

Aplicabilidad de redes de dispersores aislados como dispositivos reductores de ruido en infraestructuras viarias



Mª del Pilar Peiró Torres¹, Juan Vicente Sanchez Pérez¹, F. Javier Redondo Pastor¹, Juan J. Martín Pino¹

¹ Departamento de Física Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia.
e-mail: mapeitor@doctor.upv.es

PACS: 43.50.Gf

Resumen

El control de ruido ambiental es una preocupación de primera magnitud para las sociedades avanzadas, debido a los problemas que ocasiona este tipo de contaminación en la salud de los ciudadanos. Una de las soluciones más extendidas para el control del ruido en su fase de transmisión es la utilización de pantallas acústicas.

La aparición de nuevos materiales formados por redes de dispersores acústicos aislados, denominados cristales de sonido, está revolucionando el campo del apantallamiento acústico, posibilitando el avance tecnológico de este área. Así, en los últimos años, las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido se han posicionado como una alternativa viable a las pantallas acústicas tradicionales, puesto que ofrecen múltiples ventajas frente a las soluciones actuales.

En el presente trabajo se muestra, en primer lugar, una recopilación de los avances realizados en el campo del apantallamiento acústico mediante esta tipología de pantallas. Asimismo, se describen y analiza la interacción que se produce entre dos de los mecanismos de control de ruido utilizados para este tipo de pantallas, las resonancias y la dispersión múltiple, siendo este último característico de los cristales de sonido.

También se ha diseñado un nuevo dispositivo de reducción de ruido basado en cristales de sonido, utilizando herramientas de optimización multiobjetivo, que permiten apantallar y reflejar de forma difusa el ruido. Por último, se ha realizado un estudio psicoacústico para comparar la percepción de la reducción de la molestia que proporcionan las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido y las barreras tradicionales, determinando si los parámetros objetivos que evalúan su rendimiento coinciden con la respuesta subjetiva de los usuarios.

Abstract

Control of environmental noise is a major concern for advanced societies because of the resulting problems of this kind of contamination for citizens' health. One of the most widespread solutions for controlling noise in its transmission phase is the use of acoustic screens.

The emergence of new materials to control noise made up of arrays of isolated acoustic scatterers, called sonic crystals, to control noise, is revolutionizing the field of acoustic screening. In recent years, acoustic screens based on sonic crystals have positioned themselves as a viable alternative to traditional acoustic screens, as they offer multiple advantages over current traditional solutions.

In this paper, firstly, a compilation of the advances made in the field of acoustic screening using this this new material is shown. In addition, it has been described some detected interferences between the effects of resonance and multiple scattering - the noise control mechanism specific of sonic crystals - when they work in nearby frequency ranges.

Also, it has been designed a new noise reduction device based on sonic crystals, using multi-objective optimization tools, which would block and diffuse the noise. Finally, it has been carried out a psychoacoustic study to compare the perception of the annoyance reduction provided by acoustic screens based on sonic crystals and traditional barriers, determining whether the objective parameters that evaluate their performance match to the subjective response of the users.

1. Introducción

El ruido se puede definir como una sensación auditiva molesta para el receptor y es considerado como un tipo de contaminación ambiental. Cada vez es más importante la preocupación por los problemas que genera el ruido y la demanda de ambientes más silenciosos por parte de las sociedades avanzadas conlleva el desarrollo de técnicas y dispositivos que permitan un mejor control de este tipo de contaminación.

Una de las fuentes de ruido más importantes es la debida al transporte de pasajeros y mercancías por carretera y genera un problema medioambiental de primera magnitud con consecuencias graves en la salud de los ciudadanos que lo padecen [1].

Una de las medidas más comúnmente adoptadas para minimizar el problema en la fase de transmisión del ruido desde la fuente al receptor lo constituye la instalación de pantallas acústicas que se interponen en dicha transmisión. Este trabajo se ha centrado en el desarrollo de estos dispositivos reductores de ruido diseñados basándose en unos materiales denominados Cristales de Sonido (CS).

Los CS están constituidos por un medio heterogéneo formado por un conjunto de dispersores acústicos aislados dispuestos en forma periódica e inmersos en un medio con distintas propiedades físicas. Estas diferencias en las propiedades físicas entre ambos medios posibili-

tan la existencia de un nuevo fenómeno físico de control de ondas acústicas denominado dispersión múltiple, propio de estos materiales.

La dispersión múltiple [2] se produce cuando una onda incide sobre un CS y ésta es reflejada en todos y cada uno de los dispersores acústicos que lo forman o que lo constituyen. Así, el campo que incide sobre cada dispersor, estará a su vez formado por la combinación de las ondas dispersadas por el resto de dispersores y la onda incidente. Este fenómeno físico, basado en la ley de Bragg, posibilita la aparición de bandas prohibidas de propagación es decir, de rangos de frecuencia en los cuales las ondas no se transmiten a través de los CS. Estas bandas prohibidas de propagación las denominaremos bandgaps (BG) (figura 1a).

La aplicación de los CS a las pantallas acústicas se puede realizar utilizando cualquier tipo de ordenamiento cristalino de los dispersores. Los más utilizados son los cristales bidimensionales, donde solo existe variación de propiedades físicas a lo largo de los ejes OX y OY (figura 1b). La forma geométrica de los dispersores que normalmente se utiliza es la cilíndrica, debido a su sencillez y simetría (figura 1c).

La altura y la anchura de los BG dependen de varios factores. El factor de llenado, que determina la anchura del BG, se define como el cociente entre el volumen ocupado por el medio dispersor y el volumen total del cristal. La altura del BG dependerá del número de filas que compo-

