

## DISEÑO DE PANTALLAS ACÚSTICAS ABIERTAS FORMADAS POR DISPERSORES RECTANGULARES AISLADOS CON SEPARACIÓN SUBSÓNICA

PACS: 43.50.Gf

Sergio Castiñeira-Ibáñez<sup>1,2</sup>, Antonio Uris<sup>2</sup>, Pilar Candelas<sup>2</sup>, Constanza Rubio<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Electrónica, Universitat de València. Avd. de la Universitat s/n. 46100 Burjassot, Valencia, Spain

[casiser@uv.es](mailto:casiser@uv.es)

<sup>2</sup>Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

[auris@fis.upv.es](mailto:auris@fis.upv.es), [pcandelas@fis.upv.es](mailto:pcandelas@fis.upv.es), [crubiom@fis.upv.es](mailto:crubiom@fis.upv.es)

**Palabras Clave:** Pantallas abiertas, Resonancia, Elementos finitos

### ABSTRACT

In recent years, open screens have been designed consisting of discrete elements as an alternative to the classic continuous screens. In particular, screens consisting of rectangular timber spacers arranged periodically introduce Fabry-Perot resonance phenomena and Wood anomalies producing destructive interference between the scattered waves.

In this work new designs of this type of screens are presented. Different arrangements of the dispersers are analyzed by finite elements, as well as the addition of new mechanisms of noise attenuation.

### RESUMEN

En los últimos años se han diseñado pantallas abiertas formadas por elementos discretos como alternativa a las pantallas continuas clásicas. En concreto, las pantallas formadas por dispersores rectangulares de madera dispuestos de forma periódica, introducen los fenómenos de resonancia Fabry-Perot y anomalías de Wood produciendo interferencias destructivas entre las ondas dispersadas.

En este trabajo se presentan nuevos diseños de este tipo de pantallas. Se analiza mediante elementos finitos diferentes disposiciones de los dispersores, así como la adición de nuevos mecanismos de atenuación del ruido.

### INTRODUCCIÓN

Las pantallas acústicas constituyen una solución para el control de ruido en la fase de transmisión. Su utilización se hace necesaria cuando no se puede actuar directamente sobre la fuente de ruido. Presentan un diseño sencillo, basado en un medio continuo de material rígido, que se interpone entre la fuente emisora de sonido y el receptor.

En las últimas décadas se han desarrollado nuevos diseños de pantallas acústicas que, con la misma finalidad de las pantallas clásicas, incorporan nuevos mecanismos de control de ruido. Así, las pantallas acústicas abiertas han atraído el interés de la comunidad científica. Sánchez-Pérez et al. [1] diseñaron la primera pantalla acústica basada en cristales de sonido aprovechando únicamente el proceso dispersión múltiple. Posteriormente, Romero-García et al [2] propusieron un dispersor formado por material rígido, absorbente y con comportamiento de resonador, siendo en este caso tres los mecanismos de control de ruido involucrados. A partir de estos resultados, Castiñeira-Ibáñez et al [3] diseñaron y homologaron para su puesta en el mercado, la primera pantalla acústica abierta basada en cristales de sonido.

En 1998, Ebbesen et al. [4] observaron la extraordinaria transmisión óptica a través de películas metálicas con perforaciones dispuestas en forma matricial y con abertura de longitud de onda subsónica. Estos resultados se transfirieron a la acústica. En 2007, Lu et al. [5] mostró tanto teóricamente como experimentalmente la extraordinaria transmisión acústica a través de un sistema unidimensional (1D) basado en con ranuras de longitud de onda subsónica y Hou et al. [6] demostraron experimentalmente de la extraordinaria transmisión acústica a través de una matriz de agujeros de longitud de onda subsónica. Estos fenómenos vienen motivados por resonancias Fabry-Perot dentro de las aberturas. En 2008, Estrada et al. [7] mostraron, tanto teóricamente como experimentalmente, que las anomalías de Wood [8] eran las responsables de una atenuación extraordinaria en placas perforadas con agujeros de tamaño subsónico ordenados en matrices de forma periódica. La posición en el espectro de los picos de atenuación acústica correspondientes a las anomalías de Wood dependen de la constante de red y de la geometría de la matriz. A partir de estos resultados, se diseña una nueva pantalla acústica basada en ranuras de anchura subsónica [9] como una alternativa a la pantalla acústica clásica y a las pantallas abiertas basadas en cristales de sonido. La capacidad de atenuación de sonido de la nueva pantalla puede ser sintonizado en función de los parámetros geométricos, al igual que ocurre con las pantallas basadas en cristales de sonido.

