

(04-016) - Exploring sustainable and effective solutions in the industry by designing an open acoustic barrier

Tarrazó-Serrano, Daniel ¹; Castiñeira-Ibáñez, Sergio ¹; San Bautista, Alberto ¹; Rubio, Constanza ¹; Uris, Antonio ¹

¹ Universitat Politècnica de València

Numerous acoustic solutions address noise pollution and problems generated by noise in the industry. Open acoustic barriers are ideal for this problem, given their properties (air flow permeability, visibility, etc.). This project uses this type of barrier design due to their tunability and localization of the attenuation in the working area. Numerical models have been used to optimize the frequency and geometry of a barrier based on subsonic slits. In addition, a key aspect is the ecological character of this type of structure, given the possibility of being built with recycled materials. A prototype was made using medium-density panels from wastepaper materials. This project offers a comprehensive solution that addresses noise mitigation in industry as a cause of noise pollution and promotes an environmentally friendly approach, improving the value chain of acoustic engineering products and devices.

Keywords: open acoustic barrier; recycling; noise control; sustainability; optimization

Explorando soluciones sostenibles y efectivas en la industria mediante el diseño de una pantalla acústica abierta

Existen numerosas soluciones acústicas que abordan la contaminación y problemática generada por el ruido en la industria. Las barreras acústicas abiertas son una solución ideal para este problema dadas sus propiedades (permeabilidad del flujo del aire, visibilidad, etc.). Este proyecto utiliza el diseño de este tipo de pantallas dada su posibilidad de sintonización y localización de la atenuación en la zona de trabajo. Se han utilizado modelos numéricos para la optimización en frecuencia y geometría de una pantalla basada en ranuras subsónicas. Además, un aspecto clave es el carácter ecológico de este tipo de estructuras, dada la posibilidad de construirse en materiales reciclados. Se realizó la construcción de un prototipo utilizando paneles de densidad media a partir de materiales de desecho de papel. Este proyecto ofrece una solución integral, que no sólo aborda la mitigación del ruido en industria como causa de contaminación acústica, sino que también promueve un enfoque respetuoso con el medio ambiente, mejorando la cadena de valor de los productos y dispositivos de la ingeniería acústica.

Palabras clave: Pantalla acústica abierta; reciclado; control del ruido; sostenibilidad; optimización

Correspondencia: sercasib@fis.upv.es

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el proyecto: PAS-Eco con referencia 20230632 (CIGE/2022/32), Conselleria d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat Digital, Generalitat Valenciana



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

1.1 Antecedentes de la investigación

La contaminación acústica se perfila como un reto medioambiental crítico en el siglo XXI, que afecta significativamente a millones de personas en todo el planeta. El problema es especialmente pronunciado en las ciudades, donde la amalgama de tráfico, industria y otras dinámicas urbanas se traduce en elevados niveles de ruido. Esta contaminación perturba las actividades cotidianas y plantea graves riesgos para la salud. En los casos en que es imposible reducir el ruido en su origen, el despliegue de pantallas acústicas ofrece un método eficaz para minimizar la transmisión del sonido. Esta situación pone de relieve la necesidad crítica de enfoques innovadores para mitigar los efectos adversos de la contaminación acústica en la salud y la calidad de vida de los ciudadanos.

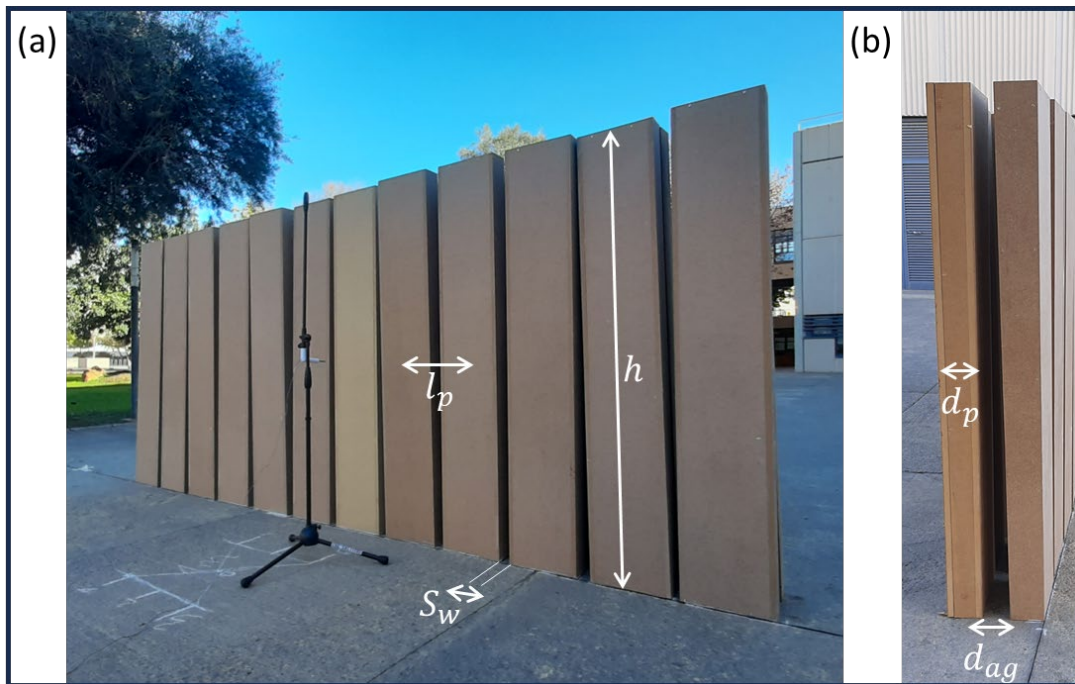
El papel de las pantallas acústicas en la lucha contra la contaminación acústica es fundamental, ya que afecta significativamente tanto a la calidad de vida como a la salud pública. Normalmente, las pantallas acústicas se consideran tabiques robustos que bloquean el sonido entre su fuente y las zonas silenciosas deseadas, construidos para reducir la transmisión del sonido mediante una cuidadosa selección de materiales, cumpliendo un requisito de densidad superficial mínima de 20 kg/m^2 según dicta la Ley de Masa (Rubio et al., 2016). Sin embargo, estas pantallas se enfrentan a limitaciones debidas a la difracción del sonido, especialmente en sus bordes superiores, lo que da lugar a esfuerzos continuos de investigación y desarrollo para mejorar los diseños de las pantallas con el fin de superar estos retos de difracción de manera más eficiente.

