



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# TRABAJO DE FIN DE MASTER

---

Diseño de una pantalla acústica verde abierta para la  
reducción del ruido

---

*Presentado por*

Calero Pons, Elena

---

*Para la obtención del*

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

*Curso: 2020/2021*

*Fecha: 01/09/2021*

*Tutor: Dra. Constanza Rubio Michavila*

*Cotutor: Dr. Sergio Castiñeira Ibáñez*



## **AGRADECIMIENTOS**

Para empezar, me gustaría dar las gracias a la Dra. Constanza Rubio Michavila por darme la oportunidad de llevar a cabo este TFM, pese a encontrarnos en una situación un tanto complicada, y descubrirme el mundo de la contaminación acústica y todo lo que conlleva. Agradecer también al Dr. Sergio Castiñeira Ibáñez toda la ayuda a lo largo de estos meses, la paciencia, las horas de trabajo, y todos los conocimientos que me han transmitido ambos.

En segundo lugar, agradecer a los compañeros y compañeras del máster, que se han convertido en amigos y con los que he formado una pequeña familia, todos los momentos que hemos compartido, tanto dentro como fuera de la universidad, porque sin ellos estos dos años no habrían sido lo mismo.

A las amigas y amigos que han estado a mi lado a lo largo de todo este proceso, gracias por ser mi punto de apoyo, escucharme y animarme siempre.

Por último, agradecer a mi familia el apoyo incondicional y la confianza que siempre han depositado en mí

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta una novedosa pantalla vegetal basada en cristales de sonido (CS) la cual, estará formada por distintas especies de árboles que serán los encargados de actuar como centros de dispersión, de tal forma que, los picos de atenuación que se predicen mediante la Ley de Bragg atenuarán las frecuencias no deseadas.

El hecho de emplear árboles hace que la pantalla se integre de forma respetuosa en el medio ambiente, y que su impacto visual sea mínimo ya que, se consigue bloquear la transmisión del ruido a su través sin que visualmente haga un obstáculo continuo. Las frecuencias que se atenúan dependen de la disposición de los elementos dispersores (árboles) que, en este caso, se han dispuesto en forma de red cuadrada.

Para ello, se ha realizado un estudio numérico con la herramienta COMSOL Multiphysics 5.5, evaluando la pérdida por inserción cuando se instala la pantalla entre el foco emisor de ruido y el receptor.

Los resultados se han analizado a partir de espectros acústicos y mapas de presión sonora de la zona de estudio.

**Palabras clave:** Pantalla vegetal, cristales de sonido, pérdida por inserción, espectro acústico, mapas de presión sonora.

## RESUM

En aquest treball es presenta una nova pantalla vegetal basada en cristalls de so (CS) la qual, estarà formada per diferents espècies d'arbres que seran els encarregats d'actuar com a centres de dispersió, de tal forma que, els pics d'atenuació que es prediuen mitjançant la Llei de Bragg atenuaran les freqüències no desitjades.

El fet d'emprar arbres fa que la pantalla s'integre de forma respectuosa amb el medi ambient, i que el seu impacte visual siga mínim ja que, s'aconsegueix bloquejar la transmissió del soroll al seu través sense que visualment supose un obstacle continu. Les freqüències que s'atenuen depenen de la disposició dels elements dispersius (arbres) , que en este cas, s'han disposat en forma de xarxa quadrada.

Per a dur-ho a terme, s'ha realitzat un estudi numèric amb l'eina COMSOL Multiphysics 5.5, avaluant la pèrdua per inserció quan s'instal·la la pantalla entre el focus emissor de soroll i el receptor.

Els resultats s'han analitzat a partir d'espectres acústics i mapes de pressió sonora de la zona d'estudi.

**Paraules clau:** Pantalla vegetal, cristalls de so, pèrdua per inserció, espectre acústic, mapes de pressió sonora.

## **ABSTRACT**

This work presents a new green screen based on sonic crystals (SC) which is formed by different species of trees that will be responsible for acting as scattering centres, so that, the attenuation peaks that are predicted by Bragg's Law will attenuate unwanted frequencies.

The fact of using trees makes the screen integrate in a respectful way with the environment, and its visual impact will be minimal due to the fact that, it is possible to block the transmission of noise through it without lock the view through the screen. The frequencies that are attenuated depend on the arrangement of the dispersing elements (trees), which in this case have been arranged in the form of a square network.

To do this, a numerical study has been performed with the COMSOL Multiphysics 5.5 tool, evaluating the insertion loss when the screen is installed between the noise emitter and the receiver.

The results have been analyzed by using acoustic attenuation spectra and sound pressure maps of the study area.

**Keywords:** Green screen, sound crystals, insertion loss, acoustic attenuation spectra, sound pressure maps.

# ÍNDICE

## DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- DOCUMENTO I: MEMORIA
- DOCUMENTO II: PRESUPUESTO
- ANEXO ODS

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.2 METODOLOGÍA .....	10
1.3 ETAPAS .....	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	12
2.1 PANTALLAS ACÚSTICAS.....	12
2.1.1 EXPERIMENTO DE MAEKAWA.....	13
2.1.2 INSERTION LOSS (IL). ATENUACIÓN POR EFECTO DE LA PANTALLA.....	14
2.2 CRISTALES DE SONIDO (CS).....	15
2.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	16
2.2.2 LEY DE BRAGG .....	18
2.2.3 BAND GAPS (BG). BANDAS PROHIBIDAS DE PROPAGACIÓN .....	19
2.3 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO .....	20
2.3.1 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO DE PRIMERA GENERACIÓN .....	20
2.3.2 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO DE SEGUNDA GENERACIÓN.....	21
2.3.3 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO VERDES.....	23
2.4 ELEMENTOS FINITOS: MÉTODO DE SIMULACIÓN .....	24
2.4.1 CONDICIONES DE CONTORNO .....	25
2.4.2 COMSOL Multiphysics .....	26
3. DISEÑO Y RESULTADOS.....	28

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES .....	28
3.1.1 MODELO 2D DE CAMPO LIBRE .....	29
3.1.2 MODELO 2D DE UN CS IDEAL .....	29
3.2 MODELO REAL FRENTE AL MODELO IDEAL .....	30
3.3 MODELO POR ZONAS.....	33
3.3.1 RED CUADRADA.....	34
3.3.2 RED TRIANGULAR .....	37
3.4 INCLUSIÓN DE RESONADORES.....	40
3.4.1 RED CUADRADA.....	42
3.4.2 RED TRIANGULAR .....	43
3.5 COMPARATIVA RED CUADRADA FRENTE A RED TRIANGULAR.....	44
4. CONCLUSIONES.....	45
5. TRABAJOS FUTUROS .....	47
6. BIBLIOGRAFÍA .....	48

#### **ÍNDICE DEL PRESUPUESTO**

1. PRESUPUESTOS PARCIALES .....	52
1.1 MANO DE OBRA .....	52
1.2 ESPECIES ARBÓREAS .....	53
1.3 TRABAJOS PREVIOS.....	53
1.4 MAQUINARIA .....	54
2. PRESUPUESTO TOTAL .....	54
3. BIBLIOGRAFÍA .....	55
Anexo al Trabajo Fin de Máster.....	58



# **DOCUMENTO I:**

# **MEMORIA**



## **1. INTRODUCCIÓN**

El ruido es un problema medioambiental que afecta a la vida de las personas y de la fauna presentes en las grandes ciudades y en las zonas turísticas de los países desarrollados [1].

Este problema se suele corregir actuando sobre las viviendas, es decir, mejorando aspectos de la construcción, aunque otras veces se opta por mudarse a zonas rurales o periurbanas, donde los efectos del ruido son menores. No obstante, estos desplazamientos provocan un aumento del ruido en estas zonas, y como consecuencia, poblaciones rurales o lugares alejados de las grandes ciudades, donde antes el ruido no suponía un problema, se están convirtiendo en zonas acústicamente contaminadas. Esta nueva situación se ve influenciada también por los desplazamientos por vacaciones, días libres, excursiones, etc.

Debido a esta problemática acústica, han surgido medidas a nivel europeo a través de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 (desarrollada en la directiva 2015/996 de la Comisión Europea), sobre la evaluación y gestión del ruido ambiental, haciendo solo referencia a la población humana, mientras que en España se desarrolló la Ley 37/2003 de 17 noviembre del ruido, y distintos Reales Decretos que desarrollan algunos aspectos de esta ley, donde además, se hace referencia a la fauna.

### **1.1 OBJETIVOS**

El objetivo general de este trabajo consiste en diseñar una pantalla acústica verde que contribuya a resolver el problema del ruido de tráfico, el cual es, en parte, responsable de determinadas dolencias auditivas, dolores de cabeza, estrés e irritabilidad, entre otras afecciones referidas a la salud humana.

Para ello, se pretende conocer y manejar herramientas de simulación comerciales para el diseño de dispositivos reductores del ruido. En este caso, la finalidad es diseñar, mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF), una pantalla acústica verde abierta para la reducción de ruido, que sea respetuosa con el medio ambiente y pase desapercibida, o que incluso favorezcan que la fauna que queda dentro de su perímetro pueda aprovecharla, mejorando así los problemas acústicos de la población, a fin de poder presentar una pantalla verde con vistas a su posible puesta en el mercado.

Los resultados se van a analizar mediante espectros acústicos de atenuación y mapas de presión sonora de la zona de estudio.

## 1.2 METODOLOGÍA

El procedimiento seguido para realizar este proyecto se ha dividido en las siguientes fases:

- Un primer periodo de estudio y documentación sobre la teoría física de las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido (CS), que continúa a lo largo de la realización del trabajo.
- Una segunda fase de aprendizaje sobre el funcionamiento del software que se va a emplear, COMSOL Multiphysics 5.5, y la puesta en práctica de distintas simulaciones.
- En tercer lugar, se diseñan diversos modelos que son simulados en COMSOL, y cuyos resultados obtenidos se exportan a Matlab para ser tratados por este programa y, a partir de los resultados gráficos que se van consiguiendo, ir mejorando los modelos de partida.
- Por último, tras todas las simulaciones llevadas a cabo se sacan conclusiones y se proponen soluciones, buscando siempre el modelo que consiga los mejores resultados.

## 1.3 ETAPAS

A continuación, en la Tabla 1 se muestran las etapas en las que se ha dividido este proyecto:

*Tabla 1. Distribución de las tareas realizadas.*

OCTUBRE	Búsqueda bibliográfica
NOVIEMBRE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprendizaje del nuevo Software específico de simulación COMSOL Multiphysics 5.5.</li> <li>• Simulación de modelos básicos ideales y reales, en red cuadrada, para poder comparar los resultados.</li> </ul>
DICIEMBRE	Simulación de modelos reales en red cuadrada incorporando las características geométricas y absorbentes de distintos árboles.
ENERO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación de modelos reales en red triangular incorporando las características geométricas y absorbentes de distintos árboles.</li> <li>• Simulaciones modificadas de los modelos anteriores con nuevos elementos de diseño.</li> </ul>
FEBRERO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación de los modelos reales anteriores, en red cuadrada y triangular, en los que se incorporan resonadores.</li> <li>• Simulaciones modificadas de los modelos anteriores con nuevos elementos de diseño.</li> </ul>

MARZO	<ul style="list-style-type: none"><li>• Simulación de modelos básicos para comparar los resultados obtenidos con red cuadrada y triangular.</li><li>• Modificaciones de los modelos anteriores con nuevos elementos de diseño.</li></ul>
ABRIL	Redacción del primer borrador del trabajo
MAYO	Revisión del borrador
JUNIO	Correcciones del trabajo
JULIO	Revisiones del trabajo
AGOSTO	Últimas correcciones

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 PANTALLAS ACÚSTICAS

Una de las posibles opciones para la reducción del ruido procedente de carreteras, industrias, o de maquinaria que trabaja a campo abierto, es actuar sobre el medio de transmisión de dicho ruido mediante el uso de pantallas acústicas. El modo de funcionamiento de éstas consiste en evitar la propagación directa del sonido entre la fuente y el receptor [1].

El empleo de estas pantallas presenta distintas ventajas:

- Reducen el ruido a niveles que cumplen los estándares de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- Restringen el paso de peatones o fauna en zonas no permitidas.
- Presentan un bajo impacto ambiental debido a la gran variedad de materiales y medios con los que construir la barrera.

Una pantalla acústica clásica, en general, es un material rígido continuo que se coloca entre la fuente de sonido y el receptor. Los materiales empleados generalmente para su construcción son rígidos y con una densidad superficial mínima de  $20 \text{ kg/m}^2$ , de acuerdo con la Ley de masas [2].

El efecto acústico de una de estas pantallas sobre el ruido se puede explicar de la siguiente manera, tal y como muestra la Figura 1: El ruido transmitido viaja desde la fuente hasta el receptor en línea recta. Esta trayectoria se ve interrumpida por la pantalla acústica, haciendo que una parte de la energía transmitida se refleje o se disperse hacia la fuente. La otra parte se puede transmitir a través de la pantalla, y ser difractada desde el borde de esta, reduciendo de forma notable el rendimiento de estos dispositivos, y la onda puede ser absorbida por el material de la pantalla.

