

MODELO INTEGRAL PARA EL DISEÑO DE PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

PACS: 43.50.Ki

S. Castiñeira-Ibáñez¹, C. Rubio², J. V. Sánchez-Pérez²

¹ *Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, EU*

² *Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València - Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, EU*

ABSTRACT

One of the most usual methods to reduce the noise level during transmission is the use of acoustic barriers. In the last few years, an interesting alternative to classical ones is the use of arrays of isolated scatterers embedded in air, usually called sonic crystals. In this paper a comprehensive practical model based on the Finite Element Method to design this kind of barrier is presented, taking into account all the acoustic phenomena involved, such as diffraction at the top of the barrier or the addition of new attenuation mechanisms.

RESUMEN

Uno de los métodos más habituales para reducir el nivel de ruido durante su transmisión es el uso de pantallas acústicas. En los últimos años, una alternativa interesante a las pantallas clásicas es el uso de redes de dispersores aislados inmersos en aire, conocidos como cristales de sonido. En este trabajo se presenta un modelo práctico integral basado en el Método de Elementos Finitos para diseñar este tipo de pantallas, teniendo en cuenta todos los fenómenos acústicos que intervienen, como la difracción en el borde superior o la adición de nuevos mecanismos de atenuación.

INTRODUCCIÓN

Una de las soluciones para el control del ruido en su transmisión cuando no es posible, o es demasiado caro, reducir la emisión de ruido de la fuente, viene dada por la utilización de pantallas acústicas, también denominadas pantallas antirruído o barreras acústicas. Una pantalla acústica clásica consiste básicamente en un medio continuo de material rígido que se interpone entre la fuente emisora de sonido y el receptor [1]. Esta reducción del nivel de ruido, que habitualmente se denomina atenuación, es debida fundamentalmente a la Ley de Masas. El efecto acústico de una barrera se puede explicar de la siguiente forma: el ruido transmitido viaja desde la fuente al receptor en línea recta. Esta trayectoria se interrumpe por la barrera acústica cuando se sitúa entre la fuente y el receptor. Una porción de la energía acústica emitida es o bien reflejada o dispersada hacia la fuente, otra porción es transmitida

a través de la barrera, difractada por el borde de la barrera o absorbida por el material del que está construida la misma Figura 1(a).

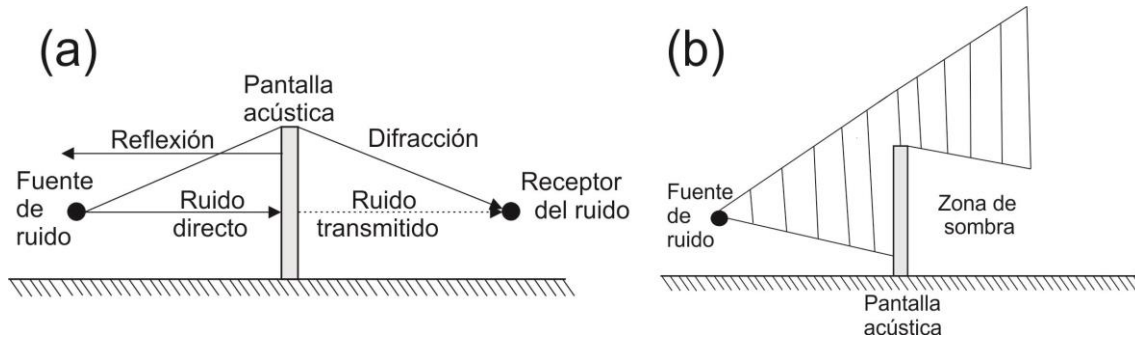


Figura 1 (a) Pantalla acústica tradicional, (b) zona de sombra de una pantalla acústica tradicional.

La difracción por los bordes de la pantalla (superior o laterales) es considerado el mecanismo acústico que más reduce la efectividad de una pantalla acústica. Esta efectividad se concentra en la región donde el ruido no llega de manera directa desde la fuente, y se conoce con el nombre de zona de sombra, (Figura 1(b)). La zona de sombra es mayor conforme aumenta la frecuencia, produciendo pues, mayor atenuación para altas frecuencias [2]. Con la finalidad de reducir la difracción por el borde de las pantallas se han desarrollado en la última década dispositivos difractivos montados en la parte superior de las barreras acústicas tradicionales ([3], [4], [5]). Estos dispositivos no aumentan el peso de la barrera, sin embargo disminuyen el sonido difractado en la zona de sombra aumentando la capacidad acústica de las barreras.

