



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA

CAMINOS
apv **MÁSTER
EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Diseño y fabricación de una pantalla acústica abierta con ranuras subsónicas que incorpora material reciclable (Cáscara de coco).

AUTOR: FLOR ÁNGEL PADILLA ANTÚNEZ

TUTORES: CONSTANZA RUBIO MICHAVILA

SERGIO CASTIÑEIRA-IBÁNEZ



Curso Académico 2020 - 2021

RESUMEN

Con la finalidad de hacer una contribución para contrarrestar los efectos medioambientales generados por la contaminación acústica, dar un valor añadido al residuo procedente del consumo de coco y considerando la innovación de las pantallas acústicas abiertas, en este informe se realiza el análisis de estas pantallas. Se ha incorporado a estas pantallas material reciclable (cáscaras de coco) como material rígido, con la finalidad de evaluar la capacidad de atenuación del sonido generada por este material.

Para el desarrollo de este trabajo se iniciará con el estudio bibliográfico sobre el funcionamiento de las pantallas acústicas abiertas y propiedad físicas-químicas de la cáscara de coco. Diseño de la pantalla acústica y su simulación mediante la utilización del Método de Elementos Finitos y en concreto con el software comercial COMSOL Multiphysics 5.5.

Palabras Claves: Pantallas acústicas, reciclaje, cáscara de coco, contaminación acústica, Método de Elementos Finitos.

ABSTRACT

To contribute for counteracting the environmental effects generated by noise pollution, to give added value to waste from coconut consumption and considering the innovation of open acoustic screens, this report analyses these screens. Recyclable material (coconut shells) has been incorporated into these screens as a rigid material, to evaluate the attenuation capacity of the sound generated by this material.

For this work will begin with the bibliographic study of the operation of open acoustic screens and physical-chemical properties of the coconut shell. For the design of the acoustic screen and its simulation, the Finite Element Method (FEM) will be used through the commercial software COMSOL Multiphysics 5.5.

Keywords: Acoustic screens, recycling, coconut shell, acoustics contamination, Finite Element Method.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS.....	6
2.1 Objetivo General	6
2.2 Objetivos Específico	6
3. MARCO TEORICO	7
3.1 Contaminación Acústica	7
3.2 Principios Básicos de Sonido y Ruido	7
3.3 Valoración económica del ruido	11
3.4 Teoría Básica Sobre Pantallas Acústicas.....	11
3.4.1 Reflexión, transmisión y difracción de las ondas sonoras.....	12
3.4.2 Pérdida por inserción.....	13
3.4.1 Integración paisajística.....	14
3.5 Tipología de las Principales Pantallas Acústicas Tradicionales.....	15
3.6 Tipología De Pantallas Acústicas Abiertas	19
3.6.1 Pantalla acústica basada en cristales de sonido	19
3.6.2 Pantallas acústicas con ranuras subsónicas	20
3.7 Comparativa entre las Pantallas Acústicas Abiertas frente a las Pantallas Acústicas Tradicionales	22
3.8 Materiales Normalmente Empleados en la Elaboración de las Pantallas Acústicas ...	23
3.9 Propuesta de Nuevo Material para la Elaboración de Pantallas Acústicas Abiertas ...	23
3.9.1 Caracterización de la Cáscara de Coco	25
3.9.2 Comparativa de absorción acústica entre la cáscara de coco y otros materiales .	26
3.10 Objetivo de Desarrollo Sostenible.....	27
3.11 Método de Elementos Finitos: Comsol Multiphysics 5.5	30
3.12 Preparación del Material	33

4. DISEÑO DE PANTALLA ACÚSTICA MEDIANTE COMSOL.....	35
5. RESULTADOS.....	42
5.1 Ensayos en Laboratorio-Coeficiente de Absorción.....	42
5.1.1 Fundamento teórico.....	42
5.1.2 Resultados obtenidos.....	46
5.2 Densidad de la cáscara de coco.....	47
5.3 Modelización de Pantalla Acústica mediante Comsol.....	48
6. CONCLUSIONES.....	51
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	52
8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	53
9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	58
10. ANEXOS.....	59
ANEXO I: Ensayo en laboratorio-coeficiente de absorción-Tubo de Kundt.....	59
ANEXO II: Resultados obtenidos mediante Comsol.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de Ondas Sonoras	9
Figura 2. Parámetros de las Ondas Sonoras	10
Figura 3. Reflexión, transmisión, difracción y absorción de las ondas sonoras.....	13
Figura 4. Espectro de atenuación	14
Figura 5. Ejemplos de pantallas acústicas metálicas.....	15
Figura 6. Pantalla acústica de vidrio transparente o traslucido	16
Figura 7. Pantalla acústica mixta	16
Figura 8. Pantalla acústica de hormigón	17
Figura 9. Pantalla acústica de madera.....	17
Figura 10. Pantalla acústica vegetal	18
Figura 11. Pantalla acústica abierta basada en cristales de sonido.....	19
Figura 12. Ejemplificación vista isométrico de la distribución una pantalla acústica con ranuras subsónicas	20
Figura 13. Ejemplificación vista planta de la distribución una pantalla acústica con ranuras subsónicas	21
Figura 14. Ranking de los principales países productores de coco a nivel mundial en 2019	24
Figura 15. Gráfico comparativo del coeficiente de absorción.....	26
Figura 16. ODS relacionados con la salud urbana dentro de un enfoque de STP.....	27
Figura 17. Molino triturador utilizado disponible en el departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy	33
Figura 18. Prensa con platos calientes utilizada para la fabricación del material	34
Figura 19. Selección de estudio e interfaz de la física	35
Figura 20. Presión acústica	37
Figura 21. Contorno rígido al sonido	38
Figura 22. Condición periódica.....	38
Figura 23. Radiación de onda plana.....	39
Figura 24. Campo de presión en segundo plano	39
Figura 25. Mallado de estudio.....	40
Figura 26. Diseño del modelo numérico ideal	40
Figura 27. Representación de la máxima y mínima presión en un tubo de impedancia para ondas estacionarias	45
Figura 28. Gráfica coeficiente de absorción acústica.....	46
Figura 29. Esquema de radio interno y externo en la muestra de cáscara de coco	47
Figura 30. Espectro de atenuación acústica para dispersores con material rígido, calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla, variando la anchura de separación (S_w)......	48

Figura 31. Diseño numérico ideal, modelo 2	49
Figura 32. Espectro de atenuación acústica para dispersores con material poco absorbente, calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla, con geometría 1.	49
Figura 33. Diseño numérico ideal, modelo 3	50
Figura 34. Espectro de atenuación acústica para dispersores con material rígido recubierto con capa de lana de roca, calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla, con geometría 1.	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa entre P.A. abiertas y a P.A. tradicionales.....	22
Tabla 2. Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la cáscara de coco	25
Tabla 3. Caracterización de los modelos desarrollados.....	37
Tabla 4. Frecuencia máxima y mínima medibles en el Tubo de Kundt	43
Tabla 5. Máximos y mínimos de presión obtenidos en ensayo coeficiente de absorción-Tubo de Kundt.....	46

AGRADECIMIENTO

Desde lo profundo de mi corazón agradezco infinitamente a **Dios**, por su fidelidad incalculable, amor incondicional y protección divina. Eben-ezer: Hasta aquí nos ha ayudado el Señor.

A mis padres: Roberto Padilla y Lidia Antúnez, enormemente gracias por siempre darme sus votos de confianza.

A mis hermanos: Rosangel y Carlos Roberto, les estaré agradecida infinitamente, por siempre ser mi apoyo incondicional.

A mi sobrinito: Anthony Esteban, gracias por ser un motivo más, por el cual, jamás rendirme.

A mis seres queridos: Familia Padilla García y Grupo “El Escape”.

Amistad de oro: Dariana Ávila, gracias por su apoyo, por cada alegría, lágrima, experiencia, oración, etc. que compartimos y ganamos juntas durante todo este recorrido. ¡Éxitos hoy, mañana y siempre!

A mis tutores: Constanza Rubio y Sergio Castiñeira, gracias por sus enseñanzas, tiempo y conocimientos compartidos durante toda esta experiencia.

¡Con la bendición de Dios, la valentía de mi padre, las oraciones de mi madre, el respaldo incondicional de mis hermanos y la sonrisa de mí sobrinito; iré por muchos éxitos más, hasta el último suspiro!

GLOSARIO

Acústica: Es la disciplina que estudia el sonido en todos sus posibles aspectos: generación, radiación, propagación, confinamiento, etc., así como los recursos para mejorar la amplitud de un ambiente para la música y/o la palabra [1].

Amplitud: En una señal periódica o cuasiperiódica, el máximo valor (o valor de pico) en un periodo [1].

Belio (B): Unidad de intensidad acústica que se expresa como el logaritmo decimal del cociente entre la presión producida por una onda y una presión de referencia [1].

Cámara anecoica: Recinto revestido en todas sus superficies con materiales acústicos de muy alta absorción en el cual se ha eliminado prácticamente toda reflexión sonora [1].

Campo libre: Sonoro en el cual no existen obstáculos para las ondas sonoras [1].

Campo reverberante: Parte del campo sonoro debido a las reflexiones en las diversas superficies de un recinto [1].

Campo sonoro: Distribución de la presión sonora en el tiempo y en el espacio [1].

Coefficiente de absorción sonora: Cociente entre la energía sonora que es absorbida por una superficie y la que incide sobre ella [1].

Decibelios (dB): Unidad de intensidad acústica equivalente a la décima parte de un 1 belio [1].

Difracción: Cambio producido en la propagación de una onda en presencia de un obstáculo [1].

Energía: Magnitud física asociada a un determinado sistema que indica, por ejemplo, la capacidad de este de realizar trabajo mecánico [1].

Hertz (Hz): Unidad que indica el número de repeticiones de un fenómeno por unidad de tiempo [2].

Reverberación: Persistencia del sonido en un ambiente acústico cerrado o semicerrado aún después de interrumpida la fuente, debida a la acumulación de energía sonora debido a las reflexiones [1].

Ruido: Es un sonido no deseado y molesto. Es aquel, producido por la mezcla de ondas sonoras de distintas frecuencias y distintas amplitudes [3].

Sonido: La vibración de las moléculas de aire provoca una variación de la presión atmosférica, es decir, el paso de una onda sonora produce una onda de presión que se propaga por el aire [3].

Frecuencia: Número de variaciones de presión por segundo. Se expresa en ciclos por segundo o hertzios, Hz [3].

Presión acústica: La variación de la presión atmosférica en un punto consecuencia de la propagación a través del aire de una onda sonora [3].

ABREVIACIONES

λ : Longitud de onda

A: Amplitud

cm: centímetros

dB: Decibelio

EEU: Agencia Europea del Medio Ambiente

Hz: Hertz

m: metros

OMS: Organización Mundial para la Salud

P.A.: Pantalla acústica

Pa: Pascal

T: Período

Ton: Toneladas

α : Coeficiente de absorción sonora

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), entre otras instituciones han declarado de forma enérgica sobre la afección generada por el ruido en la salud humana a corto y largo plazo. Dejando evidencias que estas perturbaciones se ven reflejadas a nivel fisiopatológicas, psicológico y sociales [4].

En el diario vivir, se está expuesto a diversas fuentes de ruidos, entre ellas principalmente: tráfico automovilístico, obras de construcción, restaurantes y ocio nocturno, etc. La sinergia de estas actuaciones en altos niveles y de manera constante, generan perturbaciones sobre la calidad de vida, por ello, la importancia en adoptar soluciones eficientes y sostenibles con el medioambiente para reducir el impacto generado por la contaminación acústica.

Se pueden emplear distintas técnicas para reducción del ruido: *actuando sobre la fuente*, en caso de ser posible, se debe actuar sobre la vibración directamente colocando elementos dispersores de vibraciones como muelles o bancadas de inercia. La segunda opción se basa en el *control del ruido en la propagación*, esta atenuación se origina al provocar una pérdida de energía producida por obstáculos y barreras que se encuentra la onda en su propagación. Algunos de estos métodos son: modificación de la orientación de la fachada, cerramientos con cabinas que reducen el nivel de emisión en el exterior de estas, pantallas acústicas, etc [5]. El desarrollo de este informe se enfocará en la segunda opción, específicamente en el diseño pantallas acústicas.

Esta técnica se emplea para controlar el ruido en fase de transmisión, haciéndose necesaria su implementación cuando es imposible actuar directamente sobre la fuente de ruido. Su funcionamiento se basa en un medio continuo de material rígido que intercepta el sonido, interponiéndose entre la fuente emisora y el receptor, de esta manera el sonido se atenúa y disminuye la intensidad con la que es percibida por el receptor.

Las pantallas acústicas tradicionales son dispositivos pasivos utilizados para controlar el ruido en la fase de transmisión. Estos mecanismos están formados por materiales rígidos con densidad superficial superior a 20 kg/m^2 [6].

Con el objetivo de modificar el diseño de las pantallas acústicas tradicionales e incorporar nuevos mecanismos de control de ruido, Castiñeira-Ibáñez et al, han realizado nuevos diseños de pantallas acústicas abiertas [7].

Según un estudio realizado por Peiró-Torres et al, han determinado que las pantallas acústicas abiertas poseen una serie de ventajas estructurales, en comparación con las tradicionales, debido a que éstas ofrecen permeabilidad al viento y al agua, no requieren gran volumen de cimentación (reducen los esfuerzos cortantes) y tiene menor momento de vuelco (menor efecto vela producida

por la acción de contacto con el viento). Estas ventajas no solo implican un menor coste, sino que también aumentan su eficiencia en la instalación y generan una menor alteración en el régimen del viento en la zona de implementación [8].

Las pantallas acústicas abiertas surgen en la última década del siglo pasado, con ello, dieron origen a las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido, diseñadas por Sánchez-Pérez et al, este diseño se basó explícitamente en el proceso de dispersión múltiple [9]. Posteriormente, se propuso un dispersor formado por un material rígido, absorbente y con comportamiento de resonador, incluyendo los tres mecanismos involucrados para el control de ruido; este avance fue diseñado por Romero García et al [10]. Tomando como referencia de los resultados obtenido en los avances antes mencionados, Castiñeira-Ibáñez et al diseñaron y homologaron para la puesta en marcha la primera pantalla acústica abierta basada en cristales de sonido [7].

A partir de toda esta evolución teórica-experimental, se diseñó la pantalla acústica abierta basada en ranuras subsónicas [11], siendo una alternativa a la pantalla acústica clásica y a las pantallas acústicas abiertas basadas en cristales de sonido. Este nuevo avance en la acústica, de igual forma que las pantallas de cristales de sonido, pueden ser sintonizadas en función de los parámetros geométricos.

En el desarrollo en este informe, toma como referencia el diseño de las pantallas acústicas con ranuras subsónicas con estructura periódica para bajas frecuencias (menores a 1500 Hz). Se ha considerado como material rígido de relleno un material reciclable (cáscara de coco), al cual se le evalúa su capacidad de atenuación al sonido. Empleando la cáscara de coco como material de relleno, se reduce la cantidad de residuo generado por este sector, proporcionando un valor añadido al residuo creado por el consumo de esta fruta.

Con la finalidad de contribuir con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 (ODS), esta investigación sirve como una aportación a un proyecto de Cooperación al Desarrollo que se está realizando en Sudamérica: “Evaluación de la sostenibilidad mediante una fábrica artesana de productos de coco en la subregión de San Juan, Colombia”.

Esta investigación generará un aporte para el cumplimiento de los ODS 2030, enfocándose en los siguientes objetivos:

- 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
- Objetivo #17: Alianzas para lograr los objetivos

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una pantalla acústica abierta con ranuras subsónicas que incorpore material reciclable (cáscara de coco).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Determinar, mediante pruebas en laboratorio, el coeficiente de absorción del sonido generada por la cáscara de coco.
- Realizar una comparativa entre las pantallas acústicas realizada con materiales tradicionales frente a las pantallas acústicas abiertas con ranuras subsónicas.
- Conocer la contribución medioambiental generada por la implementación la cáscara de coco como material de relleno en las pantallas acústicas abiertas.

3. MARCO TEORICO

3.1 CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

La degradación del medio ambiente es uno de los mayores problemas que se plantean actualmente en nuestro entorno. El desarrollo incontrolado de las actividades humanas ha producido la contaminación del aire y de las aguas, el efecto invernadero, la desaparición de extensas zonas de vegetación, la desertización y la acumulación de grandes cantidades de residuos tóxicos, entre otros efectos. Con todo ello, se ha generado un incremento muy considerable de los niveles sonoros existentes en los países industrializados [12].