Dentro de la disciplina en evolución de la Ingeniería Acústica, centrarse en el desarrollo y perfeccionamiento de pantallas acústicas es un área de investigación fundamental. Este empeño pretende combatir la creciente contaminación acústica en diversos entornos, desde bulliciosos paisajes urbanos hasta serenos entornos naturales (Fan et al., 2024; Ma et al., 2023; Janssen et al., 2023). Nuestro estudio se centra en el examen de vanguardia de las pantallas, en particular las que utilizan metamateriales y pantallas de tipo hendidura, para una reducción superior del ruido. Investigamos los fundamentos teóricos y los principios físicos esenciales para el diseño de estas pantallas, en particular para fenómenos como la anomalía de Wood (Estrada et al., 2008; Liu and Declercq, 2015).

1.2 Pantalla acústica basada en ranuras subsónicas

La pantalla construida con postes de madera se diseñó con una forma geométrica de prisma rectangular, definidos por la anchura W_p , la altura h y el espesor d_p . Dos postes contiguos de una misma fila estaban separados por ranuras subsónicas de longitud S_w cuya dimensión era inferior a la longitud de onda del sonido a atenuar. Los postes estaban dispuestos de manera periódica en cada fila, con una periodicidad l_p que era igual a la suma de la anchura del poste y de las ranuras subsónicas. Además, las dos filas de elementos dispersores estaban separadas una distancia d_{ag} . La Figura 1 muestra un esquema de la pantalla desarrollada. En la Figura 1 (a) se puede observar la pantalla formada por postes de madera alineados y vista frontal, mientras que en la Figura 1 (b), se observa una imagen de los postes en vista lateral. Los mecanismos de atenuación de ruido de este tipo de pantallas son las anomalías de Wood y la interferencia destructiva entre los modos Fabry-Perot par e impar. Estos fenómenos dependen de los parámetros geométricos de la pantalla, por lo que ésta puede ser sintonizada para reducir un ruido en una determinada banda de frecuencia o un tono puro sin tener un espesor de pantallas excesivo (Rubio et al., 2018).

Figura 1: Pantalla acústica abierta basada en ranuras subsónica: (a) Vista frontal (b) Vista lateral



La utilización de estas estructuras presenta una serie de ventajas respecto a las pantallas tradicionales: acústicamente, las pantallas abiertas consiguen altos niveles de atenuación a muy bajas frecuencias ($f < 500$ Hz), las más difíciles de atenuar. Permiten mediante una disposición determinada inhibir la transmisión del sonido evitando bloquear la visión a través de la pantalla, produciendo un efecto paisajístico positivo para la población. Son sintonizables, es decir, se puede elegir la frecuencia o banda de frecuencias en la que la atenuación acústica es máxima, y con ello, se pueden utilizar para atenuar diferentes fuentes de ruido, siendo posible diseñar pantallas personalizadas, ya que trabajan como filtros acústicos. Para su diseño utilizaremos estructuras bidimensionales en los que el medio transmisor será el aire. Además, estos sistemas, son más sencillos de diseñar ya que solo hay que actuar sobre los dispersores.

