

04-045

USING RECYCLED MATERIALS FOR MODELING OPEN ACOUSTIC BARRIERS FOR AN ECO-SUSTAINABLE SOCIETY

Castiñeira-Ibáñez, Sergio ⁽¹⁾; Rubio Michavila, Constanza ⁽¹⁾; Tarrazó-Serrano, Daniel ⁽¹⁾; Uris, Antonio ⁽¹⁾; Sinisterra-Solís, Nelson Kevin ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de València

Noise is one of the leading local environmental problems in industrialized countries. Acoustic barriers, devices that reduce noise by being placed between the source and the receiver, can be used to control noise in its transmission phase. Open acoustic barriers represent an interesting technological change in noise control, as they achieve high attenuation levels at low frequencies, which are the most difficult to attenuate. They are also tunable and permeable and can be custom designed. In addition, they can be considered environmentally ecological, as recycled materials can be used in their design and construction. Reusing waste materials will improve the value chain of products and mitigate the noise the population is exposed to. This paper presents a design project of a subwavelength slit open acoustic barrier made from coconut shell waste. Coconut replaces wood, helping to conserve mountain ecosystems, allowing the recovery of degraded forests, and protecting their biological diversity. The aim is to reduce deforestation, reduce economic expenditure and reduce poverty.

Keywords: open acoustic barrier; recycling; coconut shell; noise control; sustainability; circular economy

USO DE MATERIALES RECICLADOS PARA LA MODELIZACIÓN DE BARRERAS ACÚSTICAS ABIERTAS PARA UNA SOCIEDAD ECO-SOSTENIBLE

El ruido es uno de los principales problemas ambientales de ámbito local en los países industrializados. Para el control del ruido en su fase de transmisión, se pueden utilizar barreras acústicas, dispositivos que reducen el ruido al situarlos entre la fuente y el receptor. Las barreras acústicas abiertas representan un interesante cambio tecnológico en el control del ruido ya que consiguen altos niveles de atenuación a bajas frecuencias, las más difíciles de atenuar. También son sintonizables y permeables, siendo posible su diseño a la carta. Además, se pueden considerar ecológicas, ya que en su diseño y construcción de los materiales que las forman es factible utilizar materiales reciclados. La reutilización de materiales de desecho mejorará la cadena de valor de los productos, además de mitigar el ruido al que está expuesta la población. En este trabajo se presenta un proyecto de diseño de una barrera acústica abierta con ranura subsónica realizada con residuo de cáscara de coco. Este sustituye a la madera, contribuyendo a velar por la conservación de los ecosistemas montañosos, permitiendo la recuperación de los bosques degradados y la protección de su diversidad biológica. La finalidad es reducir la deforestación, disminuir el gasto económico y reducir la pobreza.

Palabras clave: Barrera acústica abierta; reciclado; cáscara de coco; control del ruido; sostenibilidad; economía circular

Agradecimientos: Agradecemos a la Dra. Gabriela Clemente Polo su colaboración con los autores de este trabajo a partir del proyecto "Evaluación de la sostenibilidad del establecimiento de una fábrica artesana de productos de coco en la subregión de Sanquianga (departamen



© 2023 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

1.1 Antecedentes de la investigación

Europa se enfrenta a retos medioambientales cuya magnitud y urgencia no tiene precedentes. Aunque las políticas de la UE en materia de clima y medio ambiente han aportado importantes beneficios durante las últimas décadas, Europa se enfrenta a problemas persistentes en ámbitos como la pérdida de biodiversidad, el uso de recursos, el impacto del cambio climático y los riesgos medioambientales para la salud y el bienestar. La Tierra está experimentando una pérdida de biodiversidad excepcionalmente rápida, y el número de especies amenazadas de extinción en la actualidad es mayor que en cualquier momento de la historia de la humanidad. Muchos de los cambios en el sistema climático mundial observados en las últimas décadas son en gran medida consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la agricultura y la deforestación. Tanto directa como indirectamente, estas presiones están causando enormes daños a la salud y el bienestar de las personas. La visión general para el medio ambiente y la sociedad en Europa figura en el Séptimo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente (7.º PMA), que plantea para 2050: Vivir bien, respetando los límites ecológicos del planeta. Nuestra prosperidad y el medio ambiente saludable son la consecuencia de una economía circular innovadora, donde nada se desperdicia y en la que los recursos naturales se gestionan de manera sostenible, y la biodiversidad se protege, valora y restaura de tal manera que la resiliencia de nuestra sociedad resulta fortalecida. Nuestro crecimiento hipocarbónico lleva tiempo disociado del uso de los recursos, marcando así el paso hacia una economía segura y sostenible a nivel mundial. Las políticas medioambientales de la UE se guían por tres prioridades políticas temáticas recogidas en el 7.º PMA: proteger, conservar y mejorar el capital natural de la UE; convertir a la UE en una economía hipocarbónica eficiente en el uso de los recursos, verde y competitiva; y proteger a los ciudadanos de la Unión frente a las presiones y riesgos medioambientales para la salud y el bienestar. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas complementan estos marcos, proporcionando una lógica para el cambio transformador que reconoce la interdependencia de los objetivos sociales, económicos y medioambientales (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2019).