Algunos autores [6], han demostrado la posibilidad de utilizar redes de dispersores cilíndricos rígidos para construir pantallas acústicas. Estos dispersores ordenados periódicamente forman los llamados cristales de sonido (SC), materiales que fueron desarrollados en los años 90 [7]. Los SC consisten en distribuciones periódicas de dispersores acústicos aislados, inmersos en un fluido con propiedades físicas diferentes. En estos sistemas se ha comprobado de la existencia de bandas de frecuencia en las que no existe propagación del sonido (BG) debido únicamente al mecanismo de la dispersión múltiple. A las pantallas acústicas basadas en SC que únicamente utilizan este mecanismo se les denomina de primera generación. Desde ese momento las investigaciones desarrolladas se basaron básicamente en dos objetivos: (i) maximizar el mecanismo de la dispersión múltiple mediante la búsqueda de nuevas ordenaciones de dispersores cilíndricos ([8] [9]) y (ii) añadir nuevos mecanismos de control de ruido tales como la resonancia y la absorción en el diseño de los dispersores [10]. A las pantallas basadas en cristales de sonido con dispersores así mejorados se les denomina de segunda generación.

Para la caracterización de las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido se ha desarrollado un modelo de pantalla formado por dispersores cilíndricos rígidos de longitud finita, con la finalidad de caracterizar el campo acústico en la zona de sombra. Este análisis tiene en cuenta la interacción entre la difracción Bragg y la difracción por el borde superior de la pantalla [11]. Se considera que la pantalla es lo suficientemente larga para que no exista difracción en la zona de estudio debido a los bordes laterales lo que convierte el problema 3D en un 2D (2DSC). De esta manera, el campo de presión resultante detrás de un 2DSC real se puede obtener como la superposición de los dos efectos considerados, lo que permite actuar sobre cada efecto por separado con el fin de reducir su contribución al campo de presión total, siguiendo el concepto de tuneado [10]. Siguiendo con este concepto y con la finalidad de reducir el efecto de la difracción por el borde superior de las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido, se ha diseñado una solución basada en la interferencia destructiva de

ondas a la que se le aplicará el modelo de superposición desarrollado. La solución adoptada consiste en introducir unos dispersores estratégicamente situados en el entorno de la pantalla, tal y como se puede observar en la Figura 2(a) donde se representa una pantalla real 3D basada en cristales de sonido de segunda generación junto a los dispersores añadidos. La finalidad de estos dispersores es que produzcan interferencias destructivas con las ondas que han llegado a la zona de sombra.

En la siguiente sección se presenta un modelo numérico integral de pantalla acústica basada en cristales de sonido que a partir de dos modelos 2D por superposición reproduce los resultados de un 2DSC que incluye múltiples fenómenos acústicos. Este modelo integrador permite de una manera sencilla y computacionalmente rápida realizar diseños de pantallas con múltiples soluciones.

MODELO NUMERICO DE SUPERPOSICIÓN INTEGRAL DE PANTALLA ACÚSTICA BASADA EN CRISTALES DE SONIDO

En la Figura 2(a) se representa una pantalla acústica formada por dispersores cilíndricos finitos multifenómeno de altura h en tres dimensiones. Se considera que la pantalla es lo suficientemente larga para que no exista difracción en la zona de estudio debido a los bordes laterales.