### PANTALLAS ABIERTAS FORMADAS POR DISPERSORES RECTANGULARES AISLADOS CON SEPARACIÓN SUBSÓNICA

Una pantalla abierta formada por dispersores con separación subsónica puede definirse como un medio heterogéneo que consiste en una serie periódica de dispersores acústicos inmersos en aire cuando la separación entre dos dispersores contiguos es menor que la longitud de onda. Las características acústicas de los dispersores, densidad y velocidad, son muy diferentes a las del medio que los rodea (aire), para que exista contraste entre ellos.

El tamaño y la posición de los picos de atenuación en el dominio de la frecuencia que se pueden obtener con esta pantalla dependen de cómo se disponen los dispersores, del tamaño de la ranura, de la relación entre la constante de la red y la anchura del dispersor (relación entre el área ocupada por los dispersores y el área de la red). También influyen la profundidad de los dispersores-ranura y como se ha comentado anteriormente, el contraste de velocidad y densidad.

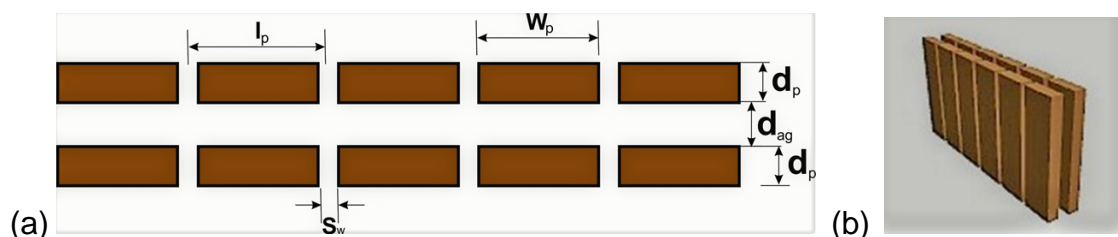


Figura 1.- (a) Vista desde arriba de la pantalla abierta formada por dispersores rectangulares aislados con separación subsónica. (b) Vista en 3D de la pantalla abierta.

En la Figura 1 se muestran los parámetros característicos de la pantalla. Así  $W_p$  representa la anchura de los dispersores rectangulares y  $d_p$  su profundidad. El parámetro de red viene representado por  $l_p$ , mientras la anchura de las ranuras se representa por  $S_w$ . También es importante el parámetro que define la separación entre las filas de los dispersores, al que se le denomina profundidad del hueco de aire entre filas  $d_{ag}$ .

### MODELO NUMÉRICO

Actualmente existe un gran número de técnicas matemáticas para resolver problemas que tengan en cuenta la interacción de las ondas con conjuntos de dispersores acústicos aislados inmersos en aire. En este trabajo se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos (FEM), en concreto el programa comercial COMSOL Multiphysics. Este método resuelve, de manera sencilla, formas geométricas complejas que incorporan múltiples fenómenos acústicos. Para resolver el problema es necesario definir la geometría que se está considerando, implementar las condiciones de contorno y discretizar el dominio de resolución.