Para un sector cada vez más importante y creciente de la población, el ruido es percibido como uno de los factores más negativos de la calidad de vida, especialmente en las ciudades (Evans, Bougdah & Bullinger, 1995). Desde esta perspectiva, el ruido, como subproducto de la actividad y la interacción humana, es sentido por la mayoría de la población como un tipo de contaminación ambiental, que debe ser reducida ya que afecta tanto a la salud como a la calidad de vida de los ciudadanos. Esto ha provocado una preocupación creciente en la sociedad por las molestias y efectos que origina sobre la salud, sobre el comportamiento y sobre las actividades de los individuos, así como por las consecuencias psicológicas y sociales que acarrea. Con la reducción de ruido se obtienen considerables beneficios tanto económicos como efectos positivos en la salud pública y el bienestar de la población.

Frente a la problemática acústica, se han interpuesto medidas tanto a nivel europeo mediante la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 (ampliada en la directiva 2015/996 de la Comisión Europea), sobre la evaluación y gestión del ruido ambiental, en el que sólo se hace referencia a la población humana (DE EUROPA, 2002), mientras que en el ámbito estatal, en este caso concreto España, la Ley 37/2003, de 17 noviembre (y los Reales Decretos que desarrollan distintos aspectos de esta ley), del ruido, hace referencia a la fauna en el artículo 8: Fijación de objetivos de la calidad acústica (Boletín Oficial del Estado, BOE, 2003), donde el objetivo 2 dice lo siguiente: "Para

establecer los objetivos de calidad acústica se tendrán en cuenta los valores de los índices de inmisión y emisión, el grado de exposición de la población, la sensibilidad de la fauna y de sus hábitats, el patrimonio histórico expuesto y la viabilidad técnica y económica”.

1.2. Concepto de barreras acústicas

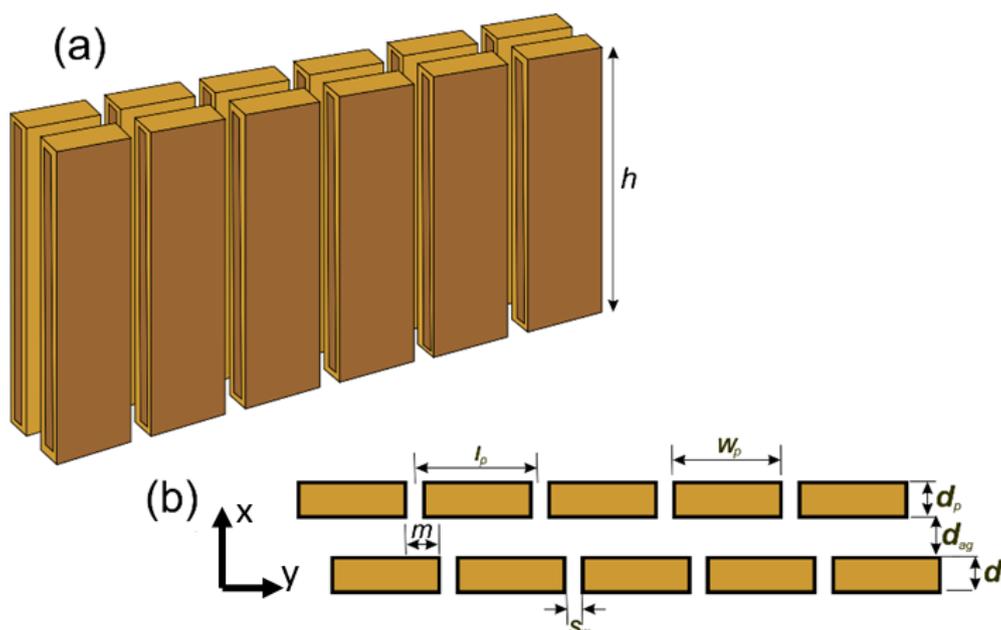
Ante la contaminación acústica, una de las posibles medidas a realizar es actuar sobre el medio de transmisión del ruido mediante el uso de barreras acústicas. Las barreras acústicas se utilizan desde hace décadas en el control del ruido en la fase de transmisión de este, situándolas entre el generador y el receptor. Su actuación está basada en la mayor parte de los casos en la absorción o reflexión de las ondas acústicas. La utilización de barreras acústicas tradicionales presenta, aparte de su baja capacidad de limitar el nivel de ruido (sobre todo a bajas frecuencias), problemas de diversa índole. Por una parte, debido a la carga de viento aplicada sobre la barrera es necesaria una cimentación que produce un encarecimiento del producto. Por otra, su colocación provoca cierto rechazo en la población debido a la falta de visión y a la estética poco cuidada en general. Además, los materiales que se suelen utilizar tienen un impacto negativo a nivel ambiental (hormigón, plexiglás, metales...) por ello para minimizar e integrar la barrera en el medio se suele utilizar madera, que es más aceptada por la población. A esto hay que añadir que el mercado está estancado ya que, según los propios fabricantes, no ha existido ninguna innovación tecnológica importante en este campo en las últimas décadas. Por tanto, el diseño de dispositivos de control basados en nuevas tecnologías y que aporten soluciones a dichos problemas abre un vasto campo de actuación tecnológica.