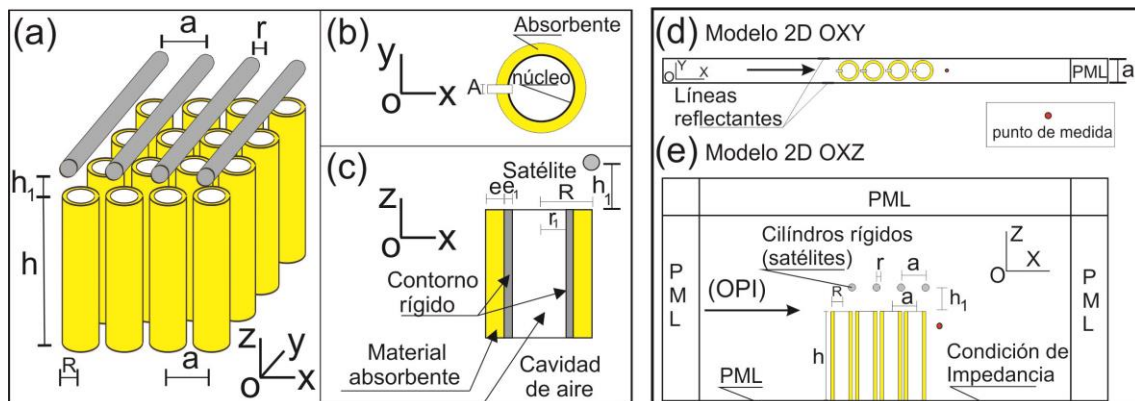


Figura 2: (a) Pantalla real 3D basada en SCs de segunda generación, (b) corte transversal del dispersor multifenómeno (plano OXY), (c) corte longitudinal del dispersor multifenómeno: R es el radio exterior del dispersor, A es la anchura del cuello de la cavidad resonante, r_1 es el radio interior de la cavidad resonante, e_1 es el espesor del núcleo rígido (corona interior) y e es el espesor del anillo de material absorbente. La figura de la derecha representa el modelo de superposición integral generalizado donde el problema real 3D se sustituye por dos casos 2D; (d) Modelo 2D plano OXY, que incluye BG, resonancias y los fenómenos de absorción. Se muestra la sección OXY de los dispersores cilíndricos multifenómeno, así como las líneas laterales reflectoras y las PML que definen los límites del dominio; (e) Modelo 2D plano OXZ con los principales parámetros geométricos del problema considerado. En este modelo 2D, se considera la difracción por el borde superior de los dispersores multifenómeno y la difracción en los dispersores circulares (satélites) donde se puede ver la sección OXZ del problema real 3D. También se muestran las PML y la condición de impedancia que definen los límites de la figura.

Por lo tanto, y debido a condiciones de simetría, sólo se tienen en cuenta los mecanismos relacionados con la composición de los dispersores (BG, la absorción y resonancias) que se producen en el plano OXY, la difracción por el borde superior que se produce en el plano OXZ

y la difracción en los nuevos dispersores, que también se estudia en el plano OXZ. Se ha dividido, pues, el problema 3D en dos casos 2D. Las geometrías completas de ambos casos 2D, incluyendo todos los mecanismos considerados, se muestran en la Figura 2(d) y Figura 2(e), con los diferentes mecanismos implicados que se asignan a cada uno de ellos. Por un lado, los mecanismos relacionados con la composición de los dispersores (BG, la absorción y resonancias) han sido asignados a la geometría mostrada en la Figura 2(d). Esta asignación puede ser fácilmente entendida teniendo en cuenta que no hay cambios en la geometría que definen estos mecanismos a lo largo de la dirección de los ejes de los cilindros (OZ, dirección en este modelo), y el sistema puede ser considerado como un sistema 2D. Se ha llamado a esta geometría "modelo 2D plano OXY". Como se puede ver, la geometría está formada por una sección de la estructura 2DSC considerada, perpendicular a los ejes de los dispersores cilíndricos (OXY), representados por círculos que incluyen todos los mecanismos considerados. En las Figuras 2(b) y 2(c) se puede observar la composición de los cilindros multifenómeno. Están formados por cilindros rígidos vacíos hechos de PVC con espesor de pared e_1 y radio r_1 . A continuación, una capa de un material absorbente (lana de roca) con radio externo R y espesor e está enrollada alrededor del cilindro rígido. Para simular la ranura a lo largo de su longitud, se inserta un rectángulo de anchura de cuello A, a través del dispersor. Las diferentes partes, de esta geometría, pueden ser activadas o desactivadas en el modelo para simular diferentes materiales o diferente composición de los dispersores cilíndricos.