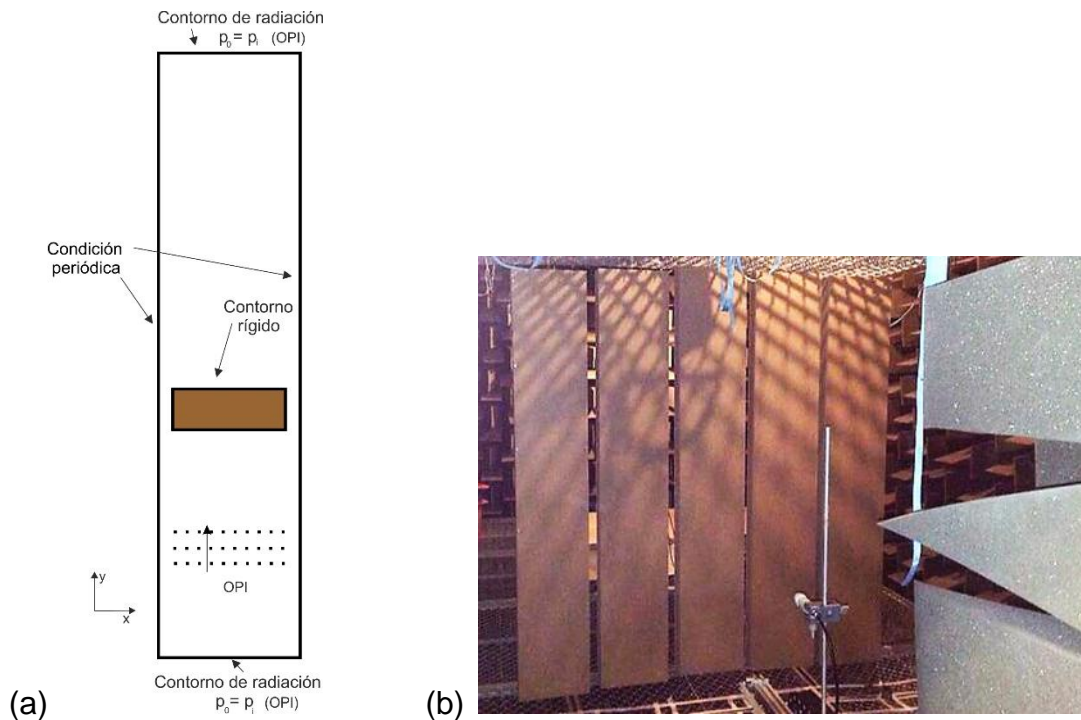


Figura 2.- (a) Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno. (b) Pantalla real en laboratorio.

Se resuelve la ecuación de ondas,

$$\nabla \left( \frac{1}{\rho} \nabla p \right) + \frac{w^2}{c^2 \rho} p = 0 \quad (1)$$

ecuación en derivadas parciales, y se estudia la propagación de la onda plana a lo largo de la dirección Y.

En la Figura 2(a) se muestra el esquema del modelo numérico ideal utilizado. Se considera longitud infinita a lo largo de la dirección Z, por lo que se utiliza un modelo 2D. Está formado por un dominio rectangular en cuyo interior se ha situado el dispersor rígido rectangular de altura 0.1 m. La onda plana incidente (OPI) viaja en la dirección Y. Además, a lo largo de la dirección X la estructura se considera infinita, por ello se utilizan dos límites con condición periódica separados por la constante de red

Dado que los dispersores se consideran rígidos se considera en sus superficies la condición límite de Neumann. Para evitar reflexiones indeseables en los límites superior e inferior, se utiliza condición de radiación de Sommerfeld.

Para discretizar el dominio, se utiliza una malla triangular, dado que la geometría es relativamente simple y el número de grados de libertad se calcula a partir del número de nudos de la rejilla de malla y las ecuaciones.

El tamaño máximo de la malla es  $c / 8f_{\max}$ . Con este tamaño se evitan errores numéricos en los cálculos de tal manera que se cumpla el teorema de Nyquist-Shanon.

En la Figura 2(b) se muestra el aspecto real de la pantalla abierta en situación de medida controlada en cámara anecoica.

