

02-010

## DESIGN OF A MODULAR ACOUSTIC BARRIER WITH A TUNABLE ATTENUATION BAND AT LOW FREQUENCIES

Castiñeira Ibáñez, Sergio<sup>(2)</sup>; Rubio Michavila, Constanza<sup>(2)</sup>; Uris Martínez, Antonio<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, <sup>(2)</sup>Universitat Politècnica de València,

<sup>(3)</sup>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

The use of acoustic barriers is one of the most used techniques to reduce or eliminate the annoyance caused by noise. Although research on acoustic barriers has been developing since 1950, the scientific community remains active in this area. In recent years, the use of periodic structures as noise reduction devices has been the subject of research by the scientific community. An alternative to continuous acoustic barriers are those based on sonic crystals, which are open and tunable barriers. In the present work an open, modular, tunable and with a broad band of attenuation in the low frequency range acoustic barrier based on subwavelength slits is presented as an alternative to classical acoustic barriers and those based on sonic crystals. This new acoustic barrier is tunable, it is an open structure and the total thickness is less than that of a barrier based on sonic crystals

**Keywords:** *Acoustic barrier; Periodic structure; Quarter wavelength resonator*

## DISEÑO DE UNA PANTALLA ACÚSTICA MODULAR CON UNA BANDA DE ATENUACIÓN SINTONIZABLE EN BAJAS FRECUENCIAS

El empleo de pantallas acústicas es una de las técnicas más empleadas para reducir o eliminar la molestia originada por el ruido. Aunque la investigación en pantallas acústicas se ha estado desarrollando desde 1950, la comunidad científica sigue siendo activa en esta área. En los últimos años, el uso de estructuras periódicas como dispositivos de reducción del ruido ha sido objeto de investigación por parte de la comunidad científica. Una alternativa a las pantallas acústicas continuas, son las basadas en cristales de sonidos, que son pantallas abiertas y sintonizables. En el presente trabajo se presenta una pantalla acústica abierta, modular, sintonizable y con una banda ancha de atenuación en el rango de bajas frecuencias basada en ranuras subwavelength como una alternativa a las pantallas acústicas clásicas y a las basadas en cristales de sonido. Esta nueva pantalla acústica es sintonizable, es una estructura abierta y el espesor total es menor que la de una pantalla basada en cristales de sonido.