Por otro lado, la difracción en el borde superior de los dispersores cilíndricos se ha incluido en la geometría mostrada en la Figura 2(e). Se ha llamado a esta geometría "modelo 2D plano OXZ". En este caso, el modelo 2D está formado por una sección en un plano paralelo a los ejes de los dispersores cilíndricos (OXZ), y que están representados por rectángulos con su base igual al doble del radio de los dispersores multifenómeno. Aunque la difracción por el borde de una pantalla formada por dispersores periódicos es discontinua y no lineal, se puede aplicar el mismo argumento que en una pantalla clásica, porque todos los puntos donde la onda se difracta emiten en fase entre sí aunque la contribución de cada uno a la presión del frente de ondas es diferente. Como resultado, el frente de ondas difractado es uniforme en la dirección OY como en el caso de la pantalla acústica clásica semi-infinita, y se puede considerar, simplificando, la misma anchura de los rectángulos en la multicapa independientemente de la posición del punto de medida. Esta hipótesis, sin embargo, puede producir un ligero incremento en la presión acústica debida a la difracción por el borde, que es asumible [11]. Se puede observar en la Figura 2(c) de color amarillo la capa del material absorbente de cada dispersor.

Para la reducción de la difracción utilizando interferencias destructivas, se incluye en el modelo 2D OXZ un conjunto de cilindros vacíos rígidos (color gris en la Figura 2(b)) con el radio r_1 y espesor de pared e_1 que se sitúan perpendicularmente y en la parte superior de los dispersores multifenómeno cilíndricos. Estos nuevos dispersores se ven en el modelo 2D OXZ como un conjunto de círculos, que están dispuestos cerca del límite posterior de cada cilindro multifenómeno a fin de reducir la difracción que se produce en el borde superior de cada uno que forma la estructura 2DSC. Para calcular la distancia h_1 entre estos nuevos dispersores y los dispersores cilíndricos que forma la estructura SC hay que tener en cuenta que las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido tienen una zona del espectro donde son más efectivas: zona alrededor de la frecuencia Bragg. La difracción por el borde superior en cambio, se produce para todas las frecuencias. Si a esto se le añade que la posición de los dispersores para que produzcan interferencias destructivas con la difracción por el borde superior es variable, la solución no es única ya que esa distancia depende de la frecuencia que se quiere atenuar. En este trabajo, la posición de los dispersores para crear interferencias destructivas con la onda difractada generada en el borde superior de la pantalla acústica, se ha calculado de forma que los dispersores trabajen cerca de la frecuencia Bragg:

$$h_1 = \frac{\lambda}{2} = \frac{343/515}{2} = 0.33 \text{ m}$$

es decir, la posición se ajusta para que produzca interferencia destructiva a la frecuencia Bragg $f_{Bragg} = 515$ Hz, de la pantalla diseñada.

El dominio geométrico que se muestra en la Figura 2(d) está formado por 4 círculos con radio exterior $R=0.14$ m y separados por la constante de red, $a=0.33$ m, confinados completamente entre dos líneas reflectoras para simular el efecto de un cristal infinito, también separadas por una constante de red, siendo paralelas a la dirección de propagación de la onda plana incidente (OPI) que viaja de izquierda a derecha. Estos dispersores poseen una cavidad, con forma también circular, de radio interior $r_1=0.095$ m y radio exterior $r_2=0.10$ m ($r_2 = r_1 + e_1$), con un cuello de anchura $A=0.02$ m para que la onda pueda penetrar. Por otro lado, la corona circular de radio interior $r_2=0.10$ m y radio exterior $R=0.14$ m, está formada por material absorbente (lana de roca) de espesor 0.04 m. Con todo esto, el dispersor está formado por tres partes y cada una de ellas tiene una condición de contorno diferente cuando están activadas. Estas condiciones son, de dentro hacia fuera y suponiendo todos los fenómenos implicados:

- La cavidad resonante de radio r_1 y cuello de anchura A . La condición de contorno utilizada para esta corona es condición de contorno Neumann (contorno rígido). El subdominio está activado con la condición de aire en su interior.
- La corona de radio interior r_1 y radio exterior r_2 , condición de contorno Neumann (contorno rígido) y subdominio desactivado.
- La corona de radio interior r_2 y radio exterior R , formada de material absorbente, condición de contorno continuidad y subdominio Delany-Bazley, que se utiliza para simular modelos con absorción (resistencia al flujo $23000 \text{ kg/m}^3\text{s}$).