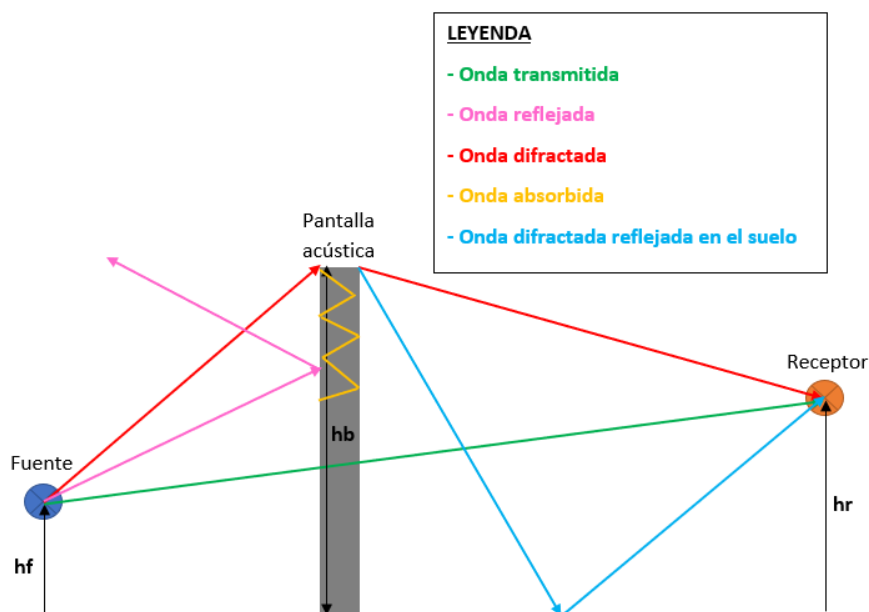


Figura 1. Esquema de comportamiento acústico de una pantalla.

A la hora de trabajar con estas pantallas, se deben tener en cuenta las siguientes características [2][3]:

- No atenúan el sonido por completo, si no que el límite que se puede obtener, propuesto por Z. Maekawa, es de 25 dB [4].
- Su eficacia depende del tamaño de estas, y es esencial una altura adecuada para que el ruido no se difracte.
- Deben ocultar la línea visual fuente-receptor y estar situadas lo más cerca posible de la fuente de ruido para que el ángulo de difracción en el borde superior de la pantalla sea lo más amplio posible.
- Deben controlar las reflexiones producidas ya que, en algunos casos, pueden provocar que aumente el ruido en otros receptores situados en la zona de la fuente. Esto puede hacerse inclinando las pantallas, utilizando materiales absorbentes en la fabricación de las pantallas, o protegiendo estos receptores con otra pantalla.
- El diseño debe resultar atractivo para la población, para no crear sensación de aislamiento.

### 2.1.1 EXPERIMENTO DE MAEKAWA

Maekawa presentó en 1965 un método de cálculo de la atenuación sonora producida por una pantalla acústica tradicional, basándose en datos experimentales de difracción sonora obtenidos de una pantalla plana semi-infinita en campo libre, y empleando un pulso tonal corto para distinguir la señal reflejada y retardada, evitando así la influencia de otras superficies [4].

Los niveles de presión sonora se midieron en la zona protegida por el efecto de la pantalla, obteniendo una curva de atenuación sonora en función del número de Fresnel (N, ecuación 1):

$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} \quad (1)$$

Siendo,  $\lambda$  la longitud de onda de la frecuencia central de la banda estudiada y  $\delta$  la diferencia de camino entre la fuente y receptor con y sin la interposición de la pantalla acústica (ecuación 2), tal y como se observa en la Figura 2:

$$\delta = A + B - d \quad (2)$$

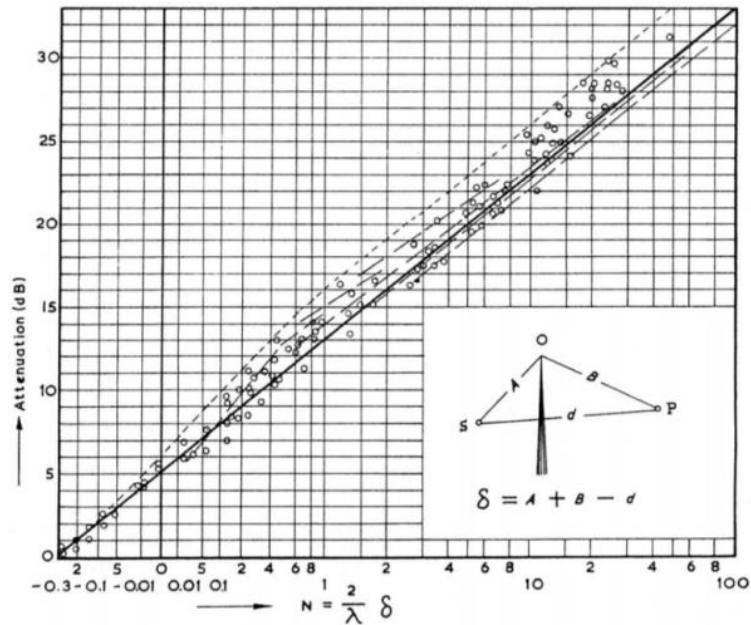


Figura 2. Ábaco de Maekawa [4].

Se trata del método más simple para calcular la difracción sonora en función de si la posición del receptor está en la zona de atenuación producida por la pantalla o fuera de ella.

### 2.1.2 INSERTION LOSS (IL). ATENUACIÓN POR EFECTO DE LA PANTALLA

El rendimiento de las pantallas acústicas suele medirse mediante un parámetro conocido como pérdidas por inserción (Insertion Loss<sup>1</sup>, IL), parámetro que se define como la diferencia de los niveles de presión sonora en un punto antes y después de la colocación de la pantalla [5]. Se rige por la siguiente expresión (ecuación 3):

$$IL (dB) = LP_{después} - LP_{antes} \rightarrow IL = 20 \cdot \log \left( \frac{|P_i|}{|P_d|} \right) (dB) \quad (3)$$

Donde,  $P_i$  es el valor de la presión eficaz cuando se coloca la pantalla, y  $P_d$  el valor de presión eficaz sin ningún obstáculo de por medio.

A partir del método de Maekawa comentado en el apartado anterior, se ha calculado la variación de IL en función de la frecuencia en banda fina para evaluar la respuesta acústica de la pantalla diseñada, con una altura de 3 m y anchura de 70-80 cm usando el método de Maekawa [2]. Los resultados se muestran en la Figura 3, donde se observa el valor máximo posible de atenuación de este tipo de pantallas, teniendo en cuenta la difracción por el borde superior como mecanismo de generación de ruido en la zona de sombra, que es la zona protegida acústicamente por la pantalla [4]. Este límite será la

<sup>1</sup> Insertion Loss (IL) es pérdidas por inserción en inglés.



referencia que se tomará para comparar la atenuación conseguida con los modelos de este trabajo.

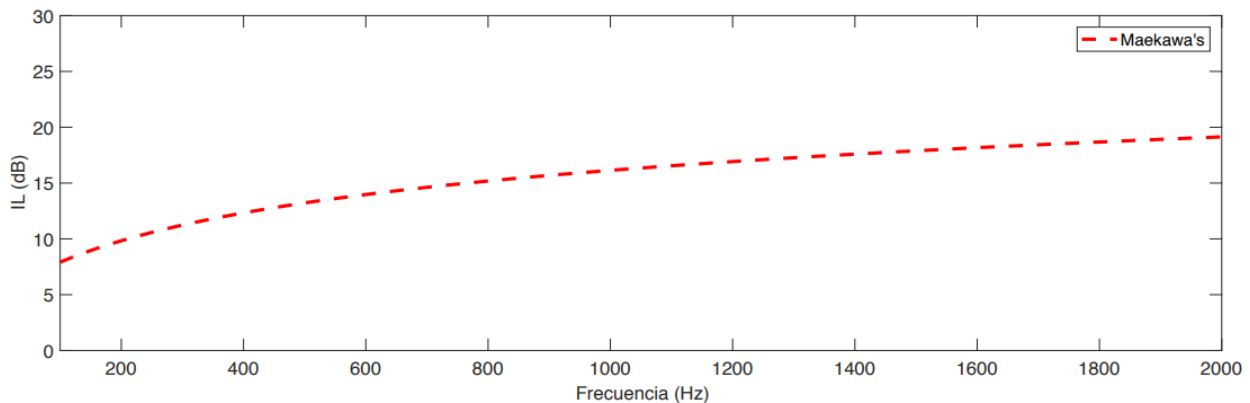


Figura 3. IL según el método de Maekawa para una pantalla de 70-80 cm de espesor [4].

Además, cabe destacar que, tal y como se observa en la Figura 3, la atenuación obtenida para el rango de frecuencias mostrado es poco selectivo.

## 2.2 CRISTALES DE SONIDO (CS).

Existen una gran variedad de pantallas que se clasifican en función del mecanismo acústico que emplean para impedir la transmisión del ruido. Actualmente, se está estudiando un tipo de pantalla acústica que incorpora un novedoso mecanismo de control de ruido, denominado dispersión múltiple [3].

Estas pantallas se denominan abiertas y están basadas en un tipo de materiales conocidos como cristales de sonido (CS). Estos dispositivos presentan ciertas ventajas respecto a las pantallas acústicas tradicionales como: la reducción en la cimentación necesaria, su transparencia, la permeabilidad al agua y al viento, la mejora en el comportamiento acústico, la posibilidad de crear un nuevo mercado de diseño de pantallas personalizadas y la mejora en la estética de este tipo de dispositivos.

La idea de los CS surgió a finales del siglo XX, cuando se demostró que una serie periódica de dispersores inhibía la transmisión del sonido debido a la periodicidad en la densidad del área que cubrían, al igual que lo hacen los cristales fotónicos con la luz para ciertos rangos de frecuencia [6]. Desde ese momento, se han ido realizando multitud de experimentos de transmisión en condiciones controladas para analizar la influencia del tipo de red u ordenamiento de los dispersores utilizados para construir la estructura periódica y de la densidad de estos, dentro de la misma [7]. Esto es así, ya que la respuesta de los CS no depende del material utilizado, siempre que la relación de impedancia del material al aire sea lo suficientemente grande como para dar como resultado una reflexión de sonido total por parte de los elementos [3].

Así, se pueden definir a los CS como materiales heterogéneos compuestos por un conjunto de dispersores acústicos inmersos en aire y colocados de forma ordenada y periódica (Figura 4) [8]. El nombre de cristales se debe a la forma en la que están distribuidos los dispersores, pues se asemeja a la de un sólido cristalino.



*Figura 4. Pantalla acústica compuesta por dispersores aislados situada en el campus de Vera (UPV) [8].*

Según las direcciones en las que se encuentren repetidos estos dispersores, los CS pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. A lo largo de todo este trabajo solo se van a considerar sistemas bidimensionales [8].

Además, estos dispersores se encuentran inmersos en un medio, y según la relación entre el medio y dichos dispersores, se determina la topología de red. Existen dos opciones [8]:

- **Topología Cermet**, en la que los dispersores están incluidos de forma aislada rodeados de forma completa por el medio material.
- **Topología Network**, donde los dispersores forman una red continua a través de toda la estructura.

En este proyecto se trabaja con la topología Cermet, ya que los dispersores se encuentran inmersos en aire, medio a través del cual se transmite el sonido. Además, esta geometría es la que más beneficia la atenuación acústica.

### 2.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Los CS conforman redes periódicas que están formadas por un conjunto de bases (unidades elementales) y una red de puntos donde se sitúan estas bases, conocida como red de Bravais. Estos tipos de redes se caracterizan en función de los ángulos ( $\alpha$ ) y la

distancia entre los nodos ( $a$ ). Las redes que se proponen con mayor frecuencia para este tipo de problemas son [8]:

- (a) Red cuadrada:  $a_1 = a_2$  y  $\alpha = 90^\circ$
- (b) Red rectangular centrada:  $a_1 \neq a_2$  y  $\alpha = 90^\circ$
- (c) Red hexagonal:  $a_1 = a_2$  y  $\alpha = 120^\circ$
- (d) Red rectangular primitiva:  $a_1 \neq a_2$  y  $\alpha = 90^\circ$
- (e) Red oblicua:  $a_1 \neq a_2$  y  $\alpha \neq 90^\circ$

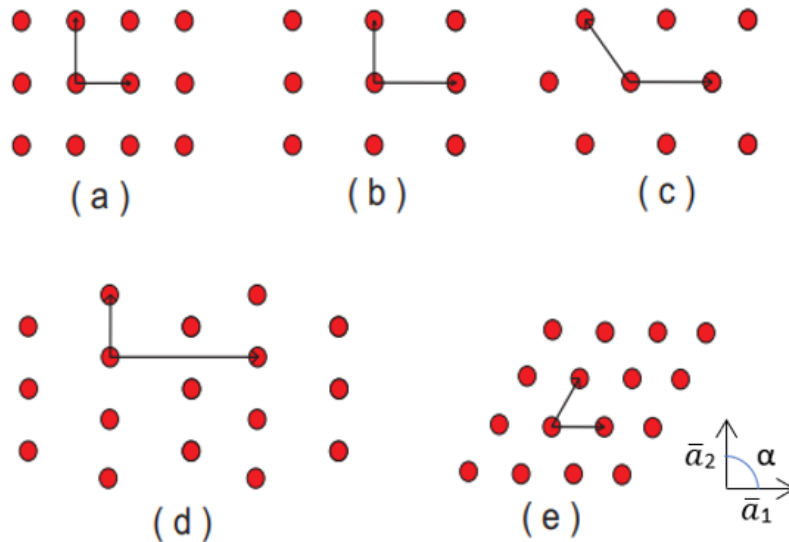


Figura 5. Redes de Bravais bidimensionales [8].