Las barreras acústicas abiertas pueden ser la clave de este cambio tecnológico. Este grupo de investigación ha diseñado un tipo de barrera abierta adaptada a estas situaciones de poco espacio y que tiene resultados comparables a las barreras tradicionales. La física que subyace en este tipo de barreras se remonta a los últimos 18 años, donde uno de los temas que mayor interés había suscitado en el campo de la óptica era la Transmisión Óptica Extraordinaria (EOT). Ebbesen et al. (1998) observaron que la cantidad de luz que es transmitida a través de films metálicos perforados con orificios de tamaño menor que la longitud de onda (orificios subsónicos) y periódicamente distribuidos era mucho mayor que lo esperado, teniendo en cuenta la teoría de Bethe (1944) sobre la transmisión a través de un sólo agujero. Al igual que el caso de los cristales fotónicos y fonónicos, las ideas y estudios desarrollados sobre EOT han sido trasladadas al campo de la acústica. En los últimos diez años, esta área de estudio ha recibido mucha atención. Lu et al. (2007) mostraron experimentalmente la llamada transmisión acústica extraordinaria a través de una red periódica de ranuras subsónicas. Zhou & Kriegsman (2007) predijeron la transmisión de sonido completa a través de una red periódica de orificios de tamaño subsónicas por medio de la técnica de matriz de dispersión, y Hou et al. (2007) demostraron de forma experimental la transmisión acústica extraordinaria a través de una red periódica de orificios subsónicas. La principal contribución a los picos de transmisión, son las resonancias de Fabry- Perot dentro de los orificios. Christensen et al. (2008) calcularon teóricamente bajo la hipótesis de sólido rígido la transmisión a través de redes periódicas de ranuras y orificios cuadrados de tamaño subsónico. Estrada et al. (2008) demostraron tanto de forma teórica como experimental, la Transmisión Acústica Resonante a través de placas perforadas con orificios subsónicas en el rango ultrasónico (placas perforadas sumergidas en agua) con incidencia normal. Este efecto es debido a la resonancia Fabry-Perot de los orificios y a la interacción entre orificios. De hecho, hay que resaltar que, a diferencia del caso óptico, dicha transmisión acústica no es extraordinaria en el caso acústico porque un solo orificio siempre soporta, al menos, un solo modo que transmite el sonido a través de la placa. Por otro lado, se observa, en un determinado rango de frecuencias, una cancelación de la transmisión acústica. Este fenómeno si es extraordinario, ya que hace que la placa apantalle el sonido mucho mejor que cuando no había orificios. Es decir, hacer orificios en una placa viola la

más conocida ley de apantallamiento en Acústica: La ley de la Masa. Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que al igual que en el caso óptico el mínimo de transmisión es debido a la anomalía de Wood (1935).

