

ESTÁNDARES DE MEDIDA DE AISLAMIENTO DE PANTALLAS ACÚSTICAS: "EL BUENO, EL FEO Y EL MALO"

Javier Redondo¹, Jaime Galiana-Nieves¹, David Ramirez-Solana², Rubén Picó¹

¹ Universitat Politècnica de València. Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, Paranimf 1, Grao de Gandia, Valencia (Spain);
{fredondo@fis.upv.es, jaiganie@doctor.upv.es, rpico@fis.upv.es}

² Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4, 70125 Bari, (Italy)
{david.ramirezsolana@poliba.it}

Resumen

La medición de las características acústicas intrínsecas de las pantallas acústicas, y en concreto el aislamiento acústico, viene definido por dos estándares: EN 1793-2:2019 y EN 1793-6:2019+A1:2022. El primera está pensada para casos en los que la pantalla se encuentre en condiciones de campo difuso mientras que el segundo aplica en aquellos casos en que tan sólo incida sobre la pantalla el campo directo. Así, la primera supone una incidencia aleatoria mientras que la segunda supone una incidencia normal. En la inmensa mayoría de los casos, el sonido no llega a la pantalla de manera aleatoria, pero tampoco lo hace exclusivamente en incidencia normal. Esto hace que ninguno de los estándares se corresponda con una situación realista. En el presente trabajo se presenta un estudio numérico de cual son las diferencias entre los resultados proporcionados por ambos métodos y también el de una hipotética técnica de medida que permitiera considerar la contribución de todos los ángulos de incidencia ajustándose a la forma en el sonido incide sobre las pantallas en condiciones reales. Se evidencia que, en pantallas con aislamientos fuertemente dependientes del ángulo, los resultados de las tres técnicas son muy diferentes.

Palabras clave: estándares de medida, pantallas acústicas, cristales de sonido, simulación numérica.

Abstract

The measurement of the intrinsic acoustic characteristics of noise barriers, and in particular the sound insulation, is established by two standards: EN 1793-2:2019 and EN 1793-6:2019+A1:2022. The former is intended for cases where the screen is in diffuse field conditions while the latter applies in cases where only the direct field is impinging on the screen. Thus, the former assumes random incidence while the latter assumes normal incidence. In the majority of cases, the sound does not reach the screen randomly, but neither only at normal incidence. This means that neither standard corresponds to a realistic situation. This paper presents a numerical study of the differences between the results provided by the two methods and also of a hypothetical measurement technique that would allow the contribution of all angles of incidence to be taken into account, adjusting to the way sound hits the screens in real conditions. It is shown that, in screens with strongly angle-dependent isolations, the results of the three techniques are very different.

Keywords: measurement standards, noise barriers, sonic crystals, numerical simulation.

PACS n°. 43.55.-n, 43.55. Rg, 43.58.-e

1 Introducción

El transporte constituye uno de los mayores problemas medioambientales en general por la emisión de sustancias químicas y en particular por la contaminación sonora. Dado que la movilidad de transportes y mercancías es inevitable, se pueden tan sólo mitigar parcialmente los efectos nocivos del ruido. Es bien sabido que existe diferentes estrategias para reducir la molestia, actuando sobre la fuente (reducción del ruido de motor y rodadura) o sobre los receptores (mejora del aislamiento acústica de las fachadas), pero generalmente, no existe otra opción que actuar sobre la propagación del sonido entre ambos (fuente y receptor). Nos referimos a las pantallas acústicas, muy extendidas a pesar de que su eficiencia es muy reducida en la mayoría de las situaciones.

Para poder planificar o proyectar soluciones basadas en la instalación de pantallas acústicas se hace necesario conocer sus características acústicas intrínsecas, tanto su aislamiento como su absorción. En particular en lo tocante al aislamiento, existen dos normas que vienen a estandarizar la medición de su aislamiento. El estándar EN 1793-2:2019 [1] (en lo sucesivo Método de cámara de transmisión) establece un tipo de ensayo en laboratorio inspirado en el utilizado en el campo de la acústica arquitectónica que se desarrolla en cámara de transmisión. Por otra parte, el estándar EN 1793-6:2019+A1:2022 [2] (en lo sucesivo Método in situ) establece un relativamente novedoso método de medida que se realiza directamente en el lugar de instalación de la pantalla. Obviamente, el primero supone someter la pantalla a un campo sonoro difuso mientras que en el segundo existe una total falta de reflexiones. Si bien el segundo método ya se ha convertido en el más extendido en muchos países, el primero sigue siendo utilizado en muchos países (entre otros Portugal y España) dado que numerosos laboratorios tienen experiencia de varias décadas realizando este tipo de mediciones, así como la complejidad del postprocesado necesario para aplicar el segundo método.