El dominio geométrico que se muestra en la Figura 2(e) está formado por 4 dispersores rígidos (condición Neumann) con forma rectangular de altura $h=1.20$ m y anchura $d=0.28$ m, separados por la constante de red, $a=0.33$ m. Tres de los límites del dominio están rodeados de capas perfectamente adaptadas (PML) para simular propagación en campo libre [11]. En el límite inferior, delante de la multicapa, se utiliza una PML y en la parte inferior de detrás de la estructura se ha introducido la condición de impedancia [12].

La aplicación del modelo integral de superposición generalizado a los diferentes casos estudiados consiste en activar o desactivar los dominios que forman el modelo. Activar una capa en este modelo es habilitar dicha capa con la condición de contorno y tipo de material correspondiente. Así, si la superficie es rígida se activa o habilita como tal (condición Neumann). En cambio, si es rígida pero se desea desactivada, es transparente a la perturbación ya que a efectos de cálculo sería como si estuviera formada por aire.

Para el caso de dispersores rígidos, Figura 3(a), se habilita la capa cilíndrica de radio R de forma que no penetra la perturbación en su interior. El efecto es como si el dispersor fuera totalmente rígido (color gris). De la misma manera, para el caso de dispersores rígidos con cavidad resonante (ranurados), Figura 3(b), se activa como aire (color blanco) la capa cilíndrica de radio interior r_1 y el rectángulo (cuello) que penetra en el interior del círculo. El cilindro de radio interior r_1 y exterior R se activa como rígido (color gris). Por último, para el caso de dispersores rígidos con cavidad resonante y material absorbente, que se muestra en la Figura 3(c), las capas activadas son: la capa cilíndrica de radio interior r_1 y exterior R con la condición de material absorbente (color amarillo); el rectángulo (cuello) que penetra en el interior del círculo como aire (color blanco) y por último la corona de radio interior r_1 y radio exterior r_2 , rígida (color gris). Para este último caso se considera que la absorción sólo interviene en el modelo 2D plano OXY.

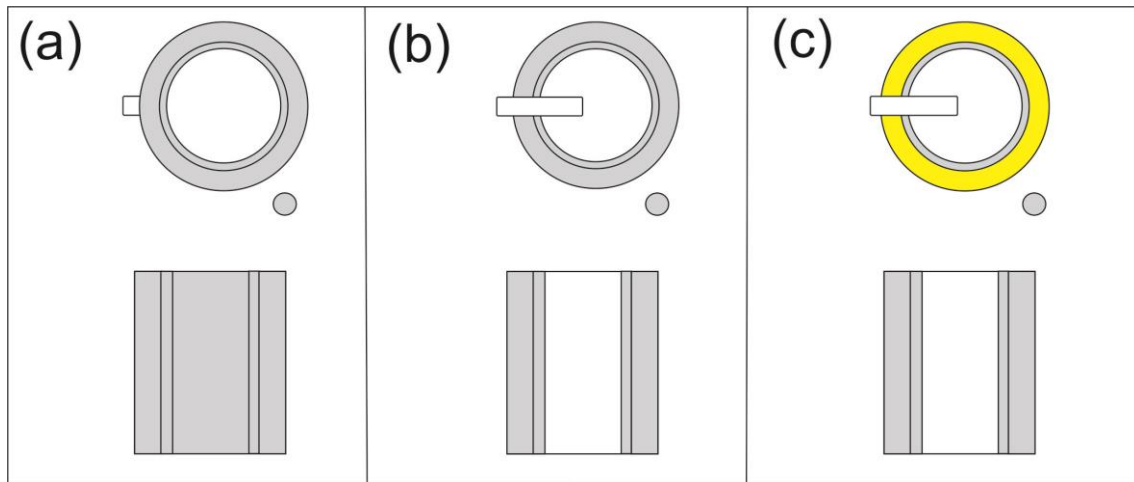


Figura 3: Aplicación del modelo integral de superposición generalizado al análisis de los diferentes casos: (a) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos. Los mecanismos considerados son: BG y difracción tanto en el borde superior del dispositivo como en los satélites; (b) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos y ranurados. En este caso, los mecanismos implicados son: BG, difracción en el borde superior y satélites y resonancias acústicas. En ambos casos, se pueden ver los diferentes dominios activados (rígido en color gris, aire en color blanco), dependiendo de la naturaleza de los mecanismos acústicos involucrados en el problema; (c) 2DSC formado por dispersores cilíndricos rígidos, ranurados y absorbente. En este caso, los mecanismos implicados son: BG, difracción en el borde superior, difracción en satélites, resonancias acústicas y absorción acústica. Los diferentes dominios activados son: rígido en color gris, aire en color blanco y absorbente en color amarillo. En el supuesto de estar interesados en que los satélites no actúen se desactivan como rígidos y se activan como aire (color blanco) pasando a ser transparentes a la perturbación.