**Palabras clave:** *Pantalla acústica; Estructura periódica; Resonador Lambda cuarto*

Correspondencia: Constanza Rubio Michavila

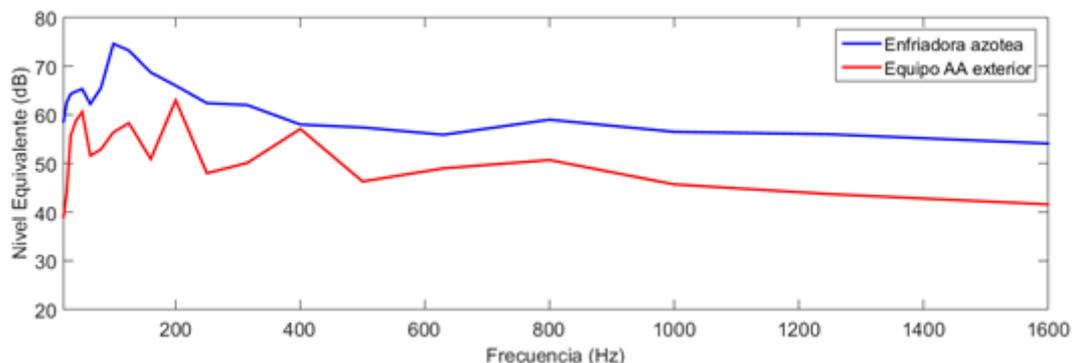


©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Actualmente un porcentaje importante y creciente de la población percibe el ruido, definido como un sonido exterior no deseado o desagradable generado por la actividad humana, como uno de los factores más negativos de la calidad de vida. El ruido influye sobre el sistema nervioso, provocando en ocasiones cierto grado de ansiedad, cefaleas, irritabilidad o alteraciones y dificultad para conciliar el sueño o que éste sea de mala calidad, así como en el desarrollo de la actividad de los ciudadanos disminuyendo la capacidad de concentración y por tanto al rendimiento escolar y laboral. Por este motivo el ruido es considerado como una forma más de contaminación ambiental, y como tal debe ser reducida ya que afecta tanto a la salud como a la calidad de vida de los ciudadanos. El control de esta forma de contaminación lleva a la reducción de ruido lo que permite obtener considerables beneficios tanto económicos como efectos positivos en la salud pública y el bienestar de la población. La industrialización y los actuales estilos de vida han llevado a una mayor producción de ruido en todo el rango de frecuencias de ruido, y especialmente en el rango de bajas frecuencias. Aunque las fuentes de ruido de baja frecuencia son muchas y variadas (Berglund & Hassmen, 1996), a menudo están relacionadas con la industria y las instalaciones de los edificios. Ejemplos de fuentes de ruido de baja frecuencia son los ventiladores, calderas, plantas de ventilación o plantas técnicas, instalaciones eléctricas, torres de enfriamiento, etc. Una característica común a todas estas fuentes es que se localizan principalmente en el exterior ya que es necesario un flujo de aire, además, este tipo de ruido es difícil de atenuar ya que sobre todo contiene bajas frecuencias. A modo de ejemplo, en la Figura 1 se muestran los espectros de emisión de una enfriadora ubicada en la azotea de un edificio y un equipo de aire acondicionado (compresor) ubicado en el exterior. Se observa claramente que los niveles más altos de emisión se encuentran en el rango de las bajas frecuencias, entre 100 y 400 Hz.

**Figura 1: Espectros de ruido de baja frecuencia. Enfriadora y equipo de aire acondicionado**



El control del ruido es el conjunto de técnicas que reducen o eliminan la molestia originada por el ruido. Estas técnicas o medidas se pueden aplicar sobre la fuente de ruido, sobre el medio de transmisión o sobre el receptor. En aquellos casos en los que no es posible reducir los niveles de emisión de ruido generado por la fuente o su aplicación resulta excesivamente cara, lo más apropiado es reducir los niveles de ruido ambiental en el medio de transmisión mediante el uso de pantallas acústicas (Harris, 1991). Tradicionalmente, las pantallas acústicas están constituidas básicamente por un material continuo rígido que está situado entre la fuente de ruido y el receptor, con masa superficial de al menos 20 kg/m<sup>2</sup>, debido a que el mecanismo de actuación de éstas es la ley de masas, y una longitud que debe ser mayor que la longitud de onda del sonido que se pretende atenuar. Las pantallas acústicas son realmente eficaces en la reducción el ruido de frecuencias medias y altas. Sin embargo, el ruido de baja frecuencia es particularmente difícil de controlar y reducir. La razón es que el

rendimiento de las pantallas acústicas es pobre a bajas frecuencias dada su reducida masa superficial y a la difracción que se produce en el borde superior de las mismas.

La investigación en pantallas acústicas se ha estado desarrollando desde mediados del siglo XX y en la actualidad es una línea de investigación activa. Gran parte de la investigación disponible se centra en diversos tratamientos para el borde superior de la pantalla. La intención es alterar el borde lineal que causa la difracción hacia receptores situados en la parte posterior de la pantalla. Algunas de las primeras investigaciones identificaron que un borde superior de perfil en T reduce los niveles de ruido (May & Osman, 1980). Estudios posteriores confirmaron la mejora de un borde superior de perfil en T en la reducción de los niveles de ruido, incluso cuando se compara a las variaciones tales como Y-perfil y pantalla de perfil en flecha (Hothersall, Crombie & Chandler-Wilde, 1991). A mediados de 1990, varios investigadores examinaron el potencial de atenuación de ruido mediante la sustitución del borde superior lineal de una reducción acústica con un dentado o borde superior irregular (Ho, Busch-Vishniac & Blackstock, 1997). Además del diseño de perfil en T y los diseños de pantallas con borde dentado, otra serie han sido estudiados por los investigadores en varios países. Los diseños van desde modificaciones del diseño de perfil en T, tales como un perfil de tenedor y parte superior de pantalla ramificada a un borde superior en forma de hongo. Las primeras investigaciones de innovadores diseños de pantallas acústicas se realizaron en Japón. Los investigadores examinaron pantallas con bordes superiores cilíndricos rígidos y con tratamiento absorbente (Fujiwara & Furuta, 1991).