A parte del lugar de realización de las mediciones, y el postprocesado necesario, ambos métodos asumen condiciones del campo sonoro incidente completamente diferentes. En el primero el campo sonoro que incide sobre la barrera es difuso, mientras que, en el segundo, la incidencia es básicamente normal a la superficie definida por la pantalla. En condiciones prácticas, el sonido se genera a lo largo de una línea, bien sea una carretera, autovía, autopista, etc, o vía ferroviaria. Por lo tanto, el sonido incide sobre la pantalla fundamentalmente sobre un plano. Cabría por lo tanto establecer un hipotético tercer método basado el sonido incide sobre la barrera en una situación realista. A este modo de evaluación lo denominaremos Método realista.

A parte de otros aspectos, los tres métodos establecen unas ponderaciones angulares claramente diferentes. En otras palabras, el peso o relevancia de cada posible ángulo es completamente diferente en cada método. La siguiente tabla resume dichas diferencias añadiendo una denominación alternativa.

Tabla 1 – Ponderaciones angulares establecidos por los tres métodos comparados en este trabajo

Método	Ponderación angular
Cámara de transmisión / El feo	Ecuación de Paris (incidencia aleatoria)
In situ / El malo	Sólo incidencia normal
Realista / El bueno	Sólo plano horizontal

Como se mostrará más adelante, en pantallas con una variación pequeña del aislamiento (o coeficiente de transmisión) frente a la dirección de incidencia, estas diferencias no son notables. Por el contrario, existen dispositivos en los que la variación angular de estos parámetros puede ser muy fuerte los resultados de los tres métodos comparados en este trabajo son muy dispares. Uno de los casos en que la variación angular del aislamiento es relativamente importante es el de las pantallas basadas en cristales

de sonido. Este tipo de dispositivos consiste en una disposición periódica de dispersores (cilindros). Fueron propuestos hace más de dos décadas [3-4] y han despertado un gran interés en la comunidad científica dado que proporcionan un elevado aislamiento sin por ello impedir el paso del viento ni obstaculizar el paso de agua, evitando así acumulaciones en caso de fuertes lluvias. Aunque su elevado coste y la falta de aislamiento en algunos rangos frecuenciales hace que aún no se hayan instalado este tipo de dispositivos. El principio de funcionamiento de las pantallas basadas en cristales de sonido es la existencia de bandgaps (bandas prohibidas) que ocurren para múltiplos enteros de la frecuencia asociada a la longitud de onda igual a dos veces la distancia mínima entre los dispersores.

En el presente trabajo se comparan mediante simulación numérica los resultados de las tres técnicas anteriormente citadas tanto para pantallas homogéneas como para pantallas basadas en cristales de sonido. En la siguiente sección se presentará la técnica numérica utilizada, así como los cálculos del aislamiento de cada uno de los tres métodos. En la sección 3 se mostrarán los resultados y finalmente en la sección 4 se mostrarán las conclusiones extraídas del presente trabajo.

2 Método de simulación numérica y cálculo de parámetros

2.1 Método de simulación numérica

Por conveniencia hemos elegido el método de las diferencias finitas en dominio frecuencial (Finite difference time domain – FDTD) para realizar las simulaciones de los métodos considerados. Este método se basa en la discretización del dominio de simulación, convirtiendo mediante el uso de diferencias finitas las ecuaciones de conservación de la masa y conservación del momento en ecuaciones de actualización para la presión y la velocidad de partícula que permiten, tras un número de iteraciones, obtener la evolución del campo sonoro. Para más detalles consultar [5].

El estudio de estructuras periódicas hace especialmente adecuado el uso de condiciones de contorno periódicas [6]. Existen diferentes técnicas para tratar problemas en los que la estructura bajo análisis es periódica. De entre estas técnicas destaca por su sencillez el método de seno-coseno, en el que por contra de lo que se hace habitualmente en FDTD, se consideran una a una las frecuencias de interés.