Se ha calculado el espectro de atenuación de ruido en un punto detrás de la muestra. Para ello, se evalúa la diferencia entre la presión sonora directa ( $p_d$ ) e interferida ( $p_i$ ) por medio del parámetro pérdida por inserción (Atenuación Acústica) en ese punto, mediante la expresión:

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

Los espectros que se muestran son en banda fina y se han calculado en un punto situado a un metro de distancia de la pantalla. Se analiza el rango de frecuencias de 100 a 1500 Hz dado que la finalidad de este trabajo es estudiar las bajas frecuencias. Para rangos superiores se puede consultar el trabajo realizado por C. Rubio et al. [9].

## RESULTADOS

En este apartado se analizan tres resultados: (1) la estructura formada por una sola fila de dispersores rígidos, (2) la estructura formada por dos filas de dispersores rígidos y (3) la incorporación de un efecto añadido a los dispersores: resonancias  $\lambda/4$ .

### PANTALLA FORMADA POR UNA SOLA FILA DE DISPERSORES RÍGIDOS

En primer lugar se analiza el efecto de variar el parámetro de red  $I_p$  para una única fila de dispersores. Este parámetro varía entre 0.35 y 0.50 m. En la Figura 3(a) se puede observar el resultado: un desplazamiento del pico. Estos picos están relacionados con la anomalía de Wood y dependen exclusivamente del período de la red. Al mismo tiempo, como el tamaño del dispersor es constante, con el aumento de  $I_p$ , el área ocupada por el dispersor es menor, de modo que la atenuación acústica a bajas frecuencias disminuye.

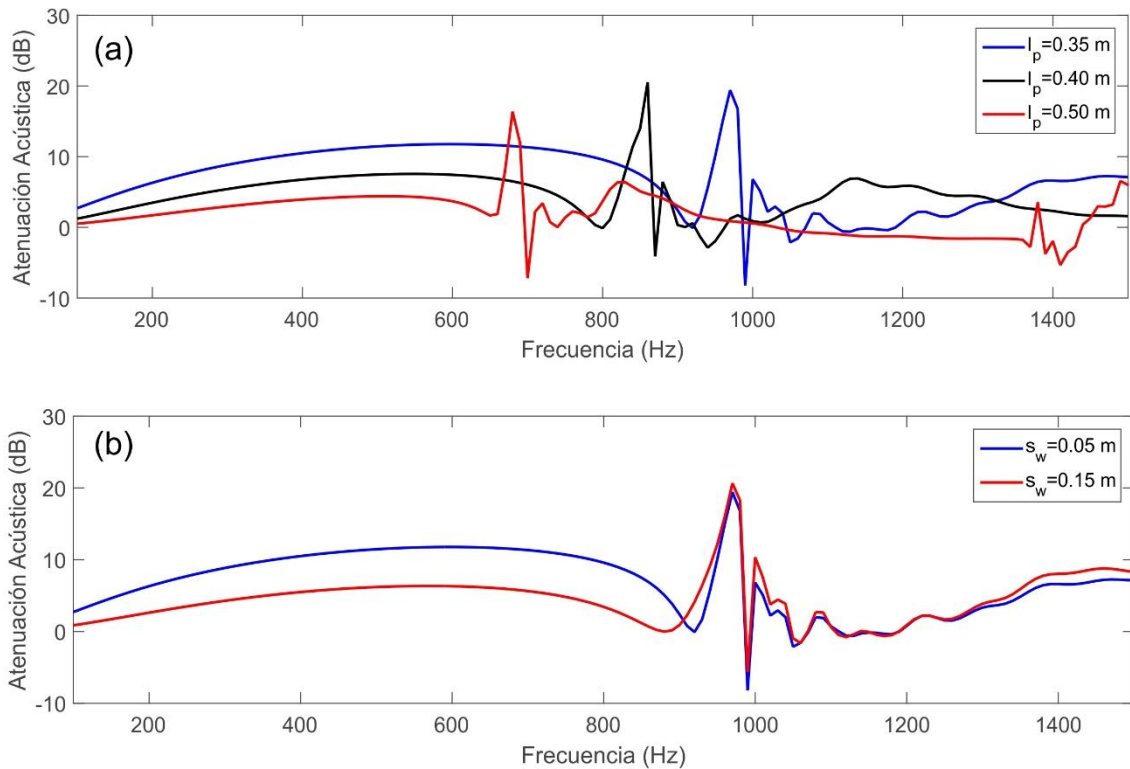


Figura 3.- (a) Espectro de atenuación acústica para una única fila de dispersores rectangulares calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla variando el parámetro de red  $l_p$ . (b) Vista en 3D de la pantalla abierta.