La barrera construida con postes de madera se diseñó con una forma geométrica de prisma rectangular, definidos por la anchura W_p , la altura h y el espesor d_p . Dos postes contiguos de una misma fila estaban separados por ranuras subsónicas de longitud S_w cuya dimensión era inferior a la longitud de onda del sonido a atenuar. Los postes estaban dispuestos de manera periódica en cada fila, con una periodicidad l_p que era igual a la suma de la anchura del poste y de las ranuras subsónicas. Además, las dos filas de elementos dispersores estaban separadas una distancia d_{ag} . La Figura 1 muestra un esquema de la barrera desarrollada. En la Figura 1 (a) se puede observar la barrera formada por postes de madera alineados en 3D, mientras que en la Figura 1 (b), se observa una imagen 2D de los postes presentando ambas filas una desalineación lateral m . Los mecanismos de atenuación de ruido de este tipo de barreras son las anomalías de Wood y la interferencia destructiva entre los modos Fabry-Perot par e impar. Estos fenómenos dependen de los parámetros geométricos de la barrera, por lo que ésta puede ser sintonizada para reducir un ruido en una determinada banda de frecuencia o un tono puro sin tener un espesor de barreras excesivo (Rubio et al.2018).

Figura 1 Barrera acústica basada en ranuras subsónicas: (a) Vista en 3D (b) Vista en 2D con parámetros geométricos más importantes. La onda incide en la dirección del eje x.



La utilización de estas estructuras presenta una serie de ventajas respecto a las barreras tradicionales: acústicamente, las barreras abiertas consiguen altos niveles de atenuación a muy bajas frecuencias ($f < 500$ Hz), las más difíciles de atenuar. También son sintonizables, se puede elegir la frecuencia o banda de frecuencias en la que la atenuación acústica es máxima, por lo tanto, se pueden utilizar para atenuar diferentes fuentes de ruido, siendo posible diseñar barreras personalizadas, ya que trabajan como filtros acústicos. Estas barreras se pueden considerar ecológicas, ya que en el diseño y construcción de los elementos que las forman, se pueden utilizar materiales obtenidos a partir de residuos.

Otras ventajas son que, debido a que permiten la visión a su través y a su origen escultórico, producen un efecto paisajístico positivo para la población. Sin embargo, no hay que olvidar que existen también importantes desventajas en su utilización: atenúan distintas bandas de frecuencia de pequeño tamaño en función de la geometría utilizada. Además, necesita una anchura mínima mayor que las barreras clásicas para ser efectivo. Por último, la misma fabricación puede ser un condicionante económico debido al gran número de elementos a utilizar. Nuestra línea de actuación va a consistir en potenciar las ventajas y minimizar los inconvenientes en la utilización de estas barreras abiertas, con el fin de conseguir productos competitivos en todos los aspectos. Para conseguir este objetivo utilizaremos estructuras bidimensionales en los que el medio transmisor será el aire, siendo por tanto estos sistemas más sencillos de diseñar ya que solo hay que actuar sobre los postes, en su caso.

2. Objetivos

Los trabajos realizados por nuestro grupo en los últimos años indican que la tecnología utilizada en el diseño de este tipo de barreras puede beneficiarse de materiales que presenten en su fabricación poco o nada de impacto medioambiental. Así, tomando como referencia este tipo de iniciativas, que incluyen diversos ODS, como son: Objetivo 3 (Salud y bienestar), Objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructura), Objetivo 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), Objetivo 12 (Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles), Objetivo 15 (Vida de ecosistema terrestre), en este Proyecto se utilizan un tipo de barreras abiertas como son las basadas en ranuras subsónicas, en las que los postes están fabricados de material reciclado obtenidos a partir de residuos agronómicos, en concreto de la cáscara de coco. La iniciativa de emplear residuos de naturaleza agronómica para reemplazar madera ya tiene sus precedentes. Por ejemplo, la empresa holandesa CocoPallet International (2020) ha tomado como base la economía circular, desarrollando y patentado un prototipo de pallet 100% biológico (reciclando residuos de cáscara de coco). La finalidad es reducir la deforestación, disminuir el gasto económico y reducir la pobreza. En este trabajo se pretende justificar que es posible sustituir el material de madera del que están hechos los postes de la barrera por material reciclado obtenido de los residuos de la cáscara de coco.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de residuos que se generan en el mundo, en este trabajo se considera que la utilización de éstos para la fabricación de barreras acústicas abiertas permitirá mejorar la situación de los habitantes de la región donde se producen tales residuos. Esta idea surge de la colaboración de los autores de este trabajo en una investigación que se está realizando en la subregión de Sanquianga (Colombia) para evaluar la viabilidad de desarrollar un plan de negocio sostenible, generando de esta manera, un aporte al desarrollo socio-económico de esta población. Por lo tanto, este enfoque en el ámbito de la cooperación internacional busca fortalecer la cadena productiva del cocotero de manera sostenible, como cultivo lícito, apoyando la situación socio-económica de la subregión de Sanquianga, Departamento de Nariño (Colombia) y de este modo, generar un aprovechamiento íntegro del consumo del coco cuya cáscara de representa alrededor del 85% del peso de la fruta. Con ello se conseguiría centralizar su comercio, ubicar un posible lugar de elaboración y generar en última instancia un aporte a la economía local.