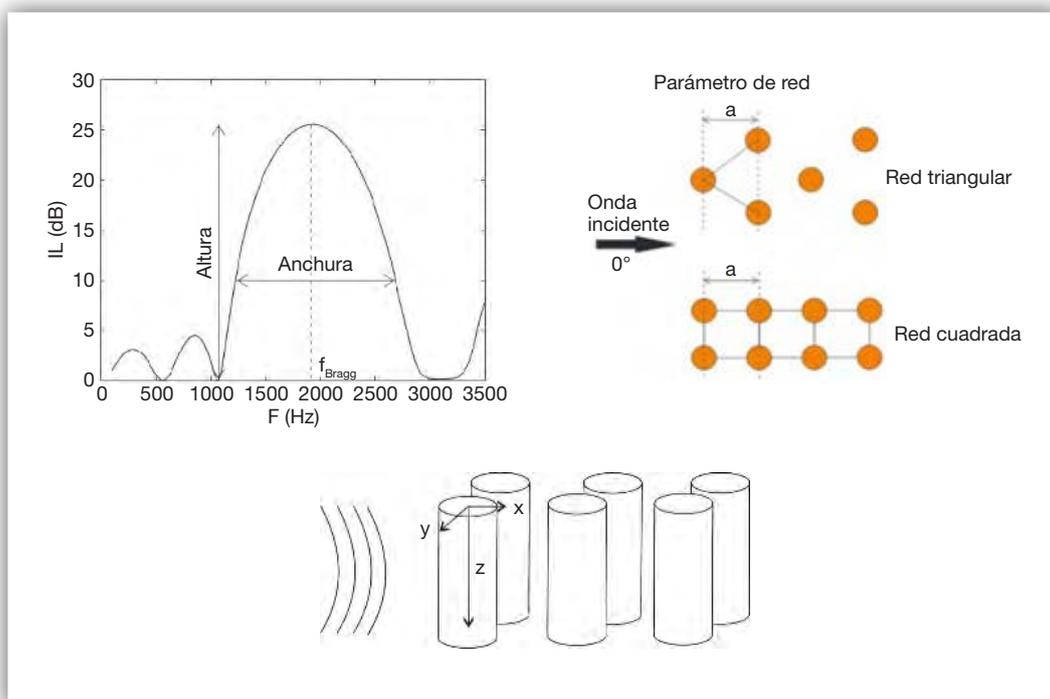


Figura 1. a) Cristal de sonido bidimensional compuesto por dispersores cilíndricos. b) Cristales de Sonido en dos dimensiones. Red triangular y cuadrada.

nen el CS. Se ha demostrado que una disposición de 3 filas de dispersores perpendiculares al sentido de avance de la onda es suficiente para obtener BG notables [3].

Mucho se ha avanzado en el campo de la investigación de este tipo de barreras acústicas desde que se descubrió y demostró experimentalmente la existencia de BG en la propagación de ondas acústicas a través de distribuciones periódicas [4]. No obstante, continúan desarrollándose investigaciones en esta área para conocer más profundamente el funcionamiento físico de los CS y para conseguir barreras acústicas tecnológicamente más avanzadas y efectivas, o con nuevas funcionalidades.

La capacidad de apantallamiento de cualquier pantalla acústica se encuentra limitada debido a distintos factores, pero sobre todo por la difracción producida en los bordes de la misma [5]. Se ha demostrado que pantallas que presentan aislamientos superiores a 25dB según su ensayo de aislamiento a ruido aéreo homologado no ofrecen dichos valores al emplazarse en condiciones reales, debido a la difracción por el borde que se produce en la onda acústica. La reducción de este fenómeno, que conlleva una gran merma de rendimiento acústico en este tipo de dispositivos, representa una de las principales líneas de investigación en el campo de las barreras acústicas tradicionales [6, 7, 8, 9, 10] formadas por paramentos continuos. En este sentido, el diseño basado en CS ofrece mayores posibilidades de actuación frente a esta problemática. Esta es una línea de investigación activa que pretende obtener diseños que ofrezcan un mayor rendimiento acústico que las pantallas tradicionales.

Otro de los retos planteados en este campo consiste en conseguir pantallas basadas en CS que ofrezcan una atenuación efectiva en todo el espectro de ruido de tráfico normalizado, aumentando el ancho de los BG que aparecen debido al fenómeno de dispersión múltiple mediante la adición de otros mecanismos de control del ruido. Para ello se está trabajando actualmente no sólo en el diseño de los dispersores, sino también en la geometría de la red, e incluso se analiza la posibilidad de añadir elementos de control activo de ruido a estas nuevas pantallas.

Al igual que en otros campos, la utilización de métodos numéricos ha permitido la aparición de técnicas de diseño iterativas que prueban un número elevado de configuraciones y seleccionan las mejores, ofreciendo así herramientas de optimización que permiten conseguir diseños mejores y más eficaces [11]. Esto ha facilitado la propuesta de nuevas funcionalidades en este tipo de pantallas.

Finalmente, es importante conocer la respuesta subjetiva de la ciudadanía frente a esta nueva tipología de barreras acústicas. Este punto es de especial interés

para conocer si este nuevo producto tendría una buena acogida por parte de los usuarios. Es preciso que esta línea de investigación, que se encuentra muy activa en otros ámbitos de dispositivos acústicos [12, 13], sea también tomada en cuenta por parte de los investigadores y desarrolladores de las pantallas basadas en CS.

El trabajo que se presenta en este artículo aborda algunas de estas líneas de investigación, que se desarrollarán en los apartados 3, 4 y 5. En el apartado 2, se describe brevemente el estado de la tecnología en el momento de inicio de la tesis doctoral que ha dado lugar a este trabajo.

2. Pantallas acústicas abiertas basadas en cristales de sonido

La primera pantalla acústica basada en CS fue propuesta teóricamente por Kushwaha en 1997 [14] y el primer prototipo de esta tipología de pantallas fue diseñado y construido por Sánchez-Pérez et al. en 2002 [15]. Estos dispositivos fueron diseñados utilizando la existencia de BG como único mecanismo de atenuación y estaban formados por un conjunto de dispersores rígidos embebidos en aire como se muestra en la Figura 2.

No obstante, se demostró que la utilización de la dispersión múltiple como único mecanismo para evitar la transmisión de ondas no era suficiente para garantizar un buen rendimiento acústico de este tipo de pantallas.

Para mejorar la capacidad de control de ruido de estos dispositivos, en 2011 Romero-García et al. [16] utilizaron un diseño de dispersores que incluía además de la dispersión múltiple, la resonancia y la absorción como mecanismos de control de ruido, dando lugar a diseños de dispersores multifísicos (figura 3).

Para determinar dicha mejora en el rendimiento acústico, se realizaron ensayos acústicos en un laboratorio certificado, que permitió la homologación por primera vez de este tipo de pantallas según las normas EN 1793-1 y EN 1793-2 respecto a su capacidad de absorción acústica y aislamiento a ruido aéreo respectivamente [17]. Pese a que estos ensayos de homologación no están diseñados para evaluar este tipo de barreras, los resultados obtenidos fueron prometedores. Estos resultados demostraron la capacidad de este tipo de dispositivos para ser utilizados como alternativa a las pantallas acústicas tradicionales.

Las pantallas acústicas diseñadas a partir de CS que utilizan otros mecanismos de control de ruido además de la dispersión múltiple, como el de la figura 3, se denominan pantallas acústicas basadas en CS de segunda generación y ofrecen un mayor rendimiento acústico.