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición prolongada al ruido ambiental se asocia con un mayor riesgo de resultados de salud fisiológico y psicológico negativos [13].

3.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE SONIDO Y RUIDO

- **Diferencia entre sonido y ruido**

El sonido es la perturbación que se propaga por un medio, comúnmente el aire, transformándose en una variación de presión detectada por el oído. Según estudios el oído humano es capaz de percibir frecuencias comprendidas entre 20 a 20kHz, los ultrasonidos (frecuencias mayores de 20kHz) y los infrasonidos (frecuencias inferiores a 20Hz) no son captados por el oído humano [14].

La determinación si una propagación vibratoria se define como sonido o ruido es un criterio netamente subjetivo, debido a que no existe un parámetro que los clasifique como tal. Este último término está relacionado con la contaminación acústica, ya que este se produce cuando un ruido es considerado como contaminante, dejando como resultado efectos nocivos sobre los seres humanos.

El nivel del ruido se mide en decibelios (dB) y es una unidad logarítmica, adimensional y matemáticamente escalar [15].

- **Principales fuentes de ruido**

Claramente, la contaminación acústica no es un nuevo fenómeno al que se enfrenta la humanidad, sino que, este siempre ha estado presente en el diario vivir. Desde tiempos inmemorables la humanidad ha estado expuesta a diversas fuentes de ruido, con diversos orígenes y características físicas. La Naturaleza, por sí misma, también es considerada como una fuente de ruido inagotable (erupciones volcánicas, terremotos, tormentas, etc.) las cuales pueden alcanzar intensidades de ruido considerables. Las fuentes de ruido más agresivas son de origen antropogénicas, generando

una importante relevancia en el entorno que se generan como en los medios urbanos, centros de trabajo, etc.

En las últimas décadas como resultado de la evolución experimentada por los países desarrollados, ha surgido un aumento en la calidad de vida de los ciudadanos, pero es indiscutible que este avance está dejando huella considerable en la contaminación ambiental, en particular, los ruidos y vibraciones [16].

- **Naturaleza del sonido**

El sonido consiste en una vibración mecánica de un medio elástico (gaseoso, líquido o sólido) a través del cual se propaga la energía por medio de ondas progresivas. La partícula acústica es lo suficientemente grande para contener millones de moléculas, y lo suficientemente pequeñas para que las magnitudes físicas sean constantes [17].

- **Propagación del sonido**

Cuando se genera una vibración en el aire, este se propaga en forma de ondas de presión, estas no solo se producen a lo largo del tiempo, sino que también se propagan por el espacio a una cierta velocidad. La velocidad de propagación en los fluidos líquidos y gaseosos, está determinada por peso molecular y temperatura del medio en el que se transporta [18].

- **Las ondas sonoras**

Dependiendo de la relación entre el sentido de propagación y oscilación, las ondas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Ondas longitudinales:** los desplazamientos son en dirección en que se desplaza la onda.
- **Ondas transversales:** los desplazamientos son perpendiculares a la dirección en la que se propaga la onda.
- **Ondas de torsión:** los desplazamientos giran en un plano perpendicular a la dirección de la onda [19].

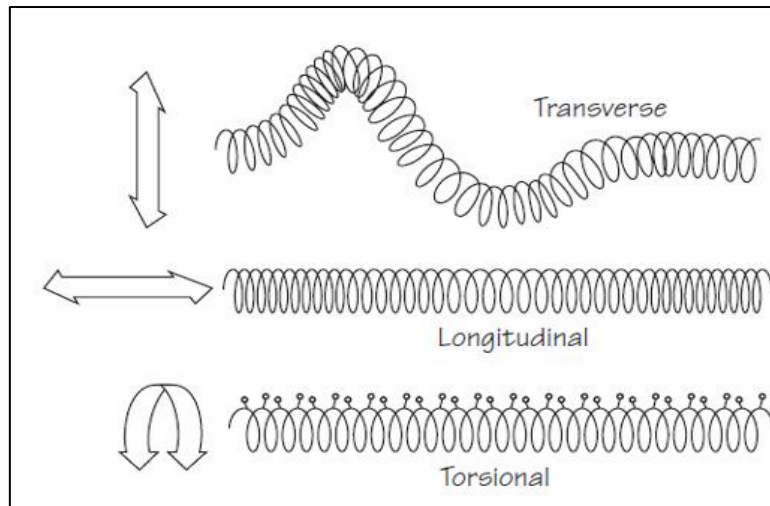


Figura 1. Tipo de Ondas Sonoras

Fuente: [19]

En la Figura 1 se puede observar la tipología de las ondas sonoras haciendo clasificación según su sentido de propagación y oscilación.

Las ondas transversales y de torsión en los fluidos se extinguen rápidamente, por ello, cuando una onda sonora se produce en un fluido (agua y aire) se considera únicamente la onda longitudinal. La ejemplificación de estas tres ondas se puede identificar, a efectos prácticos, únicamente en sólidos [19].

Para el desarrollo de este informe, consideraremos que la propagación de la onda sonora en el aire, se genera a través de una onda longitudinal.

Los parámetros ondulatorios que definen una onda sonora son los siguientes.

- **Frecuencia (f):** es el número de pulsaciones de una onda acústica senoidal que ocurre en el tiempo de un segundo. Equivalente al inverso del periodo. La unidad de medida es el hercio (Hz) [20].
- **Período (T):** tiempo que tarda en producirse un ciclo completo de la onda sonora, su unidad es el segundo (s) [20].
- **Velocidad del sonido (c):** es la velocidad con la que se propaga la onda acústica en el medio elástico, se mide en metros por segundo (m/s). La velocidad del sonido en el aire, para temperatura de 20°C y presión de 1 atm, es de 344 m/s [21].
- **Amplitud:** es el valor máximo del movimiento de una onda [22].

- **Longitud de onda (λ):** distancia entre puntos análogos en dos ondas sucesivas, su unidad de medida es el metro (m) [20].

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \times T \quad (1)$$

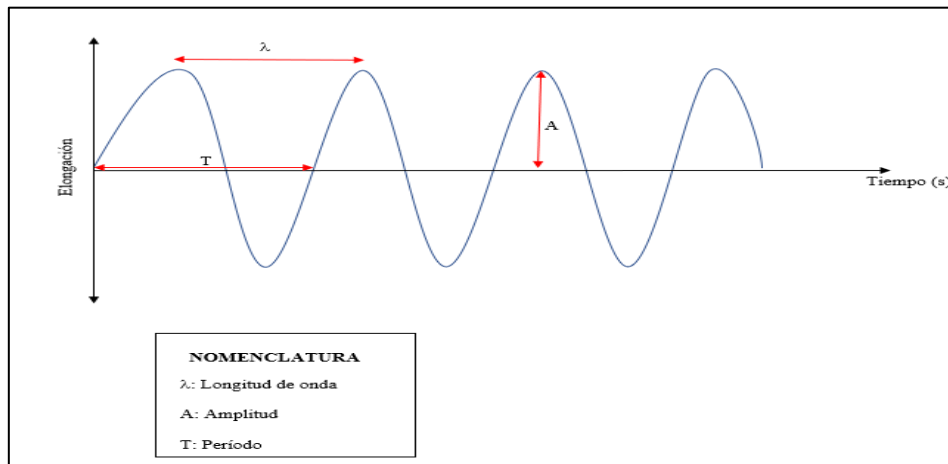


Figura 2. Parámetros de las Ondas Sonoras

En la Figura 2 se puede observar los principales parámetros ondulatorios que definen a una onda sonora.

- **Control de Ruido**

Si bien es cierto que las ondas se debilitan en su amplitud conforme van alejándose de la fuente emisora de sonido, es a esto lo que se define como atenuación de la onda. Aunque la amplitud de las ondas decrece, la frecuencia y longitud de onda se mantienen constantes, debido a que éstas dependen sólo de la fuente sonora.

La disminución de la amplitud viene cuantificada por la Ley cuadrática inversa, la cual hace referencia a algunos fenómenos físicos cuya intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia al centro donde se originan.

Al doblar la distancia de escucha el nivel de intensidad disminuye en 6 dB por la relación de los logaritmos:

$$\Delta dB = 20 \times \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = 20 \times \log\left(\frac{2 \times R_2}{R_1}\right) = \frac{6dB}{dd} \quad (2)$$

Si se midiese en escala lineal disminuiría la mitad de la intensidad, pero en escala logarítmica únicamente disminuye 6dB [22].

3.3 VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RUIDO

Los estudios realizados sobre valoración económica del ruido se han centrado, principalmente, en establecer valores a las afectaciones, bajo el enfoque de la percepción de molestias asociadas a la exposición a diferentes niveles de ruido y el efecto que tiene sobre el valor de las viviendas. Así, los diferentes estudios encontrados en la literatura económica buscan establecer la disminución de los ruidos causados por diversas fuentes, entre las que se tienen como más comunes el ruido generado por tráfico vehicular, tráfico aéreo y transporte férreo [23].

3.4 TEORÍA BÁSICA SOBRE PANTALLAS ACÚSTICAS

Las pantallas acústicas tradicionales producen un efecto de atenuación del ruido en la zona del receptor. La eficacia frente a la transmisión del ruido viene dada por la capacidad de aislamiento de la pantalla que, además de sus dimensiones, depende del material de construcción, así como de su emplazamiento relativo a la situación de la fuente emisora y de la zona de recepción a proteger.

El funcionamiento de una pantalla acústica tradicional consiste en que al momento que es generado un sonido, la onda sonora pasa a través de la una pantalla acústica, esta onda generada es transmitida, absorbida, reflejada, y difractada, dando como resultado una reducción del nivel sonoro.

Considerando que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia ($\lambda=c/f$), por ello, se busca reducir los niveles sonoros producidos a bajas y medias frecuencias. La atenuación en estos rangos de frecuencia es más compleja, debido a que el recorrido de la longitud de onda es mayor y pueden llegar a traspasar la barrera.

La eficacia de las pantallas acústicas se centra en dos parámetros físicos: el aislamiento acústico y el coeficiente de absorción acústica. El primer parámetro hace referencia a la cantidad de energía acústica que atraviesa la pantalla acústica en dirección hacia el receptor, y el segundo es la cantidad de energía producida por la onda sonora que se refleja en dirección a la fuente. Para obtener una alta eficiencia en las pantallas acústicas, el diseño se debe de enfocar en obtener altos resultados en estos dos parámetros [24].

La finalidad de instalar una pantalla acústica radica en reducir los niveles sonoros hasta alcanzar niveles por debajo de los valores límites establecidos por la legislación vigente, ésta haciendo diferenciación según el tipo de área acústica y horarios (día, tarde y noche) donde se genera el ruido.

Para realizar un correcto diseño de estas pantallas se debe de considerar diferentes factores p. ej. las dimensiones (alto, ancho y espesor), separación con la fuente de sonido, etc. El material de relleno que se empleará es uno de los aspectos más críticos (densidad superficial), en este informe nos enfocaremos en analizar este factor, empleando como relleno un material reciclable (cáscara de coco).

3.4.1 Reflexión, transmisión y difracción de las ondas sonoras

Para comprender cuál es el funcionamiento básico de las pantallas acústicas tradicionales es necesario definir estos tres fenómenos que experimenta el sonido en su encuentro con un cambio de medio físico.

Cuando una onda sonora se propaga a través de un medio y encuentra a su paso una superficie de separación con otro medio, se origina una onda reflejada en el medio de origen y una onda transmitida. Siempre que exista una discontinuidad o un cambio en el medio en el cual se propaga la onda acústica, esta experimentará una reflexión [25].

Se determina “sonido directo” al sonido que viaja por el camino más corto, y “sonido reflejado” al que impacta con el obstáculo ubicado entre el emisor-receptor y que finalmente vuelve al punto de recepción.

Si se considera únicamente la influencia del terreno en la propagación del sonido entre el emisor y el receptor en un espacio abierto sin pantalla acústica, la propagación del sonido tendría dos caminos. El “sonido directo” el que llegaría al receptor, al cual se le debe sumar la contribución proveniente del “sonido reflejado” en el terreno. Se inició a estudiar esta fenomenología en los años 50, para tener una buena sistematización se pueden consultar los siguientes trabajos: [26], [27], [28] y [29]. Llegando a la conclusión que el margen de frecuencia en los que se produce una interferencia destructiva depende de forma crítica de la resistividad al flujo de aire en la superficie del terreno, quien es el causante de los cambios de fase debidos a la reflexión de la onda incidente [25].

Se conoce como “difracción del sonido” al cambio de dirección de las ondas incidentes al pasar por un medio con una cierta velocidad de propagación. La ley de propagación rectilínea de las ondas sonoras, no es estrictamente válida, sino que, en ciertos puntos las ondas sonoras se curvan en las zonas cercanas de a los obstáculos. Para validar este fenómeno, se debe comparar las dimensiones del obstáculo con la longitud de onda de las ondas sonoras, si esta es mucho mayor que las dimensiones del obstáculo, este fenómeno es muy difícil de apreciar [25].

La difracción se localiza en las zonas de sombra sonora, por ello la importancia de considerar la relación entre la longitud de onda, las propiedades direccionales de la fuente y la modelización del terreno.

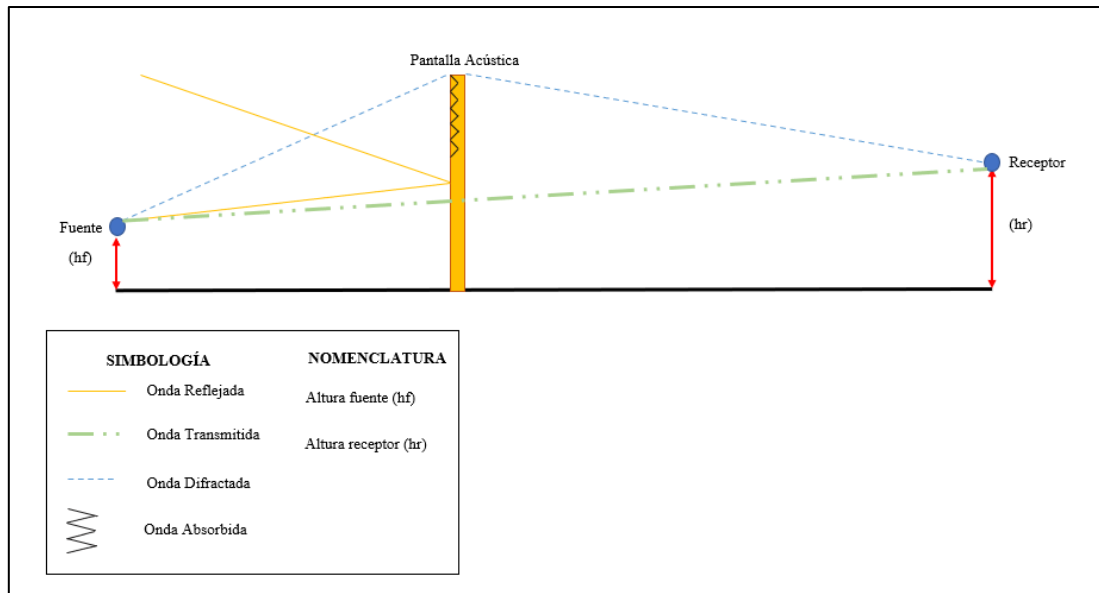


Figura 3. Reflexión, transmisión, difracción y absorción de las ondas sonoras

En la Figura 3 se puede observar las ondas sonoras que interactúan cuando un sonido es generado desde una fuente, luego este se intercepta con un obstáculo (pantalla acústica) y posteriormente llega al receptor.

3.4.2 Pérdida por inserción

Se denomina zona de sombra al área protegida por la pantalla acústica, la atenuación que se genera en esta zona se denominada pérdida por inserción (en inglés: “Insertion Loss” (IL)). Este parámetro se estima como la diferencia de la presión sonora registrado en un mismo punto con y sin pantalla acústica, Castiñeira-Ibáñez et al [30].

La fórmula para estimar la pérdida por inserción (IL) en un punto, está dada por la siguiente expresión:

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_d}{P_i} \right| (dB) \quad (3)$$

Donde:

P_d : presión sonora en el receptor sin pantalla acústica

P_i : presión sonora en el receptor con pantalla acústica

En este trabajo se va a utilizar la representación gráfica de la IL (dB) frente a la frecuencia (Hz). Esta gráfica se denomina espectro de atenuación en banda fina y se obtiene en un punto detrás de la pantalla a un metro de distancia. El rango de frecuencia estudiado comprende de 100 a 1500 Hz (bajas frecuencias).