Como ya se ha apuntado, los métodos de control de ruido utilizados por todas estas pantallas las pantallas acústicas son la reflexión, la absorción y la resonancia y en general están basados en la ley de masas. A partir de 1995 se inicia una línea de investigación de la atenuación del sonido basada en cristales de sonido. Esta nueva concepción pantallas acústicas utiliza un nuevo mecanismo de control del ruido, denominado dispersión múltiple. Este mecanismo juega un papel importante ya que las pantallas basadas en cristales de sonido están formadas por un conjunto de dispersores aislados, dispuestos de manera periódica e inmersos en el aire. De hecho, la presencia y disposición periódica de estos conjuntos de dispersores acústicos en el medio (por lo general el ambiente al aire libre) conduce a la aparición de bandas prohibidas, intervalos de frecuencias en las que las ondas acústicas no se propagan, siendo totalmente reflejadas por los elementos sólidos de cristal de sonido. El comportamiento es análogo al observado en los cristales fotónicos y las estructuras de banda electrónica, con la propagación de las ondas electromagnéticas afectada por una disposición periódica de dispersores (Miyashita, 2005). En varios estudios, los investigadores han señalado el efecto sobre la atenuación de ruido de este tipo de estructuras periódicas, con diferentes configuraciones y materiales (Rubio et al., 1999). El uso de cristales de sonido en el diseño de barreras acústicas con dispersores cilíndricos, se ha demostrado en diferentes trabajos (Sánchez-Pérez et al., 2002; Castiñeira-Ibañez et al., 2012). Al no estar basado su mecanismo de actuación en la ley de masas, el hecho de presentar menor volumen y peso que las tradicionales, no afecta o implica una menor efectividad en su capacidad de atenuación que las pantallas clásicas.

Por otro lado, en 2008 se demostró, tanto teórica como experimentalmente (Estrada et al., 2008), que las placas perforadas sumergidas en agua y con orificios cuyo tamaño es menor que la longitud de onda (subwavelength) y distribuidos periódicamente, presentan a frecuencias ultrasónicas, una atenuación de sonido superior a la prevista por la ley de masa. Se demostró que las anomalías de Wood (Wood, R W 1935) son responsables de esta atenuación. Basados en los trabajos mencionados, tanto en cristales de sonido como en estructuras subwavelength, en 2015 se demostró (Rubio et al., 2015) que una estructura periódica formada por dispersores rectangulares separados entre sí por una distancia menor que la longitud de onda (o lo que sería lo mismo una distribución periódica de ranuras de

anchura subwavelength) puede actuar como pantalla acústica abierta. Este tipo de pantallas, al ser modulares, se pueden construir fácilmente, es sintonizable con la frecuencia y se puede trasladar de un lugar a otro sin excesiva complicación, característica importante en obra civil.

Utilizando una pantalla formada por una estructura periódica formada por dispersores rectangulares separados entre sí por una distancia menor que la longitud de onda, este trabajo presenta una nueva pantalla en la que, al efecto de la periodicidad de las ranuras subwavelength, se le añade el efecto de la resonancia ya que los postes son sustituidos por resonadores acústicos con el fin de aumentar la atenuación acústica en el rango de bajas frecuencias. Este diseño es sintonizable en frecuencia, lo cual permite seleccionar el rango de frecuencias en la cuales la pantalla será más eficaz. Este tipo de pantallas presenta las ventajas de las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido y además permite buenos rendimientos a bajas frecuencias.