Figura 2. Primer prototipo de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de primera generación, situado en el campus de la Universitat Politècnica de València.

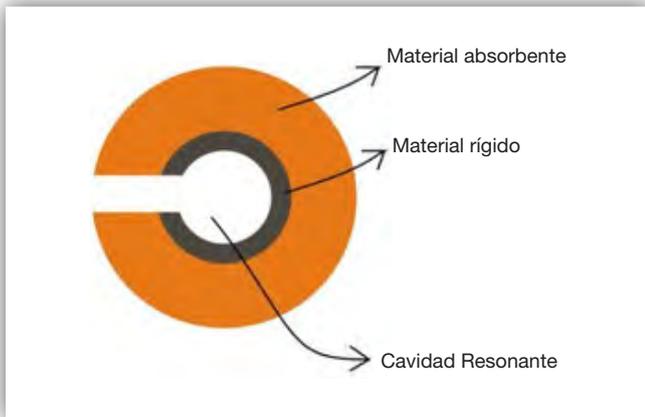


Figura 3. Sección de dispersor acústico multifísico diseñado por V. Romero-García et al [16].

3. Interferencias ondulatorias en pantallas basadas en CS diseñadas con dispersores que contienen resonadores de Helmholtz

Uno de los estudios realizados en el marco de la tesis doctoral que ha dado lugar a este trabajo, fue el relacionado con las interferencias detectadas entre las resonancias y la dispersión múltiple, que son dos de los mecanismos de control de ruido utilizados normalmente en dispersores multifísicos, como se muestra en la Figura 3.

Conseguir un rendimiento acústico adecuado en todo el espectro de frecuencias que contemple el ruido de tráfico normalizado [18] requiere que los distintos mecanismos de control de ruido actúen en frecuencias cercanas para ampliar el ancho de banda de atenuación. En la fase de diseño se detectaron interferencias destructivas entre las resonancias y los BG cuando se empleaban dispersores acústicos compuestos por resonadores de

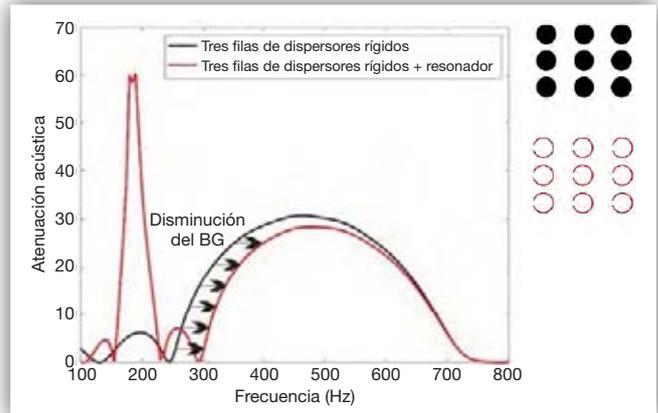


Figura 4. Interferencias detectadas entre BG-HR.

Helmholtz (HR) y ambos fenómenos se localizaban en rangos de frecuencia cercanos (ver Figura 4).

Con el fin de profundizar en el fenómeno se empleó un modelo numérico bidimensional (2D) basado en el Método de los Elementos Finitos (FEM). Utilizando este método se desarrollaron dos geometrías basadas en tubo de impedancia y en una configuración anecoica. Mediante estas geometrías se estudiaron los tres efectos que podrían ser los responsables de las interferencias detectadas cuando la onda interfiere con las cavidades resonantes: el cambio de fase, el cambio de directividad y la absorción.

Así, se observó en primer lugar (Figura 5) que la interferencia se producía exactamente de la misma forma cuando la entrada a las cavidades resonantes se orientaba a 0° y a 180° respecto a la dirección de incidencia de la onda. Esta circunstancia permitió descartar el cambio de directividad como responsable del fenómeno, puesto que en las simulaciones realizadas se apreciaban diferencias en la onda dispersada cuando la abertura de los resonadores se orientaba tanto a 0° como a 180° .

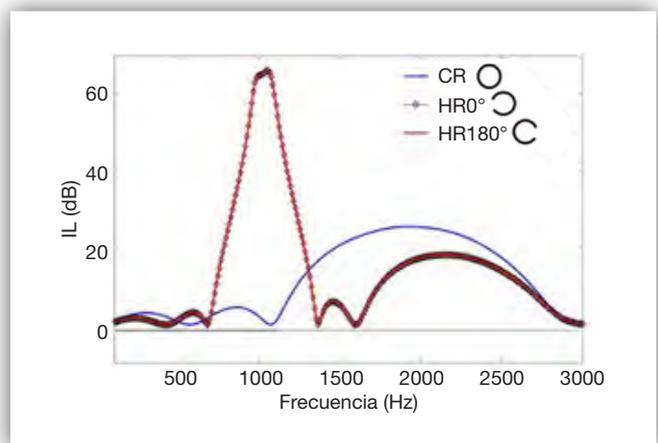


Figura 5. Interferencias detectadas según se orienten las aperturas a 0° (HR 0°) y a 180° (HR 180°) respecto a la dirección de incidencia de la onda.

Por otro lado, se observó que el rango de afección de la absorción no coincidía con la del efecto de interferencia detectada, mientras que sí coincidía con el rango del cambio de fase producido en la onda (figura 6). Por todo ello se concluyó que la interferencia observada era debida al cambio de fase que se produce en la onda transmitida.

Una vez concluido que es el cambio de fase de la onda transmitida el responsable de que se produzca el fenómeno de interferencia detectado, se puede interpretar dicha variación como una diferencia del espacio recorrido por la onda transmitida a través de un CS cuando éste está formado por resonadores Helmholtz en vez de por dispersores rígidos. Por lo tanto esta diferencia de fase se puede interpretar como un cambio virtual en el parámetro de red del CS, definido como la distancia entre dos dispersores consecutivos en la dirección de incidencia de la onda. También hemos podido concluir que este parámetro de red virtual, al que se ha denominado "equivalente", sería menor al real si el BG se produce a más altas frecuencias que la resonancia y mayor si el BG se produce a frecuencias más bajas que la resonancia.