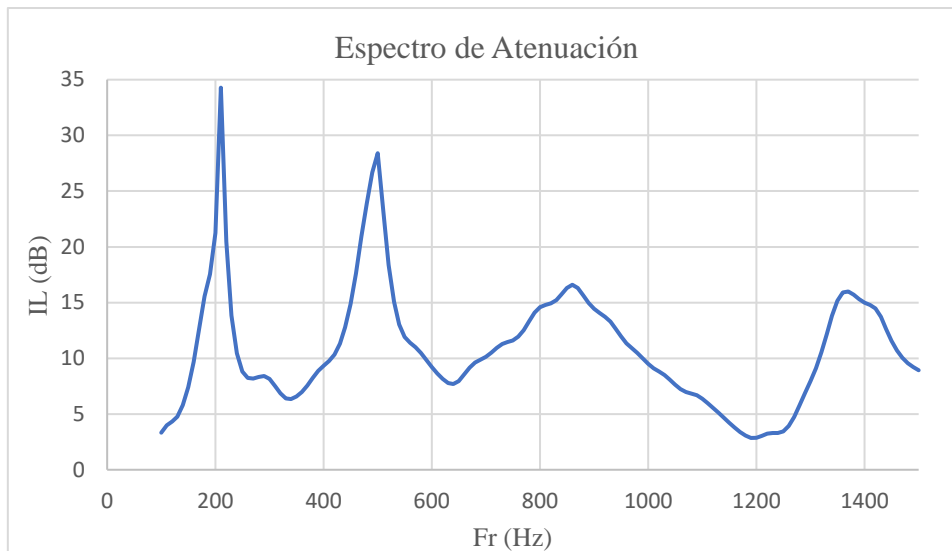


Figura 4. Espectro de atenuación

En el gráfico de la Figura 4 todo valor por encima de 0 dB indica que está siendo atenuado por la pantalla, en menor o mayor medida.

3.4.1 Integración paisajística

De manera general, sin importar el sitio donde se instalará la pantalla acústica, la estética de ésta es uno de los aspectos más importantes para los clientes. Es por este motivo la importancia de comprobar que cumplan con los parámetros técnicos que exige la legislación, verificar una correcta funcionalidad y conseguir una adecuada integración paisajística donde será instalada [25].

Considerando que el diseño de esta pantalla acústica se realizará con material natural (cáscara de coco), a priori, el impacto paisajístico no se considera afectado en gran magnitud. Haciendo la comparativa de este material empleado con los materiales de relleno utilizados tradicionalmente (hormigón, ladrillo, vidrio, etc.) es evidente que éstos último, de origen artificial, dan como resultado una peor integración con el entorno.

3.5 TIPOLOGÍA DE LAS PRINCIPALES PANTALLAS ACÚSTICAS

TRADICIONALES

Entre los tipos de pantallas acústicas comúnmente más empleados, se encuentran los siguientes [31]:

- **Pantallas acústicas metálicas**

Están formadas por dos láminas de metal, normalmente de acero, con un núcleo de lana mineral entre ambas. La densidad del núcleo y el espesor de las caras metálicas varía significativamente cuando el núcleo está adherido en su totalidad de acero.



Figura 5. Ejemplos de pantallas acústicas metálicas

Fuente: [31]

En la Figura 5, en la imagen de la izquierda, se puede observar una pantalla metálica realizadas con panel prefabricado, con este mecanismo se obtiene un excelente comportamiento mecánico usando espesores de chapa muy reducidos debido a la utilización de un adhesivado entre el núcleo y el metal, además de la alta densidad de la lana de roca empleada.

En la Figura 5, en la imagen de la derecha, se puede observar una pantalla metálica armadas íntegramente con elementos mecánicos. Están formados a base de capas de diferentes materiales, requieren un mayor espesor de las chapas metálicas dado que toda la resistencia mecánica la soportan las caras de la pantalla. Habitualmente se emplea muy baja densidad en la lana de roca alojada en su interior.

- **Pantalla acústica de vidrio transparente o traslucido**

Existen diferentes tipos de pantallas transparentes, estas pueden ser de: metacrilato PMMA (material más empleado), policarbonato o vidrio de seguridad. Estos materiales ayudan, adicional de cubrir, a reducir el ruido y cumplir una función visual para interferir mínimamente en la visibilidad del entorno. Poseen baja capacidad de absorción acústica y pueden llevar tratamiento antigrafiti.



Figura 6. Pantalla acústica de vidrio transparente o traslucido

Fuente: [31]

- **Pantalla acústica mixta**

Estas pantallas están formadas generalmente por la mezcla de una pantalla acústica de metacrilato (material reflectante) en la parte superior y material absorbente en la parte inferior (hormigón, madera, etc.).



Figura 7. Pantalla acústica mixta

Fuente: [31]

- **Pantalla acústica de hormigón**

Estas pantallas se componen de una estructura de hormigón armado revestida por dos capas de conglomerado de madera mineralizada y cemento. En los extremos se colocan bandas macizas de hormigón para permitir un correcto encaje en cualquier viga estándar de acero.



Figura 8. Pantalla acústica de hormigón

Fuente: [31]

- **Pantalla acústica de madera**

En su mayoría son fabricadas con madera nórdica, con este material se consiguen altos niveles de atenuación de sonido debido al cerramiento hermético de las juntas. Habitualmente son empleadas en zonas anexas a vías pecuarias.



Figura 9. Pantalla acústica de madera

Fuente: [31]

- **Pantallas acústicas vegetales**

Barreras realizadas a partir de estructuras metálicas que alojan en su entramado elementos que posibilitan el desarrollo de especies vegetales: reciclados, desperdicios de alfombras, restos de papel, materiales fibrosos, desechos de jardines, grava etc. Igualmente, la base de estas pantallas se acondiciona para permitir el desarrollo vegetal.



Figura 10. Pantalla acústica vegetal

Fuente: [31]

3.6 TIPOLOGÍA DE PANTALLAS ACÚSTICAS ABIERTAS

A finales de los 90's, surgió una nueva línea de investigación, esto se realizó en aras de encontrar nuevos sistemas de pantallas [30].

3.6.1 *Pantalla acústica basada en cristales de sonido*

Esta es una de las primeras alternativas a las pantallas acústicas clásicas, está formada por un conjunto de dispersores acústicos aislados, ordenados de forma cristalina, utiliza la dispersión múltiple como mecanismo de control de ruido [32].

Este tipo de pantallas están diseñados por dispersores elaborados con materiales rígidos y en el medio hay aire. La forma de los dispersores está relacionada con las propiedades de atenuación que tiene el sistema en conjunto [33]. La geometría más utilizada, en el caso bidimensional, es la cilíndrica. Independientemente de la forma, la dispersión de la onda incidente tiene contacto en todos y cada uno de los dispersores de la pantalla acústica [30].

Una de las principales ventajas de estas pantallas es que no requieren de grandes cimentaciones, son visualmente permeables, más estéticas y sintonizables a cada problema de ruido [32].

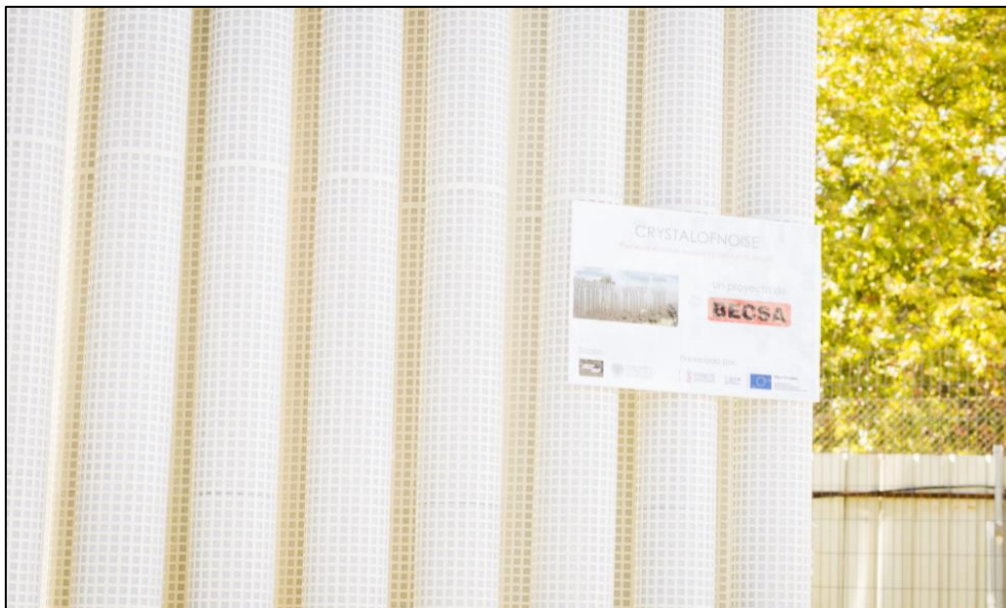


Figura 11. Pantalla acústica abierta basada en cristales de sonido

Fuente: [32]

3.6.2 Pantallas acústicas con ranuras subsónicas

En 1998 se observó a través de una película metálica perforada con matrices con ranuras subsónicas una extraordinaria transmisión óptica [34]. Tomando como referencia este descubrimiento, se iniciaron a realizar estudios de la naturaleza ondulatoria aplicándola con un enfoque de electromagnética y acústica.

En 2007 Lu et al demostró de manera teórica-práctica la transmisión acústica a través de una rejilla de 1D con ranuras subsónicas [35]. Estrada et al en 2008 introdujo que las anomalías de manera teórica-prácticas que las Wood [36] eran las responsables del excelente comportamiento en las placas perforadas con separación subsónicas, determinando como principales criterios a la separación y el arreglo de la geometría [37].

Siendo conscientes del avance realizado, se diseñó una nueva pantalla acústica basada en ranuras subsónicas, considerada como un evidente progreso en la acústica y en el diseño de las pantallas acústicas.

Tomando como referencia, el avance teórico-experimental anteriormente citado, y con la finalidad de abrir un nuevo campo de investigación, el desarrollo de este informe se basará en el diseño de una pantalla acústica abierta con ranuras subsónicas empleando como material la cáscara de coco.

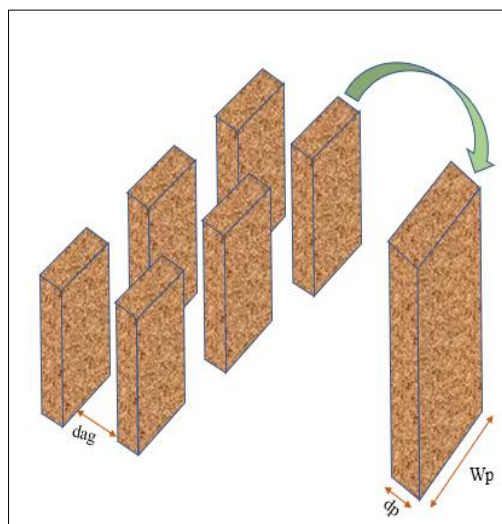


Figura 12. Ejemplificación vista isométrico de la distribución una pantalla acústica con ranuras subsónicas

Donde:

dag: separación entre fila de dispersores; **dp:** espesor de dispersor; **Wp:** ancho de dispersor.

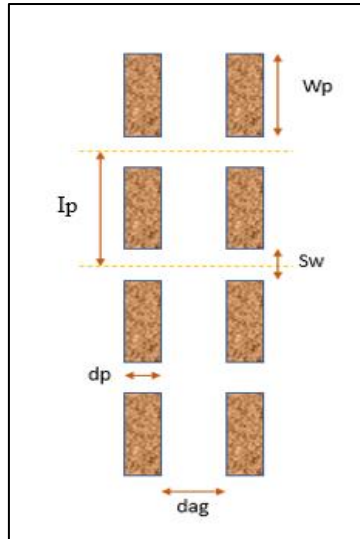


Figura 13. Ejemplificación vista planta de la distribución una pantalla acústica con ranuras subsónicas

Donde:

W_p : ancho de dispersor; **Sw :** anchura de ranura; **I_p :** parámetro de red (W_p+Sw); **dp :** espesor de dispersor; **d_{ag} :** separación entre fila de dispersores.

En la Figura 12 y 13 hace referencia a la nomenclatura empleada en el diseño de las pantallas acústicas, en vista isométrico y planta respectivamente.

3.7 COMPARATIVA ENTRE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS ABIERTAS FRENTE A LAS PANTALLAS ACÚSTICAS TRADICIONALES

Tabla 1. Comparativa entre P.A. abiertas y a P.A. tradicionales

Criterio	P.A. Tradicionales	P.A abiertas
Genera atenuación acústica.	X	X
Mejor atenuación de ruido en bajas frecuencias.		X
Diseño adaptable para frecuencias sintonizables.		X
Se puede lograr una integración paisajística.	X	X
Menor tamaño de cimentaciones.		X
Concentra menos calor interno.		X
Visión óptica menos obstaculizada.		X
Diseño con valor artístico.	X	X
Mayor permeabilidad ante el viento.		X
Menor retención de aguas superficiales.		X

En la Tabla 1 se analizan 10 criterios fundamentales para el diseño e instalación de las pantallas acústicas, evaluando principales aspectos como: la eficiencia, coste de cimentación e integración paisajística. Dejando en evidencia que las pantallas acústicas abiertas presentan mayor ventaja frente a las tradicionales.

3.8 MATERIALES NORMALMENTE EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE LAS PANTALLAS ACÚSTICAS

Para la elaboración de las pantallas acústicas tradicionales normalmente se emplean distintos tipos de materiales como ser: hormigón, metal, madera, vidrio, etc. Durante el proceso de su fabricación estos requieren de grandes consumos de recursos. Al finalizar su vida útil se convierten en residuos que muy difícilmente pueden ser reciclados. Estas pantallas por estar elaboradas con materiales artificiales, generan un mayor impacto visual, alterando considerablemente el paisaje donde estas son instaladas [38].

Con la finalidad de realizar un aporte en la acústica medioambiental, actualmente se están realizando investigaciones para evaluar distintos materiales reciclados o basados en fibras naturales: diferentes tipos de textiles, espumas, textiles naturales, etc, en la elaboración de las pantallas acústicas.

La finalidad de emplear estos materiales, aparte de hacer una reducción de costes considerable, se toma como principal objetivo utilizar materiales que sean de difícil reciclaje. Estos materiales absorbentes aún son objeto de estudio a nivel estatal y europeo, para sustituir los materiales clásicos por estos [24].

Por las razones antes mencionadas, esta investigación será objeto de estudio para evaluar la cáscara de coco como material para la elaboración de los bloques que constituirán a la pantalla acústica abierta con ranuras subsónicas.

3.9 PROPUESTA DE NUEVO MATERIAL PARA LA ELABORACIÓN DE PANTALLAS ACÚSTICAS ABIERTAS

La iniciativa de emplear los residuos del coco para reemplazar la madera y salvar los árboles, ya tiene sus precedentes, un ejemplo de ello es la empresa holandesa CocoPallet International. Esta empresa ha tomado como base la economía circular, desarrollando y patentado un prototipo de pallet 100% biológico (reciclando residuos de cáscara de coco) [39].

Esta investigación fue desarrollada por investigadores de la Universidad de Wageningen de Holanda. CocoPallet ha ganado importantes premios y reconocimiento por su innovación, este avance ha sido considerado como un proceso beneficioso para todos, salvando miles de árboles y por reciclar un material considerado como desecho [39].

Esta investigación no está realizada para desarrollarse en una zona o país en específico, pero es importante conocer que países cuentan con mayor cantidad de este material, no para centralizar su comercio; sino para ubicar un posible sitio de elaboración y evitar el transporte de esta materia prima hasta otro sitio para ser procesado.

Como se puede observar en la Figura 14 los países que lideran la producción de coco en el año 2019 son: Indonesia, Filipinas y la India, en orden descendiente [40]. La cáscara de coco representa alrededor del 85% del peso de la fruta [41]. Cabe resaltar que la compra de materia prima y/o elaboración de estas pantallas acústicas en estos países, generará un aporte a la economía local.