El objetivo principal de este trabajo es realizar el diseño de una barrera acústica abierta basada en ranuras subsónicas para el uso en zonas urbanas (plantas técnicas e industria) utilizando materiales reciclables. El diseño se realiza utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF), en concreto mediante el software comercial COMSOL Multiphysics®. Hasta ahora, los postes con los que se diseñan estas barreras eran de madera, tal y como muestra la Figura 2 (Rubio et al.2018) donde se observa la barrera situada en cámara anecoica para la realización de las pruebas que caracterizan este tipo de estructuras. Se pretende sustituir

el material de madera por material reciclado obtenido de los residuos de la cáscara de coco. Como mínimo, se quiere conseguir que, compactando las fibras del residuo, el material resultante sea lo suficientemente rígido para que se comporte como la madera.

Figura 2 Barrera acústica abierta basada en ranuras subsónicas realizada con madera (Rubio et al. 2018)



3. Metodología

El trabajo realizado se ha dividido en tres fases: en primer lugar, a partir del residuo de cáscara de coco se elaboró en laboratorio la muestra compactada. Posteriormente se realizaron los ensayos en condiciones controladas para caracterizar dicha muestra acústicamente. Finalmente, con estos resultados se realizó el modelo numérico y se obtuvieron los resultados. En esta sección se detalla el modelo numérico, dejando el detalle de las dos primeras fases para la sección de resultados.

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 barrera acústica, en la simulación el dispositivo propuesto se ha desarrollado considerando una barrera con postes rectangulares rígidos con una longitud infinita. La barrera acústica se considera infinitamente larga con el fin de evaluar la eficacia de esta 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 MEF. En este método se parte de la ecuación de Helmholtz que viene dada por:

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

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

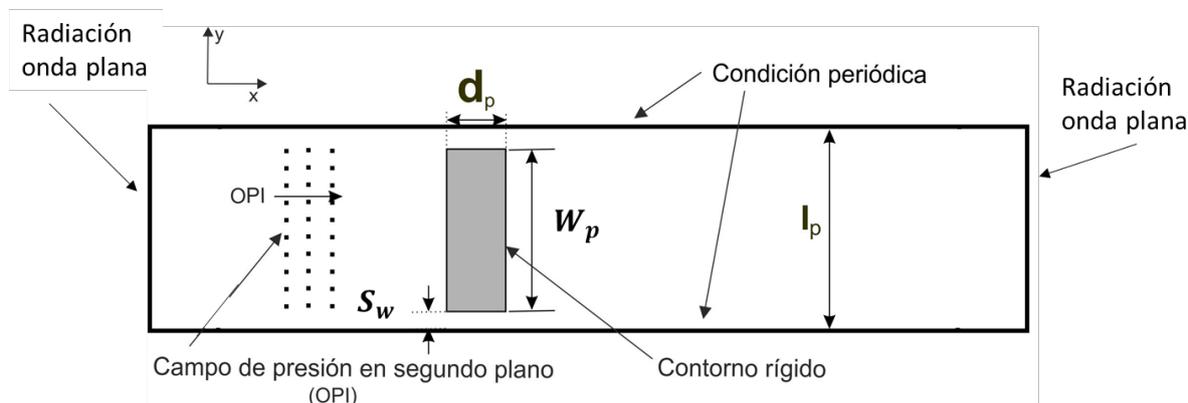
Para abordar el problema mediante el MEF, se debe definir la geometría de la estructura, discretizar el dominio y considerar las condiciones iniciales y de contorno (Reddy, 2019).