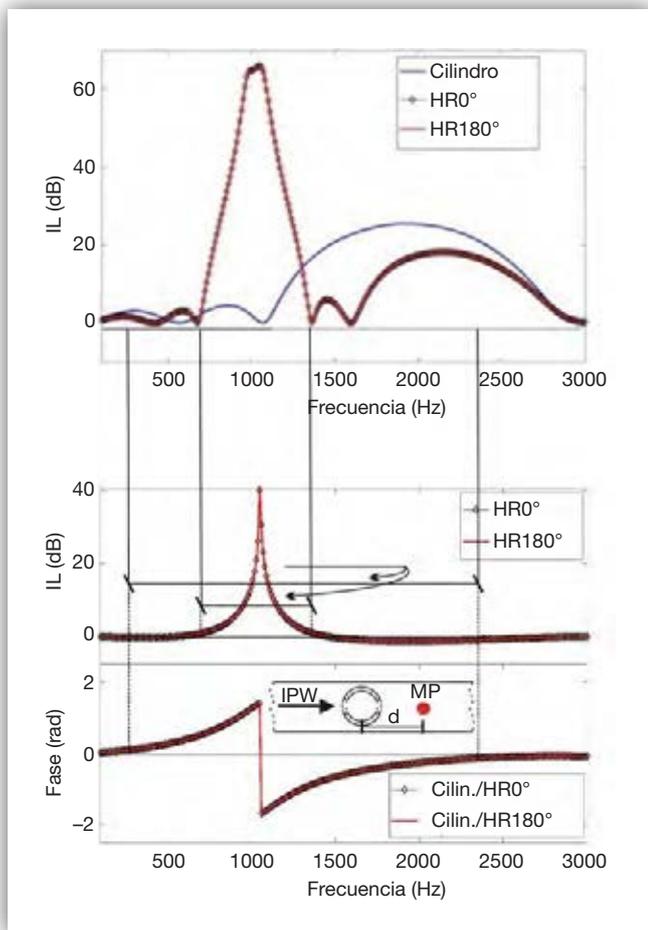


Figura 6. Rangos de afección de los distintos efectos (absorción y cambio de fase) respecto al efecto detectado.

Gracias al descubrimiento físico de este fenómeno de interferencia se abren nuevas líneas de investigación para tratar de reducir o manipular las interferencias observadas con el fin de aumentar el rendimiento acústico de estos dispositivos.

4. Pantallas acústicas difusoras basadas en cristales de sonido

Son muchos los ejemplos prácticos en los que las soluciones de apantallamiento acústico tradicionales basadas en paramentos continuos reflejan el sonido especularmente. Estas reflexiones no deseadas pueden producir a menudo problemas al dirigir el ruido a aquellas zonas que se pretende proteger (figura 7), pudiendo incluso agravar el problema acústico en dichas zonas [19, 20, 21].

Para solucionar esta problemática, en esta tesis doctoral se ha analizado la posibilidad de diseñar pantallas acústicas basadas en CS con propiedades difusoras de forma que el sonido no se reflejara en dichas pantallas de forma especular.

Para la consecución de este objetivo se han utilizado herramientas avanzadas de diseño basadas en métodos de optimización. Estas herramientas han sido ya utilizadas en el caso de dispositivos basados en CS, demostrando su eficacia en la resolución de problemas específicos y mejorando notablemente el rendimiento acústico de los dispositivos. Así, en los últimos años se ha incrementado el uso de técnicas de optimización para la mejora de diseños de pantallas acústicas basadas en CS y de difusores basados en CS [11, 18, 23]

En este caso, se utilizó un algoritmo evolutivo denominado ev-MOGA [24], desarrollado por investigadores pertenecientes al Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial de la Universitat Politècnica de València, con el fin de realizar una optimización biobjetivo

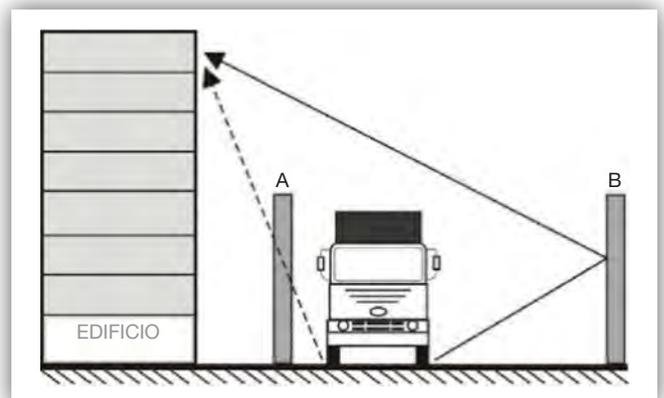


Figura 7. Esquema del problema.

para tratar de maximizar dos funcionalidades del dispositivo basado en CS: el aislamiento y la difusión.

Para ello se definieron las dos funciones de coste a minimizar que determinarían el rendimiento de cada uno de los diseños propuestos, el sonido reflejado especularmente (SRS) y las pérdidas por inserción en valor negativo (-IL). Esto último es debido a que el algoritmo de optimización minimiza las funciones de coste y ya que se deseaban maximizar las pérdidas por inserción, definimos dicha formulación en valor negativo.

$$SRS = 10\log(1 - \infty) + 10\log(1 - d)$$

$$-IL = \log\left|\frac{P_d}{P_{inter}}\right|$$

Tras definir las funciones de coste se definió la geometría de los individuos a optimizar. Se consideraron dos configuraciones generales distintas, una compuesta por

un monocristal de módulo 7x4 cilindros con un solo parámetro de red y otra - que denominamos bicristal - compuesta por dos parámetros de red distintos y módulos de dispersores 5x2 y 7x2, dejando así la funcionalidad de aislamiento a las filas del trasdós y la función de la difusión a las filas expuestas en parte de incidencia del sonido (figura 8). Como variable para formar los distintos individuos se tomó el diámetro de los dispersores. De esta forma, los distintos individuos que propondría el algoritmo de optimización estarían formados por conjuntos de dispersores de distintos diámetros que compondrían dicho módulo.

Para determinar el valor de las funciones de coste y caracterizar acústicamente los diferentes individuos obtenidos en el proceso de optimización se desarrolló un modelo de simulación basado en Diferencias Finitas en Dominio de Tiempo (FDTD), recogido en la figura 9.

Así, el proceso de optimización se llevó a cabo conjuntamente utilizando el algoritmo ev-MOGA y el modelo de simulación acústica que se muestra en la figura 9. La mecánica de funcionamiento del proceso de diseño es la siguiente: ev-MOGA es el algoritmo que dirige el proceso y propone los nuevos individuos a probar siguiendo las reglas de la genética, incluidas las mutaciones, los cruces y los genotipos de los individuos propuestos en una población inicial. Se sigue un proceso iterativo que se inicia con la propuesta de un nuevo individuo por parte de ev-MOGA. A continuación, se evalúa su rendimiento acústico simulando su comportamiento con FDTD, según el modelo de la figura 9 y calculando sus funciones de coste. Una vez obtenidos los valores de las funciones de coste, se ordena y representa en un espacio objetivo. Finalmente, se establece el Frente de Pareto en el espacio objetivo, que es el conjunto de individuos que presentan mejores resultados.