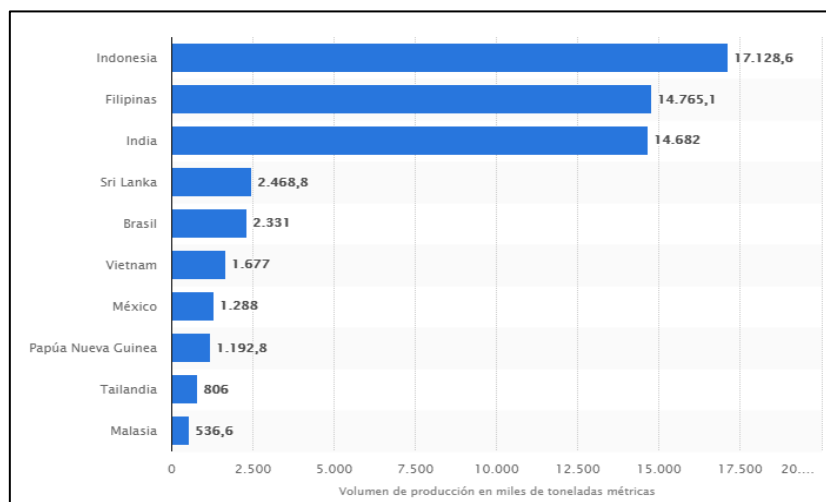


Figura 14. Ranking de los principales países productores de coco a nivel mundial en 2019

Fuente: [40]

3.9.1 Caracterización de la Cáscara de Coco

- **Composición**

La cáscara del coco representa un 85% del peso de la fruta y su composición es la siguiente: 33,30% lignina, 30,58% de celulosa, 26,70% hemicelulosa, 8,86% de agua y 0,56% de ceniza [42].

- **Propiedades físicas, mecánicas y térmicas**

Desconocer las principales propiedades de la cáscara de coco, conlleva a no darle una valorización correcta a esta materia prima. Conocer las propiedades mecánicas (capacidades de esfuerzos y dureza), propiedades físicas (densidad y porosidad) y propiedades térmicas (poder calorífico y conductividad térmica) permite tener un panorama más amplio sobre sus posibles aplicaciones [43].

Tabla 2. Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la cáscara de coco

Propiedad	Valor	Unidad de medida
Resistencia a flexión longitudinal	150	MPa
Resistencia a flexión transversal	600	MPa
Dureza	37	HV
Densidad	1,40 – 1,42	g/cm ³
Porosidad	55	%
Poder calorífico	19000 – 20000	kJ/Kg
Conductividad térmica	0,46	W/Km

Fuente: [43]

Nota: los valores detallados anteriormente pueden variar dependiendo de las condiciones de madurez en las que se encuentre la fibra.

En la Tabla 2 se detallan, de manera general, los valores y unidades de medida de las principales propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la cáscara de coco.

3.9.2 Comparativa de absorción acústica entre la cáscara de coco y otros materiales

Para la elaboración de la muestra utilizada en el ensayo del coeficiente de absorción, se requería lograr la aglomeración de las partículas trituradas de la cáscara de coco, por esta razón se compactó y adicionó resina epoxi más endurecedor. Claramente esto altera su composición natural. Por ello, este material actualmente no está caracterizado en su totalidad.

Considerando lo antes expuesto, el siguiente gráfico servirá únicamente de manera orientativa.

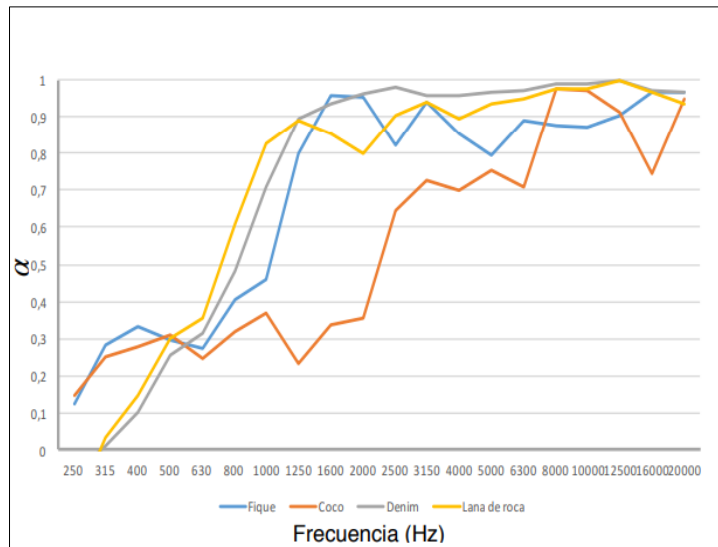


Figura 15. Gráfico comparativo del coeficiente de absorción

Fuente: [44]

Como se puede observar en la Figura 15 el coco presenta poca absorción acústica, especialmente para bajas frecuencias.

A partir de los 2500 Hz, haciendo la comparativa entre posibles materiales empleados para el acondicionamiento acústico, como ser: el fique, coco, denim y la lana de roca, estos dos últimos presentan un mayor y más estable grado de absorción acústica para altas frecuencias.

3.10 OBJETIVO DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Figura 16. ODS relacionados con la salud urbana dentro de un enfoque de STP

Fuente: Gráfico publicado en el estudio: Oriana Ramírez et al. Urban Health: an example of a “Health in All Policies” approach in the context of SDGs implementation. Global Health 15, 87 (2019) doi:10.1186/s12992-019-0529-z

En la Figura 16 se detallan los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y la vinculación de estos con temas que están directa o indirectamente relacionados con la salud urbana.

- **Objetivo #3: Salud y bienestar**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha clasificado al ruido de tráfico como la segunda causa más importante de mala salud en Europa Occidental, estando únicamente detrás de la contaminación en el aire (partículas muy finas) [45].

Según la Norma UNE-EN 1793-3: “Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras- Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico”, Parte 3: “Espectro normalizado de ruido de tráfico”, se ha determinado que un espectro típico de ruido de tráfico en zonas y vías

urbanas, caracterizado por considerar velocidades relativamente bajas y una fluidez a menudo intermitente, incluye las siguientes frecuencias: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 y 5000 Hz [46].

Como se había mencionado anteriormente, esta investigación se enfoca en la atenuación de ruido a bajas frecuencias (100–1500 Hz). Por ello, se está intentando atenuar a las primeras 12 de las 18 frecuencias consideradas en la normativa, siendo estas las más difíciles de eliminar.

Como se mencionó en la introducción, existe una clara relación entre la contaminación acústica y los daños en la salud humana a corto y largo plazo.

Según la OMS los grupos de personas más vulnerables por esta contaminación física son:

- Niños: afectados por el ruido nocturno, generando alteraciones en el sueño, dañando el desempeño cognitivo.
- Personas mayores: especialmente aquellos con enfermedades crónicas, estos son más sensibles a las perturbaciones.
- Trabajadores por turnos: tienen un mayor riesgo porque su estructura de sueño está sometida a estrés.
- Menos pudientes: no tiene la posibilidad de vivir en zonas residenciales tranquilas o tener una vivienda acústicamente aislada [47].

En el informe “Riesgos para la salud provocada por el ruido ambiental en Europa” publicado en la EEA se establece lo siguiente: “La exposición prolongada al ruido ambiental contribuye a 48.000 nuevos casos de enfermedades cardíacas y 12.000 muertes prematuras cada año en Europa. Además, 22 millones de personas sufren molestias crónicas elevadas y 6,5 millones sufren trastornos crónicos del sueño intenso” [48] .

Según los datos destacables de la OMS en este objetivo, cada año mueren más de 5 millones de niños antes de cumplir 5 años [49].

- **Objetivo #9: industria, innovación e infraestructura**

Esta investigación genera un aporte en las investigaciones innovadoras en el sector industrial de los países en desarrollo, generando un aporte en la meta 9,5 de este objetivo, el cual establece lo siguiente: “Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo” [50].

- **Objetivo #11: Ciudades y comunidades sostenibles**

Aunque la contaminación acústica (ruido) no esté presente directamente en este ODS [51]. Ver Figura 16. La implementación de la cáscara de coco como material de relleno (residuo producto del consumo de esta fruta) para la elaboración de esta pantalla acústica, genera una aportación a la sostenibilidad de las ciudades y comunidades. Evitando emplear materiales fabricados específicamente para la elaboración de estas, los cuales no son provenientes de un reciclaje, sino que el procesamiento de estos materiales genera una mayor huella ambiental.

- **Objetivo #12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles**

Al darle un valor a los residuos procedentes de la cáscara de coco, se reduce el porcentaje de este residuo que es destinado a pudrirse o se quemen sin ningún tipo de control.

Según un estudio realizado por CocoPallet se estima que únicamente el 15% del residuo proveniente de esta fruta es reutilizado, significando que el restante es destinado a la quema, llevado a un vertedero o se deja pudrir [52].

- **Objetivo #15: Vida de ecosistema terrestre**

Sustituir la madera 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 su diversidad biológica.

La elaboración estas pantallas acústicas contribuyen con el cumplimiento de la siguiente meta:

Meta 15,4: Para 2030, velar por la conservación de los ecosistemas montañosos, incluida su diversidad biológica, a fin de mejorar su capacidad de proporcionar beneficios esenciales para el desarrollo sostenible [53].

- **Objetivo #17: Alianzas para lograr los objetivos**

Con la finalidad de contribuir con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 (ODS), esta investigación sirve como una aportación a un proyecto de Cooperación al Desarrollo que se está realizando en Sudamérica: “Evaluación de la sostenibilidad mediante una fábrica artesana de productos de coco en la subregión de San Juan, Colombia”.

3.11 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS: COMSOL MULTIPHYSICS 5.5

Para predecir el rendimiento de una pantalla acústica antes de su elaboración, se deben desarrollar cálculos numéricos. COMSOL MULTIPHYSICS 5.5 es una herramienta útil y responde a los principales criterios físicos en la modelización acústica [54]:

- **Geometría**

Haciendo uso de la herramienta “*Geometría*” se definen y crean los componentes que ilustran la distribución de los dispersores que componen la pantalla acústica.

- **Materiales**

Este programa permite utilizar materiales predefinidos por la base de biblioteca o se puede definir un nuevo material.

- **Presión acústica, frecuencia (acpr)**

Utilizando la interfaz física de la acústica de presión se puede modelar la propagación de ondas sonoras bajo el dominio de la frecuencia (acpr) resolviendo la ecuación de Helmholtz. Este método es efectivo para las simulaciones en el dominio de la frecuencia con variaciones armónicas del campo de presión. La interfaz de física se puede utilizar para acústica lineal descrita por una variable de presión escalar.

La presión sonora (p), utilizada en la acústica de presión, representa la variación o perturbaciones acústicas de la presión ambiental.

$$Presión_{acústica} = 20 \times \text{Log}_{10} \left(\frac{1}{acpr. absp} \right) \quad (4)$$

Las ecuaciones que gobiernan y las condiciones de contorno se realizan utilizando la presión total (p_t), misma que resulta de la sumatoria de la presión sonora (p) más la presión de onda de fondo (p_b).

- **Presión acústica**

Se consideran las ecuaciones de la acústica armónica de tiempo (dominio de frecuencia):

$$\nabla \times \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \left(\frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} \right) = Q_m \quad (5)$$

Donde:

$$p_t = p + p_b$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{w}{c_c}\right)^2 - k_z^2$$

$$c_c = c \quad \rho_c = \rho$$

De entrada, el modelo considera temperatura (293,15 K) y presión absoluta (1 atm). Empleando un modelo de fluido elástico lineal, se puede modelizar utilizando los siguientes parámetros como criterios de diseño:

- Densidad y velocidad del sonido
- Impedancia y número de onda
- Módulo de compresibilidad y densidad

Según el criterio de diseño seleccionado, se puede emplear valores definidos por el usuario o el referente a la base de datos existente del programa.

- **Contorno rígido al sonido**

Es una condición de límite, también denominada Neumann, en el que el componente normal de la aceleración (por lo tanto, también la velocidad) es igual a cero:

$$-n \times \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d)\right) = 0$$

Para una fuente de dominio dipolar cero ($q_d=0$) y una densidad de fluido constante (ρ_c), la derivada de la normal de la presión es cero en el límite:

$$\frac{\partial p_t}{\partial n} = 0$$

- **Condición periódica**

Establece una condición límite que se puede utilizar para reducir el tamaño del modelo, empleando usos de simetría y periodicidades en las interfaces de geometría y física que se modelan.

Las periodicidades disponibles en esta herramienta son:

- Frontal (Periodicidad de Bloch): para modelar estructuras periódicas infinitas con excitaciones o campos de presión incidente no normales.
- Simetría cíclica: para modelar cualquier geometría que tenga una estructura periódica cíclica, como un micrófono o un controlador de altavoz.

En el dominio del tiempo para ambos casos se reducen a la condición de continuidad.

- **Radiación de onda plana**

Esta condición de radiación, también denominada de Sommerfeld, cuando el ángulo de incidencia es casi normal, permite que una onda plana saliente abandone el dominio de modelado con reflejos mínimos. Permitiendo simular un campo libre para los contornos que rodean a la muestra en análisis.

- **Campo de presión en segundo plano**

Se agrega un nodo de campo de presión para modelar una onda de presión de fondo-incidente para estudiar el campo de presión dispersa. Definida por la diferencia entre presión acústica total (p_t) u el campo de presión de fondo (p_b).

En este apartado se define la dirección de la onda y si la fase con la que la onda será propagada.

- **Malla**

El mallado empleado puede ser controlada por la física (valores predeterminados) o una controlada por el usuario. Según el grado de complejidad en el análisis se puede realizar distintos tamaños de mallado, desde extremadamente fina hasta extremadamente gruesa.

3.12 PREPARACIÓN DEL MATERIAL

La cáscara de coco fue triturada con un molino triturador de cuchillas de 5000 kW. Ver Figura 17.



Figura 17. Molino triturador utilizado disponible en el departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Fuente: Escuela Politécnica Superior de Alcoy

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. Ver Figura 18.

Características de la prensa:

La prensa utilizada es una prensa Robima de 10 Ton (Robima S.A., Valencia, España) con sistema de control de temperatura de DUPRA (DUPRA S.A, Castalla, Alicante).



Figura 18. Prensa con platos calientes utilizada para la fabricación del material

Fuente: Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Para lograr la aglomeración de las partículas de coco material, se utilizó resina Epoxi Resoltech 1050 (suministrada por Resinas Castro) y endurecedor 1059S. Se realizó un porcentaje de composición 100:35 (resina:endurecedor).

La cantidad de resina utilizada para aglomerar la cáscara de coco triturada ha sido un 20% del peso total.

4. DISEÑO DE PANTALLA ACÚSTICA MEDIANTE COMSOL

Para esta modelización se empleó el Método de Elementos Finitos (MEF), debido a que esta herramienta responde a los requerimientos planteados para este diseño. Para este desarrollo se utilizó el programa COMSOL MULTIPHYSICS 5.5, empleando las herramientas que se han explicado en el apartado 3.11: “Método de Elemento Finitos: COMSOL MULTIPHYSICS 5.5”.

Los principales parámetros considerados en el diseño son los siguientes:

- Geometría
- Condiciones de contorno
- Discretización del dominio de resolución

Para realizar el diseño ideal de esta pantalla acústica abierta con ranuras subsónicas, se ejecutó con el asistente de modelo en 2D, con física enfocada en la presión acústica, frecuencia (acpr).

El estudio se hizo con dominio de la frecuencia debido a que se deseaba calcular la modelización de un modelo lineal para varias frecuencias.

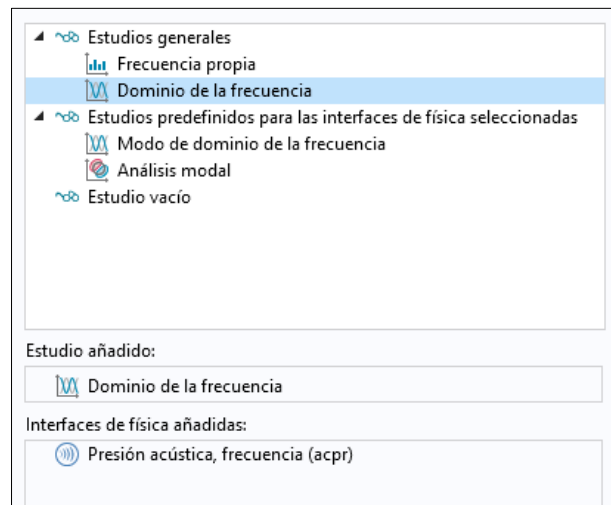


Figura 19. Selección de estudio e interfaz de la física

- **Geometría**

Se utilizaron dispersores rectangulares distribuidos en dos filas, la altura del dispersor se considera infinita, por ello no se considera la difracción de borde superior.

Para seleccionar la distribución geométrica y dimensiones se han seguido los resultados obtenidos en los trabajos de investigación de Castiñeira-Ibáñez et al [7] y Rubio et al [55].

A continuación se detallan los 3 modelos realizado:

- **Modelo 1:** Dispersores con material rígido

En este modelo se realizaron combinaciones de la separación entre dispersores (S_w) y su anchura (W_p).