Posteriormente, utilizando la ecuación (1) se resuelve numéricamente en cada punto del dominio seleccionado, obteniendo las soluciones al problema.

Las simulaciones se han llevado a cabo analizando numéricamente una estructura formada por dos filas infinitas de postes separados entre sí una distancia d_{ag} , con una periodicidad l_p . Las dimensiones de los postes son $S_w \times d_p$ tal y como se muestra en la Figura 1 (b). Para el caso de considerar la estructura acústicamente rígida se aplica la condición de contorno de Neumann (velocidad de sonido cero) a sus superficies, mientras que si se considera que las superficies tienen absorción se aplica el modelo de Delany-Bazley (1970). 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 dispersada y 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 3. 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 & Sánchez-Pérez, 2013). 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 o *Insertion Loss*, IL) en ese punto, mediante la expresión:

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

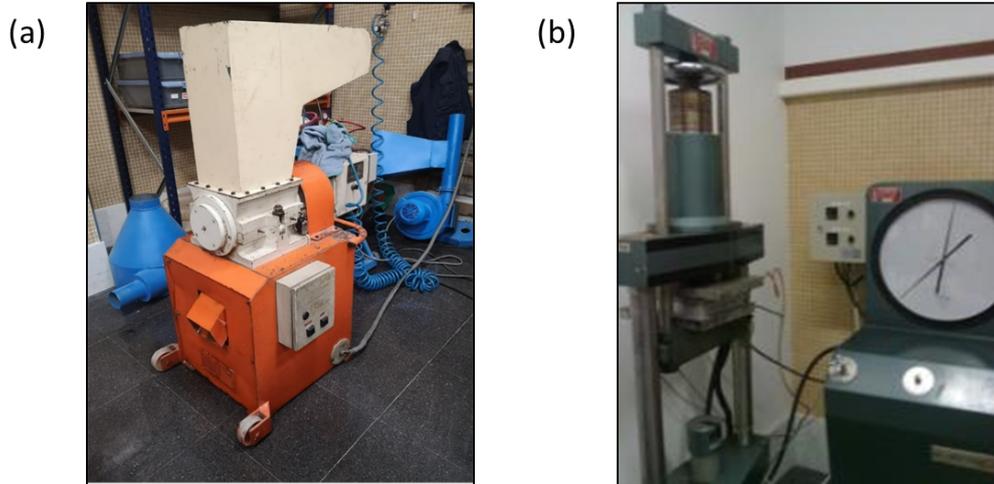
Figura 3: Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno



4. Resultados

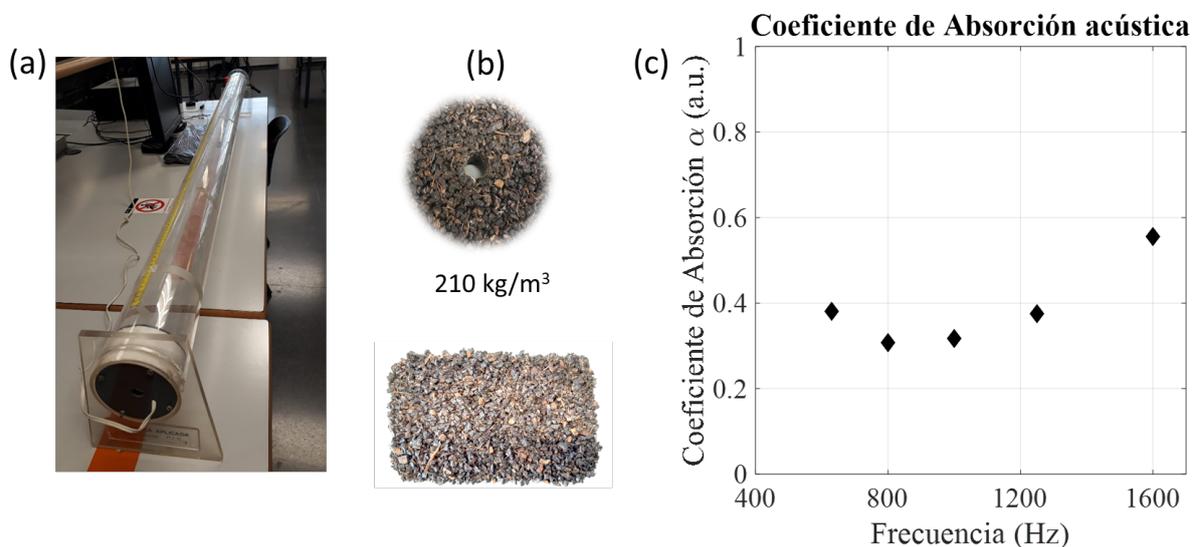
Como ya se ha comentado en la sección anterior, para realizar el modelo con el MEF primeramente se caracterizó el material a utilizar. Para ello, en una primera fase se realizó la preparación de la muestra de residuo de cáscara de coco. Esta fue elaborada por el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Alcoi. La cáscara de coco fue triturada con un molino triturador de cuchillas de 5 kW, Figura 4 (a) y al composite se le realizó una termocompresión con prensa de platos calientes, con fuerza de 200 kg sobre una superficie de 20 x 20 cm con temperatura de 50°C durante 30 minutos, Figura 4 (b). La muestra final, tenía un 20% de resina y una relación: 100:35 (resina:endurecedor), Figura 5 (b).