Los resultados se muestran en las figuras 10 y 11.

Después de analizar los resultados concluimos que aunque la configuración bicristal ofrecía mejores resulta-

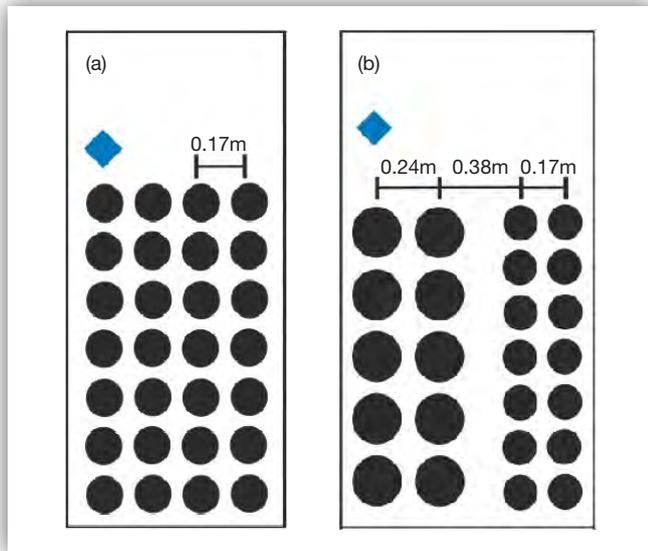


Figura 8. Configuración inicial del (a) monocristal y el (b) bicristal.

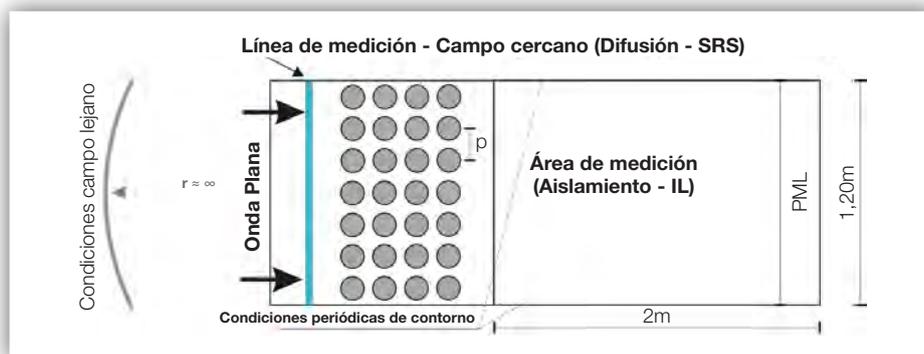


Figura 9. Esquema de simulación empleado para la caracterización acústica de los diseños propuestos.

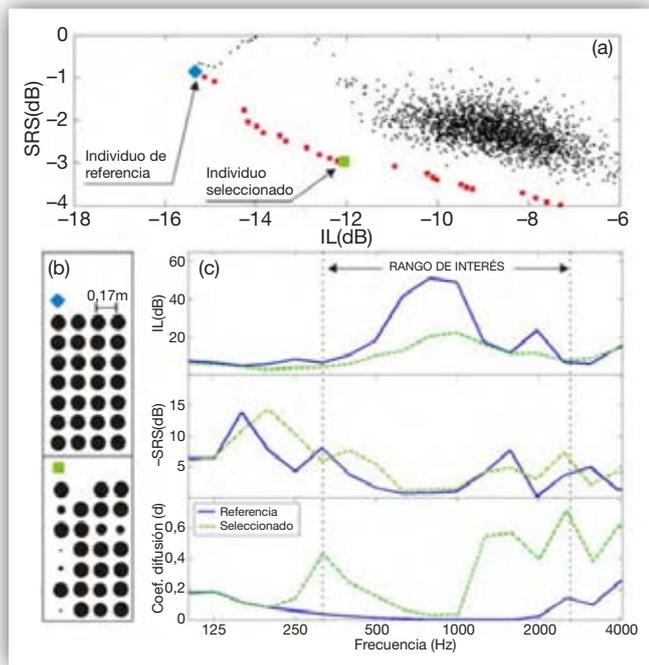


Figura 10. Resultados de la optimización para el caso del monocristal. (a) Espacio objetivo en el que se señalan la población inicial, el Frente de Pareto y los individuos de referencia y el seleccionado, marcados en verde y azul respectivamente; (b) Dispositivo de referencia inicial (arriba) y el seleccionado por su buen comportamiento acústico (abajo); (c) Rendimiento acústico de ambos individuos, el de referencia (línea continua azul) y el seleccionado (línea discontinua verde). Se muestran los espectros IL, -SRS y el coeficiente de difusión d , que mide la uniformidad de la distribución polar de las direcciones de las ondas reflejadas.

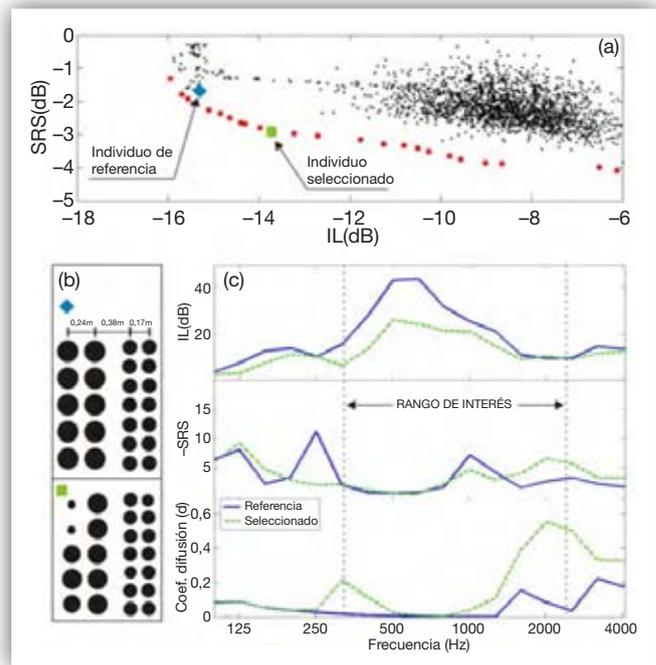


Figura 11. Resultados de la optimización para el caso del bicristal. (a) Espacio objetivo en el que se señalan la población inicial, el Frente de Pareto y los individuos de referencia y el seleccionado, marcados verde y azul respectivamente; (b) Dispositivo de referencia inicial (arriba) y el seleccionado por su buen comportamiento acústico (abajo); (c) Rendimiento acústico de ambos individuos, el de referencia (línea continua azul) y el seleccionado (línea discontinua verde). Se muestran los espectros IL, -SRS y el coeficiente de difusión d , que mide la uniformidad de la distribución polar de las direcciones de las ondas reflejadas.

dos. Ambos eran capaces de ofrecer ambas funcionalidades, apantallamiento y difusión, de forma satisfactoria con un número mínimo de filas. Estos nuevos dispositivos fueron denominados Sonic Crystals Acoustic Screens and Diffusers (SCASAD).