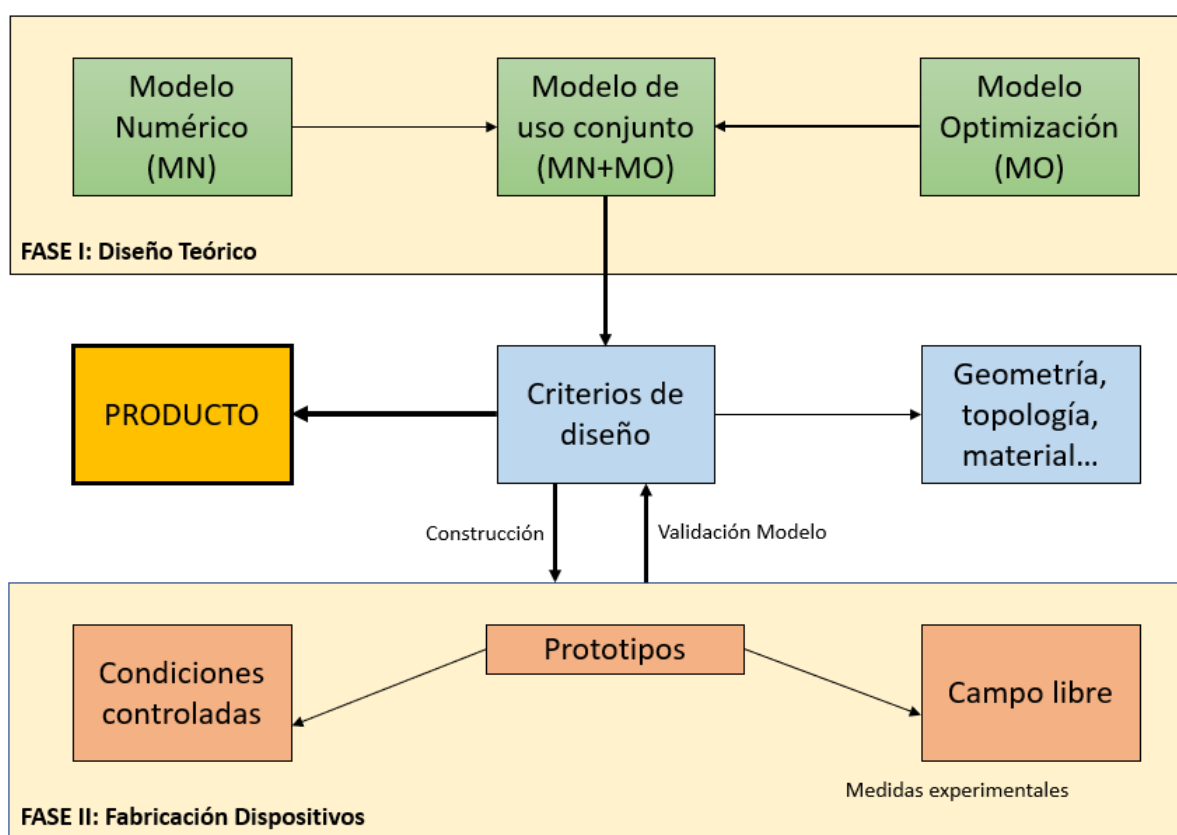
2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar el diseño de una pantalla acústica abierta basada en ranuras subsónicas optimizada para usos industriales y plantas técnicas. Para conseguir este objetivo principal se plantean dos objetivos específicos: uno científico y otro tecnológico. El objetivo científico se centra en la realización y análisis de modelos numéricos y su optimización para mejorar el rendimiento de la pantalla en una zona concreta del espectro, dando como grados de libertad la rotación de las rendijas respecto a su punto central. Dada la naturaleza de este tipo de pantallas y para el uso al que están destinadas, potenciar una zona concreta del rango de frecuencias del espacio puede hacerla mucho más eficiente. El diseño se realiza utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF), en concreto mediante el software comercial COMSOL Multiphysics® (COMSOL, 2022). El objetivo tecnológico se centra en el diseño y construcción de la pantalla acústica, resultado del estudio numérico, utilizando materiales reciclados. Para validar los estudios numéricos se realizan medidas experimentales con el prototipo construido y se compraran los resultados obtenidos.

3. Metodología

Como se muestra en la Figura 2, el proyecto se lleva a término en dos fases: la primera corresponde a la tarea científica y la segunda a la tecnológica, ambas descritas en la parte de objetivos. Existe una fase de modelización teórica que sirve de base a los casos de aplicación. Esta fase se ha dividido en tres partes: en primer lugar, el desarrollo de modelos teóricos utilizando el MEF (MN) que permitan predecir la respuesta física de las estructuras por implementación de nuevas propiedades acústicas o por mejora en el diseño de los elementos (utilización de nuevos materiales o por variación en la forma de estos); en segundo lugar, el desarrollo de modelos de optimización multiobjetivo y en tercer lugar la aplicación conjunta de ambos (MO+MN) que permitan la creación de una potente herramienta predictiva para el diseño optimizado de estos materiales en las aplicaciones buscadas.