En la Figura 3(b), se muestra el resultado del espectro de atenuación acústica cuando manteniendo el parámetro de red  $l_p$  se aumenta la anchura de las ranuras  $s_w$  entre dispersores disminuyendo la anchura  $w_p$  de los mismos. El pico se mantiene en el mismo lugar, confirmando que sólo depende del parámetro de red.

#### PANTALLA FORMADA POR DOS FILAS DE DISPERSORES RÍGIDOS

Ahora se compara una y dos filas. Como el período de rejilla permanece constante, el pico relacionado con la Anomalia de Wood permanece en la misma posición, Figura 4(a).

Cuando se analizan dos filas, se puede observar que el espectro de pérdida de inserción sigue un patrón de filtro acústico típico relacionado con cambios en la sección. El rango atenuado de frecuencias está relacionado con un filtro acústico. Así en la Figura 4(b), se ha comparado una fila con la misma anchura que dos filas con profundidad del hueco de aire entre filas  $d_{ag}$ . Esta comparación demuestra que es mejor poner dos fila ya que el efecto de filtro acústico favorece la atenuación acústica de la pantalla.



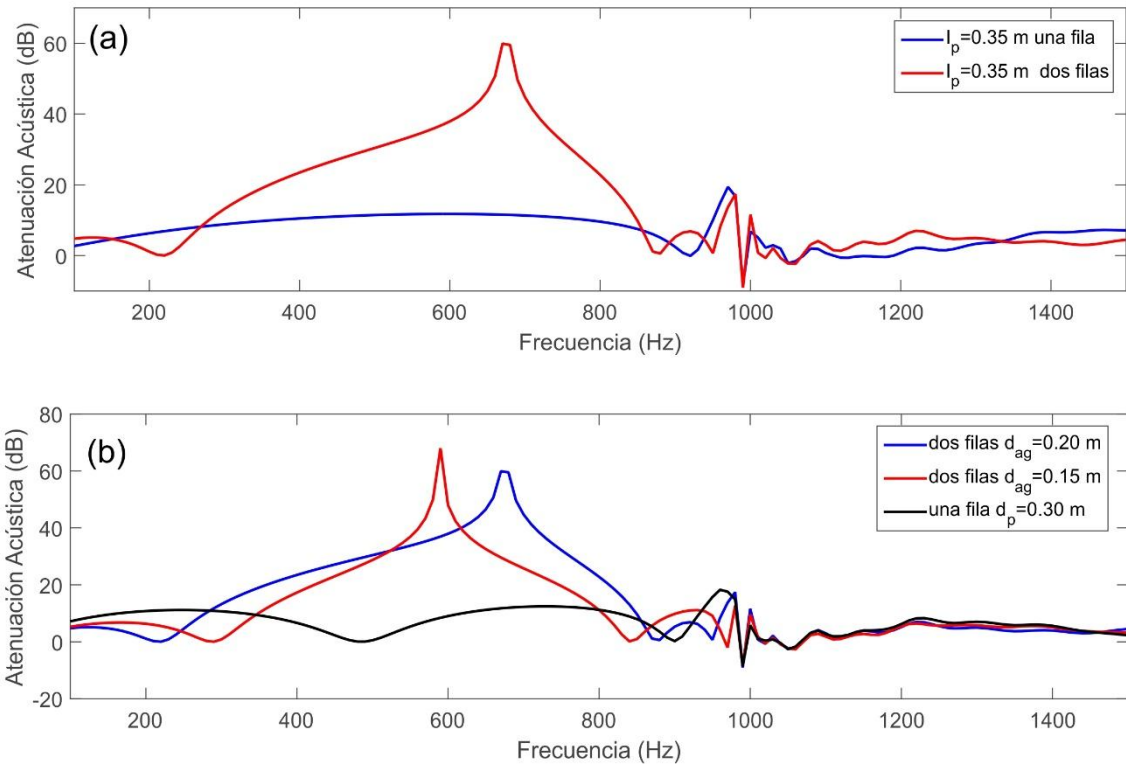