Las redes más empleadas en CS bidimensionales son la triangular y la cuadrada. Estos cristales se construyen a partir de la repetición periódica espacial de la celda unidad, la cual puede ser caracterizada por el parámetro de red,  $a$  [8].

Para red cuadrada, el parámetro de red es la longitud que existe entre los centros de los dispersores de un lado de la celda mientras que, para la red triangular, el parámetro de red coincide con la base de un triángulo equilátero (Figura 6).

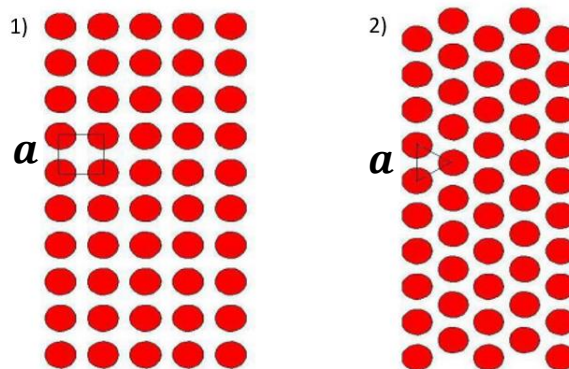


Figura 6. Ejemplos de red cuadrada (1) y red triangular (2) [8].

### 2.2.2 LEY DE BRAGG

Estos sistemas presentan una propiedad interesante que permite su uso como pantalla acústica, y es la existencia de rangos de frecuencias en los que no se transmite el sonido a través del cristal. Estos rangos se denominan bandas prohibidas (band gap<sup>2</sup>), concepto del que se hablará en el siguiente apartado 2.2.3 [2].

El mecanismo físico en el que se basa este fenómeno es la interferencia destructiva de Bragg (Figura 7) debido a un proceso de dispersión múltiple, relacionado con la periodicidad del sistema.

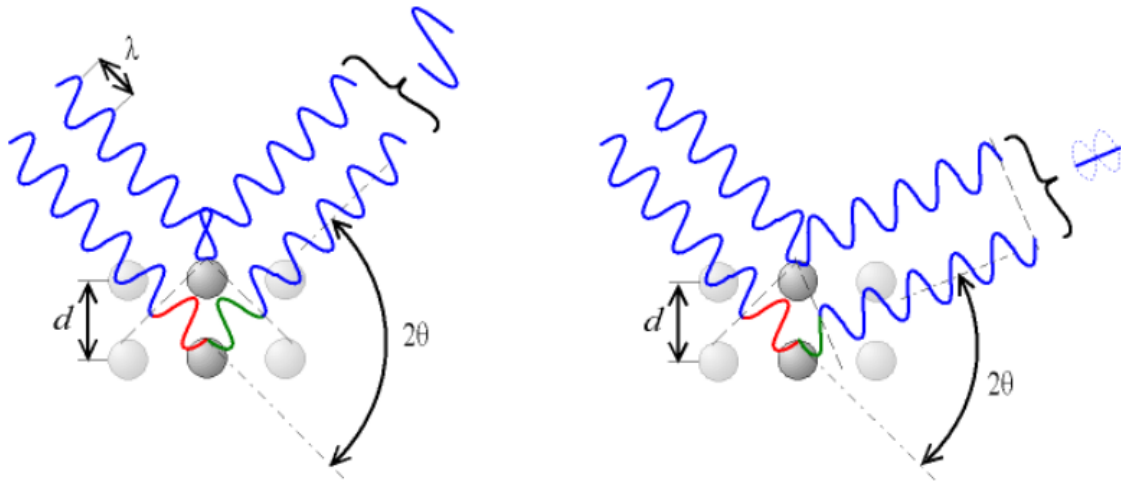


Figura 7. Interferencia constructiva (izquierda) y destructiva (derecha) en función de  $\theta$  (ángulo de desviación) [9].

Esta propiedad de interferencia está basada en la Ley de Bragg [8], que estudia las direcciones en las que se producen interferencias constructivas a partir de ondas que inciden en estructuras cristalinas y se reflejan en otras direcciones, tal y como se puede ver en la Figura 8 [10].

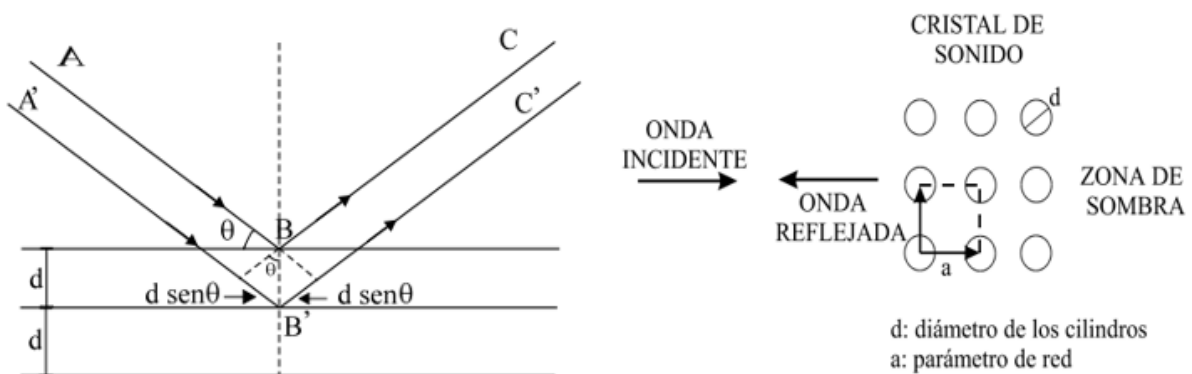


Figura 8. Mecanismo de la Ley de Bragg y esquema del efecto ondulatorio que se produce cuando una onda incide sobre un cristal [11].

Para que una interferencia sea constructiva la diferencia de caminos entre los rayos reflejados debe de ser un múltiplo entero,  $n$ , de longitudes de onda  $\lambda$  [10].

<sup>2</sup> Band gap es banda prohibida en inglés.

$$2 \cdot a \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \quad (4)$$

Siendo,  $a$  el parámetro de red,  $\theta$  el ángulo que forman la onda incidente y la onda reflejada y  $\lambda$  la longitud de onda sonora.

### 2.2.3 BAND GAPS (BG). BANDAS PROHIBIDAS DE PROPAGACIÓN

Uno de los primeros ejemplos de CS se descubrió en una escultura realizada con cilindros de acero al aire, que demostró experimentalmente la existencia de band gaps [6]. La posición y el tamaño de estas bandas dependen de factores como:

- El **parámetro de red** ( $a$ ), ya que cuanto menor sea la distancia entre los dispersores, mayor será la frecuencia a la que se encuentra el band gap [8].

Se puede calcular a partir de unas expresiones matemáticas establecidas a partir de la ley de Bragg o del cálculo de las zonas de Brillouin. Estas expresiones también se ven influenciadas por la dirección de propagación del sonido.

A continuación, se muestran las expresiones obtenidas a partir de la ecuación 4 para calcular la frecuencia Bragg en red cuadrada y en red triangular (ecuación 5 y 6 respectivamente).

$$\text{Red cuadrada: } f_{Bragg} = \frac{c}{2 \cdot a} \quad (5)$$

$$\text{Red triangular: } f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3} \cdot a} \quad (6)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en el aire, que en este trabajo se tomará de 340 m/s.

- El **factor de llenado** ( $ff$ , filling factor<sup>3</sup>), siendo este la fracción de volumen que ocupan los dispersores en la celda unidad con respecto al volumen total de la celda. Se expresa de la siguiente forma [8]:

$$ff = \frac{N \text{ dispersores} \cdot V \text{ dispersor}}{V \text{ celda unidad}} \quad (7)$$

Las expresiones del factor de llenado para las redes típicas se muestran en las ecuaciones 8 y 9:

$$\text{Red cuadrada: } ff = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot a^2} \quad (8)$$

---

<sup>3</sup> Filling factor es factor de llenado en inglés.

$$\text{Red triangular: } ff = \frac{\pi \cdot 4 \cdot r^2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot a^2} \quad (9)$$

- El **cociente entre densidades de los elementos del cristal**, el cual determina el tamaño de los band gaps e influye en la posición de estos en el espectro de frecuencia. Este cociente permite que los dispersores sean de todo tipo de materiales [8].
- El **área de atenuación (AA)**, parámetro que sirve para determinar la atenuación producida por un cuerpo. Se define por el área encerrada en la parte positiva del espectro de atenuación (IL) y el umbral de 0 dB en el intervalo de frecuencia estudiado. Cuanto mayor sea el valor de este parámetro, mejor será la capacidad de atenuación del dispositivo en cuestión [8].

### 2.3 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO

La existencia de pantallas basadas en CS, permiten abrir un nuevo horizonte de manera que se diseñe una pantalla con una buena calidad de integración en el paisaje, permitiendo mediante una disposición determinada inhibir la transmisión del sonido evitando bloquear la visión a través de dicha pantalla [1].

Además, son tan efectivas para atenuar el sonido como una sólida, pero como tienen menos volumen y pesan menos son más fáciles de construir, ya que el mecanismo de atenuación no se basa en la ley de masas sino en la interferencia del sonido [3].

#### 2.3.1 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO DE PRIMERA GENERACIÓN

El mecanismo de control del ruido de estas pantallas, la dispersión múltiple, no es capaz de atenuar todo el espectro audible de frecuencias, solo actúa sobre ciertos rangos en concreto según las características geométricas del cristal [12] [2], por lo que se plantean dos objetivos de mejora con los que surgen las pantallas de segunda generación [12]:

- Mejorar el proceso de dispersión múltiple mediante nuevas ordenaciones de dispersores cilíndricos.
- Incluir nuevos mecanismos de control de ruido en el diseño, como la resonancia y la absorción.

### 2.3.2 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO DE SEGUNDA GENERACIÓN.

Estas pantallas combinan los mecanismos de dispersión, absorción y resonancia acopladas en una distribución óptima, que presenta un gran abanico de posibilidades de diseño para atenuar el ruido en distintos rangos de frecuencia, sabiendo que [12]:

- La posición de los picos de atenuación debidos a la dispersión múltiple depende de la distribución espacial de los dispersores.
- La posición de los picos de resonancia depende de la geometría del resonador.
- Los niveles de absorción dependen del volumen de material absorbente empleado.
- Los efectos de control de ruido de los mecanismos implicados se superponen aumentando la capacidad global de atenuación del dispositivo en un amplio rango de frecuencias.

A continuación, en las Figuras 9, 10, 11 y 12 se muestran diversas propuestas de diseño de estos dispositivos [12]:

- Dispersores en forma cilíndrica compuestos por un núcleo rígido con un material absorbente poroso alrededor.

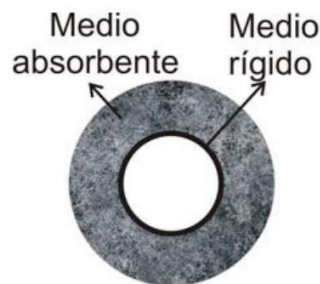


Figura 9. Esquema de la sección transversal del primer tipo de dispersor propuesto [12].

- Dispersores en forma cilíndrica compuestos de materiales rígidos que presentan propiedades resonantes.



Figura 10. Esquema de la sección transversal del segundo tipo de dispersor propuesto [12].

Estos dispositivos se conocen como resonadores de Helmholtz. En este caso, modificando las características geométricas del resonador se puede modular la posición del pico de resonancia en el rango de frecuencias [13]:

$$f = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{Le \cdot V}} \quad (10)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en el aire (m/s),  $S$  es la sección de la entrada al resonador ( $m^2$ ),  $Le$  es la longitud efectiva del cuello del resonador (m) y  $V$  es el volumen de la cavidad resonante ( $m^3$ ) [12].

- Dispersores elásticos en los que aparezcan dos picos de resonancia debidos a distintos fenómenos físicos, en los que también se puede modular la posición del pico de resonancia en el rango de frecuencias [12].

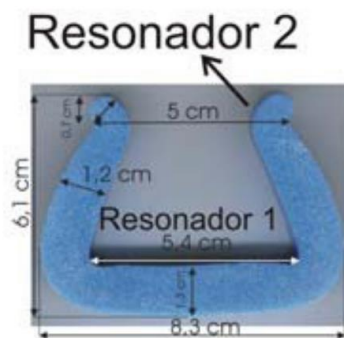


Figura 11. Esquema de la sección transversal del tercer tipo de dispersor propuesto [12].

- Dispersores formados por material rígido, absorbente y con comportamiento de resonador, en el que se involucran tres mecanismos de control de ruido (dispersión múltiple, absorción y resonancia) [12].

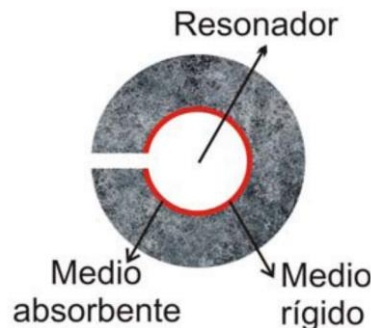


Figura 12. Esquema de la sección transversal del cuarto tipo de dispersor propuesto [12].