Figura 2: Esquema de las áreas de trabajo y metodología que propone el proyecto



Los métodos numéricos son una buena alternativa a los teóricos para encontrar soluciones a problemas que involucran la interacción de ondas con dispersores acústicos. Con el fin de predecir el rendimiento de una pantalla acústica, en la simulación el dispositivo propuesto se ha desarrollado considerando una pantalla con postes rígidos de longitud S_w (en 2D son rectángulos rígidos). La pantalla acústica se diseña en 2D con el fin de evaluar la eficacia de esta y evitar así que los resultados no sean enmascarados por la difracción en los bordes superiores de la misma. Dado un diseño, la simulación determina la atenuación del sonido en función de la frecuencia.

Las simulaciones se han llevado a cabo utilizando el MEF. En este método se parte de la ecuación de Helmholtz que viene dada por:

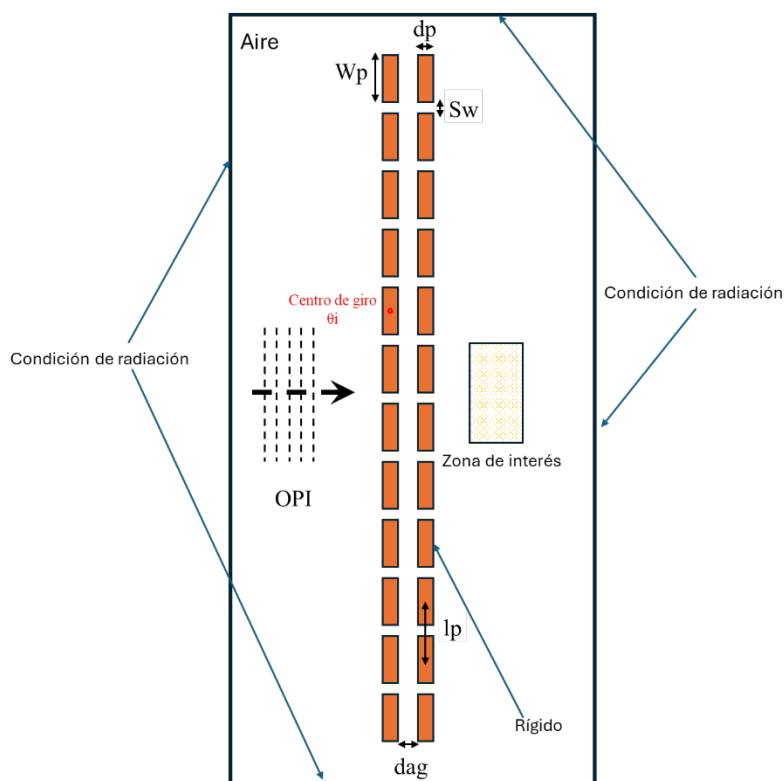
$$\nabla\left(\frac{1}{\rho}\nabla p\right) = \frac{\omega^2}{\rho c^2} p \quad (1)$$

donde, ρ es la densidad del aire, c es la velocidad del sonido en el medio de propagación (aire), ω es la frecuencia angular y p es la presión acústica.

Para abordar el problema mediante el MEF, primero se define la geometría de la estructura, se discretiza el dominio y se consideran las condiciones iniciales y de contorno (Reddy, 2019). Posteriormente, el software utilizando la ecuación (1), resuelve numéricamente en cada punto del dominio seleccionado, obteniendo las soluciones al problema.

Las simulaciones se han llevado a cabo con el diseño de una estructura formada por dos filas de postes separados entre sí una distancia d_{ag} , con una periodicidad l_p . Las dimensiones de los postes son $S_w \times d_p$ tal y como se muestra Figura 3. Al considerar la estructura acústicamente rígida se aplica la condición de contorno de Neumann (velocidad de sonido cero) a sus superficies. Estos postes están confinados en una región con paredes cuyas condiciones de contorno simulan campo libre (condición de contorno Sommerfeld). La finalidad es que la onda plana incidente a la pantalla (OPI), que viaja de izquierda a derecha (sentido eje X positivo), no se refleje en las paredes (Rubio et al., 2018).