5. Correlación entre evaluaciones objetivas y subjetivas de barreras acústicas

El procedimiento para evaluar el rendimiento acústico de los dispositivos reductores de ruido que se disponen en las infraestructuras viarias viene recogido en las normas publicadas. En estas normas se detalla tanto la metodología de ensayo como la metodología de cálculo con el fin de obtener un solo número que represente el aislamiento a ruido aéreo o las pérdidas por inserción de los dispositivos [25, 26]. Estos índices objetivos, denominados DL_{SI} y $D_{IL,Atr}$ definen la calidad y el rendimiento de las pantallas acústicas, estando el primero relacionado únicamente con las características intrínsecas de las pantallas mientras que el segundo contempla también las características extrínsecas de los dispositivos.

Mediante el estudio de percepción descrito en este apartado, se evaluó la correlación entre ambos parámetros objetivos que evalúan el rendimiento acústico de los dispositivos reductores de ruido y la reducción de molestia que ofrecen y que era percibida efectivamente por los individuos encuestados.

Así, se simuló el comportamiento de apantallamiento acústico de tres tipologías de pantallas: i) una pantalla basada en cristales de sonido de primera generación compuesta únicamente por dispersores rígidos; ii) una pantalla acústica basada en cristales de sonido de segunda generación compuesta por dispersores con cavidades resonantes y material absorbente y iii) una pantalla acústica tradicional metálica que dispone de material absorbente. Cada uno de estos dispositivos ofrecía un aislamiento a ruido aéreo diferente (condiciones intrínsecas).

También se simularon tres situaciones emisor-receptor: i) la onda emitida era esférica y el receptor estaba cerca de la pantalla; ii) se emitía una onda plana y el receptor estaba cerca de la pantalla y iii) se emitía una onda plana y el receptor se encontraba alejado de la pantalla

y a una altura similar a la misma. La combinación de estos dispositivos y estas simulaciones resultaron en un total de 9 muestras que ofrecían unas pérdidas por inserción distintas (condiciones extrínsecas).

Todas las configuraciones y los valores de los distintos parámetros objetivos se encuentran recogidos en la tabla 1.

Tabla 1. Configuraciones probadas en el estudio psicoacústico.

EMISOR/RECEPTOR SITUACIÓN				
		$DL_{SI} = 4,98 \text{ dB(A)}$	$DL_{SI} = 11,1 \text{ dB(A)}$	$DL_{SI} = 26,4 \text{ dB(A)}$
I	EMISOR RECEPTOR	$D_{IL,Atr} = 5 \text{ dB(A)}$ Muestra 3	$D_{IL,Atr} = 11 \text{ dB(A)}$ Muestra 7	$D_{IL,Atr} = 22 \text{ dB(A)}$ Muestra 9
II	EMISOR (PLANE WAVE) RECEPTOR	$D_{IL,Atr} = 4,8 \text{ dB(A)}$ Muestra 2	$D_{IL,Atr} = 10,5 \text{ dB(A)}$ Muestra 6	$D_{IL,Atr} = 17 \text{ dB(A)}$ Muestra 8
III	EMISOR (PLANE WAVE) RECEPTOR	$D_{IL,Atr} = 3,7 \text{ dB(A)}$ Muestra 1	$D_{IL,Atr} = 6,5 \text{ dB(A)}$ Muestra 4	$D_{IL,Atr} = 7,8 \text{ dB(A)}$ Muestra 5

En este estudio psicoacústico fueron encuestados noventa individuos de dos nacionalidades diferentes (portuguesa y española) para que calificaran la reducción de molestia percibida tras exponerlos a estímulos acústicos sin el filtro del apantallamiento seguido por estímulos acústicos apantallados por una de las soluciones evaluadas.

Tras analizar las respuestas de los encuestados, evaluándolas con puntuaciones en función de la reducción de la molestia percibida (en inglés PAR), y comparándolas con los parámetros objetivos que evalúan estos dispositivos. Se observó que efectivamente existía una relación lineal entre los indicadores objetivos y las respuestas de los encuestados (figura 12). De hecho, el valor de correlación de Spearman próximo a 1, verificaba dicha correlación, siendo mayor la correlación si los parámetros

objetivos considerados tenían en cuenta las condiciones extrínsecas (tabla 2). Es decir, existía mayor correlación respecto al parámetro objetivo basado en las pérdidas por inserción que respecto al basado en el aislamiento a ruido aéreo.

Tabla 2. Valores del coeficiente de Correlación Spearman.

Coeficiente de Correlación Spearman's rho DL_{SI}-PAR	0.695
Coeficiente de Correlación Spearman's rho $DL_{IL,Atr}$-PAR	0.812

Además, si observamos la curva de correlación DL_{SI} vs PAR (figura 12) podemos observar que los dispositivos que ofrecían aislamientos a ruido aéreo superiores a 10 dB no eran evaluados de acuerdo con lo esperado por los encuestados. Es decir, para valores altos de aislamiento, disminuía la relación lineal de dichos parámetros objetivos con la percepción subjetiva analizada y el aumento del aislamiento no era percibido proporcionalmente por los usuarios. Esta conclusión puede ser muy interesante a la hora de seleccionar los mejores diseños de pantallas ya que no sólo los parámetros objetivos relativos al aislamiento acústico deberían ser tenidos en cuenta en la selección, sino que también deberían considerarse otros parámetros tales como como la permeabilidad, o la reducción del impacto visual de los dispositivos reductores de ruido.

Adicionalmente, se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre varias características de los encuestados (nacionalidad y género) siendo las mujeres más exigentes que los hombres a la hora de evaluar el rendimiento del apantallamiento acústico y los españoles más exigentes que los encuestados portugueses.