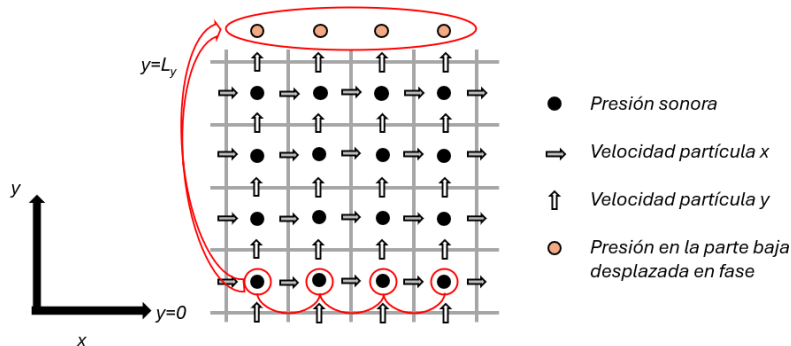


Figura 1 – Condiciones de contorno periódicas en FDTD

El esquema presentado en la figura 1 ilustra el funcionamiento del método. Supongamos que se considera un dominio en el que imponemos condiciones de contorno periódicas en los límites inferior y superior ($y=0$ y $y=L_y$). Para conseguir una condición de contorno periódica en la parte superior, a cada paso temporal, se debe copiar en la parte superior ($y=L_y$) los valores de presión sonora de la parte baja de la simulación ($y=0$) multiplicados por un factor de fase que viene dado por:

$$p(y = L_y) = p(y = 0) \cdot e^{-k_y \cdot L_y} = p(y = 0) \cdot e^{-k \cdot \sin(\theta) \cdot L_y}, \quad (1)$$

donde k es el número de onda. Si se repite el proceso en la parte baja, se puede obtener la actualización de la componente vertical (y) de la velocidad de partícula a través del cálculo directo del gradiente de la matriz de presiones. Para más detalles consultar [6].

La figura 2 ilustra el esquema de simulación completo, incluyendo a modo de ejemplo un cristal de sonido. Se imponen condiciones de contorno en los extremos inferior y superior. Para evitar reflexiones en las terminaciones del dominio de integración se incluyen dos PML a izquierda y derecha. En la parte izquierda se define una fuente sonora emitiendo una honda plana cuyo vector de onda subtende un ángulo θ con el eje de las x . En la parte derecha, a una distancia suficiente de la estructura bajo análisis, se sitúa un conjunto de micrófonos.

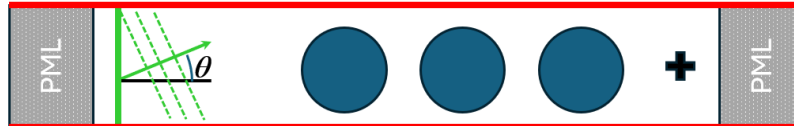


Figura 2 – Esquema de simulación FDTD. Condiciones de contorno absorbentes (PML) en izquierda y derecha. Arriba y abajo (líneas rojas) condiciones de contorno periódica. En la izquierda excitación de la malla (verde), onda plana con un ángulo θ con el eje x . La cruz marca la posición de uno de los micrófonos.

Dado que se consideran ondas planas, para el cálculo del coeficiente de transmisión, se puede simplemente comparar el campo con y sin la estructura bajo análisis, evitando así la intromisión de reflexiones si se considerara el campo incidente. Una vez obtenido el coeficiente de transmisión se puede obtener directamente el aislamiento (índice de reducción sonora, R).

Es importante mencionar que las estructuras bajo análisis son tridimensionales y las diferencias entre los métodos están asociadas a como se consideran las tres dimensiones del espacio. La figura 3 ilustra la geometría bajo análisis, así como los ángulos en coordenadas esféricas que se deben utilizar para realizar los promediados angulares de cada uno de los métodos.

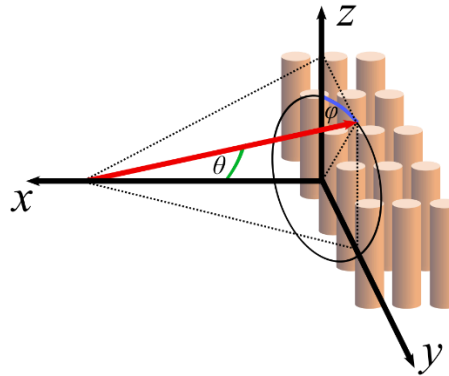


Figura 3 – Geometría del problema (caso particular de las pantallas basadas en cristales de sonido). Por conveniencia no se han utilizados las relaciones habituales entre los ejes x y z y los ángulos θ y φ .