Dimensiones constantes:

$$I_p: 0,35 \text{ m} \quad d_{ag}: 0,20 \text{ m} \quad d_p: 0,10 \text{ m}$$

Considerando que:

$$L_p = W_p + S_w$$

Como se mencionó anteriormente, la anchura del dispersor (W_p) y de ranura (S_w) variaron:

Geometría	W_p (m)	S_w (m)
1	0,30	0,05
2	0,25	0,10
3	0,20	0,15
4	0,15	0,20

- **Modelo 2:** Dispersores con material poco absorbente (cáscara de coco)

En este modelo los dispersores rectangulares fueron diseñados únicamente con material de cáscara de coco.

- **Modelo 3:** Dispersores con material rígido recubierto con capa de lana de roca

Los dispersores se han recubierto de una capa absorbente con espesor de 2 cm, tomando como referencia lo realizado en la investigación: “Numerical simulation and laboratory measurements on an open tunable acoustic barrier” elaborado por Constanza Rubio et al [55].

En el modelo 2 y 3 se utilizaron las dimensiones de la geometría 1:

$$I_p: 0,35 \text{ m} \quad d_{ag}: 0,20 \text{ m} \quad d_p: 0,10 \text{ m} \quad W_p: 0,30 \text{ m} \quad S_w: 0,05 \text{ m}$$

- **Materiales**

Como se mencionó anteriormente, se realizaron 3 modelos: (1) se utilizó únicamente material rígido en los dispersores, (2) se empleó material poco absorbente (cáscara de coco, ver apartado 3.9.1) y (3) se utilizó material rígido recubierto con capa de lana de roca (lana de roca de 23000 Pa·s/m²).

En resumen, se realizaron 3 modelos, con las siguientes características:

Tabla 3. Caracterización de los modelos desarrollados

Modelo	Material de Dispersores	Ip (m)	dag (m)	dp (m)	Wp (m)	Sw (m)
1	Rígido, geometría 1	0,35	0,20	0,10	0,30	0,05
	Rígido, geometría 2	0,35	0,20	0,10	0,25	0,10
	Rígido, geometría 3	0,35	0,20	0,10	0,20	0,15
	Rígido, geometría 4	0,35	0,20	0,10	0,15	0,20
2	Poco absorbente, geometría 1	0,35	0,20	0,10	0,30	0,05
3	Rígido más capa absorbente, geometría 1	0,35	0,20	0,10	0,30	0,05

- **Presión acústica**

Se consideró presión referente al aire (20 μPa), velocidad de aire (343 m/s), temperatura (293,15 K) y presión absoluta (1 atm).

En el esquema que se indica en la Figura 20, la Onda Plana Incidente (OPI) viaja de izquierda a derecha incidiendo normalmente sobre los bloques rectangulares.

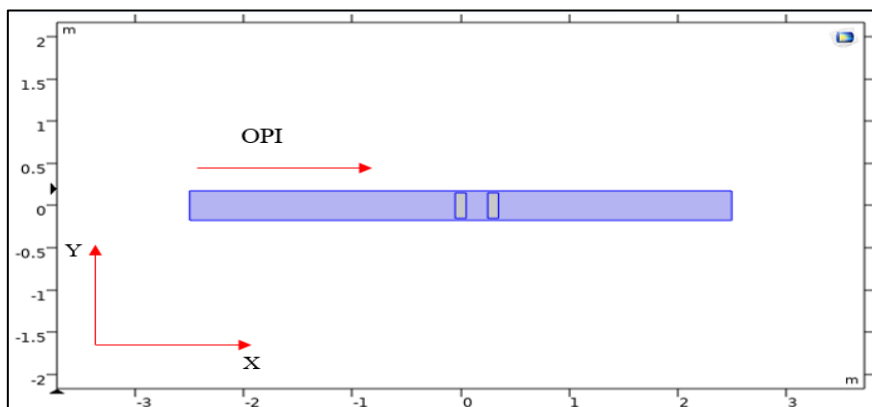


Figura 20. Presión acústica

La onda plana incidente (OPI) se desplaza sobre el eje X tal y como se muestra en la Figura 20. De esta manera la OPI se dispersa por los rectángulos (piquetes) y son reflectadas por las paredes de estos, generando el efecto de barrera semi-infinita. Con ello, se logra utilizar un volumen reducido del dominio numérico, reduciendo la carga de los FEM [55].

- **Contorno rígido al sonido**

Considerando que los dispersores están elaborados con material rígido, sea colocado un contorno rígido al sonido a los dispersores, de esta manera la onda no será transmitida dentro de éstos.

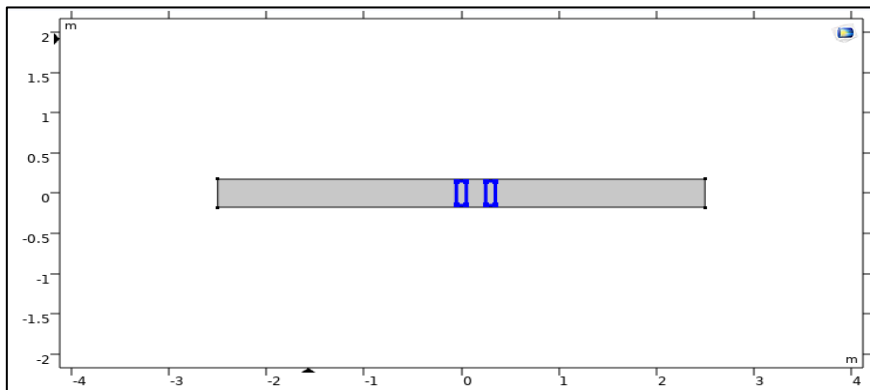


Figura 21. Contorno rígido al sonido

En la Figura 21 se puede observar, en color azul, el contorno rígido con el que están cubiertos los dispersores.

- **Condición periódica**

Con la finalidad de reducir el tamaño del modelo, se estableció una condición periódica en el límite superior e inferior del recinto.

Con esta condición los dos bloques se replican sobre el eje X, tanto arriba como hacía abajo. Según se indica en la Figura 22, simulando una pantalla infinita, evitándolos bordes. Esta condición se utiliza habitualmente para el estudio de las pantallas acústicas [7] y [55].

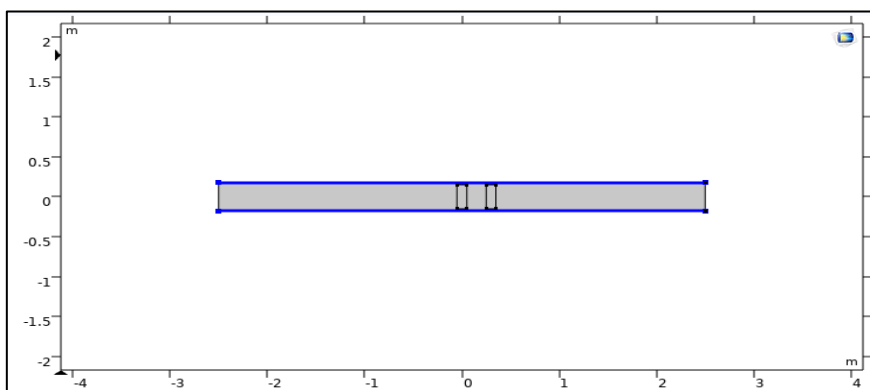


Figura 22. Condición periódica

- **Radiación de onda plana**

Asumiendo que el ángulo de incidencia es normal, la onda plana abandonará el dominio de modelado bajo los mínimos reflejos en el extremo derecho e izquierdo. Ver Figura 23.

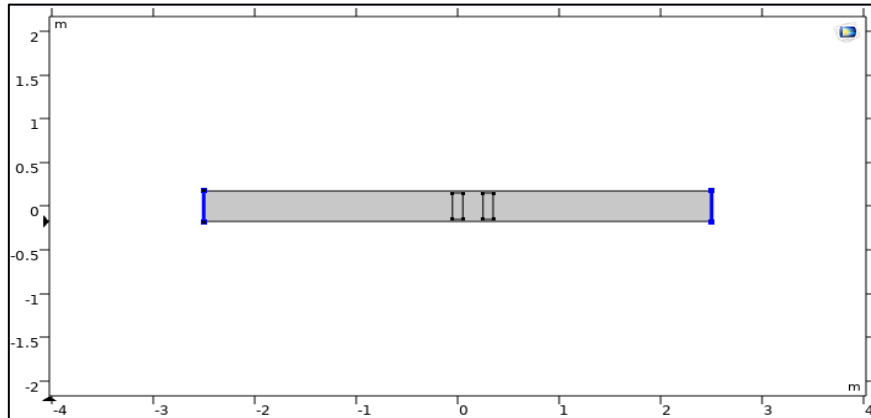


Figura 23. Radiación de onda plana

- **Campo de presión en segundo plano**

Para el campo de presión en segundo plano, se consideró que la onda plana se desplazará de izquierda a derecha.

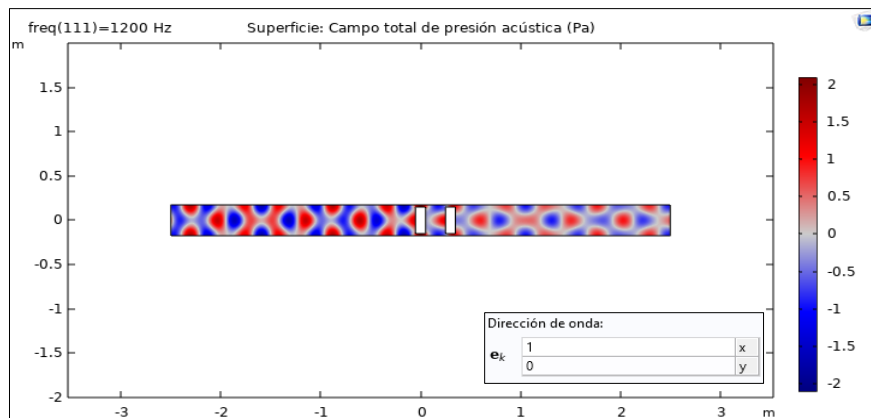


Figura 24. Campo de presión en segundo plano

En la Figura 24 se puede observar que la onda se dirige de izquierda a derecha, por ello, en la parte posterior a la pantalla acústica la presión acústica reduce su tonalidad.

- **Malla**

Para realizar un mejor análisis, en todos los modelos desarrollados se utilizó un mallado extremadamente fino.

El intervalo de análisis es 100 – 1500 Hz, con pasos de 10 Hz.

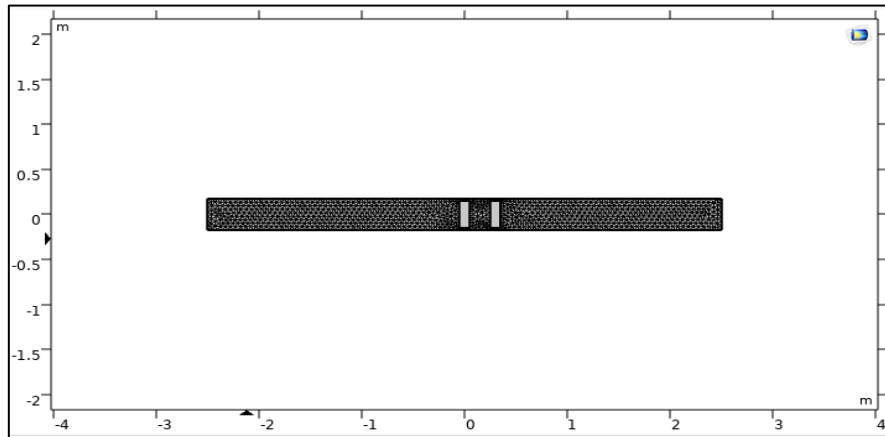


Figura 25. Mallado de estudio

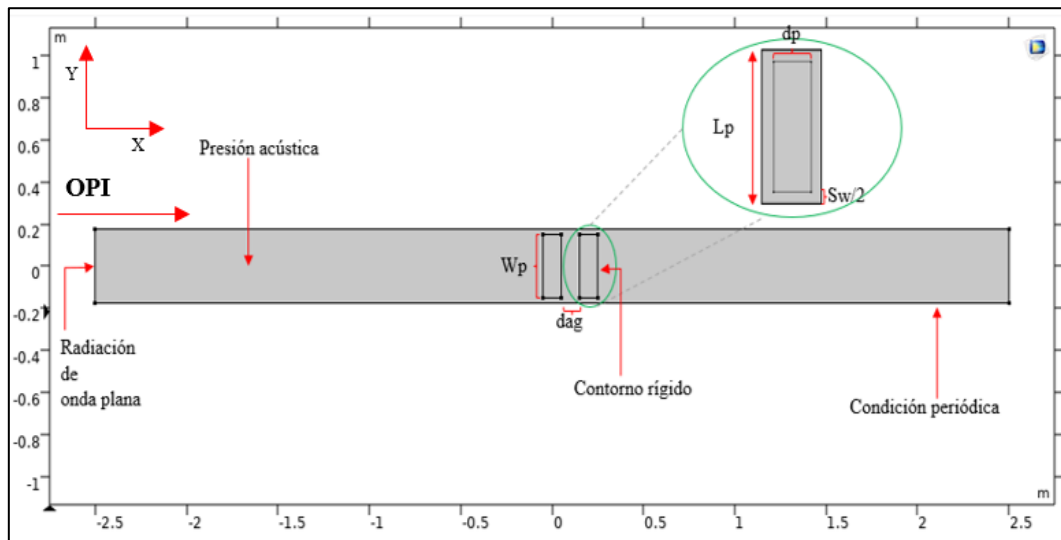


Figura 26. Diseño del modelo numérico ideal

En la Figura 26 se puede observar (vista planta): el desplazamiento de la Onda Plana Incidente (OPI) en el eje X, la principal nomenclatura empleada para definir la geometría: W_p , L_p , Sw , dp y d_{ag} y los parámetros considerados en la modelización en COMSOL MULTIPHYSICS 5.5: Presión acústica, radiación de OPI, contorno rígido y condición periódica.

- **Pantalla modelizada con capa material absorbente**

En el desarrollo de este trabajo se ha empleado un modelo de absorbente (poroacústico), específicamente el modelo empírico de Delany & Bazley.

Las expresiones desarrolladas por Delany & Bazley dependen de la resistencia específica al flujo (σ) y también de la frecuencia (f).

A continuación, se muestra la expresión de la impedancia característica compleja (Z) y de la constante de propagación compleja (Γ):

$$Z = \rho c \left[1 + 0,0571 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0,754} - j0,087 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0,732} \right] \text{ (Rayls)} \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c} \left[1 + 0,0978 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0,7} - j0,189 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0,595} \right] \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire (1,25 kg/m³)

c : velocidad del sonido en el aire (m/s)

f : frecuencia (Hz)

σ : resistencia específica al flujo por unidad de espesor (Pa·s/m²)

σ guarda una dependencia directa con el diámetro de la fibra y con la densidad del material.

Las ecuaciones presentadas por Delany & Bazley tienen validez dentro del siguiente intervalo de frecuencias [56]:

$$10^{-2} \leq \frac{\rho f}{c} \leq 1 \quad (8)$$

Donde se puede comprobar que a partir de 230 Hz es válido el modelo.

Para el recubrimiento de los dispersores rectangulares, se utiliza como material absorbente lana de roca con σ : 23000 Pa·s/m².

5. RESULTADOS

5.1 ENSAYOS EN LABORATORIO-COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

5.1.1 *Fundamento teórico*

En el mercado existen diversos materiales que pueden ser empleados como absorbentes de sonido, pero éstos normalmente carecen de información acerca de sus principales características o los fabricantes no están en condiciones de ofrecerlas [57].

La principal característica para definir si un material es selectivo para usarlo como atenuador de sonido, es el coeficiente de absorción. Por ello, en este apartado se determinará este coeficiente, haciendo uso de un tubo de impedancia (Tubo de Kundt). Tomando como referencia lo establecido en la Norma Española UNE-EN ISO 110534-1: “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”, Parte 1: “Método del rango de onda estacionaria” [58].

Según una investigación realizada en la Universidad Tecnológica afirma que esta práctica, bajo condiciones controladas, tiene un 95% de confiabilidad. Si el 100% de la onda es reflejada, entonces la onda incidente y la onda reflejada tienen la misma amplitud, si el porcentaje de energía incidente es absorbido por la muestra, esto indica que, la onda incidente y reflejada tienen diferente amplitud [57].