## 2. Modelo numérico para la evaluación de la atenuación acústica de la pantalla: método de los elementos finitos

El desarrollo de modelos teóricos que explican la interacción de ondas acústicas con diferentes objetos permite comprender tanto la física subyacente en nuevos sistemas y dispositivos, como estudiar sus potenciales aplicaciones tecnológicas. No obstante, los métodos numéricos son una buena alternativa a los teóricos para encontrar soluciones a problemas que involucran la interacción de ondas con ranuras y surcos. 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 rectangulares rígidos con una longitud infinita. La pantalla acústica se considera infinitamente larga con el fin de evaluar la eficacia de la misma y que los resultados no se vieran enmascarados por la difracción en los bordes últimos o laterales 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 Método de Elementos Finitos (FEM). El software comercial empleado para obtener las predicciones numéricas es COMSOL Multiphysics. En este método se parte de la ecuación de Helmholtz que es la que se debe resolver y que viene dada:

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

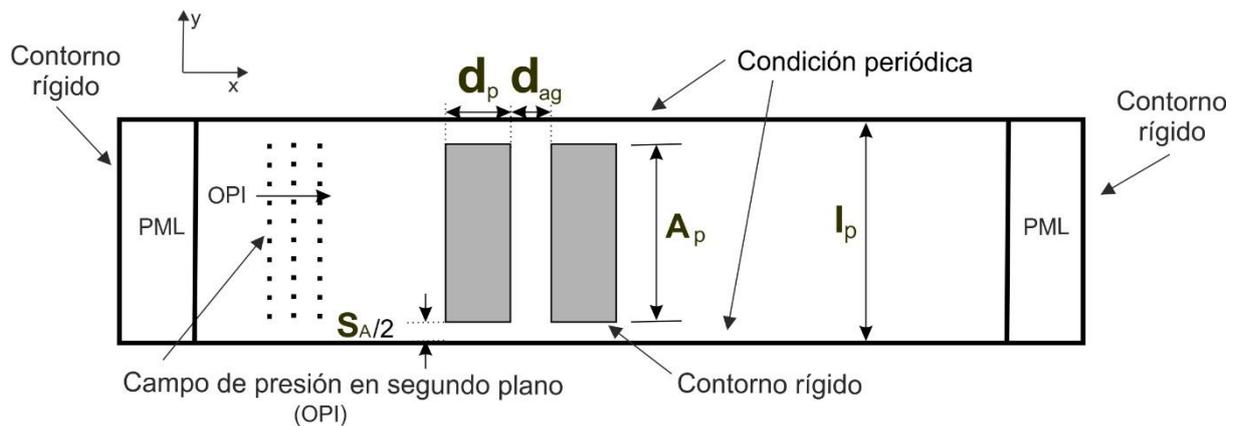
donde, en este trabajo,  $\rho$  es la densidad del aire,  $c$  es la velocidad del sonido en el medio de propagación (aire),  $\omega$  es la frecuencia angular y  $p$  es la presión acústica.

Para abordar el problema mediante FEM, se debe definir la geometría de la estructura, discretizar el dominio y considerar las condiciones de contorno, a partir de aquí, mediante la resolución numérica de la ecuación (1) en cada punto del dominio seleccionado, se obtienen las soluciones al problema. Aunque en la figura 1 se muestran dos filas de postes con el fin de mostrar todos los parámetros que intervienen en la pantalla real, en primer lugar, las simulaciones se han llevado a cabo analizando numéricamente una estructura formada por una fila infinita simple de postes separados entre sí una distancia  $S_A$ , con una periodicidad  $l_p$ . Las dimensiones de los postes son  $A_p \times d_p$  tal y como se muestra en la Figura 2 (se ha considerado la fila más alejada de la fuente para que el efecto en el punto de estudio no varíe). La estructura se considera acústicamente rígida y, por tanto, la condición de contorno de Neumann (velocidad de sonido cero) se aplica a sus superficies. Estos rectángulos están confinados entre dos muros completamente reflectantes separados por el período de red,  $l_p$  y son paralelos a la dirección de propagación de la onda del plano incidente que viaja de izquierda a derecha. La presión total que se obtiene de este modo en cada punto, es la suma de la