Figura 3: Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno



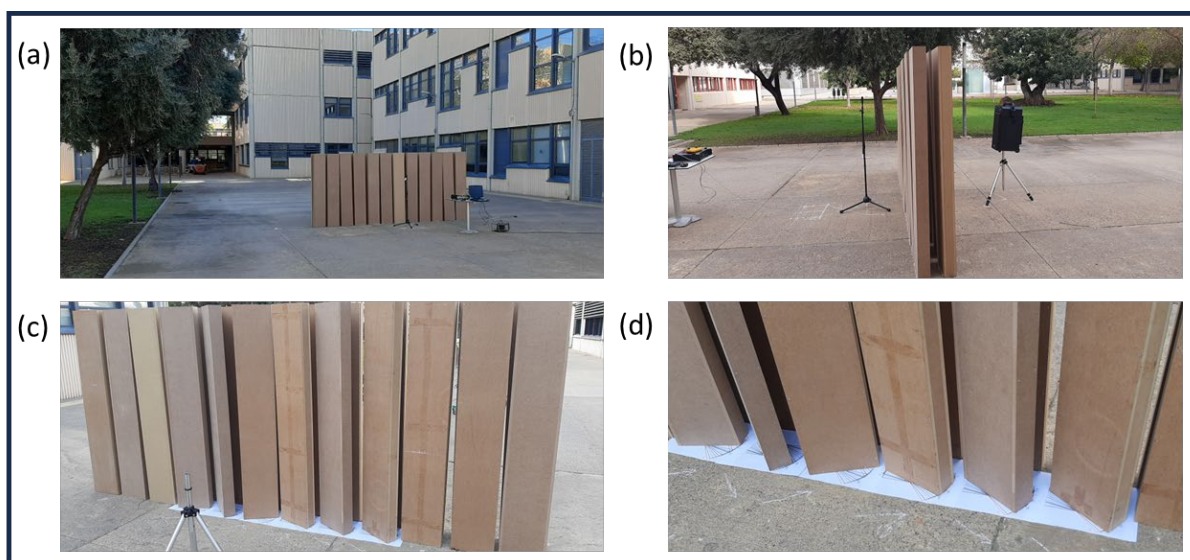
Una vez implementado el modelo con las 24 rendijas, se realizó una simulación del modelo para compararlo con las mediciones reales sin ninguna optimización. Esto se hizo porque trabajos anteriores sólo se había estudiado el comportamiento de la pantalla en cámara anecoica. Posteriormente, los elementos situados en la zona de incidencia de la onda se le dio a cada uno individualmente la posibilidad de realizar un giro para su cruce con las diagonales de la rendija. diagonales. Esto generó un modelo con 12 grados de libertad correspondientes a los ángulos de rotación θ limitando los valores entre -45 y 45° . Una superficie cuadrada de optimización del dominio situada en la parte posterior de la pantalla utilizada para designar el objetivo de optimización de superficie de $1 \times 1 \text{ m}^2$ centrada a $1,2 \text{ m}$ de la pantalla. Todas las condiciones geométricas y las condiciones de contorno del modelo se pueden ver en la Figura 3.

Las propiedades de atenuación acústica de la pantalla constituida por los elementos periódicos mostrada en la Figura 3, están representadas por su espectro de atenuación en el rango de frecuencias elegido (10-5000 Hz), caracterizado mediante la pérdida por Inserción (Atenuación acústica o *Insertion Loss*, IL), definida como la diferencia entre los niveles de presión sonora registrados en el mismo punto sin pantalla (medición directa, p_d) y con pantalla (medición interferida, p_i), mediante la expresión:

$$IL = 20 \cdot \log_{10} \left| p_d / p_i \right| \text{ (dB)} \quad (2)$$

Para las mediciones experimentales se construyeron 24 elementos. Estos se construyeron de material reciclado (cartón prensado) y se colocaron en el campus de la Universitat Politècnica de València. Las medidas se realizaron el 28 de diciembre de 2023. Los registros climatológicos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) fueron una temperatura de 13,1°C y una racha máxima de viento de 0,6 km/h. Estos parámetros meteorológicos nos permitieron obtener valores sin alienación debida al viento u otros factores. Se realizaron mediciones de las dos configuraciones de la pantalla. Las primeras mediciones consistieron en colocar los 24 elementos alineados con la configuración topológica descrita anteriormente sin rotación alguna de los elementos. Posteriormente, se realizaron las mediciones correspondientes a la distribución topológica optimizada. Para ello, se rotaron los seis elementos con los ángulos de rotación resultantes de la optimización del MEF. En la Figura 4 (a) se muestra una imagen de la pantalla acústica basada en ranuras subsónicas original, donde se aprecia su posición y tamaño respecto al entorno. La Figura 4 (b) muestra una vista lateral del conjunto experimental. En la Figura 4 (c) se muestra la imagen de la pantalla acústica basada en ranuras subsónicas optimizada, donde se aprecia la primera fila con los bloques girados. En ella se muestran los radios de giro obtenidos de θ_i en orden: 18,5°, -45°, 43,6°, 18,0°, -29,5° y -34,6°. Por último, la Figura 4 (d) muestra el detalle de los bloques girados.

Figura 4: Imágenes de la pantalla acústica formada por ranuras subsónicas: (a) Situación pantalla en el entorno de medida, vista frontal (b) Vista lateral del conjunto experimental, (c) Se observa la primera fila con los bloques girados, (d) Detalle de (c) ampliado, donde se observa la metodología utilizada para girar los bloques paralelepípedicos.