Para determinar la medida de presión de la onda estacionaria que se produce en el interior de un tubo excitado por un altavoz con una muestra del material al final del tubo, se suministra información para el cálculo del coeficiente de absorción de la muestra a incidencia normal. Existen dos limitaciones en relación con las dimensiones del tubo:

- La frecuencia mínima de medida de coeficiente de absorción viene dada por:

$$f_{\text{mín}} = \frac{c}{L} = \frac{343 \text{ m/s}}{1,8 \text{ m}} = 190,55 \text{ Hz}$$

Donde:

c: velocidad de propagación del sonido en el aire (m/s)

L: longitud del tubo (m)

Por lo tanto, la frecuencia máxima de medida del coeficiente de absorción viene dada por:

$$f_{\text{máx}} = \frac{c}{1,5 D} = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,5 \text{ m} \times (9 \times 10^{-2} \text{ m})} = 2540,74 \text{ Hz}$$

- Para considerar que la onda es plana, se debe de cumplir:

$$\lambda > 1,5D$$

Donde:

D: diámetro interno del tubo

Tabla 4. Frecuencia máxima y mínima medibles en el Tubo de Kundt

Frecuencia Máxima	Frecuencia Mínima
$\lambda = \frac{c}{f_{m\acute{a}x}} = \frac{343 \text{ m/s}}{2540,74 \text{ Hz}} = 0,135 \text{ m}$	$\lambda = \frac{c}{f_{m\acute{i}n}} = \frac{343 \text{ m/s}}{190,55 \text{ Hz}} = 1,800 \text{ m}$
<p>Criterio por cumplir:</p> $\lambda > 1,5 (9 \times 10^{-2} \text{ m})$ $\lambda > 0,135 \text{ m}$	
$0,135 \text{ m} > 0,135 \text{ m} \therefore OK$	$1,800 \text{ m} > 0,135 \text{ m} \therefore OK$

Como se puede observar en la Tabla 4, para que las mediciones del coeficiente de absorción acústica en el Tubo de Kundt sean aceptables, deberán estar entre el rango: 190–2540 Hz. Para esta investigación se realizaron mediciones entre 500-2000 Hz.

En un punto del tubo situado a una distancia “X” de la muestra, la expresión de la presión incidente (p_i) de la onda plana sobre la muestra viene dada por:

$$p_i = A \times \cos(\omega t) \quad (9)$$

En el

Donde:

A: Amplitud de la onda incidente

ω : frecuencia angular

La presión reflejada (p_r), se obtiene empleando la siguiente expresión:

$$p_r = B \times \cos \left[\omega \left(t - \frac{2x}{c} \right) \right] \quad (10)$$

Donde:

c: velocidad de propagación del sonido en el aire (m/s)

ω : frecuencia angular

La presión total en el punto situado en una distancia “X” de la muestra, resulta de la sumatoria de la presión incidente y la reflejada.

$$p_t = p_i + p_r = A \times \cos(\omega t) + B \times \cos\left[\omega\left(t - \frac{2x}{c}\right)\right] \quad (11)$$

Los máximos de presión tienen lugar a una distancia:

$$x = n\left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

Donde:

λ : Longitud de onda

n: (1,2,3, etc)

Empleando la siguiente fórmula:

$$P_{Tm\acute{a}x} = (A + B) \cos(\omega t) \quad (12)$$

Los mínimos de presión tienen lugar a una distancia:

$$x = (2n + 1)\left(\frac{\lambda}{4}\right) \quad (13)$$

Empleando la siguiente fórmula:

$$P_{Tm\grave{i}n} = (A - B) \cos(\omega t) \quad (14)$$

Considerando que la Relación de Onda Estacionaria (ROE) se define como:

$$ROE = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} = \frac{P_{Tm\acute{a}x}}{P_{Tm\grave{i}n}} = \frac{A + B}{A - B} = s$$

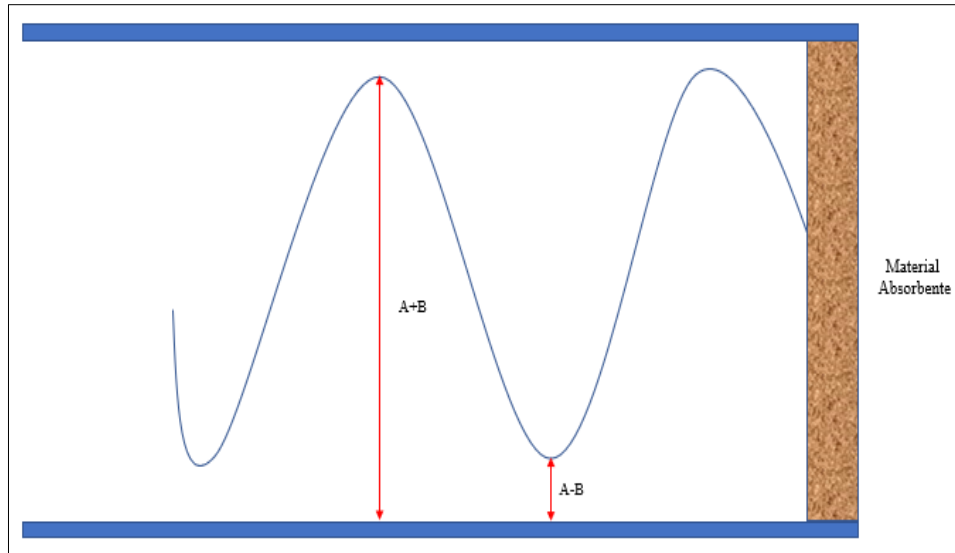


Figura 27. Representación de la máxima y mínima presión en un tubo de impedancia para ondas estacionarias

En la Figura 27 se puede observar los puntos máximos (A+B) y mínimos (A-B) de presión que se generan cuando la onda sonora es emitida, posteriormente esta impacta con el material absorbente que está dentro del Tubo de Kundt.

La onda plana viajera será reflejada con una disminución de intensidad debido a la absorción del material. El coeficiente de reflexión (r) se define como:

$$r = \frac{p_r}{p_i} = \frac{A}{B}$$

De esta manera que:

$$r = \frac{s - 1}{s + 1}$$

Si la energía que traspasa la muestra es muy pequeña en comparación con la absorbida, entonces el coeficiente de absorción de energía se representará:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = \frac{4s}{(s + 1)^2} \quad (15)$$

Para el desarrollo de este ensayo, se utilizó el equipo del Departamento de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de Valencia, este Dpto. es el responsable de organizar y desarrollar investigaciones y enseñanzas propias de esta área del conocimiento de la Física Aplicada.

Las dimensiones de la muestra (pastilla) utilizada de cáscara tritura de coco en el experimento son las siguientes: diámetro: 9 cm y espesor: 2 cm.

5.1.2 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos del ensayo de laboratorio son los siguientes:

Tabla 5. Máximos y mínimos de presión obtenidos en ensayo coeficiente de absorción-Tubo de Kundt

Frecuencia (Hz)	Máximo	Mínimo	α
500	0,532	0,148	0,681
	0,612	0,170	0,681
630	3,220	0,384	0,381
	3,320	0,380	0,369
800	6,200	0,568	0,308
	6,200	0,580	0,313
1000	0,286	0,027	0,317
	0,272	0,028	0,335
1250	7,520	0,880	0,375
	7,160	0,944	0,412
1600	6,400	1,280	0,556
	6,480	1,230	0,536
2000	1,410	0,504	0,776
	1,410	0,472	0,752

Nota: Para reducir el margen de error, se realizaron dos mediciones de los valor máximos y mínimos en cada frecuencia.

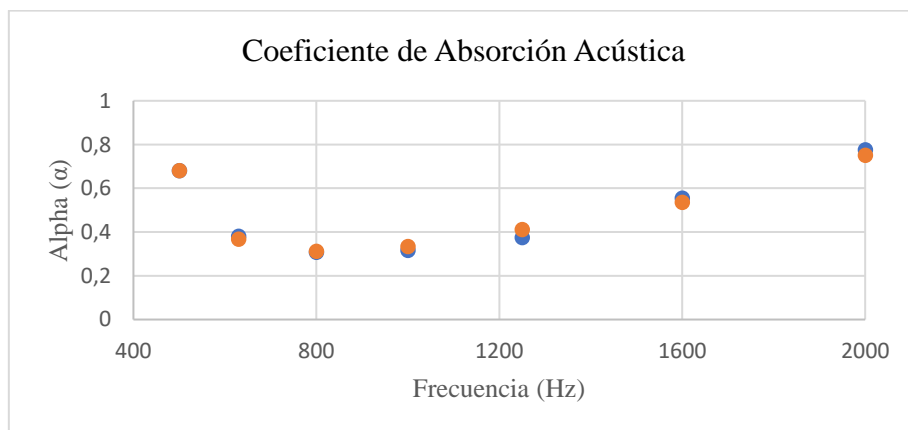


Figura 28. Gráfica coeficiente de absorción acústica

En la Figura 28 se graficaron los valores detallados en la Tabla 5. Como se puede observar para bajas frecuencias (500-2000 Hz) la cáscara de coco presenta bajo coeficiente de absorción.

5.2 DENSIDAD DE LA CÁSCARA DE COCO

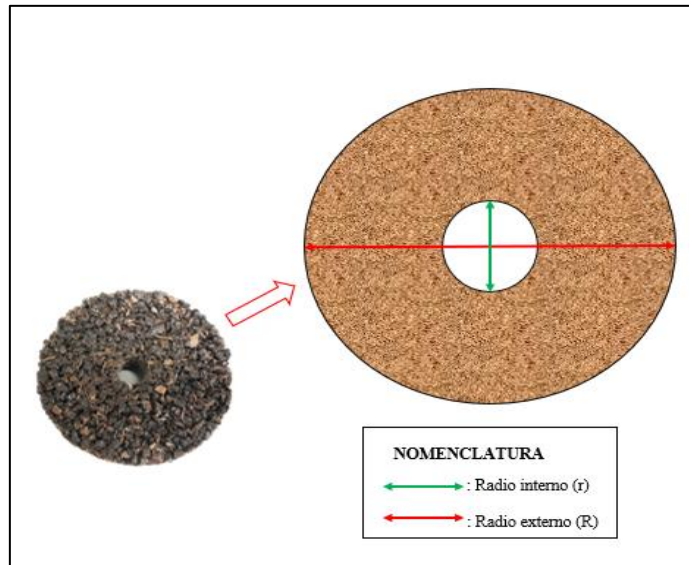


Figura 29. Esquema de radio interno y externo en la muestra de cáscara de coco

Fórmula para determinar la densidad:

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{\text{masa (kg)}}{\text{volumen (m}^3\text{)}} \quad (15)$$

- **Masa**

Peso de la muestra: 103,39 g \approx **0,10336 kg**

- **Volumen**

Dimensiones de muestra:

Radio externo (R): 9 cm Radio interno (r): 1,6 cm espesor (e): 2cm

$$\text{Área}_{\text{Total}}: \pi (R^2 - r^2)$$

Sustituyendo:

$$\text{Área}_{\text{Total}}: \pi ((9 \text{ cm})^2 - (1,6 \text{ cm})^2) = 246,43 \text{ cm}^2 \approx 0,0246428 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen}_{\text{Total}} = 0,0246428 \text{ m}^2 * 0,02 \text{ m} = \mathbf{4,92856 \times 10^{-4} \text{ m}^3}$$

Finalmente:

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{0,10336 \text{ kg}}{4,92856 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 209,72 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

5.3 MODELIZACIÓN DE PANTALLA ACÚSTICA MEDIANTE COMSOL

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de los 3 modelos detallados en el apartado 4: “Diseño de pantallas acústica mediante Comsol”.

- **Modelo 1:** Dispersores con material rígido

En este primer modelo se realizaron pequeñas variaciones con la anchura de separación (S_w). El rango analizado fue entre 0,05m a 0,20m, dejando I_p constante.

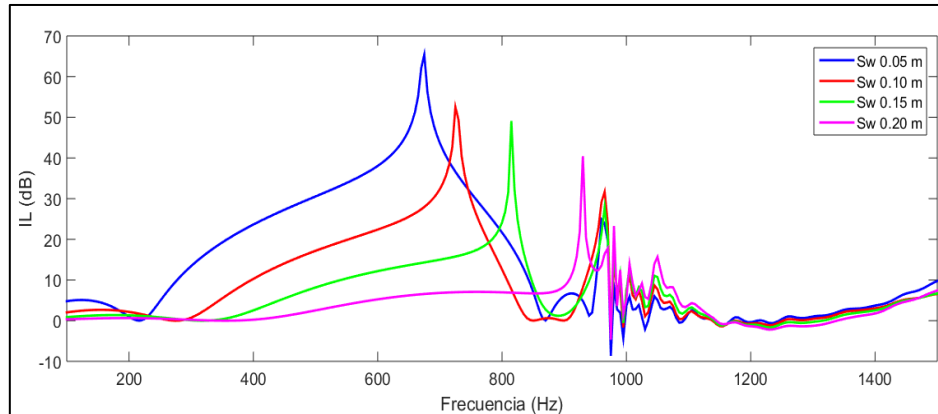


Figura 30. Espectro de atenuación acústica para dispersores con material rígido, calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla, variando la anchura de separación (S_w).

En la Figura 30, en el espectro de atenuación acústica, se puede observar que cuando disminuye S_w la atenuación acústica aumenta. Esto es debido a que $I_p = S_w + W_p$. Al ser constante I_p y al disminuir S_w , W_p aumenta.

El área del dispersor está definida por W_p y d_p , en los 4 casos d_p fue constante. Por ello, al aumentar W_p el área ocupada por los dispersores aumenta, generando mayor atenuación.

Con el desarrollo de este modelo se puede observar que el S_w que genera mayor atenuación entre el rango de frecuencias analizado (100 a 1500 Hz) es de 0,05m.

- **Modelo 2:** Dispersores con material poco absorbente (cáscara de coco)

Como se mencionó en el modelo anterior, al disminuir la separación de ranura se generaba una mejor atenuación. Por ello, se utilizó la separación de ranura de 0,05m ($S_w=0,05m$) dispersores de material rígido y absorbente (cáscara de coco).

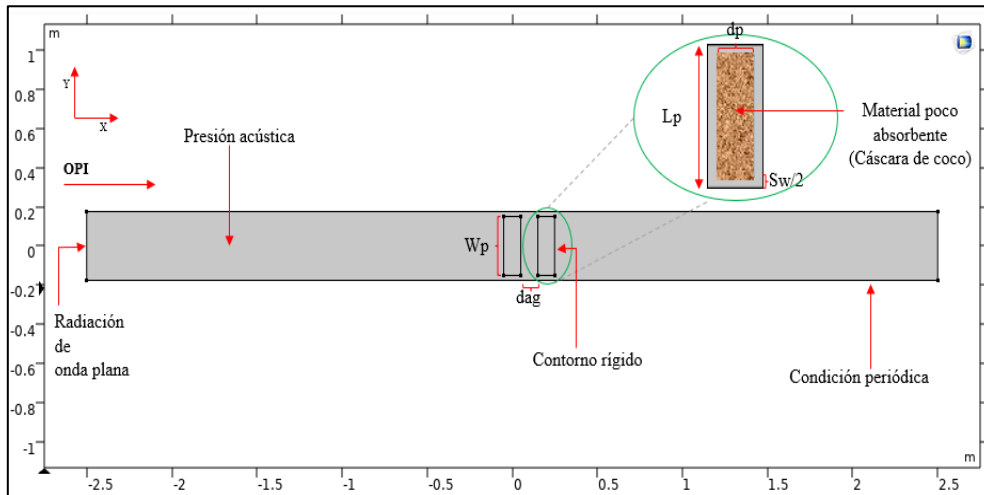


Figura 31. Diseño numérico ideal, modelo 2

En la Figura 31 se detalla que el material empleado para el dispersor rectangular en este modelo es la cáscara de coco.

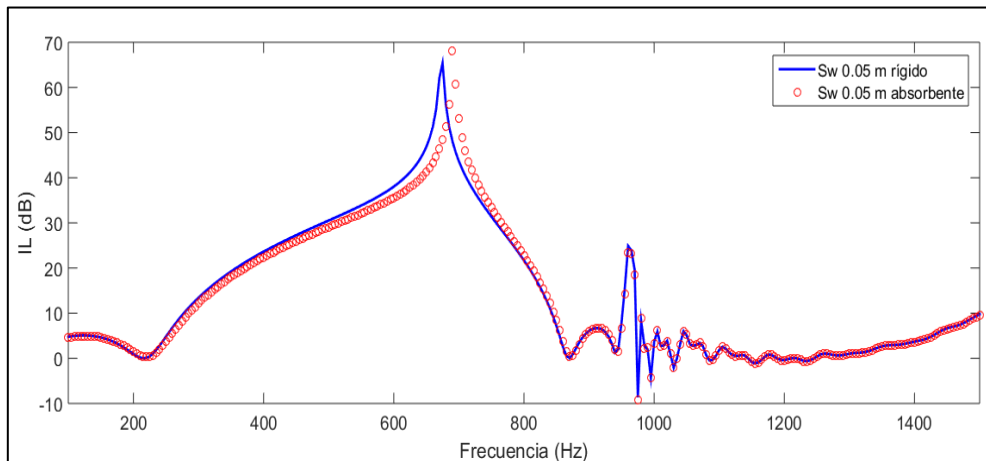


Figura 32. Espectro de atenuación acústica para dispersores con material poco absorbente, calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla, con geometría 1.