2.2 Cálculo del aislamiento según los 3 métodos

2.2.1 Método de Cámara de transmisión. El feo

En el método de Cámara de transmisión, estandarizado en la norma EN 1793-2:2019, se asumen condiciones de campo difuso de tal manera que la ponderación angular sigue la fórmula de Paris. Esta fórmula en el caso de promediado de coeficientes de transmisión se puede escribir como:

$$\tau(f) = \frac{1}{\varphi_{max}} \frac{\int_0^{\theta_{max}} \int_0^{\varphi_{max}} \tau(\theta, \varphi, f) \sin\theta \cos\theta d\varphi d\theta}{\int_0^{\theta_{max}} \sin\theta \cos\theta d\theta}, \quad (2)$$

donde $\tau(\theta, \varphi, f)$ es el coeficiente de transmisión a la frecuencia para los ángulos de incidencia θ y φ . El término *sen-cos* se puede escribir como $\text{sen}(2 \cdot \theta)$, o lo que es lo mismo, el ángulo más relevante es el de 45 grados, mientras que la incidencia normal y la incidencia rasante se desprecian por completo.

2.2.2 Método In situ. El malo

En el método In-Situ, estandarizado en la norma EN 1793-6:2019+A1:2022, tan sólo se considera la incidencia normal. El método se podría extender a ángulos de incidencia diferentes, pero esto haría muy difícil o incluso imposible la eliminación de contribuciones de difracción en la cumbre.

2.2.3 Método Realista. El bueno

Como ya se ha comentado, en la inmensa mayoría de los casos, las pantallas están lejos de estar bajo un campo sonoro difuso. No obstante, la barrera impide el paso de sonido que llega al receptor (zona a proteger) para diferentes ángulos de incidencia, dado que la fuente sonora es una línea donde las fuentes sonoras (vehículos o trenes) emiten ruido en diferentes posiciones de la línea. Se hace necesario estudiar la contribución de cada porción de la vía. En la figura 4 se ilustra la geometría bajo análisis. Por sencillez situamos el origen de coordenadas en el receptor.

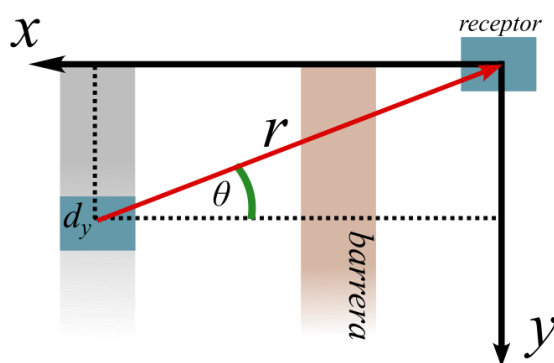


Figura 4 – Geometría de la situación realista.

Si asumimos incoherencia del sonido entre las diferentes fuentes sonoras, se puede calcular la intensidad total que llega al receptor como la suma de las contribuciones de cada elemento diferencial de carretera o vía ferroviaria. Despreciando la atenuación en la propagación, cada elemento diferencial aporta una intensidad sonora (diferencial, dI) proporcional a la inversa de la distancia del dicho elemento al receptor:

$$dI = \frac{I_0}{r} dy = \frac{I_0}{x^2+y^2} dy, \quad (3)$$

donde I_0 es proporcional a la potencia por metro de la fuente sonora. De este modo, la intensidad total en el receptor se calcularía como

$$I = \int \frac{I_0}{x^2+y^2} dy, \quad (4)$$

Para resolver esta integral se puede realizar un cambio de variables dado que:

$$y = x \tan \theta, \quad (5a)$$

$$\sqrt{x^2+y^2} = \frac{x}{\cos \theta}, \quad (5b)$$

De la ecuación (5a) podemos deducir el diferencial de y como sigue:

$$dy = \frac{x}{\cos^2 \theta} d\theta, \quad (6)$$

Utilizando las ecuaciones (5b) y (6) en la ecuación (4), esta última queda de la siguiente manera:

$$I = \int \frac{I_0}{\left(\frac{x}{\cos \theta}\right)^2} \frac{x}{\cos^2 \theta} d\theta = \int \frac{I_0}{x} d\theta, \quad (7)$$