El montaje experimental utilizó una fuente omnidireccional de ruido rosa para la emisión de sonido con el fin de obtener el espectro, empleando explícitamente un generador de ruido rosa Brüel & Kjær 4224 que opera dentro del rango de frecuencias de 50 Hz a 10 kHz. Un

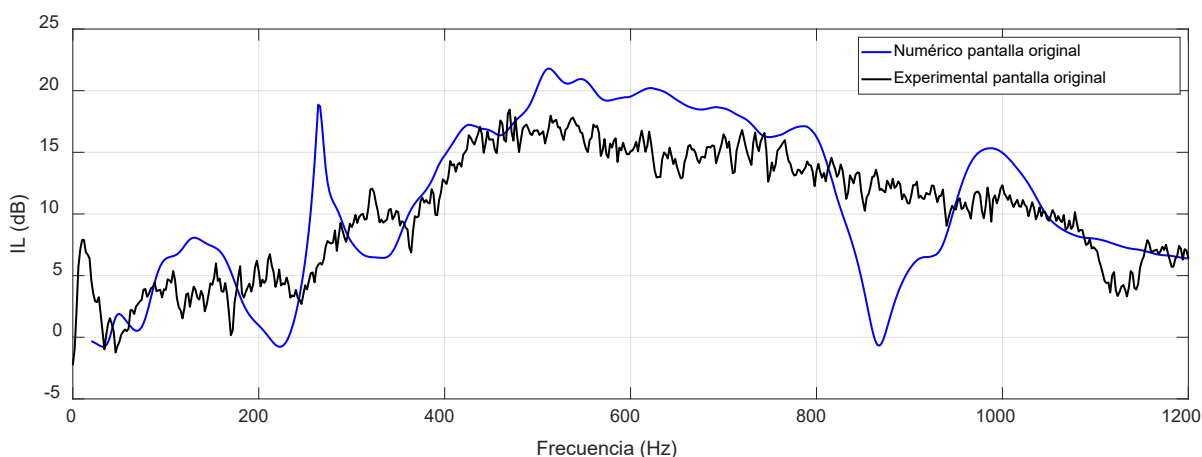
sistema Brüel & Kjær PULSE Tipo 3560-C gestionó la adquisición de la señal y el control tanto de la emisión como de la recepción del sonido para cada serie experimental, que duró aproximadamente un minuto; la señal captada por un micrófono Brüel & Kjær 4935 1/4" se sometió a 1000 promedios FFT para analizar el espectro sonoro. Este análisis arrojó resultados en dB para frecuencias comprendidas entre 10 y 5000 Hz en los lugares de medición designados. Posteriormente, se realizó un proceso de promediado energético de los datos recogidos de cada conjunto de mediciones, sobre el que se aplicó la Ecuación (2) para obtener los resultados.

Se midieron en 7 puntos situados donde se realizó la optimización. En cada punto se realizaron tres mediciones a tres alturas diferentes (0,65, 0,90 y 1,15 m). Una vez realizadas las mediciones, se llevó a cabo un proceso para obtener la media de las mediciones. La decisión de tener diferentes alturas de medición se tomó para obtener un volumen de puntos teniendo en cuenta los dos efectos causados por el efecto de borde y la reflectancia del suelo de hormigón. Estas consideraciones no se tuvieron en cuenta en las simulaciones iniciales, pero el efecto es análogo en ambas mediciones y, por tanto, las modificaciones sufridas en el espectro experimental se producen de forma idéntica.

4. Resultados

En primer lugar, se muestra en la Figura 5, el espectro de IL para el resultado numérico y la medida experimental de la pantalla acústica basada en ranuras subsónicas original.

Figura 5: Resultado IL (dB) experimental de la pantalla acústica frente al numérico

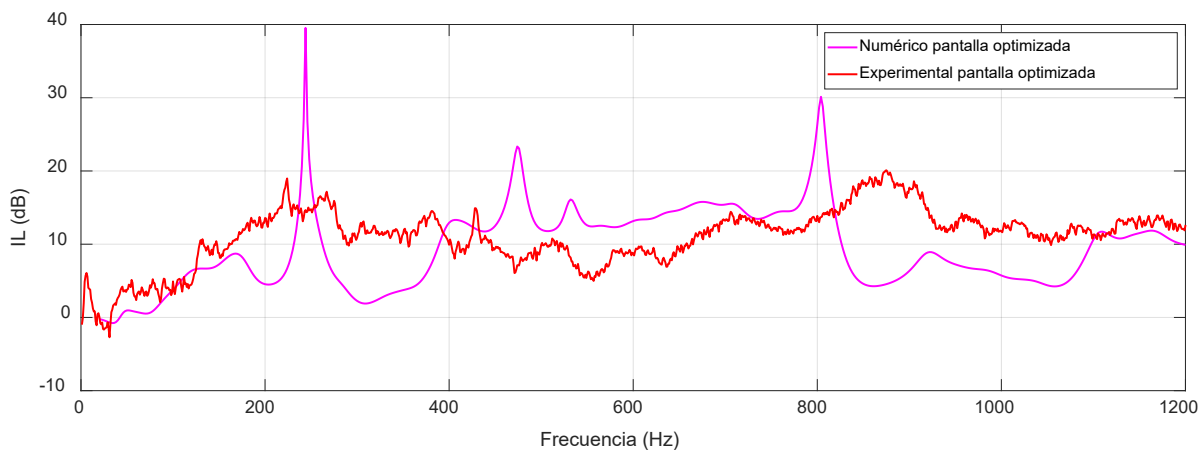


Se comparan en la Figura 5 los espectros del resultado experimental y del modelo numérico correspondiente, centrándonos en el intervalo de 0 a 1200 Hz, ya que es en el que habitualmente se intenta maximizar el IL en las pantallas acústicas. Las diferencias observadas en el espectro de frecuencias son debidas al hecho de que en el numérico no se está teniendo en cuenta la altura de los bloques y por lo tanto existe difracción por los bordes de la pantalla.