Cabe destacar que el material absorbente produce un incremento del espesor de la cavidad que hace que el pico debido a la frecuencia de resonancia se desplace en el espectro de atenuación hacia bajas frecuencias, debido a la modificación de la geometría del resonador, siendo este un resultado positivo ya que proporciona otra herramienta de diseño para atenuar bajas frecuencias.

Los efectos de estos mecanismos de control del ruido implicados se superponen de forma constructiva, aumentando la capacidad global de atenuación acústica en un amplio rango de frecuencias. Así, estas técnicas proporcionan un procedimiento de alta tecnología ya que estos dispositivos se pueden desarrollar de tal manera que se pueden elegir los rangos de frecuencias atenuados deseados [2].



Por tanto, se demuestra que las pantallas de cristales de segunda generación mejoran los resultados obtenidos respecto a las de primera generación, donde el único efecto acústico que actúa es la dispersión múltiple [12].

### **2.3.3 PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO VERDES**

Uno de los principales problemas que presentan las pantallas acústicas es que en los bordes superiores el viento puede provocar un fenómeno conocido como RESWING (Refracción del sonido por gradientes inducidos por el viento) [1].

En un experimento se colocaron árboles altos detrás de una pantalla acústica tradicional, recuperando hasta 4,5 dBA, por lo que el uso de vegetación podría contribuir en la atenuación del ruido. Por ejemplo, el uso de setos reduce el ruido del tráfico que aparece a bajas frecuencias ya que, las hojas, ramas y troncos actúan como dispersores.

También se puede crear cinturones verdes con árboles, con los que se obtienen reducciones de hasta 15 dB, en función del ancho y del marco de plantación. Para una buena atenuación del ruido, se necesitan como mínimo cinturones de 30 metros y, cuando la vegetación es lo suficientemente alta, amplia y densa, existen estudios que afirman que disminuye el ruido del tráfico. Cabe destacar que así, además, se ayuda a contener el nivel CO<sub>2</sub> en las ciudades.

Los CS se pueden crear utilizando árboles como centros de dispersión, por lo que el patrón en el que se plantan los árboles es un factor que se debe tener en cuenta, al igual que el tipo de árbol, la superficie del suelo y el ancho de la pantalla arbórea [7].

Los experimentos realizados han demostrado que los cinturones de árboles pueden atenuar ciertas bandas de frecuencias con más eficacia si están dispuestos en una configuración de red a bajas frecuencias.

En este trabajo se presenta una pantalla vegetal abierta basada en CS mediante distintas especies de árboles propios de la zona mediterránea donde, al trabajar en dos dimensiones, se van a distinguir tres zonas distintas, tal y como se muestra en la Figura 13 [1].

La zona 1, la más próxima a la superficie del suelo, está formada por los troncos de las distintas especies de árboles, y además se introducen una serie de elementos con forma cilíndrica del tipo junco o caña. Esta zona presenta otras ventajas a parte de la reducción de ruido, como son:

- Servir como barrera para que la fauna no pueda atravesar vías concurridas de tránsito.
- Evitar que la vegetación contigua a las vías rodadas, la cual puede suponer un peligro por el gran poder combustible, se acumule.
- Servir como cinturón vegetal sustituyendo los quitamiedos metálicos, tan problemáticos en accidentes de bicicletas y motocicletas.

En la zona 2, se siguen teniendo en cuenta solo los trocos de las distintas especies, pero los juncos ya no se evalúan porque se estudia una altura superior. Y, por último, en la zona 3 se incorporan al estudio las copas de los árboles más bajos y los troncos de los árboles más altos.

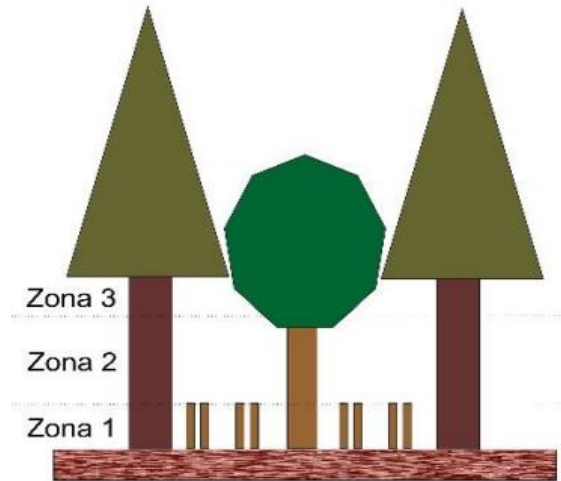


Figura 13. Esquema de las diferentes zonas de estudio [1].

## 2.4 ELEMENTOS FINITOS: MÉTODO DE SIMULACIÓN

El método de los elementos finitos (MEF) es una técnica de aproximación que consiste en dividir un problema continuo en un número finito de elementos, cuyo comportamiento viene definido por un número finito de parámetros asociados a puntos concretos (nodos). Estos nodos son los puntos de unión entre los elementos [14].

Las incógnitas del problema, definidas por funciones matemáticas, se convierten en el valor de estas funciones en los nodos, y el comportamiento de cada elemento queda definido por el de los nodos mediante funciones de interpolación.

Por tanto, los MEF se encargan de discretizar el modelo, es decir, pasar de un modelo continuo a uno discreto.

Para este caso en concreto, la simulación se ha llevado a cabo empleando el MEF, ya que los métodos numéricos son una alternativa para solucionar problemas que presentan geometrías complicadas, y para poder estudiar la interacción de las ondas con los dispersores. Este método consiste en la resolución de la ecuación de Helmholtz [1] (ecuación 16) que se obtiene a partir de la siguiente ecuación de ondas:

$$\frac{1}{\rho_0 c_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) = \vec{Q} \quad (11)$$

Donde,  $\rho_0$  es la densidad del medio (aire) ( $\frac{kg}{m^3}$ ),  $c_s$  es la velocidad del sonido ( $\frac{m}{s}$ ),  $\vec{q}$  es la fuente dipolar ( $\frac{N}{m^3}$ ) y  $\vec{Q}$  es la fuente monopolar ( $\frac{1}{s^2}$ ) [8].

Seguidamente, se lleva a cabo un análisis armónico temporal mediante el software COMSOL Multiphysics para obtener los espectros en frecuencia y los mapas de presión, quedando la ecuación 11 de la siguiente manera [8]:

$$\nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c_s^2} p = \vec{Q} \quad (12)$$

De esta forma, la presión queda en función de la posición y la frecuencia:

$$p = p(\vec{x}, \omega) \quad (13)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular  $\left(\frac{rad}{s}\right)$  y  $f$  es la frecuencia lineal (Hz), cuya relación es:

$$\omega = 2\pi f \quad (14)$$

Al trabajar en dos dimensiones y con una onda incidente plana, la ecuación 13 queda ahora de la siguiente forma:

$$p(\vec{r}) = p(x, y) e^{-ik_z z} \quad (15)$$

siendo  $k_z$  el número de onda fuera del plano, que por defecto es nulo.

Además, los parámetros  $\vec{q}$  y  $\vec{Q}$  también son nulos pues en este caso, no existen monopolos ni dipolos. Así, se simplifica la ecuación 12:

$$\nabla \left( \frac{1}{\rho} \nabla p \right) = \frac{\omega^2}{\rho c^2} p \quad (16)$$

Por otro lado, también se ha de definir la geometría de la estructura, discretizar el dominio y establecer las condiciones de contorno.

#### 2.4.1 CONDICIONES DE CONTORNO

La resolución de este tipo de problemas requiere la aplicación de algunos límites artificiales en el dominio numérico. Partiendo de la ecuación 16 para el modelo de ecuaciones en derivadas parciales, las condiciones de contorno que se han aplicado en este trabajo se presentan a continuación:

- **Rígido:** Esta condición de contorno es de tipo **Neumann**, lo que conlleva a que la derivada parcial de la presión en la superficie sea nula [8]. Es decir, la amplitud de la presión en la superficie será máxima o mínima.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (17)$$

- **Radiación:** La condición de contorno de tipo radiación, también conocida como **condición de Sommerfeld**, permite a la onda salir del dominio, simulando así un campo libre, con reflejos mínimos o nulos, de tal forma que el campo dispersado consiste solo en ondas salientes. Esta condición se puede aplicar a ondas planas,

cilíndricas y esféricas. Para incluir una onda plana en el contorno, existen dos posibilidades [8]:

1. Emplear  $p = p_0$ , cuyo valor es el que se impone en el contorno y en la dirección dada por un vector unitario normal a la superficie  $\vec{n}_x$ .
2. Utilizar  $p = p_i$ , cuyo valor es el que se ha definido en la opción Physics/Scalars Variables del menú del programa COMSOL.

Esta condición de contorno viene representada por la siguiente expresión:

$$\vec{n} \left( \frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) + \frac{ikp}{\rho_0} + \frac{i}{2k} \Delta_T p = \left( \frac{i}{2k} \Delta_T p_0 e^{-i(\vec{k}\vec{r})} + (ik - i(\vec{k}\vec{r})) \frac{p_0 e^{-i(\vec{k}\vec{r})}}{\rho_0} \right) \quad (18)$$

- **Continuidad:** Esta condición permite modelar materiales porosos utilizando el modelo Poroacústica del programa COMSOL en acústica de presión. El subdominio empleado en este caso es el modelo de Delany-Bazley-Miki, el cual modifica las expresiones para constante de propagación compleja ( $r$ ) y la impedancia característica ( $Z$ ) del modelo de Delany-Bazley. Las expresiones propuestas son las siguientes [15]:

$$Z = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0,070 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} - j0,107 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} \right] \quad (19)$$

$$r = \frac{2\pi f}{c_0} \left[ 0,160 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} + j \left( 1 + 0,109 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} \right) \right] \quad (20)$$

Siendo  $\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) la densidad del aire,  $f$  (Hz) la frecuencia,  $c_0$  (m/s) la velocidad del sonido en el aire y  $\sigma$  (N·s/m<sup>4</sup>) la resistencia específica al flujo.

Las ecuaciones 19 y 20, se basan en interpolaciones de medidas en función del cociente  $\frac{\rho_0 f}{\sigma}$ , donde el rango válido para estas relaciones es el siguiente:

$$10^{-2} \leq \frac{\rho_0 f}{\sigma} \leq 1 \quad (21)$$

Las magnitudes físicas de la ecuación 21 se encuentran expresadas en el Sistema Internacional.

#### 2.4.2 COMSOL Multiphysics

Como ya se ha comentado anteriormente, el software comercial con el que se han llevado a cabo las predicciones numéricas es COMSOL Multiphysics 5.5, software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. Este programa permite abordar todo el proceso, desde la modelización hasta la resolución del problema a partir de los siguientes pasos [16]:

- Elegir el régimen de estudio. En el caso que nos ocupa, el módulo de acústica de COMSOL permite realizar un análisis modal de frecuencias propias, análisis armónico temporal o transitorio.
- Definir la geometría del modelo continuo.
- Definir las propiedades físicas y de los materiales, que se puede realizar directamente desde la base de datos del programa.
- Introducir las condiciones de contorno.
- Introducir las cargas: definir las fuentes existentes en el problema.
- Seleccionar el tipo de mallado. En este punto se realiza la discretización del problema, dividiendo en un conjunto de elementos finitos la geometría generada. El mallado se puede hacer de forma automática o con las especificaciones del usuario. Cuanto más ajustado sea el mallado, más exacta será la solución calculada. Una malla representa la división de la geometría del modelo continuo en pequeñas unidades de formas simples, tal y como se puede ver en la Figura 14.

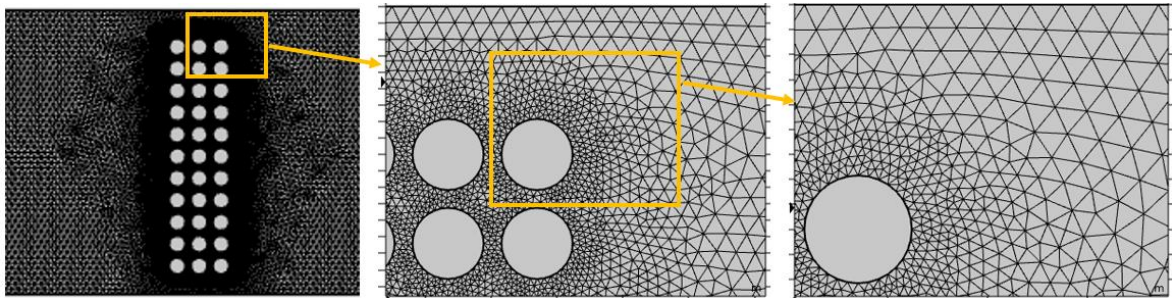


Figura 14. Ejemplo de malla extraído de este propio proyecto.

Al elegir el tipo de malla que se va a emplear, el sistema establece un número de elementos del problema a resolver. Cuanto más pequeña es la malla, el tiempo de cálculo es más grande ya que este depende de los grados de libertad del problema. El elemento de malla ha de cumplir la siguiente relación (ecuación 22) para evitar inestabilidades del modelo y tener un cálculo preciso [17]:

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{8 \cdot f_{max}} \quad (22)$$

- Resolución del problema.
- Análisis y post-procesado.