Esta última ecuación es trivial dado que tanto I_0 como x son constantes. Faltaría añadir los límites de integración, $[-\pi/2 + \pi/2]$, para obtener finalmente que la intensidad es proporcional a la inversa de la distancia al punto más próximo de la vía. En cualquier caso, lo relevante a efectos de este trabajo es que todos los ángulos son igualmente importantes contribuyendo de igual manera a la intensidad sonora recibida. En otras palabras, atendiendo a este método se deben promediar los coeficientes de transmisión sin coeficiente de ponderación para cada ángulo, pero a diferencia del método de cámara de transmisión, sólo se considera la incidencia en el plano xy , o lo que es lo mismo, $\varphi = \pi/2$.

3 Resultados

En esta sección se presentarán los resultados tanto para una pantalla homogénea convencional (es decir, se simula una barrera simplificada sin considerar los postes de montaje y asumiendo que las planchas de material son infinitas o lo que es lo mismo, sus juntas están perfectamente selladas) así como pantallas basadas en cristales de sonido. Por sencillez tan sólo consideraremos aquí cristales de sonido de primera generación, es decir, formados por dispersores completamente rígidos, sin incluir materiales porosos o resonadores de membrana o cavidad.

Para la pantalla homogénea consideraremos un caso representativo de las pantallas que se instalan habitualmente, con una densidad de 15 kg/m^2 y una velocidad equivalente de propagación del sonido de 1400 m/s .

En el caso de los cristales de sonido se utilizarán redes con parámetro de red (lattice constant- l_c) de 17 cm , con el propósito de conseguir que el máximo de aislamiento asociado al primer bandgap se encuentre en la frecuencia de 1000 Hz , frecuencia más relevante según la norma EN 1793-3 [7]. Se definirán 3 radios de los cristales: $0.50 \cdot l_c$, $0.70 \cdot l_c$, $0.90 \cdot l_c$.

Los parámetros que se miden según las diferentes normas tienen nomenclaturas diferentes. Así el parámetro de aislamiento obtenido mediante la norma EN 1793-2:2019 es el índice de reducción sonora R , mientras que según la norma EN 1793-6:2019+A1:2022 dicho parámetro es el aislamiento sonoro (airborne sound insulation-SI). Así mismo, se puede obtener un parámetro global aplicando una ponderación a cada banda de tercio de octava según la norma EN 1793-3 [7] obteniendo los índices globales DL_R y DL_{SI} respectivamente. En el caso del método que hemos denominado realista, utilizaremos la siguiente nomenclatura, R' para el aislamiento por banda de tercio de octava y $DL'_{R'}$ para el aislamiento global.

3.1 Resultados para pantalla tradicional simplificada

La figura 5 representa los resultados de los tres métodos para el caso de la pantalla tradicional.

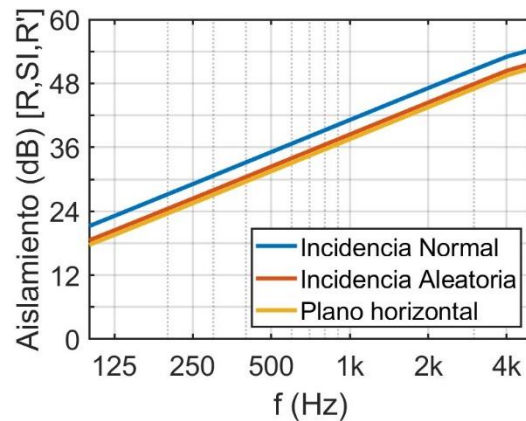


Figura 5 – Resultados de los 3 métodos de obtención del aislamiento.

Respecto a los indicadores globales estos resultan ser. $SI=34.31$ dB, $R=31.60$ dB y $R' 30.72$ dB. Tal y como se ha comentado, en este tipo de barreras las diferencias no son muy relevantes dado que el coeficiente de transmisión tiene una variación suave con respecto al ángulo de incidencia.

3.2 Resultados para pantallas basadas en cristales de sonido

Para ilustrar la variabilidad del aislamiento con el ángulo de incidencia se presenta en la figura 6 El aislamiento para el caso de radio de los dispersores igual al 75% del parámetro de red. Nótese que a 45 grados, el primer band gap, en torno a los 45 grados (ángulo más relevante al promediar mediante la fórmula de Paris [8]), no representa más de 10 dB, mientras que en el máximo (para incidencia normal) es de 22 dB.