presión scaterreada o dispersada más la presión incidente. Con las condiciones consideradas, las ondas dispersas por los rectángulos se reflejan en las paredes que reproducen el efecto de una barrera acústica infinita formada por una fila de postes rectangulares dispuestos como se muestra en la Figura 2. Al mismo tiempo, la onda plana incidente no se refleja en las paredes. Esta geometría permite el estudio de estructuras infinitas usando un volumen reducido del dominio numérico, disminuyendo el costo computacional (Castiñeira-Ibáñez, Rubio y Sánchez-Pérez, 2003). El primer y el último límite del dominio están rodeados por capas perfectas adaptadas (PML). Este método es útil para emular la condición Sommerfield en la solución numérica del problema de dispersión de las ondas (Berenguer, 1994). Finalmente, para obtener el espectro de atenuación de ruido 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:

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

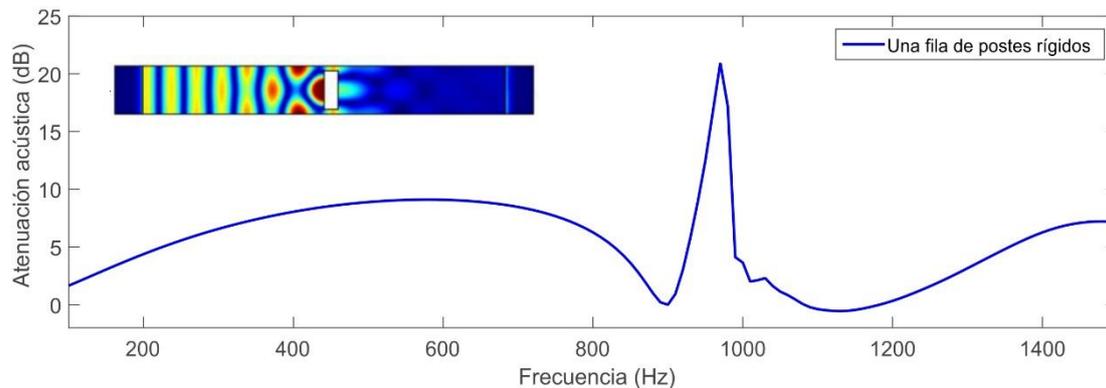
**Figura 2: Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno**



### 3. Resultados

Las propiedades de transmisión de sonido a través de una sola fila de ranuras subwavelength periódicas se pueden analizar mediante el cálculo de la pérdida de inserción, (Atenuación acústica), en función de la frecuencia  $f$  teniendo en cuenta la ecuación (1). Puesto que el dispositivo se analiza analíticamente utilizando el modelo 2D infinito, no se considera la difracción en los bordes superiores del mismo. La Figura 3 muestra la atenuación acústica calculada para una única fila de postes de profundidad  $d_p = 0,1$  m y una anchura de ranura  $S_A = 0,05$  m y una anchura de postes  $A_p = 0,30$  m, por lo que el periodo de red  $l_p = 0,35$  m. Se observa que en el espectro de atenuación acústica aparece, en torno a la frecuencia de 1000 Hz un pico pronunciado de atenuación, que es la manifestación de la anomalía de Wood. La anomalía de Wood para la incidencia normal en una red periódica de ranuras subwavelength se produce cuando la longitud de onda de la onda incidente coincide con el periodo de red,  $\lambda = l_p$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $l_p$  es el período de red. En este caso, la posición de la anomalía de Wood teórica es 971 Hz.