### 3. DISEÑO Y RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

El objetivo principal de los modelos diseñados es que sean competitivos respecto a las pantallas acústicas clásicas. Con ese fin, se busca que la pantalla sea lo más estrecha posible consiguiendo la misma atenuación acústica. A continuación, se describen las propiedades generales para el diseño de los modelos empleados y se presenta un esquema genérico para ilustrar la metodología empleada (Figura 16 y 17):

- La estructura de los dispersores empleados es cilíndrica, pues además de facilitar los cálculos, se ha escogido por ser la que más se asemeja a la forma de los árboles.
- Las dimensiones de los modelos vienen dadas por el parámetro de red  $a$ , el cual se obtiene tras fijar una frecuencia correspondiente al primer band gap. Se calcula a partir de las ecuaciones 23 y 24 que derivan de las ecuaciones 5 y 6 respectivamente:

$$\text{Red cuadrada: } a = \frac{c}{2 \cdot f_{\text{Bragg}}} \quad (23)$$

$$\text{Red triangular: } a = \frac{c}{\sqrt{3} \cdot f_{\text{Bragg}}} \quad (24)$$

- Los dispersores empleados se encuentran inmersos en aire, medio cuyas características son las siguientes: velocidad de propagación del sonido  $c = 340$  m/s y densidad  $\rho = 1,25$  kg/m<sup>3</sup>.
- El rango de frecuencias a estudiar será de 0 – 1500 Hz con pasos de 10 Hz, pues son las bajas frecuencias las que son más difíciles de atenuar.
- Se trabaja con una onda plana incidente (OPI) que viaja de izquierda a derecha de presión 1 atm.

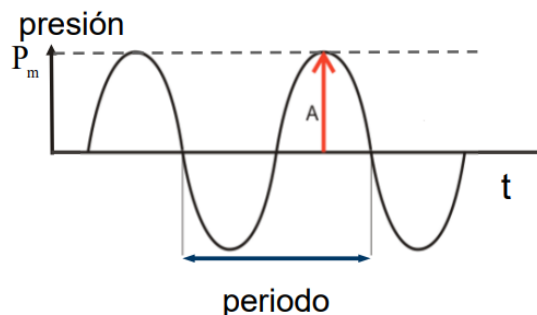


Figura 15. Onda plana.

Donde,  $P_m$  es la amplitud máxima de la presión.

- Para que los resultados sean precisos se trabaja con tamaños de malla que siguen la ecuación 22 mostrada anteriormente.

- El punto de medida se ha colocado centrado en el dominio de estudio y a 1 m desde el final de la pantalla.
- Los espectros de atenuación en el rango de estudio son tratados mediante el software Matlab.

### 3.1.1 MODELO 2D DE CAMPO LIBRE

El modelo 2D de campo libre, que se denomina real ya que considera que la pantalla es finita en el eje Y, se muestra en la Figura 16. Este modelo está formado por una serie de cilindros que se modelizan con la condición de contorno de Neumann, ya que dichos cilindros se consideran sólidos rígidos.

El dominio de la simulación donde se insertan los cilindros consiste en un rectángulo de dimensiones 8 x 4 m, con condiciones de contorno de radiación, que simulan las condiciones de campo libre (sin reflexiones indeseadas en las paredes).

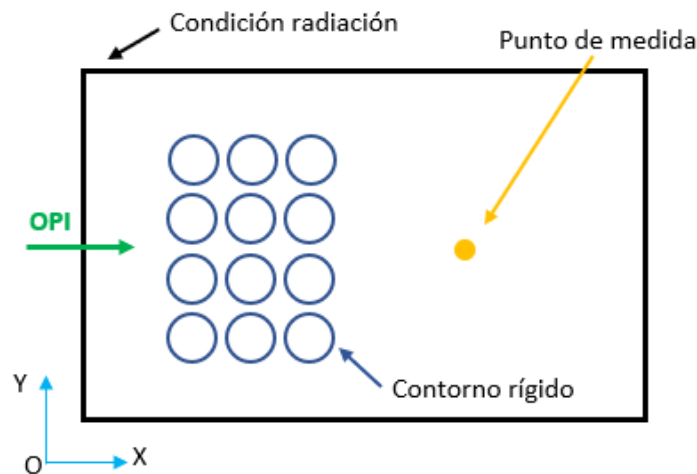


Figura 16. Modelo de simulación de campo libre.

### 3.1.2 MODELO 2D DE UN CS IDEAL

El modelo 2D ideal, que considera que la pantalla tiene una longitud semi-infinita en el eje Y, se muestra en la Figura 17. Este modelo está compuesto por tres cilindros colocados en una red donde a los contornos horizontales (inferior y superior) se les asigna una condición periódica, para que dicha red tenga unas características propias de una pantalla semi-infinita. Por otra parte, a los contornos verticales, como en el modelo real, se les asigna la condición de contorno de radiación (Sommerfeld).

En este caso, el dominio de la simulación donde se insertan los cilindros consiste en un rectángulo de dimensiones 5 x  $a$  m, siendo  $a$  el parámetro de red.

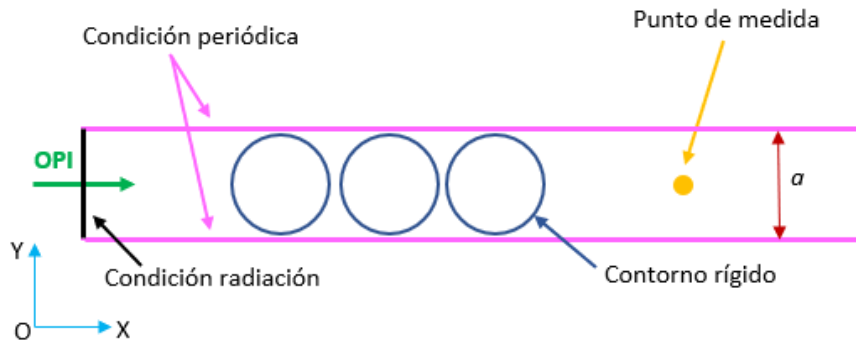


Figura 17. Modelo de simulación de CS Ideal de 3 filas.

### 3.2 MODELO REAL FRENTE AL MODELO IDEAL

El hecho de emplear modelos bidimensionales se debe a que estos sistemas reducen el coste computacional aportando buenos resultados, como se ha comprobado en trabajos ya publicados y referenciados en este TFM. Además, el modelo ideal reduce aún más dicho coste computacional, es por eso por lo que se ha incluido en este trabajo.

- Modelo real 2D

En primer lugar, tal y como se ha explicado en el apartado 3.1.1, se empieza simulando un modelo sencillo compuesto por cilindros que se van a modelizar empleando la condición de Neumann y, el dominio de la simulación donde se insertan estos cilindros es un rectángulo de dimensiones 8 x 4 m, con condiciones de contorno de radiación.

Además, en este caso se ha decidido estudiar los resultados en tres frecuencias Bragg distintas, ya que como se puede ver en la Tabla 2, al aumentar la frecuencia Bragg, disminuye el parámetro de red ( $a$ ), hecho que contribuye a que los distintos modelos disminuyan la cantidad de ruido tras la pantalla, como se podrá observar en la tabla 4.

Tabla 2. Paso de red para las distintas frecuencias Bragg estudiadas.

500 Hz (Radio = 0,10 m)	750 Hz (Radio = 0,10 m)	1000 Hz (Radio = 0,08 m)
$a = \frac{343}{2 \cdot 500} = 0,34 \text{ m}$	$a = \frac{343}{2 \cdot 750} = 0,23 \text{ m}$	$a = \frac{343}{2 \cdot 1000} = 0,17 \text{ m}$

- Modelo ideal 2D

Para este caso, el modelo se adapta para analizar las simetrías cuadradas elegidas anteriormente, y así, hacer más visible los resultados y tomar decisiones de diseño. Los resultados de esta simulación se obtienen de forma mucho más rápida.

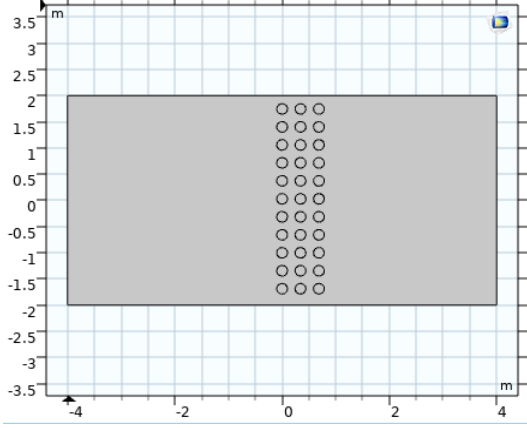
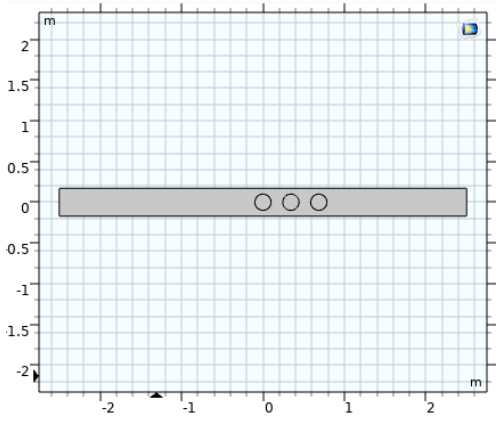
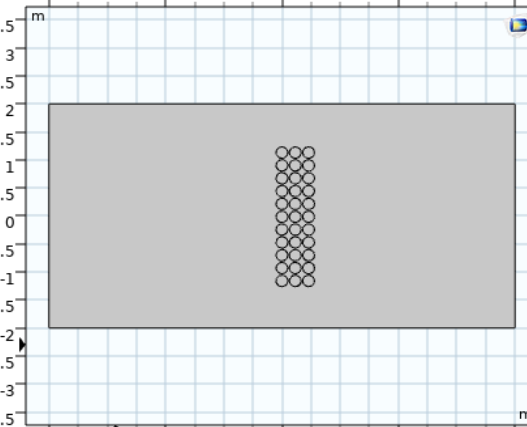
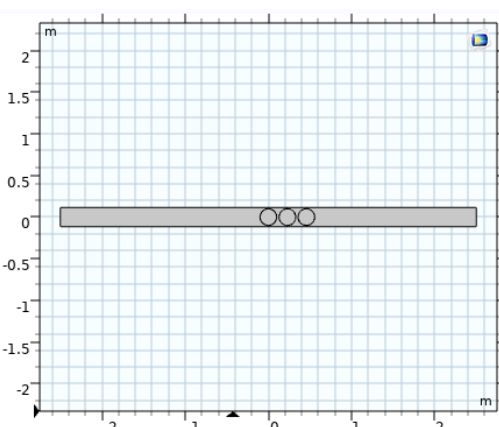
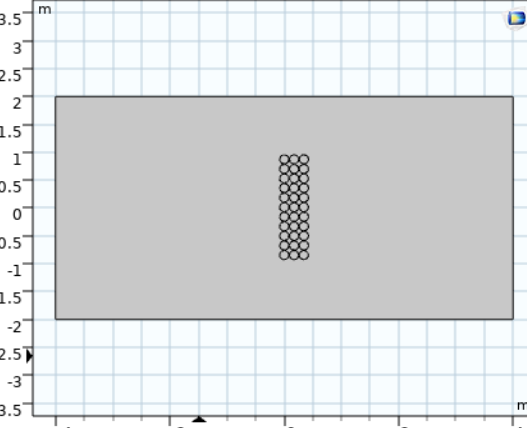
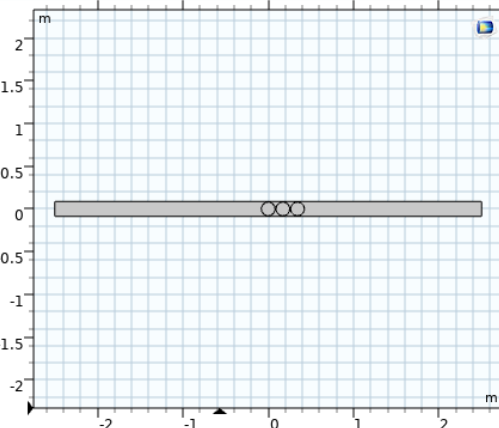
Siguiendo con las características del modelo enunciado en el apartado 3.1.2, en los modelos mostrados en la Tabla 3, se observan tres cilindros colocados en una red donde a los contornos horizontales (inferior y superior) se les asigna una condición periódica,



y a los contornos verticales, como en el modelo real, se les asigna la condición de contorno de radiación (Sommerfeld). El dominio de la simulación donde se insertan los cilindros, en este caso es un rectángulo de dimensiones  $5 \times a$  m, siendo  $a$  el parámetro de red.