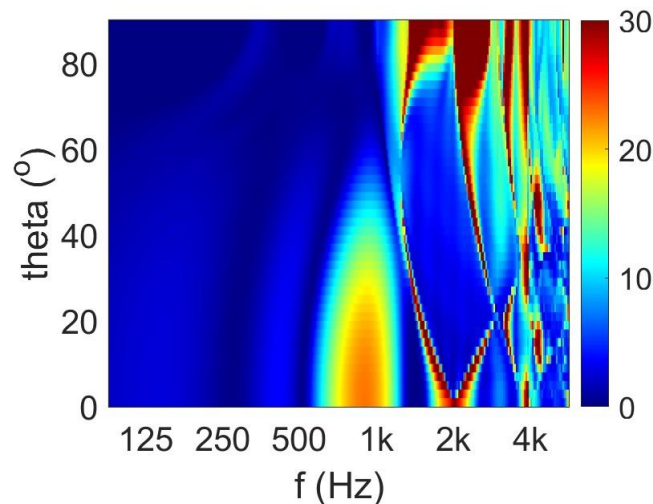


Figura 6 – Aislamiento frente a frecuencia y ángulo de incidencia para un cristal de sonido.

A continuación, en la figura 7, se muestran los resultados de los 3 métodos para los 3 casos de cristales de sonido considerados. Lo primero que se hace evidente, es que el método In situ (*El malo*), basado en la medida exclusivamente de la incidencia normal, sobreestima enormemente el rendimiento de la pantalla. Por su parte, las diferencias entre los otro dos métodos -Cámara de transmisión o incidencia

aleatoria (*El feo*), Realista o incidencia sobre el plano normal (*El bueno*)-, no se hacen especialmente notables salvo en rangos frecuenciales muy concretos.