Figura 4: (a) Molino triturador de cuchillas de 5 kW, (b) prensa de platos calientes.



Mediante ensayo con tubo de Kundt (Kundt, 1868), Figura 5 (a), se caracterizó la muestra obtenida acústicamente, Figura 5 (b), para valorar el coeficiente de absorción en el rango de frecuencias de estudio (400-1500 Hz). Se obtuvo que la muestra, con una densidad aproximada de 210 kg/m^3 , presentaba baja absorción, como se puede observar en la Figura 5 (c).

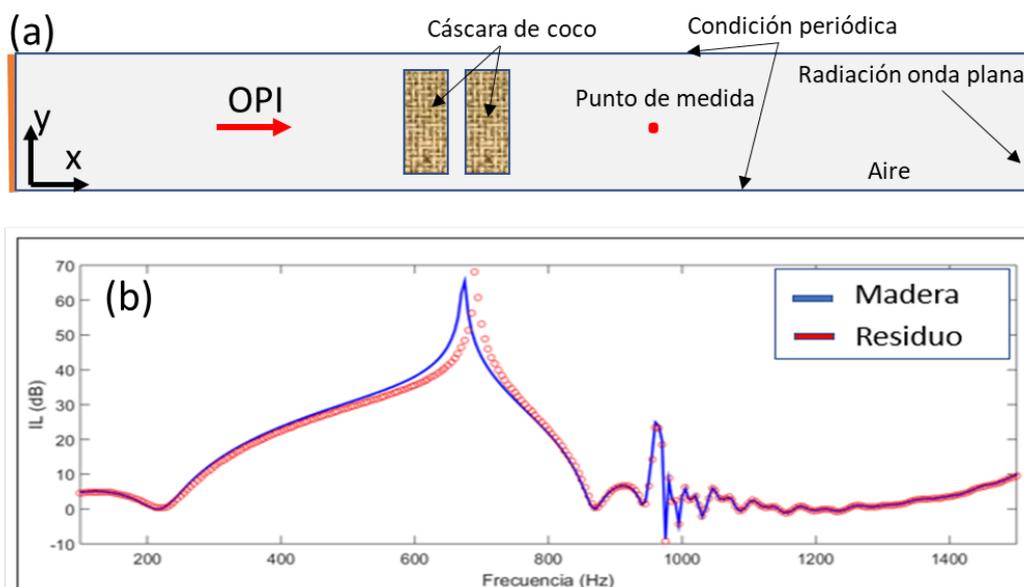
Figura 5: (a) Tubo de Kundt utilizado en el laboratorio para obtener el coeficiente de absorción acústica de la muestra, (b) muestra analizada, (c) coeficiente de absorción acústica de la muestra analizada en función de la frecuencia