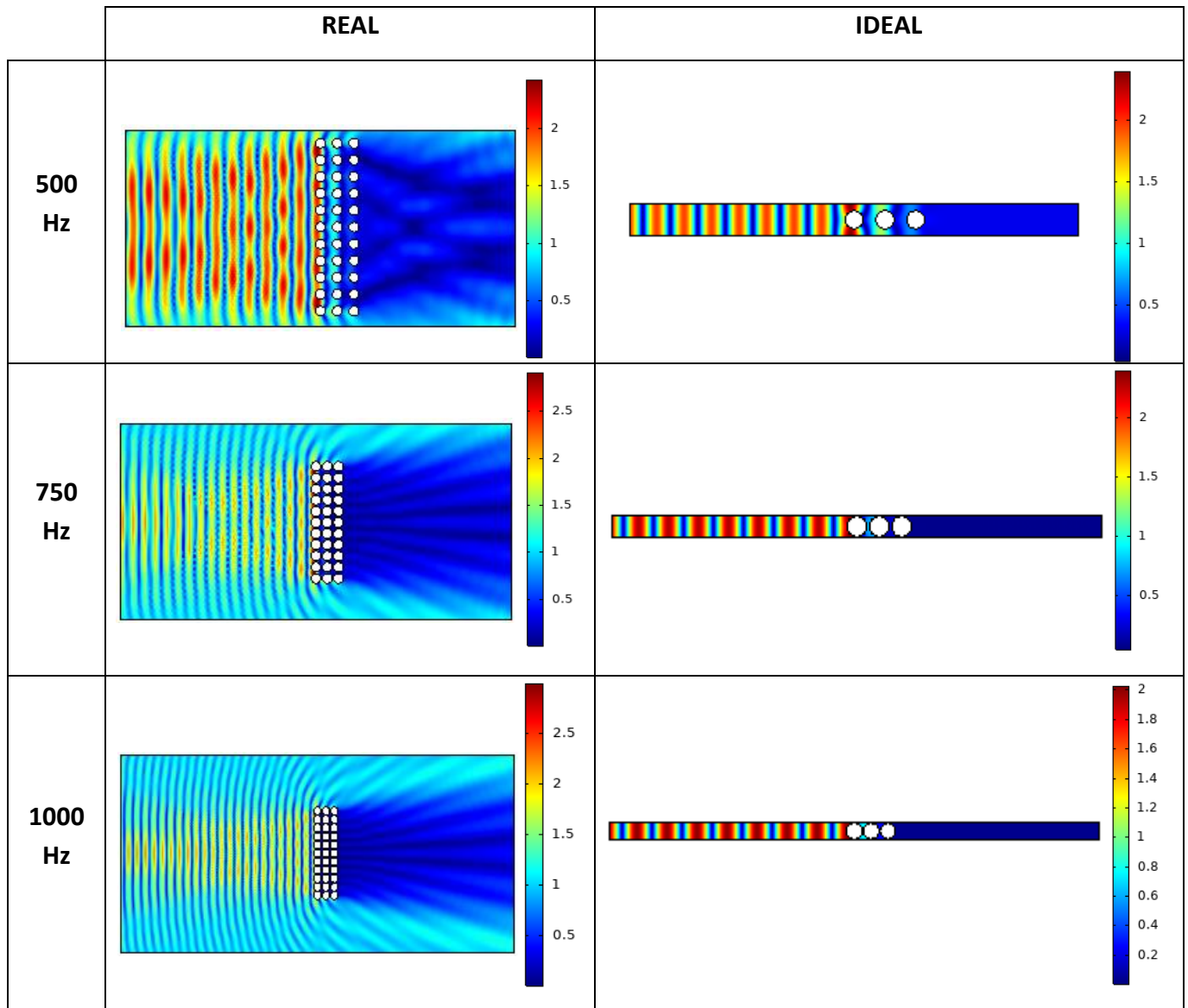
A continuación, en la Tabla 3 se muestran los distintos prototipos que se han diseñado:

Tabla 3. Modelos reales e ideales a distinta frecuencia Bragg.

F. BRAGG	REAL	IDEAL
500 Hz		
750 Hz		
1000 Hz		

A continuación, en la Tabla 4 se muestran los mapas de presión absoluta en Pa de los modelos simulados, viendo que en todos los casos hay mucha más presión delante que detrás de la pantalla.

Tabla 4. Mapas de presión absoluta a 500, 750 y 1000 Hz.



Seguidamente, se presentan los espectros de atenuación acústica de los distintos modelos. En las tres comparaciones realizadas (Figura 18, 19 y 20), se refleja como los modelos ideales (color azul) siguen la pauta de los modelos reales (color rojo), pero estos presentan un band gap mejor definido a la frecuencia Bragg correspondiente. Así pues, en la Figura 18 se observa como el primer band gap se encuentra alrededor de los 500 Hz, pues esa es la frecuencia Bragg a la que se ha diseñado el modelo. Lo mismo ocurre en la Figura 19 y 20 donde el primer band gap se observa sobre los 750 Hz y los 1000 Hz respectivamente.

## Diseño de una pantalla acústica verde abierta para la reducción del ruido

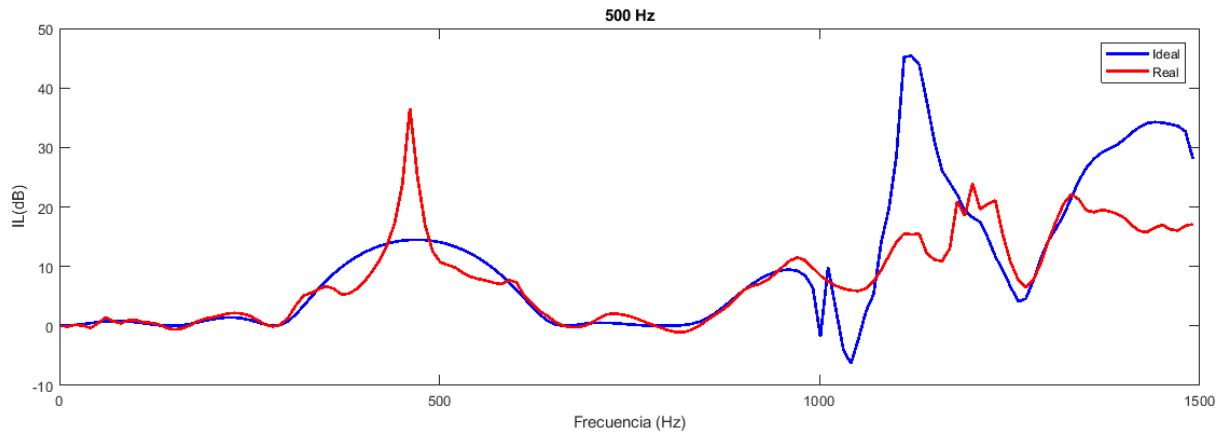


Figura 18. Espectros de atenuación acústica de un modelo ideal (azul) y real(rojo), a la frecuencia Bragg de 500 Hz.

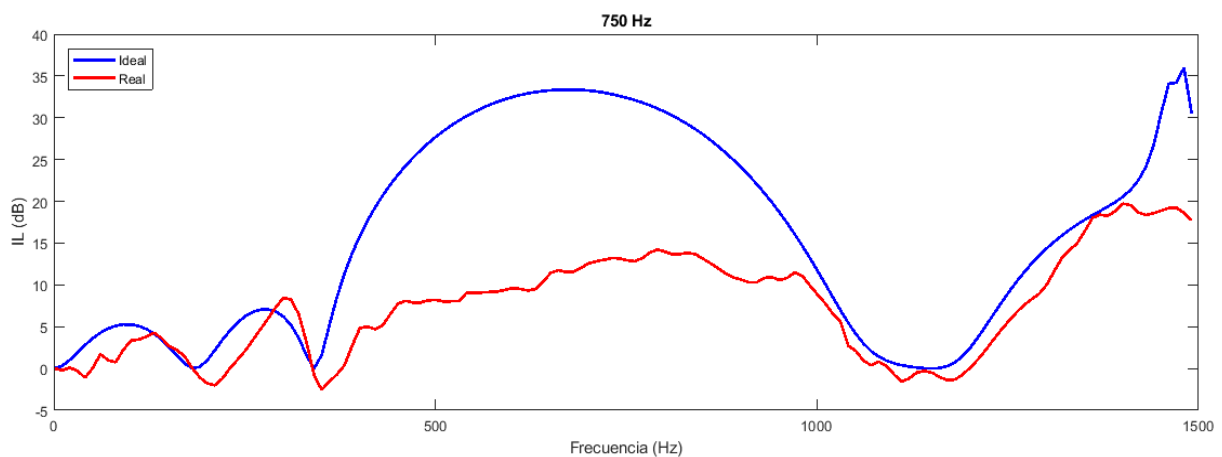


Figura 19. Espectros de atenuación acústica de un modelo ideal (azul) y real(rojo), a la frecuencia Bragg de 750 Hz.

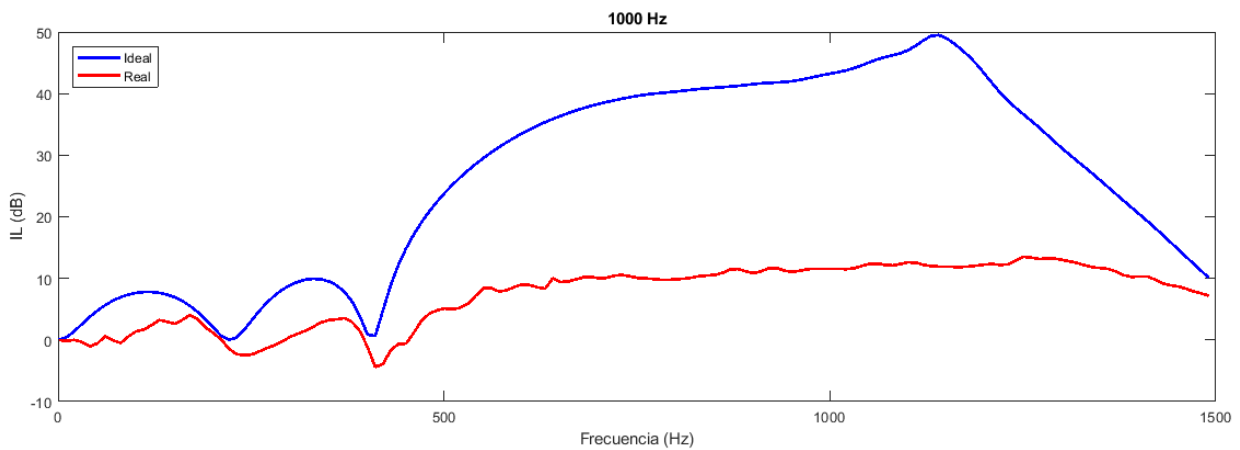


Figura 20. Espectros de atenuación acústica de un modelo ideal (azul) y real(rojo), a la frecuencia Bragg de 1000 Hz.

### 3.3 MODELO POR ZONAS

Para poder justificar que esta novedosa pantalla verde que se quiere diseñar se puede emplear como pantalla vegetal antiruido, se va a realizar un estudio numérico, evaluando la IL al colocarse entre el foco de ruido y la zona receptora.

En este caso los cilindros representan los árboles que conformarían la pantalla, que para este trabajo se ha decidido que sean especies arbóreas características del clima mediterráneo, cada uno con sus propiedades según la especie arbórea de la que se trate.

Siguiendo con el esquema presentado en la Figura 13, en la zona 1 se van a emplear juncos/cañas de baja altura y dos tipos de árboles propios de la zona mediterránea: el pino (*Pinus halepensis*) y el alcornoque (*Quercus suber*). En la zona 2, solo se van a tener en cuenta los troncos de los pinos y los alcornoques, mientras que en la zona 3, además se va a considerar la copa de los alcornoques por ser de menor altura que los pinos.

Para el caso de los juncos/cañas, se van a modelizar empleando la condición de contorno de Neumann, ya que estos se consideran sólidos rígidos. En cambio, para el resto de las especies, debido a que la corteza de los troncos de los árboles presenta propiedades absorbentes, la parte interior se va a modelizar con la condición de Neumann y la exterior (corteza), con la condición de contorno continuidad y subdominio Delany-Bazley-Miki siendo, la resistencia al flujo (Rf): 9.000 kg/m<sup>3</sup>·s para alcornoque y 30.000 kg/m<sup>3</sup>·s para el pino.

Además, se considera que la copa del alcornoque está compuesta por un conjunto de ramas y hojas cuya resistencia al flujo es de 10.000 kg/m<sup>3</sup>·s.

Los parámetros geométricos y características absorbentes de los árboles empleados se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Tipo de árboles con sus características geométricas y absorbentes.

ÁRBOL	DIÁMETRO (mm)	CORTEZA (mm)	Rf (kg/m <sup>3</sup> ·s)
Junco	40-120	-	Rígido
Pino	170	14,20	9000
Alcornoque	120	7	30000
Masa arbórea	270	-	10000

### 3.3.1 RED CUADRADA

En este apartado se ha decidido trabajar con una red cuadrada de paso de red  $a = 0,27$  m (630Hz), ya que se está trabajando en un rango de frecuencias entre 0 y 1500 Hz y, al introducir los juncos en la zona 1, dicho parámetro de red se reduce a la mitad  $a = 0,13$  m, que se corresponde con una frecuencia Bragg de 1260 Hz, la cual se encuentra dentro del rango de estudio.

A continuación, se muestra un esquema (Figura 21) de los modelos diseñados para red cuadrada.