En la Figura 32 se puede observar que el espectro de atenuación acústica para ambos casos, es casi similar. Como se había mencionado en el apartado 5.1.2: “Resultados obtenidos”, el coeficiente de absorción de la cáscara de coco es bajo para este rango de frecuencias.

La densidad de la cáscara de coco es elevada. Por ello, la absorción de este material se asemeja a la de un material rígido.

- **Modelo 3:** Dispersores con material rígido recubierto con capa de lana de roca

Con la finalidad de mejorar la atenuación obtenida en el Modelo 2 y tomando como referencia lo desarrollado en la investigación: “Numerical simulation and laboratory measurements on an open tunable acoustic barrier” elaborado por Constanza Rubio et al [55], se realizó este tercer modelo.

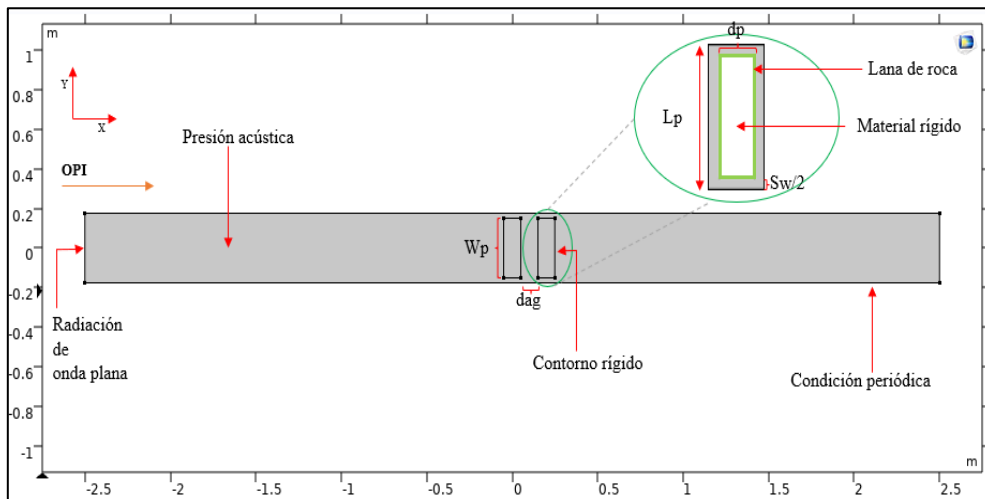


Figura 33. Diseño numérico ideal, modelo 3

En la Figura 33 se detalla que el material empleado para el dispersor rectangular en este modelo es material rígido recubierto con capa de lana de roca.

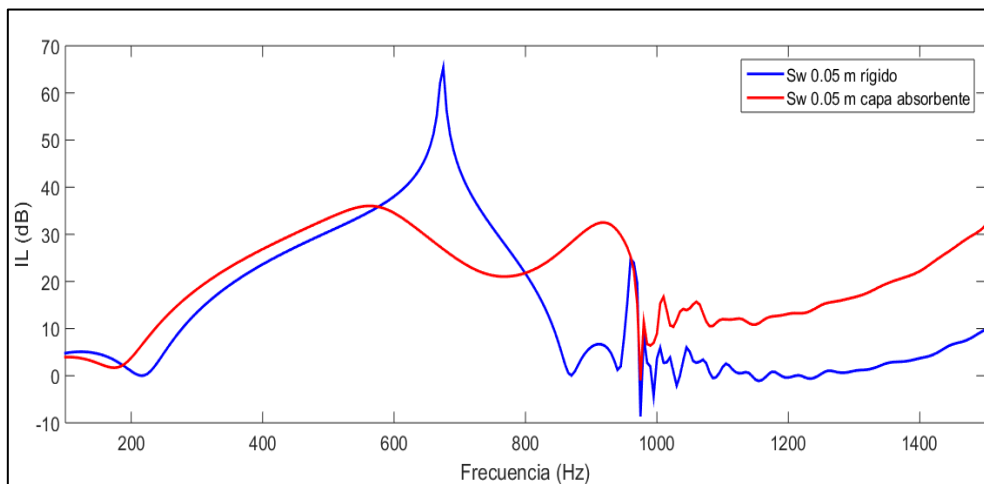


Figura 34. Espectro de atenuación acústica para dispersores con material rígido recubierto con capa de lana de roca, calculado a un metro de distancia detrás de la pantalla, con geometría 1.

Como se puede observar en la Figura 34 al añadir una capa absorbente (espesor 2 cm) al dispersor, manteniendo su tamaño externo, se consigue aumentar el rango de frecuencias donde existe una atenuación acústica. Esta es la solución más efectiva para esta investigación, ya que desde los 200 Hz hasta los 1500 Hz la atenuación está en el orden de 20 dB.

6. CONCLUSIONES

La contaminación acústica está catalogada como uno de los principales problemas a los que nos enfrentamos en la actualidad. Una solución que se ha considera efectiva para la atenuación de sonido, es la implementación de una pantalla acústica.

En esta investigación se desarrolló el diseño de una pantalla acústica abierta con ranuras subsónicas para un rango de frecuencia bajas (100 a 1500 Hz). La novedad en esta investigación es la sustitución de los materiales tradicionales empleados en estas pantallas, como ser: hormigón, metal, madera, vidrio, etc, por un material reciclable: la cáscara de coco.

Sustituir la madera (material empleado con normalidad) 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 su diversidad biológica. Este material es procedente de un residuo, por ello, la obtención de este material no generará un impacto en comparación al emplear un material que se fabrique especialmente como material para estas pantallas acústicas. De esta manera, se contribuye al cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030.

Según los ensayos de laboratorio, 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 (100-1500 Hz) y una alta densidad (Aprox. 210 kg/m³).

Las pantallas acústicas abiertas tienen un comportamiento similar a las tradicionales, pero sí posee ciertas ventajas: se pueden construir bajo demanda y para un rango de frecuencias sintonizables, son permeables al agua y aire, portables y estéticamente más contrastables con el medio que les rodea.

Según el análisis en esta investigación, al utilizar en los dispersores rígido recubiertos con una capa de lana de roca se logra obtener atenuación en todo el rango de frecuencias analizado (100 a 1500 Hz).

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Estudiar otras formas de compactación del residuo para que el coco presente mayor absorción.
- Realizar medidas en condiciones controladas (cámara anecoica) de la pantalla diseñada.
- Estudiar la posibilidad de añadir otros fenómenos físicos a la pantalla para conseguir mayores atenuaciones: resonadores, otros materiales absorbentes, etc.
- Realizar un diseño 3D de la pantalla y añadir el efecto de bordes en el estudio.
- Considerar la realización de dispersores con cavidades resonantes para generar atenuación en un mayor rango de frecuencias a la consideradas en esta investigación.

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] F. Miraya, Control de Ruido, Rosario: Riobamba, 2000.
- [2] MITECO, «Conceptos Básicos de Ruido Ambiental,» MITECO, 21 abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/gl/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/contaminacion-acustica/conceptos-basicos-ruido-ambiental/default.aspx>. [Último acceso: 2021 junio 30].
- [3] «Universidad Zaragoza,» Unidad de Producción de Riesgos Laborales, [En línea]. Available: <http://uprl.unizar.es/higiene-industrial/ruido-definiciones>. [Último acceso: 2021 junio 30].
- [4] ECODES, «Efectos de la contaminación acústica sobre la salud,» ECODES, 28 noviembre 2005. [En línea]. Available: <https://archivo.ecodes.org/web/noticias/efectos-de-la-contaminacion-acustica-sobre-la-salud>. [Último acceso: 2021 junio 20].
- [5] A. Hernando Ruíz, «El ruido,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.elruido.com/portal/web/miranda-de-ebro/que-es-el-ruido>. [Último acceso: 16 julio 2021].
- [6] F. Department of Transportation, «Federal Highway Administration U.S.A. Keeping the noise Down,» Highway Traffic Noise Barriers, Washington, 2001.
- [7] S. Castiñeira-Ibáñez, A. Uris, P. Candelas y C. Rubio, «Diseño de pantallas acústicas abiertas formadas por dispersores rectangulares aislados con separación subsónica,» 48° Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, pp. 758-765, 2017.
- [8] M. P. Peiró Torres, J. Bravo, J. Redondo, M. Ferri y J. Sánchez Pérez, «Plataforma Tecnológica Española de la Carretera,» 2015. [En línea]. Available: http://www.ptcarretera.es/wp-content/uploads/2017/07/06_sonic-crystal-technologies_CT-2015_Final.pdf.
- [9] 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, 2002.
- [10] V. Romero García, J. Sánchez-Pérez y L. García-Raffi, «Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two dimensional multiphysical phenomena periodic systems,» J. Appl, 2011.

- [11] C. Rubio, P. Candelas, F. Belmar, V. Gomez-Lozano y A. Uris, «Subwavelength slit acoustic metamaterial barrier,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015.
- [12] W. Committee, «Sound propagation at tunnel openings,» de *Noise Control Engineering Journal*, London, Her Majesty Stationery Office, 1976.
- [13] BIZKAIA, «Informe sobre Ruido Ambiental y Salud,» ekoire, Madrid, 2018.
- [14] J. Mariano Merino y L. Muñoz Repiso, «La Percepción Acústica,» The MIT Press, Londres, 2013.
- [15] InsaMetal, «Cómo funciona las barreras acústicas y cómo reducen el ruido,» Ciudad Real, 2021.
- [16] A. d. Dénia, «Regidoria de Medi Ambient i Canvi Climàtic,» [En línea]. Available: <http://deniaviva.com/es/canvi-climatic-i-qualitat-ambiental/contaminacio-acustica>. [Último acceso: 25 junio 2021].
- [17] UPV, «Ondas Sonoras,» Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, 2019.
- [18] F. Miraya, « Terminología y nociones acústicas y psicoacústicas,» de *Control del Ruido*, Rosario, ASOLOFAL, 2000.
- [19] César Tomé López, «Tipo de Ondas,» *Experientia docet*, 30 octubre 2018. [En línea]. Available: <https://culturacientifica.com/2018/10/30/tipos-de-ondas/>. [Último acceso: 25 junio 2021].
- [20] A. Campayo Riego, «Desarrollo de materiales absorbentes acústicos a partir de escorias siderúrgicas,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [21] «Silen&system,» Silen&system, 2021. [En línea]. Available: <https://silensystem.com/acustica/ruido-y-acustica/cual-es-la-velocidad-del-sonido/>. [Último acceso: 30 junio 2021].
- [22] J. M. Quintero, «Conceptos básicos del ruido ambiental,» Medellín, 1999.
- [23] J. Lambert, F. Poisson y P. Champlovier, «Valuing benefits of road traffic Noise abatement program: A contingent valuation study,» INRETS-LTE, Bron, Francia, 2001.
- [24] E. M. Porta, F. Jesús Alba y R. d. R. Tormos, «Nuevas pantallas acústicas a partir de materiales reciclados,» Universidad Politècnica de Valencia, Gandía, 2010.

- [25] M. Arias Fontalba, A. Jimenez Zumaquero y C. Carmona Maqueda, «Instalación de Pantallas Acústicas,» Licurgo, Málaga, 2006.
- [26] C. Chien y W. Soroka, Sound propagation along an impedance plane, California: ELSEVIER, 1975.
- [27] K. Attenborough y S. Hayek, Propagation of sound above a porous half-space, Milton Keynes: ASA, 1980.
- [28] M. Delaney y E. Bazley, Monopole radiation in the presence of an absorbing plane, Teddington: ELSEVIER, 1970.
- [29] T. Embleton y J. Olson, Outdoor sound propagation over ground of finite, Ottawa: ASA, 1976.
- [30] C. Rubio, S. Castiñeira-Ibáñez, J. V. Sánchez-Pérez, P. Candelas , F. Belmar y A. Uris , «Open acoustic barriers: A new attenuation mechanism,» INTECH, 2016.
- [31] ACH, «ACH,» ACH, 11 abril 2019. [En línea]. Available: <https://panelesach.com/blog/tipos-de-pantallas-acusticas-parte-1/>. [Último acceso: 29 junio 2021].
- [32] Innovacarretera, «Plataforma Tecnológica Española de la Carretera,» 10 noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.ptcarretera.es/innovacarretera-2017-pantalla-acustica-basada-en-cristales-de-sonido-becca/>. [Último acceso: 2021 julio 25].
- [33] R. Min, F. Wu , L. Zhong y Y. Liu , «Brechas de banda acústica extremas obtenidas bajo alta simetría en cristales fonónicos 2D,» Revista de Física Dpto: Física Aplicada , 2006.
- [34] T. Ebbesen, H. Lezec, H. Ghaemi y P. Wolf, «Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays,» Naturaleza, 1998.
- [35] M. Lu, X. Liu , L. Feng , J. Li, C. Huang , Y. Chen , Y. Zhu , S. Zhu y Ming NB, «Extraordinary acoustic transmission through a 1d grating with very narrow apertures,» Cartas de revisión física, 2007.
- [36] R. Wood, «Anomalous diffraction gratings,» Sociedad Estadounidense de Física, Baltimore, 1935.
- [37] H. Estrada , P. Candelas , A. Uris , F. Belmar, F. García de Abajo y F. Meseguer , «Extraordinary sound screening in perforated plates,» Physical Review Letters, 2008.

- [38] UPV, «Nueva pantalla contra el ruido más eficiente y ecológica,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2018.
- [39] I. CocoPallet, «Coco pallet hecho de residuos de coco para reemplazar la madera y salvar los árboles,» Universidad de Wageningen de Holanda, Wageningen , 210.
- [40] A. Orús, «Principales países productores de coco en el mundo 2019,» 11 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/613440/principales-paises-productores-de-coco-en-el-mundo/#statisticContainer>. [Último acceso: 8 septiembre 2021].
- [41] N. Ayrilmis, S. Jarusombuti,, V. Fueangvivat, P. Bauchongkol y R. White, «Coir fiber reinforced polypropylene composite panel for automotive interior applications,» Fibers Polym, 2011.
- [42] N. Arena, J. Lee y R. Clift, «Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells,» J. Clean, 2016.
- [43] L. Goyos Pérez, «Caracterización física, mecánica y térmica de residuos biomásicos de cuscú de palma africana y cáscara de coco,» Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecánica, Matriz Sangolquí, 2018.
- [44] A. Sesmero Irala y M. Á. Navacerrada, «Las fibras naturales: una opción sostenible para la construcción,» ETSAM, Madrid, 2019.
- [45] O. Hannien, «Environmental Burden of Disease in Europe: Assessment Nine Risk Factors in Six Countries,» Environmental Health Perspectives, 2014.
- [46] AENOR, «Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras, Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico, Parte 3: "Espectro normalizado de ruido de tráfico". UNE-EN 1793-3.,» Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 1998.
- [47] OMS, «Organización Mundial de la Salud,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/data-and-statistics>. [Último acceso: 15 julio 2021].
- [48] EEA, «Health risks caused by environmental noise in Europe,» Agencia Europea de Medio Ambiente, 2020.

- [49] ONU, «Salud y bienestar, ODS 2030,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>. [Último acceso: 15 julio 2021].
- [50] ONU, «Industria, innovación e infraestructura, ODS,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>. [Último acceso: 18 julio 2021].
- [51] O. Ramírez, «ISGlobal,» 13 enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.isglobal.org/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/la-agenda-2030-como-marco-innovador-para-la-salud-urbana/5581285/0>. [Último acceso: 22 julio 2021].
- [52] CocoPallet, «Los residuos de coco eclipsan la madera para los palets de explotación,» 26 septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://goexplorer.org/coconut-pallets-outcompete-on-weight-and-waste/>. [Último acceso: 8 agosto 2021].
- [53] ONU, «Vida de ecosistemas terrestres, ODS,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>. [Último acceso: 22 julio 2021].
- [54] COMSOL, «Acoustics Module User's Guide,» 1998-2019.
- [55] C. Rubio, S. Castiñeira-Ibáñez, A. Uris, F. Belmar y P. Candelas, «Numerical simulation and laboratory measurements on an open tunable acoustic barrier,» ELSEVIER Ltd., Países Bajos, 2018.
- [56] M. E. Delany y E. N. Bazley, «Acoustical properties of fibrous absorbent materials,» de *Applied Acoustics*, Vol. 3, 1970, pp. 105-106.
- [57] J. Andrés Castañeda y H. Álvaro González, «Medición del coeficiente de absorción del sonido,» Scientia, Lima, 2004.
- [58] AENOR, «Norma Española UNE-EN ISO 110534-1: “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”, Parte 1: “Método del rango de onda estacionaria”,» Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2002.