Figura 4.- (a) Espectro de atenuación acústica para una única fila de dispersores rectangulares calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla y dos filas con el mismo parámetro de red  $l_p$  (b) Espectro de atenuación acústica para dos filas con diferente  $d_{ag}$  y una fila del mismo espesor que la pantalla de dos filas.

#### PANTALLA FORMADA POR DISPERSORES RÍGIDOS-RESONADORES

Hasta ahora los dispersores eran rectangulares y rígidos, Figura 5(a). Se realiza una cavidad en los mismos tal y como muestra la Figura 5(b), cumpliendo la ecuación del resonador  $\lambda/4$ :

$$f = \frac{c}{\ell} \frac{(2n+1)}{4} \quad (3)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido,  $\ell$  la longitud de la cavidad y  $n$  un número entero desde 0.

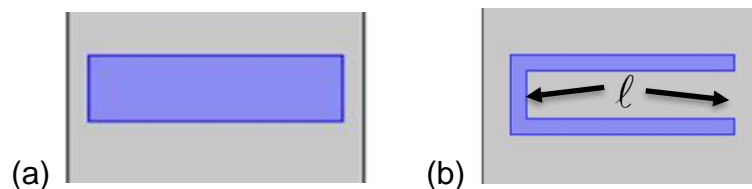


Figura 5.- (a) Sección del dispersor rígido rectangular. (b) Sección del dispersor rígido rectangular con cavidad resonante  $\lambda/4$

En la Figura 6(a) se muestra el resultado del espectro de atenuación acústica obtenido a un metro de distancia de la pantalla abierta formada por una única fila de dispersores rígidos y comparada con una única fila de dispersores-resonador. El resultado muestra cómo se han añadido en el rango de frecuencias que se muestra dos picos debido a la resonancia  $\lambda/4$  introducida.