Para mejorar el diseño de la pantalla acústica original se plantea la siguiente solución: girar los bloques de la primera fila en orden: 18,5°, -45°, 43,6°, 18,0°, -29,5° y -34,6°. La finalidad es redirigir el sonido sin alterar en exceso la estructura periódica de la pantalla y con ello siga existiendo el efecto pantalla y la anomalía de Wood. En la Figura 6 se muestra la comparativa entre el espectro del modelo numérico de la pantalla optimizada con el espectro obtenido con

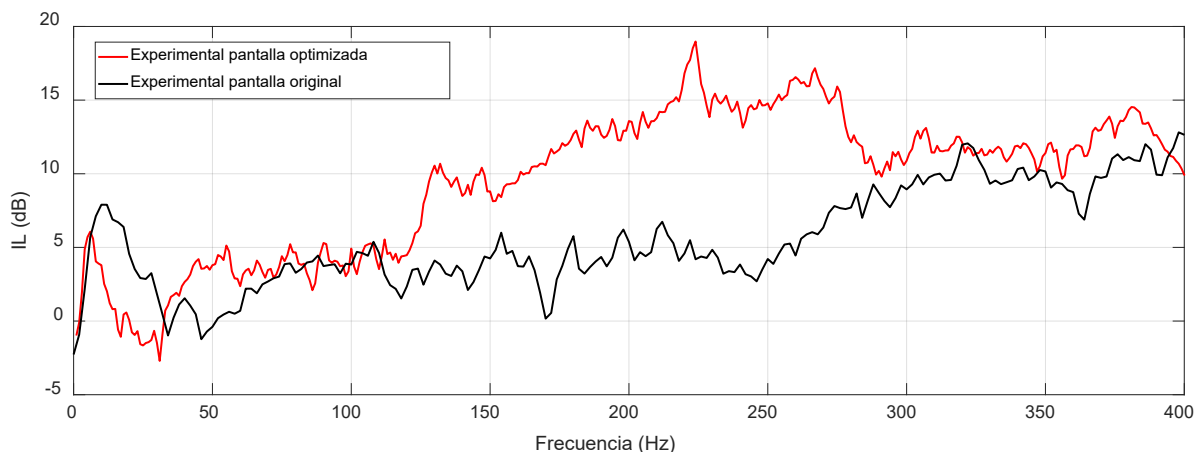
el montaje experimental optimizado. Se puede comprobar como el rango de frecuencias por debajo de 400 Hz ha mejorado considerablemente.

Figura 6: Resultado IL (dB) experimental del diseño optimizado de la pantalla acústica frente al numérico optimizado



Para verificar que se están obteniendo resultados mejorados, se compara el espectro experimental obtenido con la pantalla original con el espectro experimental obtenido con la pantalla optimizada. Se comprueba (ver Figura 7) que la optimización realizada consigue mayor atenuación en el rango de bajas frecuencias (<500 Hz) tal y como se ha comentado anteriormente.

Figura 7: Resultado IL (dB) experimental del diseño optimizado de la pantalla acústica frente al experimental original para bajas frecuencias