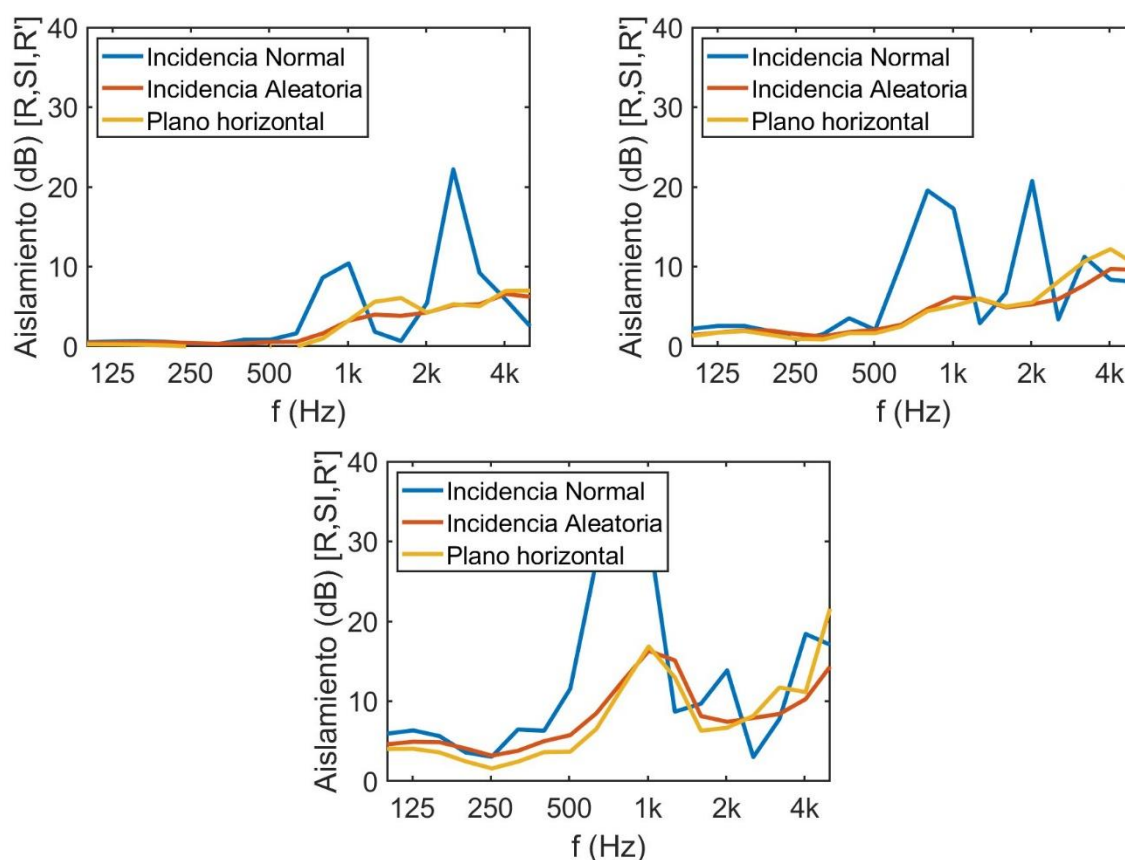


Figura 7 – Resultados de los 3 métodos para los 3 radios de dispersores considerados. Arriba a la izquierda $r=0.50 \cdot l_c$, Arriba a la derecha $r=0.70 \cdot l_c$, Abajo $r=0.90 \cdot l_c$.

Finalmente, la tabla 2 recoge los valores de los indicadores globales. De nuevo destaca la gran diferencia del método in situ, si bien es cierto que para aislamientos grandes (caso $r=0.90 \cdot l_c$), se observa una diferencia superior a 1 dB entre los otros dos métodos.

Tabla 2 – Resultados de los indicadores globales para pantallas basadas en cristales de sonido

Método	Parámetro	r=50 %	r=70 %	r=90 %
Cámara de transmisión / El feo	DL_R (dB)	2.3	4.1	8.2
In situ / El malo	DL_{SI} (dB)	3.1	5.7	9.2
Realista / El bueno	$DL_{R'}$ (dB)	2.2	4.0	6.9

4 Conclusiones

Se ha demostrado que en casos en que las pantallas acústicas tienen un aislamiento fuertemente dependiente del ángulo de incidencia, los métodos existentes para cuantificar su aislamiento pueden proporcionar estimaciones muy diferentes.

Si bien las diferencias no se hacen especialmente relevantes entre los métodos de cámara de transmisión y el que hemos denominado realista (sólo plano horizontal), se puede suponer que de tener en cuenta la atenuación del sonido, los resultados sí serían diferentes. En futuros trabajos se considerará el efecto de dicha fenomenología.

Cabe señalar que el conocimiento de los parámetros que mejor definen la eficiencia reductora de ruido de las pantallas permite plantear parámetros de coste que son fundamentales a la hora de realizar optimizaciones de este tipo de dispositivos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Economía e Innovación (MINECO) y el FEDER de la Unión Europea (proyecto PID2019-109175GB-C22). También ha sido patrocinado por la subvención PID2021-124908NB-I00 financiada por CIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por "ERDF A way of making Europe".

Referencias

- [1] UNE-EN 1793-2:2019. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 2: Características intrínsecas relativas al aislamiento al ruido aéreo en condiciones de campo de sonido difuso.
- [2] UNE-EN 1793-6:2019+A1:2022. Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 6: Características intrínsecas. Valores in situ del aislamiento acústico al ruido aéreo en condiciones de campo sonoro directo.
- [3] Sanchez-Perez, J.V.; Rubio, C; Martinez-Sala, R; Sanchez-Grandia, R; Gomez, V; Acoustic barriers based on periodic arrays of Scatterers, *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 27, pp. 5240–5242, 2002.
- [4] M.P. Peiró-Torres, J. Redondo, J.M. Bravo, J.V. Sánchez Pérez, Open Noise Barriers Based on Sonic Crystals. *Advances in Noise Control in Transport Infrastructures, Transportation Research Procedia*, Volume 18, 2016, Pages 392-398.
- [5] J. Redondo, R. Picó, B. Roig, M.R. Avis. Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes. *Acta Acustica united with Acustica* 93(4) July 2007
- [6] Taflove, A., Hagness, S. C., & Picket-May, M. (2005). Computational electromagnetics: the finite-difference time-domain method. *The Electrical Engineering Handbook*, 3(629-670), 15.
- [7] EN 1793-3; Road Traffic Noise Reducing Devices—Test Method for Determining the Acoustic Performance—Part 3: Normalized Traffic Noise Spectrum. CEN: Brussels, Belgium, 2012.
- [8] E. T. Paris, «On the coefficient of sound-absorption measured by the reverberation method», *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, n.o 5:29, pp. 489-497, 1928