**Figura 3: Espectro de atenuación acústica calculado para una única fila de postes rectangulares con  $d_p = 0,1$  m,  $S_A = 0,05$  m,  $A_p = 0,30$  m y  $l_p = 0,35$  m**



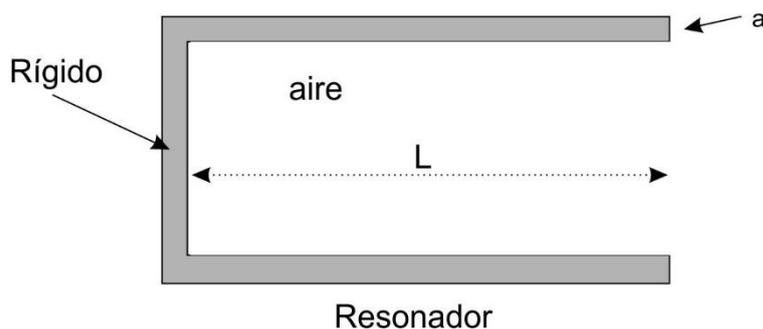
Como puede observarse la atenuación acústica en el rango de bajas frecuencias es extremadamente baja.

Con el objetivo de mejorar la atenuación a bajas frecuencias, se sustituye el poste por un dispositivo acústico que permita la absorción acústica selectiva en el rango de bajas frecuencias como son los resonadores  $\lambda/4$ . Estos dispositivos son cavidades de paredes rígidas con un extremo abierto y otro cerrado, tal y como se muestra en la Figura 4. Para un resonador con una cavidad de longitud L, la máxima absorción se producirá a una frecuencia, f, que viene dada por (Field y Fricke, 1998):

$$f = \frac{c}{L} \left( \frac{2n + 1}{4} \right) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

donde c es la velocidad de propagación del sonido. Si sustituimos los postes rectangulares por postes huecos con uno de los lados  $d_p$  abiertos, tendremos una batería de resonadores  $\lambda/4$ . El espesor rígido del resonador tiene una longitud de valor  $a = 0.02$  m.

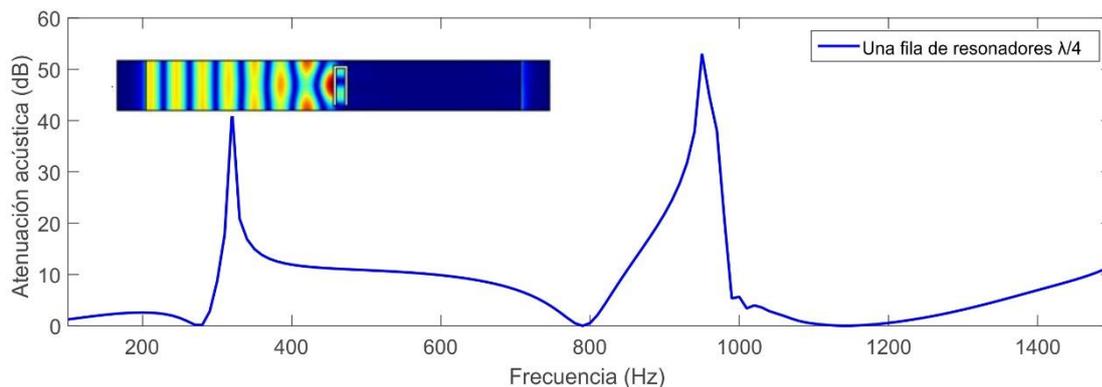
**Figura 4: Esquema de un resonador  $\lambda/4$**



La Figura 5 muestra el espectro de atenuación acústica para una distribución periódica de postes con un extremo,  $d_p$ , abierto de tal forma que se tiene un red de resonadores  $\lambda/4$  con un periodo de red  $l_p = 0,35$  m, una anchura de ranura  $S_A = 0,05$  m y una anchura de postes  $A_p = 0,30$  m. La longitud de la cavidad del resonador L es 0,26 m. Se observa que la posición en el espectro del pico de atenuación debido a la anomalía de Wood (971 Hz) permanece invariable en la posición, puesto que la periodicidad de la estructura no ha variado, aunque en

este caso la atenuación es mayor. Por otro lado, se observa que aparece un pico de atenuación a la frecuencia de 330 Hz, que corresponde con la frecuencia de resonancia del resonador  $\lambda/4$ . Para una longitud de la cavidad las frecuencias de resonancia para  $n = 0$  y  $n = 1$  son 330 Hz y 990 Hz respectivamente. De este modo, manteniendo la periodicidad de la estructura y variando la longitud de la cavidad del resonador, se puede seleccionar la frecuencia de resonancia, consiguiendo tener una estructura sintonizable a la frecuencia que se desea atenuar.