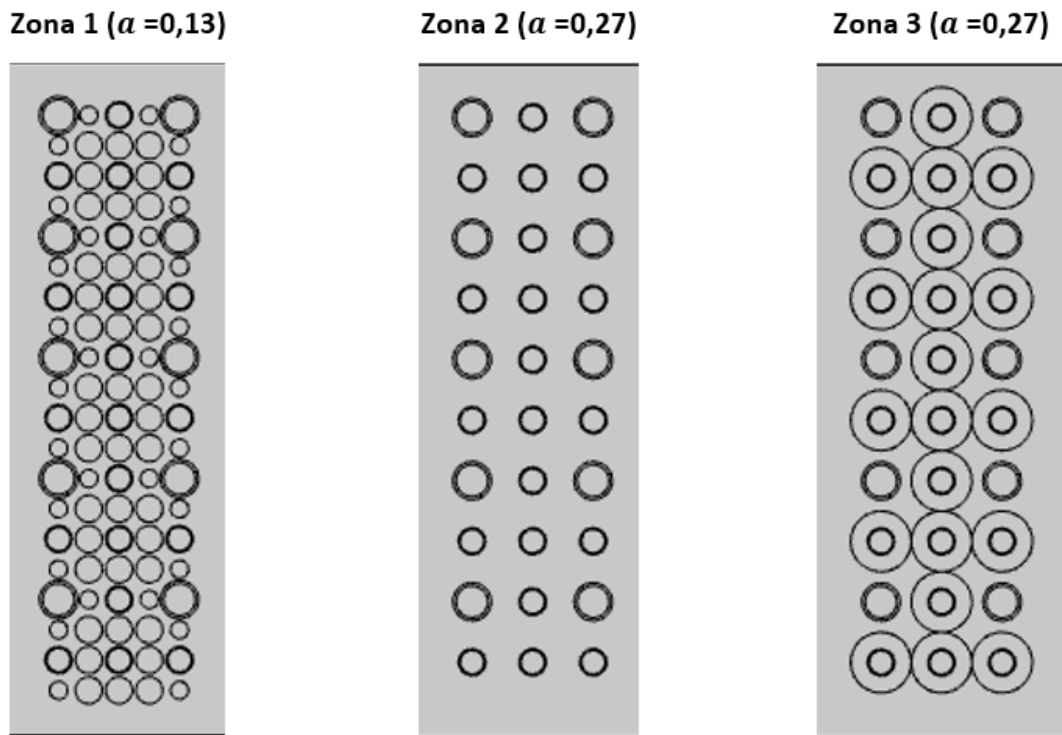


Figura 21. Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno para las tres zonas en red cuadrada.

Cabe destacar que el tamaño de los juncos se ha considerado lo más grande posible para cumplir con el parámetro de red ya que, si son demasiado pequeños, la participación que tienen estos dentro de la red es casi nula, por lo que la zona 1 y 2 serían prácticamente análogas. A continuación, se muestra una imagen (Figura 22) que detalla y especifica donde se ubica cada árbol.

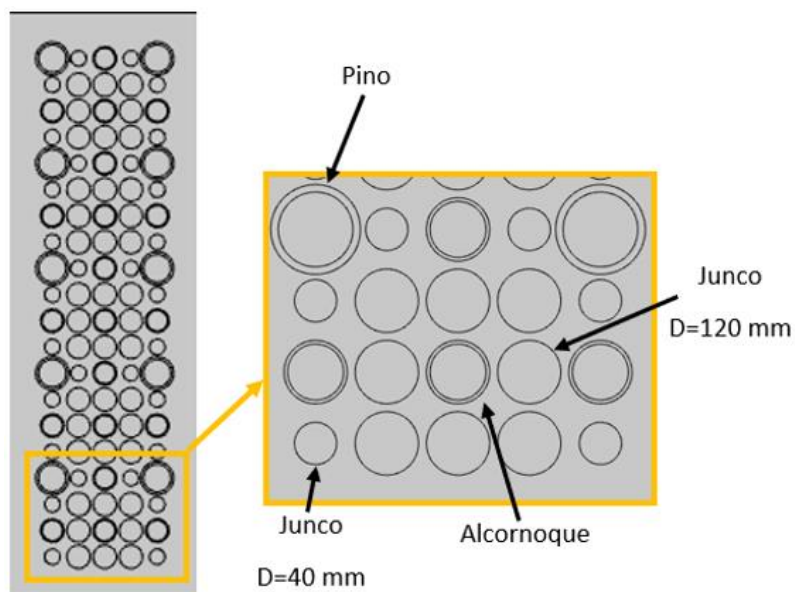
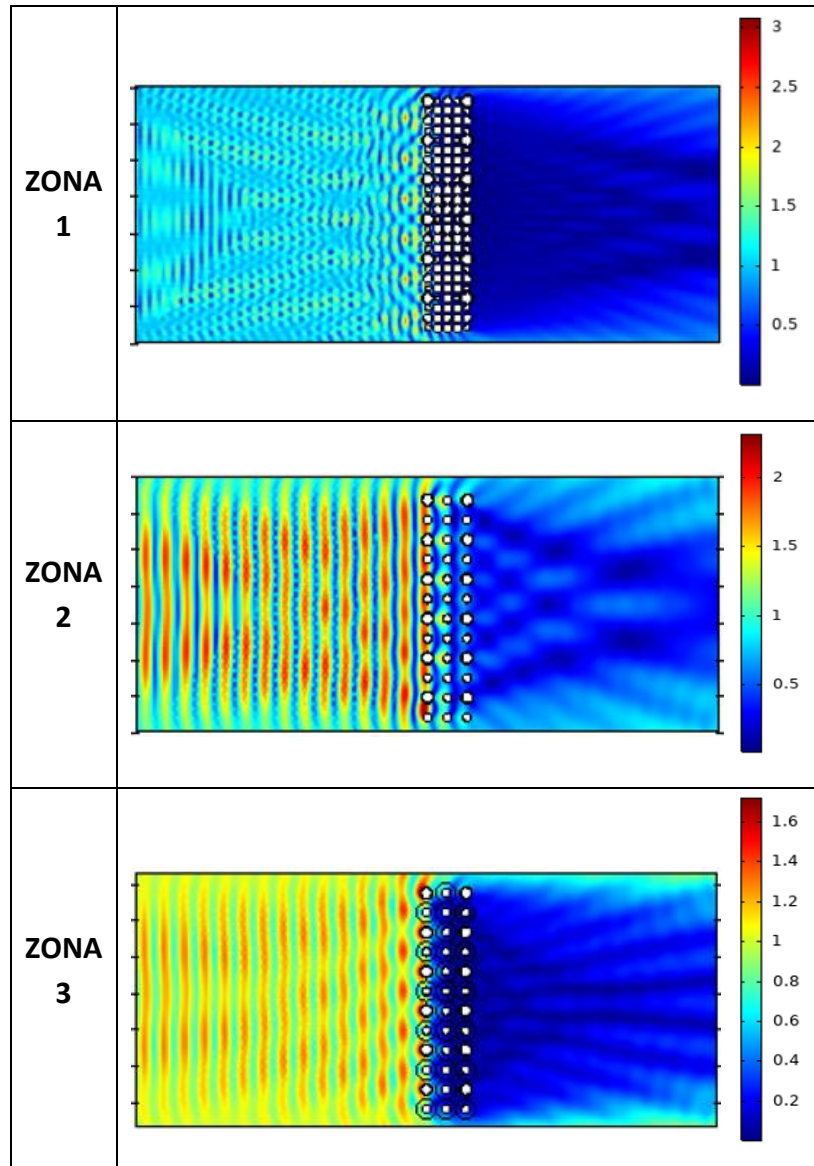


Figura 22. Esquema del modelo numérico más detallado.

Así, en la Tabla 6, se muestran tres mapas de presión absoluta en Pa a 1260 Hz (Zona 1) y a 630 Hz (Zona 2 y 3) para las diferentes zonas de estudio. En los tres casos se observa una gran reducción del ruido.

Tabla 6. Mapas de presión absoluta para las tres zonas de estudio en red cuadrada.



En la siguiente gráfica (Figura 23), se observan superpuestos los tres espectros de atenuación acústica, a 1 m de distancia de la pantalla, en decibelios para las tres zonas de estudio en red cuadrada, observando que existe una reducción considerable de ruido. La línea discontinua muestra como referencia una atenuación de 20 dB, la cual es alcanzada a distintas frecuencias.

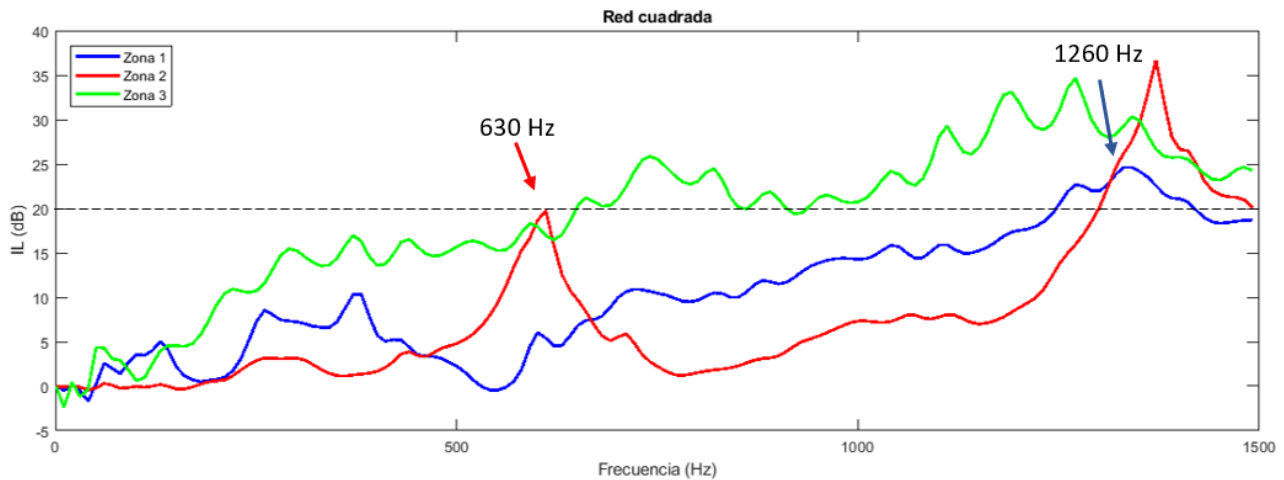


Figura 23. Espectro de atenuación acústica en dB de todas las zonas de estudio en red cuadrada.

### 3.3.2 RED TRIANGULAR

Para poder comparar los resultados de la red cuadrada y de la triangular, se mantiene la frecuencia Bragg utilizada en red cuadrada y se ajusta el paso de red para red triangular. Esta sigue la ecuación 6, de la que resulta:

$$630 \text{ Hz} = \frac{343}{\sqrt{3} \cdot a} \rightarrow a = 0,31 \text{ m (Zona 2 y 3)}$$

$$1260 \text{ Hz} = \frac{343}{\sqrt{3} \cdot a} \rightarrow a = 0,15 \text{ m (Zona 1)}$$

A continuación, en la Figura 24 y 25 se muestran los cálculos realizados.

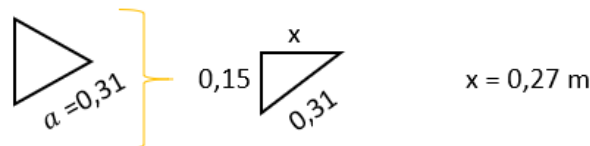


Figura 24. Cálculos para pasar a red triangular las zonas 2 y 3.

Por lo que la segunda fila de árboles en red triangular se construye a una distancia de 0,27 m en el eje de abscisas respecto de la primera fila, y se desplaza una distancia de 0,15 m en el eje de ordenadas.

En la zona 1, al añadir los juncos entre los árboles el paso de red se reduce a la mitad ( $a = 0,15$ ). Los cálculos realizados para estimar la distancia a la que se deben ubicar los árboles de la segunda fila son los siguientes:

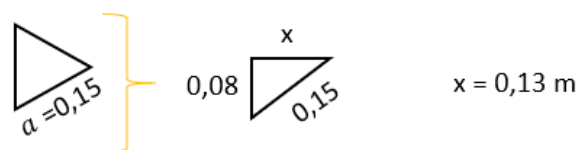


Figura 25. Cálculos para pasar a red triangular la zona 1.



Seguidamente se muestra un esquema aclaratorio en la Figura 26.

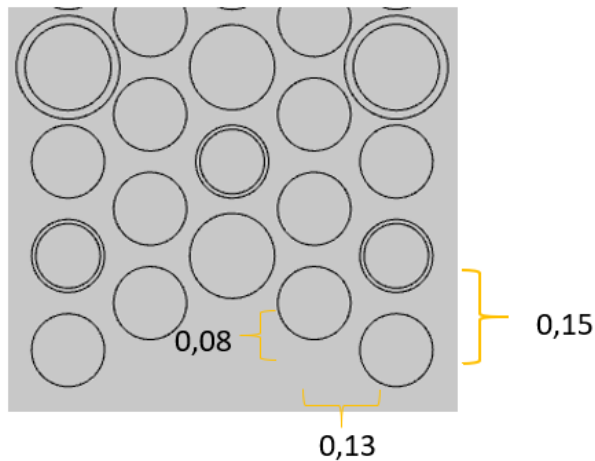
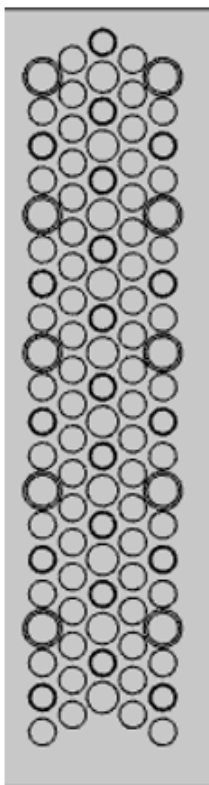


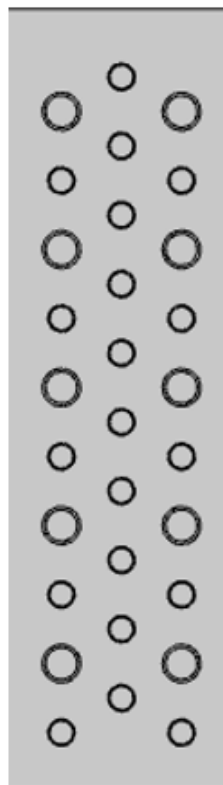
Figura 26. Esquema aclaratorio de la zona 1 en red triangular.