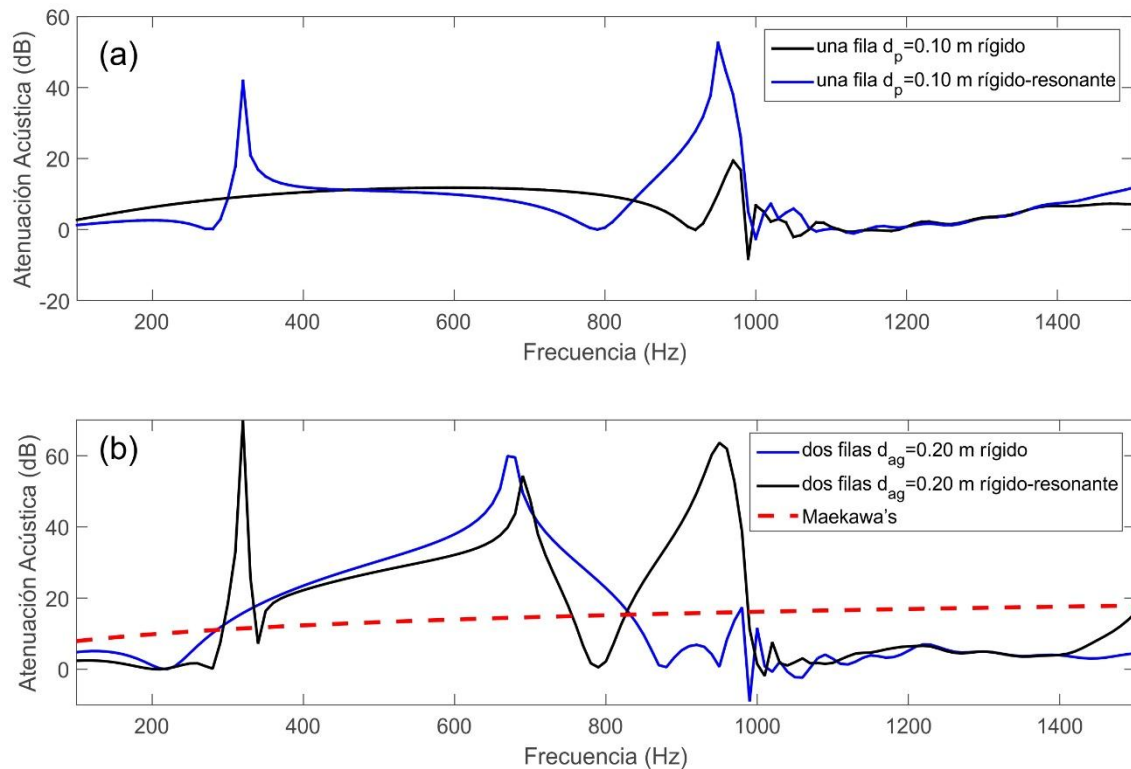


Figura 6.- (a) Espectro de atenuación acústica calculado para una única fila de dispersores rectangulares rígidos y una única fila de dispersores rectangulares rígidos-resonador con el mismo parámetro de red  $d_p$  a un metro de distancia detrás de la pantalla (b) Espectro de atenuación acústica para dos filas comparado con la predicción de Maekawa's.

Cuando se introducen dos filas se añade el efecto del filtro acústico mencionado en la sección anterior más el incremento de las resonancias  $\lambda/4$  por la existencia de más resonadores.

Se muestra en trazo discontinuo rojo, Figura 6(b), el resultado de la predicción de Maekawa's sobre los espectros obtenidos con dos filas de dispersores rígidos y rígidos-resonador. Para un rango considerable el resultado obtenido mejora dicha predicción.

## CONCLUSIONES

Las pantallas acústicas abiertas presentan niveles de atenuación similares a las tradicionales. Presentan ventajas frente a estas como son: se pueden construir bajo demanda, seleccionando las frecuencias que quieren ser atenuadas. Son permeables al agua y al aire, portables y estéticamente más acordes al medio que las rodea.

Con este tipo de diseño se abre la posibilidad de seguir añadiendo mecanismos de atenuación de ruido buscando soluciones alternativas a las pantallas tradicionales.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia y V. Gómez, Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 5240 (2002)
- [2] V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez and L. M. Garcia-Raffi, Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two dimensional multiphysical phenomena periodic systems. *J. Appl. Phys* **110**, 014904 (2011)
- [3] S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio, V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. Garcia-Raffi, *Arch. Acoust* **37**, 455, (2012)
- [4] Ebbesen T.W., Lezec H.J. Ghaemi H.F., Thio T., Wolf P.A. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature* **391**, 667–669, (1998)
- [5] Lu M.H., Liu X.K., Feng L., Li J., Huang C.P., Chen Y.F., Zhu Y.Y., Zhu S.N., Ming N.B. Extraordinary acoustic transmission through a 1d grating with very narrow apertures. *Physical Review Letters* **99**, 174301, (2007)
- [6] Hou B., Mei J., Ke M., Wen W., Liu Z., Shi J., Sheng P. Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves. *Physical Review B.* **76**, 054303, (2007)
- [7] Estrada H., Candelas P., Uris A., Belmar F., Garcia de Abajo F.J., Meseguer F. Extraordinary sound screening in perforated plates. *Physical Review Letters* **101**, 084302, (2008)
- [8] Wood R.W. Anomalous diffraction gratings. *Physical Review* **48**, 48:928–936, (1935)
- [9] Rubio C., Candelas P., Belmar F., Gomez-Lozano V., Uris A. Subwavelength slit acoustic metamaterial barrier. *Journal of Physics D: Applied Physics* **48**, 395501, (2015)