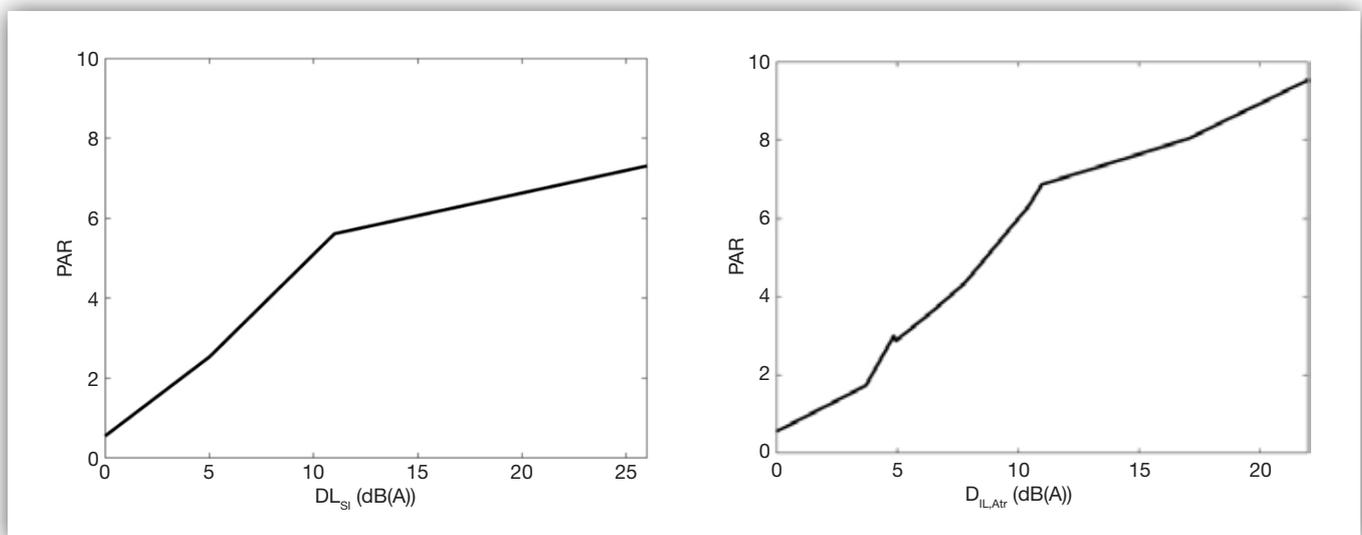


Figura 12. Respuesta de la reducción de molestia percibida (Perceived Annoyance Reduction PAR) vs parámetros objetivos de aislamiento a ruido aéreo y pérdidas por inserción (DL_{SI} y $DL_{IL,Atr}$).

También se observaron diferencias estadísticamente significativas en la tipología de ruido empleado para evaluar los rendimientos de las diferentes pantallas, siendo el sonido de motocicleta más difícil de apantallar que los otros sonidos empleados.

Por otro lado, y tal y como observamos en la figura 13, se constató que los índices ponderados por la curva de ponderación A correspondiente a la curva isofónica de 40 fonios, guardan correlación respecto a la reducción de molestia percibida por los encuestados. De hecho, dicha correlación es mucho mayor que la correlación que presentarían otras ponderaciones (por ejemplo, la curva de ponderación B correspondiente a 60 fonios). No obstante, también se comprobó que otras curvas de ponderación (aquí la hemos denominado Alpha, correspondiente a 10 fonios) podrían presentar mejor correlación incluso. Aunque es preciso realizar más estudios al respecto, estos resultados abren un debate acerca de la adecuación de la curva de ponderación A en los cálculos acústicos y cuanto menos plantea una revisión de los procedimientos de cálculo de las evaluaciones de los dispositivos reductores de ruido.

6. Conclusiones

Los avances realizados en la tesis que ha dado lugar a este trabajo podrían contribuir a que este novedoso tipo de pantallas fuesen aplicadas en un futuro cercano, en las infraestructuras viarias. La tecnología se encuentra lo suficientemente madura para ser implantada, puesto que los rendimientos acústicos de esta nueva tipología son equiparables a las soluciones tradicionales y además ofrecen múltiples ventajas respecto a las pantallas acús-

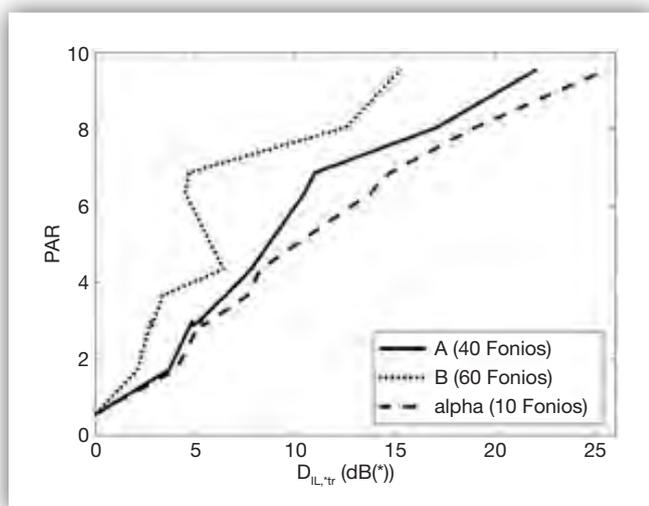


Figura 13. Correlación entre el parámetro objetivo de pérdidas por inserción ponderado por diferentes curvas de ponderación (línea continua curva A, línea de puntos curva B, línea discontinua curva Alpha) vs la reducción de molestia percibida por los encuestados (PAR).

ticas constituidas por paramentos continuos (reducción de la cimentación, permeabilidad, estética, menor impacto visual...).

A modo de resumen, se puede afirmar que en las investigaciones enmarcadas en esta tesis, se han establecido en primer lugar los principios físicos que rigen la interacción entre diversos mecanismos de control de ruido que emplean los dispersores de las pantallas acústicas basadas en CS de segunda generación. En segundo lugar, se ha establecido un procedimiento de diseño de dispositivos acústicos basados en CS basado en la optimización, obteniendo pantallas con nuevas funcionalidades acústicas. Por último, en un estudio psicoacústico realizado, aunque se corroboró la correlación entre los parámetros objetivos que evalúan las pantallas y la percepción subjetiva de los encuestados, también se observó que atenuaciones por encima de 10dB no eran percibidas por los individuos de acuerdo con lo esperado.

Los resultados de las investigaciones llevadas a cabo sobre los CS están arrojando resultados muy prometedores por lo que su aplicación inmediata al apantallamiento a nivel comercial debería ser un hecho en los próximos años. No obstante, existen todavía facetas que requieren un esfuerzo investigador, lo que haría posible el desarrollo de dispositivos más avanzados tecnológicamente y que ofrecieran mejores rendimientos acústicos, pese a que como se ha comentado anteriormente en la introducción, alcanzar aislamientos acústicos superiores a 25dB carece de sentido.

