuro cercano.

## Referencias

- [1] World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*, World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen (DK).
- [2] European Environment Agency. (2020). *Environmental noise in Europe – 2020*, Publications Office, Luxembourg (BE).
- [3] Houthuijs, D., Swart, W., & van Kempen, E. (2018). *Implications of environmental noise on health and wellbeing in Europe. EIONET Report — ETC/ACM 2018/10*. European Environment Information and Observation Network.
- [4] Blanes, N., Fons-Esteve, J., Hintzsche, M., Ramos, M. J. V., Rössli, M., De La Maza, M. S., Ubach, R., Vienneau, D., & Peris, E. (2022). *Projected health impacts from transportation noise – Exploring two scenarios for 2030. ETC HE Report 2022/5*.
- [5] Praticò, F. G., Briante, P. G., & Speranza, G. (2020). Acoustic Impact of Electric Vehicles. *2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, 16 a 18 de junio, pp. 7-12.
- [6] Ling, S., Yu, F., Sun, D., Sun, G., & Xu, L. (2021). A comprehensive review of tire-pavement noise: generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125056.
- [7] Ferrara, A., Sicon, S., & Siri, S. (2018). *Freeway traffic modelling and control*, Springer, Cham (CH).
- [8] Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K., Jean, P., Defrance, J., Hornikx, M., & Kang, J. (2015). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors. *Applied Acoustics*, 92, pp. 86-101.
- [9] Laxmi, V., Thakre, C., & Vijay, R. (2021). Evaluation of noise barriers Based on Geometries and Materials: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), pp. 1729-1745.
- [10] Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1(3), pp. 157-173.
- [11] Martínez-Sala, R. M., Sancho, J., Sánchez-Pérez, J. V., Gómez, V., Llinares, J., & Meseguer, F. (1995). Sound attenuation by sculpture. *Nature*, 378(6554), 241.
- [12] Foldy, L. L. (1945). The Multiple Scattering of Waves. I. General Theory of Isotropic Scattering by Randomly Distributed Scatterers. *Phys. Rev.*, 67(3-4), pp. 107-119.
- [13] Gupta, A. (2014). A review on Sonic Crystal, its applications and numerical analysis techniques. *Acoustical Physics*, 60(2), pp. 223-234.
- [14] Gieva, E., Ruskova, I., Nedelchev, K., & Kralov, I. (2020). Comparative analysis of the acoustic efficiency of classical and sonic crystal noise barriers. *International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies (BulTrans-2020)*, Sozopol, 10 a 13 de septiembre, 1002, 012014.
- [15] Castiñeira-Ibáñez, S., Rubio, C., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., & García-Raffi, L. M. (2012). Design, manufacture and characterization of an acoustic barrier made of Multi-Phenomena cylindrical scatterers arranged in a Fractal-Based geometry. *Archives of Acoustics*, 37(4), pp. 455-462.

- [16] Qin, X., Ni, A., Chen, Z., Fang, M.-J., & Li, Y. (2022). Numerical modeling and field test of sonic crystal acoustic barriers. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), pp. 16289-16304.
- [17] Sánchez-Pérez, J. V., Rubio, C., Martínez-Sala, R., Sanchez-Grandia, R., & Gómez, V. (2002). Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. *Applied Physics Letters*, 81(27), pp. 5240-5242.
- [18] Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., & García-Raffi, L. M. (2011a). Tunable Wideband BandStop acoustic filter based on two-dimensional multiphysical phenomena periodic systems. *Journal of Applied Physics*, 110(1), 014904.
- [19] Morandi, F., Miniaci, M., Marzani, A., Barbaresi, L., & Garai, M. (2016). Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: sound insulation and reflection properties. *Applied Acoustics*, 114, pp. 294-306.
- [20] Makarewicz, R., & Sato, Y. (1996). Representative spectrum of road traffic noise. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 17(5), pp. 249-254.
- [21] Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., & García-Raffi, L. M. (2011b). Analysis of the wave propagation properties of a periodic array of rigid cylinders perpendicular to a finite impedance surface. *Europhysics Letters*, 96(4), 44003.
- [22] Castiñeira-Ibáñez, S., Rubio, C., & Sánchez-Pérez, J. V. (2015). Environmental noise control during its transmission phase to protect buildings. Design model for acoustic barriers based on arrays of isolated scatterers. *Building and Environment*, 93, pp. 179-185.
- [23] D’Orazio, T., Asdrubali, F., Godinho, L., Veloso, M., & Amado-Mendes, P. (2023). Experimental and Numerical Analysis of Wooden Sonic Crystals Applied as Noise Barriers. *Environments*, 10(7), 116.
- [24] Berenger, J.-P. (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114(2), pp. 185-200.
- [25] COMSOL Multiphysics® v. 6.1. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). Comsol ab, stockholm, sweden.