Se ha utilizado el programa comercial Comsol 3.5a. Se ha seleccionado como parámetro de malla libre, fina, con método de refinamiento regular. La malla obtenida contiene para el modelo 2D plano OXY $1.5 \cdot 10^5$ elementos con $6.51 \cdot 10^5$ grados de libertad. Se ha utilizado el módulo acústico (PA). Para el modelo 2D plano OXZ la malla contiene $5.1 \cdot 10^5$ elementos con $3.02 \cdot 10^5$ grados de libertad. Se ha utilizado el módulo acústico (SW).

La medida que se utiliza para estimar la efectividad de la barrera es la pérdida por inserción (IL) que es la diferencia de niveles sonoros antes y después de colocar la barrera [2]. Para el cálculo de la atenuación acústica mediante el modelo de superposición, se emplea la siguiente expresión, donde la atenuación (IL) se puede expresar en función de la presión compleja total de ambos modelos 2D y de la presión compleja incidente de la siguiente forma:

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_{directa}}{P_{interferida}} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{P_i}{P_{ModelOXY} + P_{ModelOXZ}} \right| \quad (1)$$

donde: p_i es la presión compleja incidente, $p_{ModelOXY}$ y $p_{ModelOXZ}$ son las presiones complejas totales detrás de la pantalla tanto en el caso del modelo 2D plano OXY como del modelo 2D plano OXZ.

RESULTADOS Y DISCUSION.

Utilizando el modelo de superposición presentado en la sección anterior se obtienen los espectros de atenuación globales para los tres casos estudiados: dispersores totalmente rígidos, dispersores rígidos-cavidad resonante y dispersores rígidos-cavidad resonante-absorbente, sin y con los dispersores añadidos (satélites). Para el cálculo de la atenuación acústica global, se utiliza la expresión (1) a partir de los resultados obtenidos mediante FEM (Comsol 3.5a).

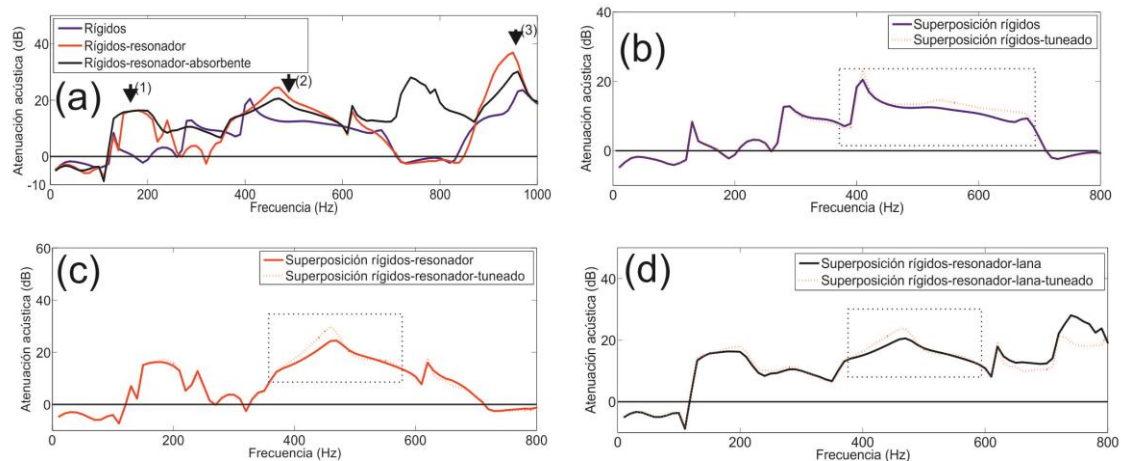


Figura 4: (a) Resultados de atenuación acústica, para los tres casos desarrollados: la línea azul, dispersores totalmente rígidos, la línea roja, dispersores rígidos con cavidad resonante y la línea negra, dispersores rígidos con cavidad resonante y absorbente (lana de roca), (b) espectros globales de atenuación acústica en dB, para los tres casos estudiados sin y con satélites. La zona recuadrada de espectro, muestra en todos los casos, que se consigue la mejora en la atenuación justo para las frecuencias de diseño de los dispersores añadidos (satélites).