**Figura 5: Espectro calculado de atenuación acústica para una única fila de resonadores  $\lambda/4$  con  $d_p = 0,1$  m,  $S_A = 0,05$  m,  $A_p = 0,30$  m y  $l_p = 0,35$  m**

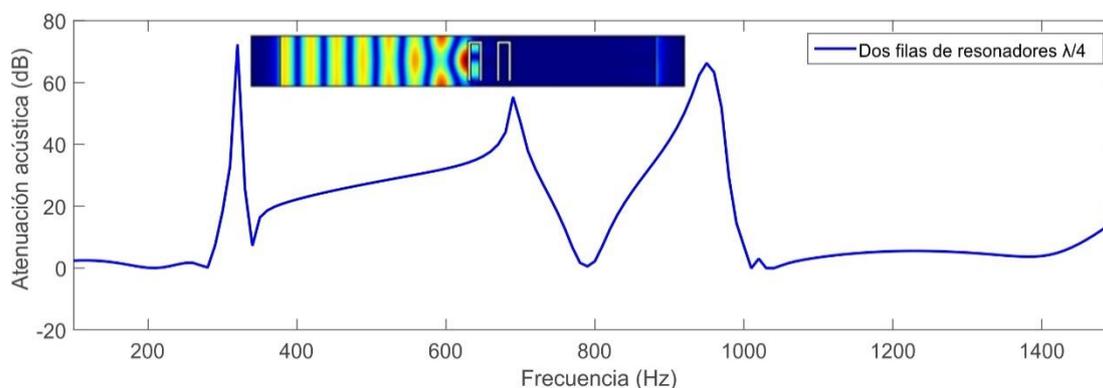


Como la intención es incrementar la atenuación acústica de la estructura, de modo que se pueda utilizar como una pantalla acústica, se añade una segunda fila de resonadores  $\lambda/4$  separadas por un distancia de 0,1 m. En este caso, la estructura puede considerarse como un conjunto de filtros acústicos. Las ranuras pueden ser consideradas como las aperturas de entrada de la cámara, el espacio entre las dos filas de postes es el que actúa como cámara de expansión y las ranuras de la segunda fila de postes se consideran como las aperturas de salida.

La Figura 6 muestra el espectro de atenuación acústica para una distribución periódica de dos filas de postes separadas  $d_{ag} = 0,1$  m con un extremo,  $d_p$ , abierto de tal forma que se tiene un red de resonadores  $\lambda/4$  con un periodo de red  $l_p = 0,35$  m, una anchura de ranura  $S_A = 0,05$  m, una anchura de postes  $A_p = 0,30$  m. La atenuación acústica producida por la anomalía de Wood se sigue observando a la frecuencia de 971 Hz puesto que ambas filas mantienen el mismo periodo de red. Así mismo, los picos de atenuación correspondientes a las resonancias del resonador  $\lambda/4$  en las frecuencias de 330 Hz y 990 Hz se observan con una mayor intensidad puesto que se ha aumentado el número de resonadores. Por otro lado, se observa un pico de pérdida de inserción a una frecuencia de aproximadamente 600 Hz que es debida a una interferencia destructiva entre las ondas que se propagan y las ondas evanescentes (Rubio et al., 2015). Por lo tanto, los efectos que se presentan se van sumando y actúan de manera constructiva.

Mediante esta disposición se ha logrado tener una atenuación considerable en el rango de bajas frecuencias y por tanto puede considerarse un candidato a ser utilizado como pantalla en las medidas de control de contaminación acústica.