Conviene señalar asimismo, que entendemos que se se abren a su vez nuevas posibilidades para continuar la investigación en este campo del apantallamiento acústico. Como la línea abierta respecto a las interferencias detectadas entre BG y la resonancia, la posibilidad detectada de poder incorporar nuevas funcionalidades a esta tipología de pantallas o la realización de estudios perceptivos más amplios que expongan a los encuestados a no sólo estímulos auditivos, sino también visuales, para estudiar la aceptación de este tipo de pantallas. También es importante apuntar que quedaría por explorar las múltiples posibilidades que ofrece esta tipología de pantallas de disminuir los efectos de la difracción por el borde.

Las publicaciones derivadas del trabajo desarrollado durante la tesis doctoral que ha dado pie a este trabajo se corresponden con las referencias de [27] a [30].

Agradecimientos

La presente tesis doctoral se ha realizado gracias a una ayuda del Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro del programa Doctores Industriales (DI-15-08100)

Bibliografía

- [1] World Health Organization. (1980). Environmental health criteria 12: Noise. Geneva: WHO.
- [2] Castiñeira Ibáñez, S. (2015). Análisis y modelado de la fenomenología ondulatoria asociada al diseño de barreras acústicas basadas en conjuntos de dispersores aislados. Homologación de dispositivos (Doctoral dissertation).
- [3] García-Raffi, L. M., Romero-García, V., & Sánchez-Pérez, J. V. (2010, June). Determination of the thickness of sonic crystal acoustic barriers using evanescent modes. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 2010, No. 10, pp. 1527-1535). Institute of Noise Control Engineering.
- [4] Martínez-Sala, R., Sancho, J., Sánchez, J. V., Gómez, V., Llinares, J., & Meseguer, F. (1995). Sound attenuation by sculpture. *Nature*, 378(6554), 241-241.
- [5] Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied acoustics*, 1(3), 157-173.
- [6] Defrance, J., & Jean, P. (2003). Integration of the efficiency of noise barrier caps in a 3D ray tracing method. Case of a T-shaped diffracting device. *Applied Acoustics*, 64(8), 765-780.
- [7] Watts, G. (1993). Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers. TRL Published Article, (PA 2191).
- [8] Watts, G. R. (1996). Acoustic performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites. *Applied Acoustics*, 47(1), 47-66.
- [9] Watts, G. R., Morgan, P. A., & Surgand, M. (2004). Assessment of the diffraction efficiency of novel barrier profiles using an MLS-based approach. *Journal of Sound and Vibration*, 274(3-5), 669-683.
- [10] Umnova, O., Attenborough, K., & Linton, C. M. (2006). Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(1), 278-284.
- [11] Herrero, J. M., García-Nieto, S., Blasco, X., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., & Garcia-Raffi, L. M. (2009). Optimization of sonic crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionary algorithm. *Struct Multidiscip Optim* 2009;39(2):203–15. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0323-7>.
- [12] Hongisto, V., Oliva, D., & Rekola, L. (2018). Subjective and objective rating of the sound insulation of residential building façades against road traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(2), 1100-1112.
- [13] Hongisto, V., Oliva, D., & Keränen, J. (2014). Subjective and objective rating of airborne sound insulation–living sounds. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(5), 848-863.
- [14] Kushwaha, M. S., 1997. Stop-bands for periodic metallic rods: Sculptures that can filter the noise. *Applied Physics Letters*, 70(24), 3218-3220.
- [15] Sanchez-Perez, J. V., Rubio, C., Martinez-Sala, R., Sanchez-Grandia, R., Gomez, V., 2002. Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. *Applied Physics Letters*, 81(27), 5240-5242.
- [16] Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., Garcia-Raffi, L. M., 2011. Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two-dimensional multiphysical phenomena periodic systems. *Journal of applied physics*, 110(1), 014904.
- [17] Castiñeira-Ibáñez, S., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V., García-Raffi, L. M., 2015. Periodic systems as road traffic noise reducing devices: Prototype and standardization. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 14(12).
- [18] EN 1793-3:1998 Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Normalized traffic noise spectrum
- [19] (a) Kotzen B, English C. Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design. London: E&FN Spon; 1999;
(b) Kotzen B, English C. Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design. CRC Press; 2009.
- [20] Platon SN, Hionis CA. Preventing risk of noise exposure in working environment using noise mapping. *Environ Eng Manage J* 2014;13 (6):1349–54.
- [21] Lee CS, Fleming GG. Measurement of highway-related noise (No. FHWA-PD-96-046). Federal Highway Administration; 1996.
- [22] Redondo J, Sánchez-Pérez JV, Blasco X, Herrero JM, Vorländer M. Optimized sound diffusers based on sonic crystals using a multiobjective evolutionary algorithm. *J Acoust Soc Am* 2016;139(5). <https://doi.org/10.1121/1.4948580>.
- [23] Hughes RJ, Angus JA, Cox TJ, Umnova O, Gehring GA, Pogson M, et al. Volumetric diffusers: pseudorandom cylinder arrays on a periodic lattice. *J Acoust Soc Am* 2010;128(5):2847–56. <https://doi.org/10.1121/1.3493455>.

- [24] Herrero JM. Non-linear Robust identification using evolutionary algorithms [Doctoral dissertation Ph.D. Thesis]. Spain: Polytechnic University of Valencia; 2006.
- [25] EN 1793-6 - Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 6: Intrinsic characteristics - In situ values of airborne sound insulation under direct sound field conditions, 2012.
- [26] ISO 10847 – Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types, 1997.
- [27] Peiró-Torres, M. P., Redondo, J., Bravo, J. M., & Pérez, J. S. (2016). Open noise barriers based on sonic crystals. *Advances in noise control in transport infrastructures. Transportation research procedia*, 18, 392-398.
- [28] Peiró-Torres, M. P., Castiñeira-Ibáñez, S., Redondo, J., & Sánchez-Pérez, J. V. (2019). Interferences in locally resonant sonic metamaterials formed from Helmholtz resonators. *Applied Physics Letters*, 114(17), 171901.
- [29] Peiró-Torres, M. P., Navarro, M. P., Ferri, M., Bravo, J. M., Sánchez-Pérez, J. V., & Redondo, J. (2019). Sonic crystals acoustic screens and diffusers. *Applied Acoustics*, 148, 399-408.
- [30] Redondo, J., Peiró-Torres, M. P., Linares, C., Bravo, J. M., Pereira, A., & Amado-Mendes, P. (2021). Correlation between objective and subjective assessment of noise barriers. *Applied Acoustics*, 172, 107640.