9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Para el desarrollo de esta investigación cronológicamente se desarrollaron las siguientes actividades:

ACTIVIDAD DESARROLLADA	ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO			
	SEMANA				SEMANA				SEMANA				SEMANA				SEMANA			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Selección de tema para la investigación.																				
Elaboración y envío para la propuesta Trabajo Fin de Máster (TFM).																				
Aprobación de tema para TFM.																				
Estudio y búsqueda de bibliografía.																				
Adquisición de muestra para el ensayo del coeficiente de absorción-Tubo de Kundt.																				
Prueba en laboratorio-coeficiente de absorción-Tubo de Kundt.																				
Instalación e introducción al programa COMSOL.																				
Propuestas de modelos numéricos para la pantalla acústica mediante COMSOL.																				
Selección definitiva de los modelos numéricos.																				
Elaboración de informe.																				

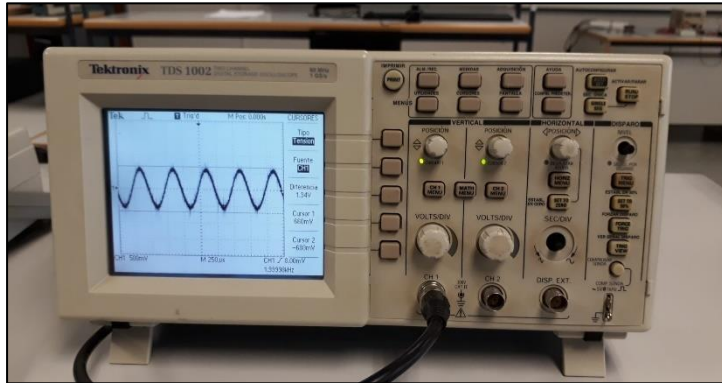
10. ANEXOS

ANEXO I: ENSAYO EN LABORATORIO-COEFICIENTE DE ABSORCIÓN-TUBO DE KUNDT

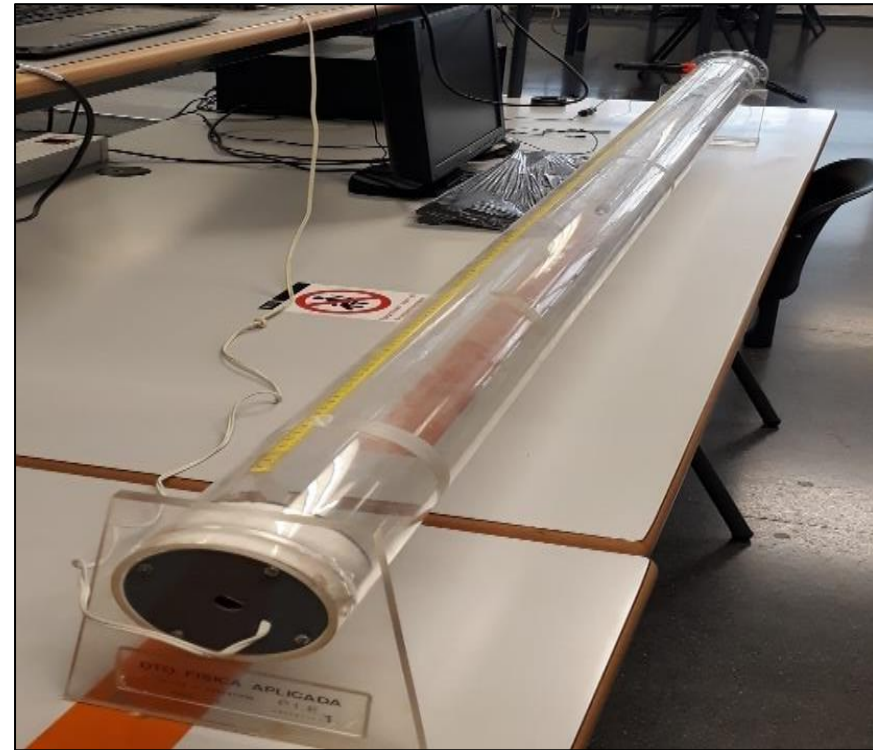


En estas Figuras, se puede observar la muestra utilizada en el ensayo para determinar el coeficiente de absorción mediante el Tubo de Kundt. Fue necesario adicionar epoxi y endurecedor para lograr que las partículas trituradas se aglomerasen.

Dimensiones: radio externo (R): 9 cm, radio interno (r): 1,6 cm y espesor: 2 cm.



(A)



(B)

Descripción del equipo:

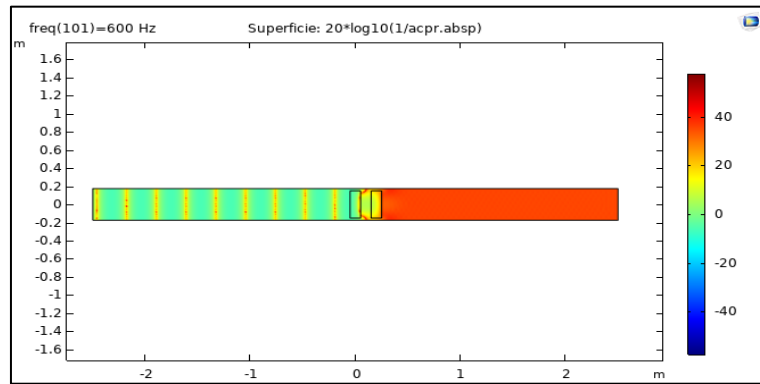
(A) Osciloscopio marca Tektronix, en él se puede observar una onda sonora longitudinal, en la que se refleja claramente los puntos máximos y mínimos de presión con frecuencia de 2000 Hz.

(B) Tubo de Kundt, con dimensiones: radio interno (r): 9 cm y longitud: 1,8 m.

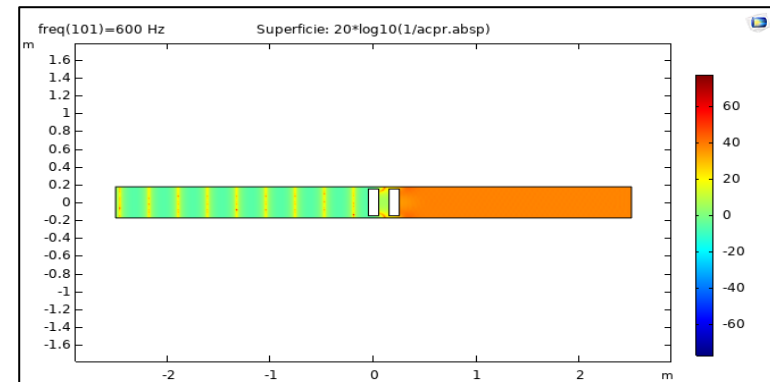
Nota: Todo el equipo utilizado en este ensayo pertenece al Dpto. de Física Aplicada de Universitat Politècnica de Valencia.

ANEXO II: RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE COMSOL

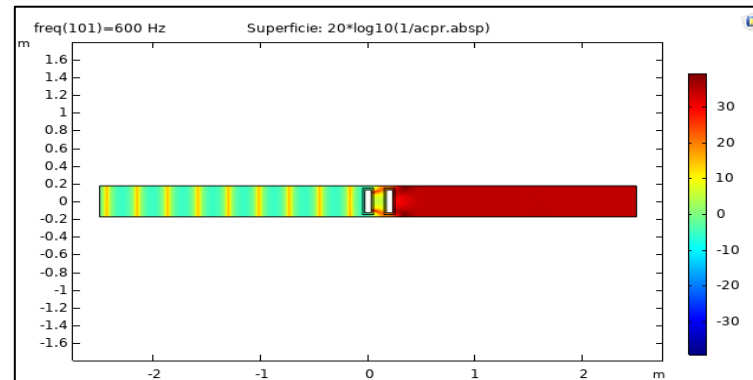
Mapa IL (dB)



Modelo 1



Modelo 2

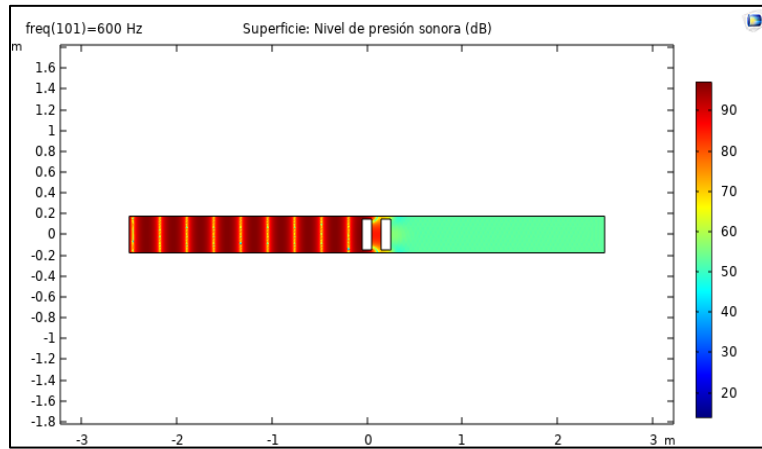


Modelo 3

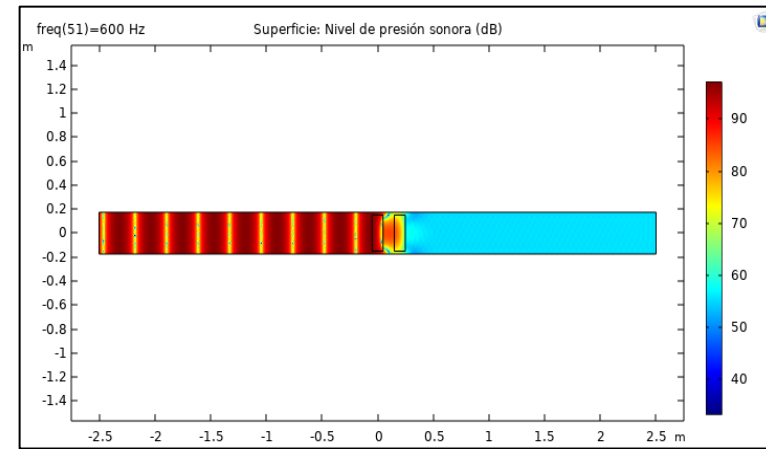
Explicación:

En estos mapas se representa la pérdida por inserción generada en una frecuencia de 600 Hz. Como ya se ha detallado anteriormente, la OPI se desplaza de izquierda a derecha. En la parte posterior de la pantalla acústica abierta los dB incrementan porque ya se ha generado la atenuación de sonido. Se puede observar que el modelo 3 proporciona un mayor nivel de atenuación del ruido.

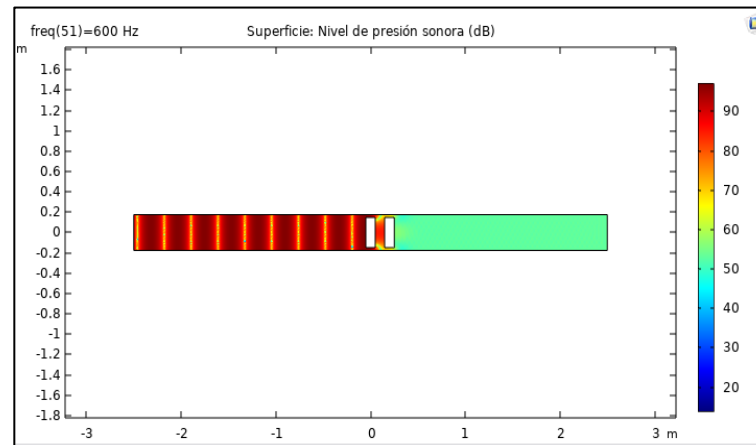
Mapa de Nivel de Presión (dB)



Modelo 1



Modelo 2

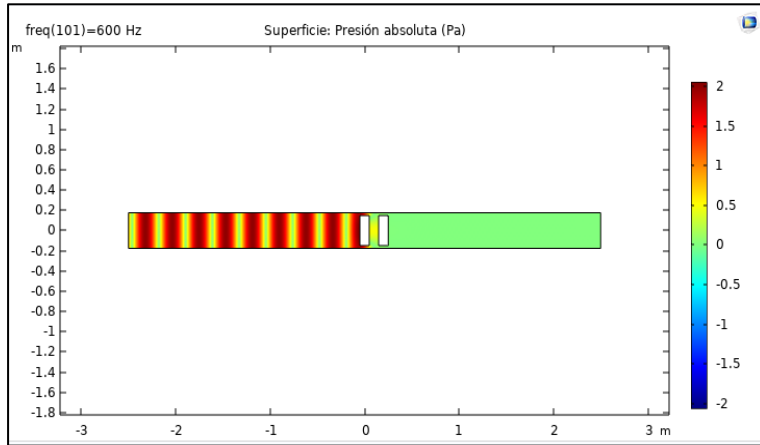


Modelo 3

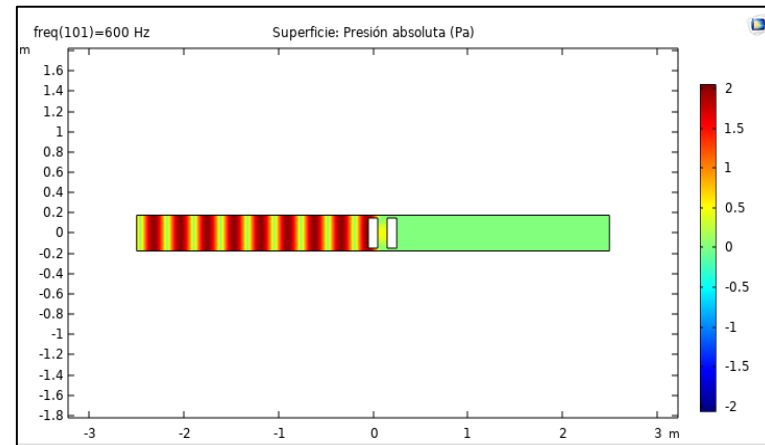
Explicación:

En estos mapas se representa el nivel de presión sonora generada en una frecuencia de 600 Hz. Como ya se ha detallado anteriormente, la OPI se desplaza de izquierda a derecha. Como se puede observar en la parte izquierda de la pantalla acústica abierta es donde se encuentran los mayores niveles de presión sonora, debido a que en esta zona no se está generando una atenuación de ruido, ocurriendo lo contrario en la zona posterior donde la presión sonora disminuye.

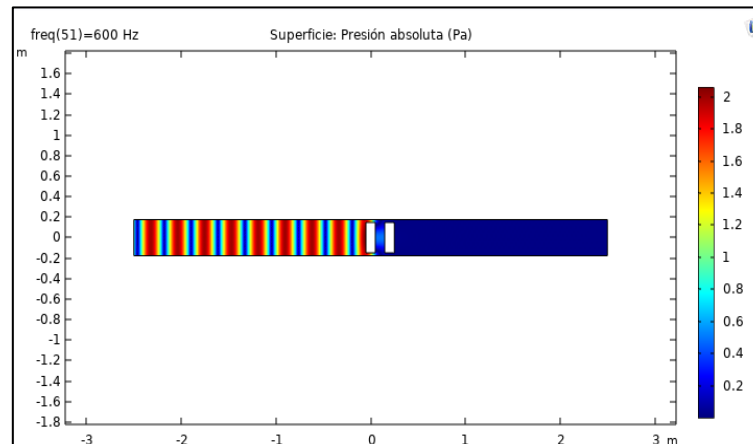
Mapa de Presión Absoluta (Pa)



Modelo 1



Modelo 2



Modelo 3

Explicación:

En estos mapas se representa el nivel de presión absoluta generada en una frecuencia de 600 Hz. Como ya se ha detallado anteriormente, la OPI se desplaza de izquierda a derecha. En los esquemas se puede observar la atenuación producida por la pantalla acústica abierta, generando prácticamente una anulación de la presión absoluta en la zona posterior a esta.