**Figura 6: Espectro calculado de atenuación acústica para dos filas de resonadores  $\lambda/4$  separadas entre sí  $d_{ag} = 0,1$  m y con  $d_p = 0,1$  m,  $S_A = 0,05$  m,  $A_p = 0,30$  m y  $l_p = 0,35$  m**



#### 4. Conclusiones

Este trabajo presenta una estructura basada en ranuras subwavelength diseñada a partir de postes rectangulares dispuestos periódicamente y que puede ser utilizada como pantalla acústica. Se ha analizado la influencia sobre la atenuación acústica en el rango de bajas frecuencias de añadir resonadores acústicos  $\lambda/4$ . Con el fin de aumentar la atenuación acústica se ha añadido una segunda fila de resonadores  $\lambda/4$  verticales distribuidos periódicamente. La idea detrás de este diseño es la obtención de una pantalla acústica abierta para atenuar ruido de baja frecuencia y que puede ser sintonizada para reducir un ruido en una determinada banda de frecuencias o un tono puro sin un espesor excesivo. La pantalla propuesta puede ser utilizada en aquellas instalaciones en la que se requiera de aberturas para el flujo de aire como una alternativa a las lamas acústicas que no atenúan todo el ruido que pasa a través de ellas; esto ocurre en torres de enfriamiento, calderas, plantas técnicas o instalaciones eléctricas.

#### 5. Referencias

- Berenguer JP. (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 1994; 114: 185-200.
- Berglund, B. & Hassmen, P. (1996). Sources and effects of low-frequency noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99, 2985-3002.
- Castiñeira-Ibáñez S, Rubio C, Sánchez-Pérez J.V. (2003). Acoustic wave diffraction at the upper edge of a two-dimensional periodic array of finite rigid cylinders. A comprehensive design model of periodicity-based devices. *Euro Physics Letters*, 101, 64002.
- Castiñeira-Ibáñez, S., Rubio, C., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J.V., García-Raffi, L.M. (2012). Design, Manufacture and Characterization of an Acoustic Barrier Made of Multi-Phenomena Cylindrical Scatterers Arranged in a Fractal-Based Geometry, *Archives of Acoustics*, 37(4), 455–462.
- Estrada, H., Candelas, P., Uris, A., Belmar, F., García de Abajo, F.J., Meseguer, F. (2008). Extraordinary sound screening in perforated plates. *Physical Review Letters*, 101, 084302.
- Field CD., Fricke FR. (1998). Theory and Applications of Quarter-wave Resonators: A Prelude to Their Use for Attenuating Noise Entering Buildings Through Ventilation Openings. *Applied Acoustics*, 53, 117–132.

- Harris, CM. (1991). Handbook of acoustical measurements and noise control. New York. 3rd ed. Mc Graw-Hill.
- Ho, S., Busch-Vishniac, I., & Blackstock, D. (1997). Noise reduction by a barrier having random edge profile. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(5), 2669- 2676.
- Hothersall, D., Crombie, D. & Chandler-Wilde, S. (1991). The performance of T profile and associated noise barriers. *Applied Acoustics*, 32, 269-287.
- May, D. & Osman, M. C. (1980). The performance of sound absorptive, reflective, and T-profile noise barriers in Toronto. *Journal of Sound and Vibration*, 71(1), 65-71.
- Miyashita, T. (2005) Sonic crystals and sonic wave-guides, *Measurement. Science & Technology*, 16, R47-R63.
- Rubio, C., Caballero, D., Sanchez-Perez, J.V., Martinez-Sala, R., Sanchez-Dehesa, J., Meseguer, F., Cervera, F. (1999). The existence of full gaps and deaf bands in two-dimensional sonic crystals, *Journal of Lightwave Technology*, 17 (11), 2202-2207.
- Rubio C., Candelas P., Belmar F., Gomez-Lozano V., Uris A. (2015). Subwavelength slit acoustic metamaterial barrier. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48, 395501.
- Sánchez-Pérez, J.V., Rubio, C., Martínez-Sala, R., Sánchez-Grandia, R., Gómez, V. (2002). Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers, *Applied Physics Letters*, 81, 5240-5242.
- Wood, RW. (1935). Anomalous diffraction gratings. *Physical Review*, 48(12), 928–936.