En la Figura 4(a) se muestra el resultado del espectro de atenuación acústica (IL) de la pantalla diseñada con el receptor situado en el punto de coordenadas: (0.11, 0.00, -0.30) m medido desde el borde del último rectángulo y para la dirección principal ΓX (0°) de incidencia obtenido mediante la simulación numérica con onda plana. Se puede observar la existencia de los diferentes picos de atenuación debido a los diferentes mecanismos considerados. Así, el pico de atenuación (1) es debido a la resonancia correspondiente al tamaño de la cavidad del resonador considerado que está en torno a 200 Hz. Los picos de atenuación (2) y (3) corresponden a la primera y segunda bandas prohibidas para la dirección de incidencia considerada en la red cuadrada (515 y 1030 Hz). Por último, el nivel continuo de atenuación que aparece a partir de 500 Hz en adelante corresponde al efecto del absorbente utilizado en cada cilindro de la estructura. En las Figuras 4(b), 4(c) y 4(d) se muestran los espectros de atenuación acústica (dB) para los tres casos anteriores sin y con satélites en el rango de frecuencias de 0 a 800 Hz. Se comprueba en los tres casos que, en el caso de utilizar satélites, se consigue mejora en la atenuación acústica en la zona en torno a la frecuencia Bragg (515 Hz).

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un modelo integral para el análisis de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de primera y de segunda generación. Se ha analizado la atenuación, definida como IL, que provoca una pantalla acústica formada por dispersores acústicos ordenados de forma periódica cuando a su través pasa una onda plana. Las estrategias utilizadas para incrementar la atenuación acústica vienen ligadas a los dos análisis 2D efectuados. Así con dispersores multifenómeno se consigue incrementar en el espectro la atenuación, ya que a la dispersión múltiple se han añadido los fenómenos de resonancia y absorción. Pero además, añadiendo dispersores exteriores a la pantalla (satélites), se consigue reducir la difracción por el borde superior, contribuyendo a un incremento global de la atenuación, ya que los fenómenos se superponen positivamente. A partir de aquí, se abre un abanico amplio de diseño a la carta para pantallas acústicas basadas en cristales de sonido, ya que estos fenómenos que se han incorporado pueden actuar en otros rangos de frecuencias. Además se pueden buscar múltiples soluciones, de manera sencilla y con un coste computacional bajo, añadiendo un importante enfoque tecnológico al campo del diseño de las pantallas acústicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el MEC (Gobierno español) a través del proyecto No. MTM2012 - 36740 - C02 - 02.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kotzen B., English C, Environmental noise barriers, E&FN SPON, London, (1999).
- [2] Harris CM. Handbook of acoustical measurements and noise control. 3rd ed. McGraw-Hill, Inc; (1991)
- [3] Fujiwara K., Furuta N., Noise Control Eng. J. **37**, 5-11 (1991)
- [4] Watts G. R., Appl.Acoust. **47**, 47-66 (1996)
- [5] Okubo T. and Yamamoto K., Appl.Acoust. **68**, 797-819 (2007)
- [6] Sánchez-Pérez J. V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandía R. and Gómez V., Appl. Phys. Lett **81** (27), 5240-5242 (2002)
- [7] Martínez-Sala R., Sancho J., Sánchez-Pérez J. V., Llinares J., Meseguer F., Nature (London) **387**, 241 (1995)
- [8] Romero-García V., Fuster E., García-Raffi L. M., Sánchez-Pérez E. A., Sopena M., Llinares J., Sánchez-Pérez J. V., Appl. Phys. Lett. **88**, 174104 (2006)
- [9] Romero-García V., García-Raffi L. M., Sopena M., Sánchez-Pérez J. V., Herrero J. M., García-Nieto S. and Blasco J., Acoust. Soc. Am. **125**, No. 6 (2009)
- [10] Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and Garcia-Raffi L. M., J. Appl. Phys. **110**, 014904 (2011)
- [11] Berenguer, J. P., A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, J. Compt. Physics,**114**, 185 (1994)
- [12] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C. and Sánchez-Pérez J. V., EPL **101**, 64002 (2013)