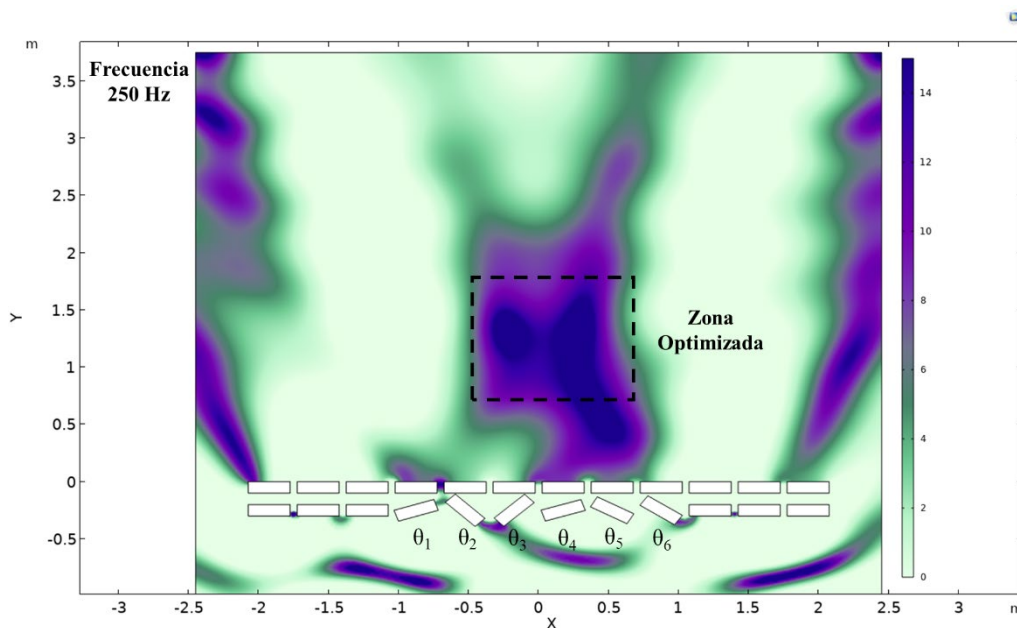


El resultado obtenido justifica que la reorientación de los bloques de la primera fila consigue aumentar la atenuación acústica en bajas frecuencias. Este hecho añade una característica positiva más a este tipo de pantallas frente a las tradicionales: aumenta la selectividad que de entrada ya tenían las pantallas basadas en ranuras subsónicas, puesto que, con el simple

hecho de cambiar la periodicidad de los bloques, se ajustaba el rango de frecuencias a atenuar. Ahora se añade la posibilidad de ajustar las bajas frecuencias con la reorientación de los bloques de la primera fila.

En la Figura 8 se muestra el mapa de IL (dB) a 250 Hz para mostrar cómo se ha concentrado la atenuación acústica en la zona que se había marcado como objetivo (zona optimizada). Evidentemente esta zona podría ser modificada con el diseño apropiado de los giros que se aplican a primera fila de la pantalla acústica.

Figura 8: Mapa de IL (dB) del diseño numérico optimizado de la pantalla acústica a 250 Hz



5. Conclusiones

En este trabajo se ha diseñado una pantalla acústica abierta 2D con ranuras subsónicas que trabaja en un rango de bajas frecuencias (100 a 1200 Hz). Se ha optimizado el espectro de atenuación acústica que produce la pantalla ante incidencia normal de ruido. En concreto, dentro del rango de frecuencias mencionado, se ha conseguido optimizar el funcionamiento de esta en el rango de 100 a 400 Hz, manteniendo el mismo número de elementos, modificando tan solo, la posición angular de los bloques de la primera fila. La zona de optimización se ha ajustado a la parte central del otro lado de la pantalla, con la finalidad de ser lo más selectiva posible. Con ello se puede asegurar una zona de bajo ruido para bajas frecuencias. Esto es una solución interesante en el ámbito industrial ya que las zonas de trabajo están muy definidas y delimitadas. Por ello esta pantalla presenta una funcionalidad interesante para su uso en industria y plantas técnicas: permeable al calor, abierta, portable, sintonizable y ahora selectiva para conseguir sombra acústica. Además, el material utilizado para la fabricación de la pantalla fue cartón prensado, material reciclado que sustituye a la madera. Con ello, se contribuye a velar por la conservación de los ecosistemas montañosos, permitiendo la recuperación de los bosques degradados y la protección de su diversidad biológica, además de contribuir a la economía circular de la región productora del desecho.

Referencias

- COMSOL AB, Stockholm, Sweden. (2022). COMSOL Multiphysics® (6.0) [Software]. <https://www.comsol.com>
- Estrada, H., Candelas, P., Uris, A., Belmar, F., G. d. Abajo & Meseguer, F. J. (2008). Extraordinary sound screening in perforated plates. *Physical Review Letters*, 101(8), 084302
- Fan, W., Cheng, Z., Xu, S., Dou, Y. (2024). A novel ventilated metamaterial barrier (VMB) for traffic noise reduction. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12, 4495–4510
- Hou, B., Mei, J., Ke, M., Wen, W., Liu, Z., Shi, J. & Sheng, P. (2007). Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves. *Physical Review B*, 76(5), 054303
- Janssen, S., Van Belle, L., de Melo Filho, N.G.R., Desmet, W., Claeys, C., Deckers, E., (2023). Improving the noise insulation performance of vibro-acoustic metamaterial panels through multi-resonant design. *Applied Acoustics* 213, 109622
- Liu, J., Declercq, N.F. (2015). Investigation of the origin of acoustic Wood anomaly. *J. Acoust. Soc. Am.* 138 (2): 1168–1179
- Ma, P.S., Seo, Y.H., Lee, H., (2023). Multiband ventilation barriers enabled by space-coiling acoustic metamaterials. *Applied Acoustics* 211, 109565
- Reddy, J. N. (2019). Introduction to the finite element method. McGraw-Hill Education
- Rubio, C., Castiñeira-Ibáñez, S., Uris, A., Belmar, F. & Candelas, P. (2018). Numerical simulation and laboratory measurements on an open tunable. *Applied Acoustic*, 141, 144–150
- Rubio, C., Castiñeira-Ibáñez, S., Sánchez-Pérez, J. V., Candelas, P., Belmar, F., & Uris, A. (2016). Open Acoustic Barriers: A New Attenuation Mechanism. *InTech*. doi: 10.5772/64360

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