Finalmente se desarrolló el modelo numérico y se obtuvo el espectro de atenuación, utilizando la ecuación (2), a un metro de distancia de la barrera. Este modelo está formado por dos bloques de material reciclado, insertados entre paredes periódicas que simulan espejos, así se puede conseguir que la pantalla en la dirección del eje y sea pueda considerar infinita, tal y como se puede observar en la Figura 6 (a). La medida que se utiliza para estimar la efectividad de la pantalla es la pérdida por inserción o atenuación acústica (IL), medida en decibelios (dB). Este parámetro, tal y como se ha comentado anteriormente,

es la diferencia de niveles sonoros antes y después de colocar la pantalla entre el emisor y el receptor. El punto de medida se sitúa a 1m detrás de la pantalla acústica abierta y en este modelo, la onda plana incidente (OPI) viaja de izquierda a derecha. Se obtuvo en ese punto el espectro de atenuación acústica IL (dB) en el rango 100 a 1500 Hz, Figura 6 (b), para el caso de madera (línea azul) y residuo de cáscara de coco (círculos rojos). Se puede observar que los resultados son muy similares en ambos casos, justificando que el residuo de cáscara de coco puede sustituir perfectamente a la madera para la construcción de barreras acústicas abiertas basadas en ranuras subsónicas.

Figura 6 (a) Modelo de la barrera realizado mediante el MEF (b) Espectro de atenuación acústica obtenido detrás de la barrera a 1 metro de distancia



5. Conclusiones

En este trabajo se ha diseñado una barrera acústica abierta 2D con ranuras subsónicas que trabaja en un rango de bajas frecuencias (100 a 1500 Hz). La novedad es la sustitución de la madera por un material reciclable: residuo de cáscara de coco. Según los ensayos realizados, se determina que el material obtenido en laboratorio tras la compactación del residuo de la cáscara de coco tiene baja capacidad de absorción acústica para bajas frecuencias (400-1500 Hz) y una alta densidad (Aprox. 210 kg/m^3). Sustituir la madera (material empleado habitualmente) por la cáscara de coco, contribuye a velar por la conservación de los ecosistemas montañosos, permitiendo la recuperación de los bosques degradados y la protección de su diversidad biológica, además de contribuir a la economía circular de la región productora del desecho.

Referencias

- Agencia Europea del Medio Ambiente (2019). El Medio Ambiente en Europa: Estado y Perspectivas 2020. *Oficina de Publicaciones de la Unión Europea*, Dinamarca
- Bethe, H. A. (1944). Theory of diffraction by small holes. *Physical Review*, 66 (7-8), 163-162
- 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.
- Christensen, J., Martin-Moreno, L. & García-Vidal, F. (2008). Theory of resonant acoustic transmission through subwavelength apertures. *Physical Review Letters*, 101(1), 014301
- CocoPallet International (2020) [Internet] Consultado el 10 de abril de 2023, <https://www.cocopallet.com>
- COMSOL AB, Stockholm, Sweden. (2022). COMSOL Multiphysics® (6.0) [Software]. <https://www.comsol.com>
- Delany, M. E., Bazley, E. N. (1970). *Appl. Acoust*, 3, 05–16
- Ebbesen, T., Lezec, H., Ghaemi, H., Thio, T. & Wolff, P. (1998). Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 39, 667-669
- Ekici, I., Bougdah, H. (2003). A review of research on environmental noise barriers.
- Estrada, H., Candelas, P., Uris, A., Belmar, F., G. d. Abajo & Meseguer, F. J. (2008). Extraordinary sound screening in perforated plates. *Physical Review Letters*, 101(8), 084302
- Evans, G. W., Hygge, S. & Bullinger, M. (1995). Chronic noise and psychological stress. *Psychological Science*, 10(4), 289-323
- Hou, B., Mei, J., Ke, M., Wen, W., Liu, Z., Shi, J. & Sheng, P. (2007). Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves. *Physical Review B*, 76(5), 054303
- Kundt, A. (1868). III. Acoustic experiments. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 35(234), 41-48
- Lu, M. L. X., Feng, L., Li, J., Huang, C., Chen, Y., Zhu, Y., Zhu, S. & Ming, N. (2007). Extraordinary acoustic transmission through a 1d grating with very narrow apertures. *Physical Review Letters*, 99(17), 174301
- Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education.
- Rubio, C., Castiñeira-Ibáñez, S., Uris, A., Belmar, F. & Candelas, P. (2018). Numerical simulation and laboratory measurements on an open tunable. *Applied Acoustic*, 141, 144–150
- Wood, R. W. (1935). Anomalous diffraction gratings. *Physical Review*, 48(12), 928-936
- Zhou, L. & Kriegsmann, G. (2007). Complete transmission through a periodically perforated rigid slab. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(6), 3288–3299

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