Tras todos estos cálculos, y empleando las mismas características para los árboles que las propuestas en la Tabla 5, los prototipos quedan de la siguiente manera:

**Zona 1 ( $\alpha = 0,15$ )**



**Zona 2 ( $\alpha = 0,31$ )**



**Zona 3 ( $\alpha = 0,31$ )**

\*Masa arbórea 135 mm

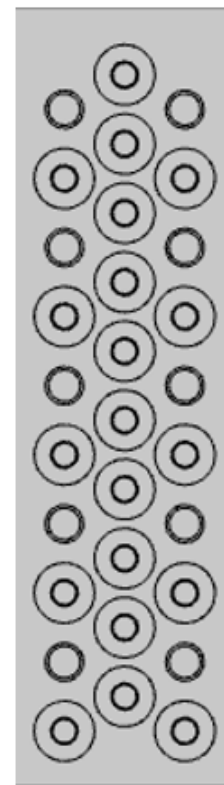
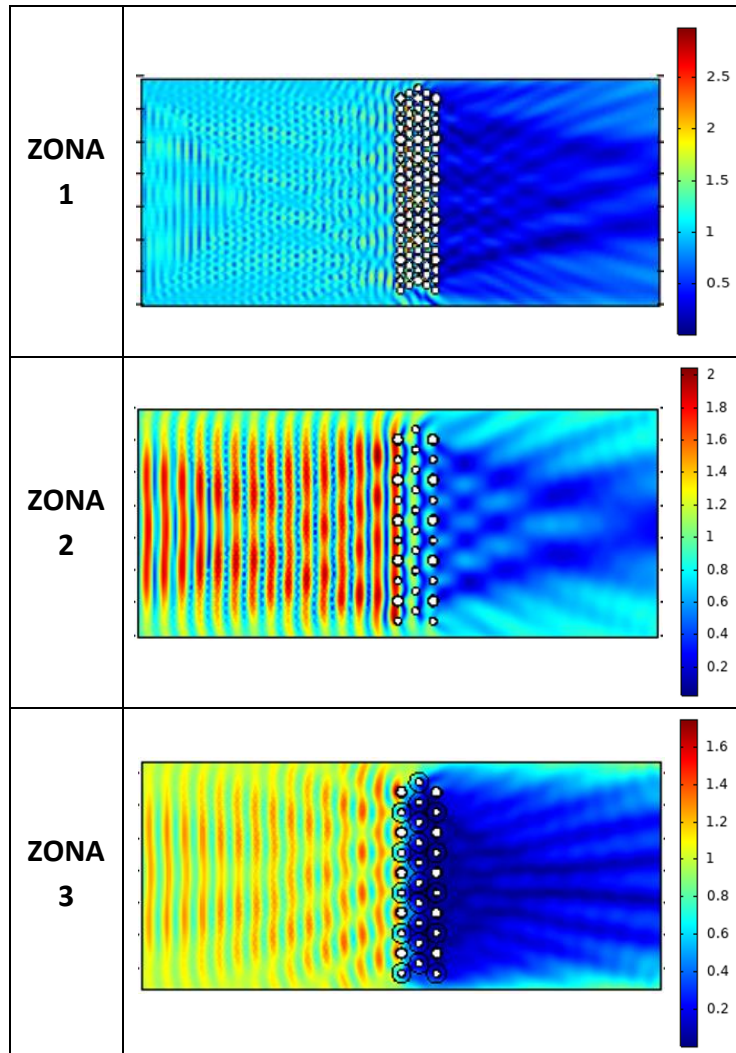


Figura 27. Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno para las tres zonas en red triangular.



Así, en la Tabla 7, se muestran tres mapas de presión absoluta en Pa a 1260 Hz (Zona 1) y a 630 Hz (Zona 2 y 3) para las diferentes zonas de estudio. En los tres casos se observa una gran reducción del ruido.

Tabla 7. Mapas de presión absoluta para las tres zonas de estudio en red triangular.



A continuación, en la figura 28 se observa que tal y como ocurre en la Figura 23, en cada una de las zonas se reduce significativamente el ruido, beneficiando así la vida de los pequeños insectos y mamíferos presentes en la zona 1, los grandes mamíferos que viven en la zona 2, y las aves e insectos voladores que habitan la zona 3.

Cabe destacar que la capacidad de atenuación con estos modelos es ligeramente mayor en red triangular.

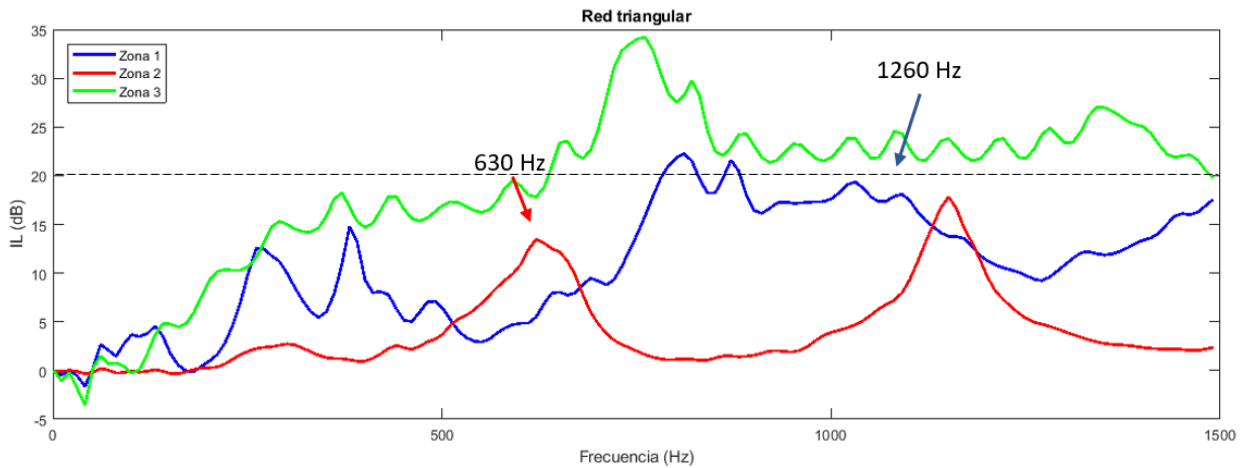


Figura 28. Espectro de atenuación acústica en dB de todas las zonas de estudio en red cuadrada.

### 3.4 INCLUSIÓN DE RESONADORES

Como se puede observar en los espectros obtenidos, las bajas frecuencias son difíciles de atenuar, por lo que se va a insertar en la pantalla otro mecanismo de atenuación del ruido, como son los resonadores de Helmholtz, ya comentados en el apartado 2.3.2. El papel de resonador lo llevarán a cabo distintas cañas de bambú, las cuales presentan mayor altura que los juncos, por lo que la zona 1 y 2 nombradas en los apartados anteriores, pasarían a ser la misma.

En primer lugar, el objetivo es insertar distintos tipos de resonadores en un modelo ideal compuesto por tres resonadores iguales seguidos para así, poder conocer la frecuencia de resonancia de cada uno. Serán de interés aquellos resonadores cuya frecuencia de resonancia se encuentre por debajo de los 500 Hz de tal manera que, con este estudio, queda demostrado que se puede definir la frecuencia de resonancia donde se quiera, es decir, el diseño de la pantalla se puede decir que es a la carta.

Los distintos tipos de resonadores utilizados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Tipos de resonadores incluidos en los modelos.

R1	R2	R3	R4	R5
Re = 0,04 m Ri = 0,03 m	Re = 0,06 m Ri = 0,058 m	Re = 0,06 m Ri = 0,055 m	Re = 0,06m Ri = 0,04 m	Re = 0,07 m Ri = 0,068 m

Seguidamente se muestra un ejemplo de modelo diseñado con uno de estos tipos de resonadores (Figura 29), empleando en este caso en concreto, el resonador R1 presente en la Tabla 8. Para ello, se toma una red cristalina con paso de red  $a = 0,20$  m cuya frecuencia Bragg se encuentra a 857 Hz.

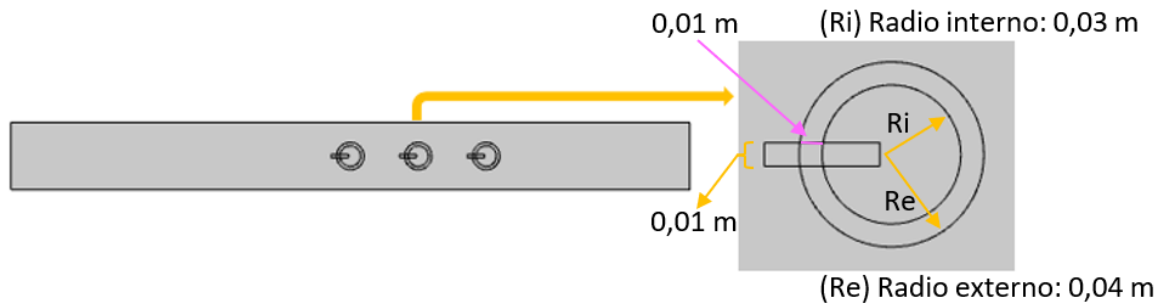


Figura 29. Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno utilizando el resonador R1.

Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica siguiente (Figura 30), donde se observa la frecuencia de resonancia a la que se ajusta cada tipo de resonador.

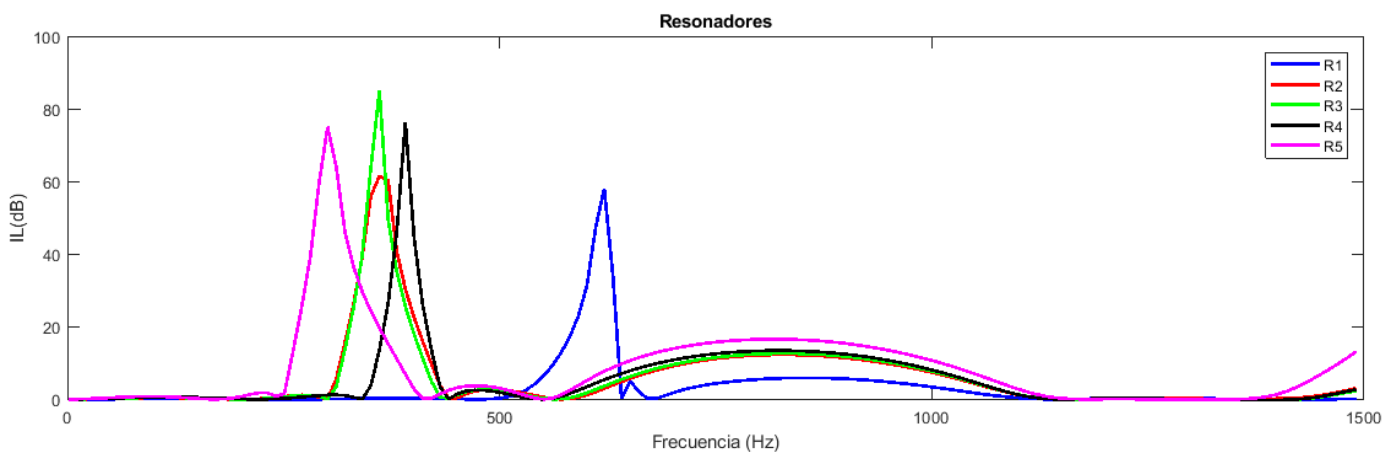


Figura 30. Frecuencia de resonancia de los distintos tipos de resonadores.

Como se puede observar en la Figura 30, los resonadores con mayor volumen de cavidad presentan una frecuencia de resonancia menor. Como se ha mencionado en el apartado 2.3.2, según la ecuación 10 se puede ajustar esta frecuencia, no sólo con el tamaño de la cavidad sino también con la anchura del cuello o incluso la longitud de este. Esto muestra las posibilidades de diseño a la carta que se ha comentado anteriormente.

Estos resonadores mostrados en la Tabla 8 se han incorporado tanto al modelo en red cuadrada como en red triangular para poder comparar los resultados que se obtienen. Los modelos empleados a los que se han incorporado estos resonadores son los diseñados en el apartado anterior 3.3, que se muestran en la Figura 21 y 27 respectivamente.

A continuación, en la Figura 31 y 33 se detalla la configuración elegida por ser aquella que presenta mejores resultados.

### 3.4.1 RED CUADRADA

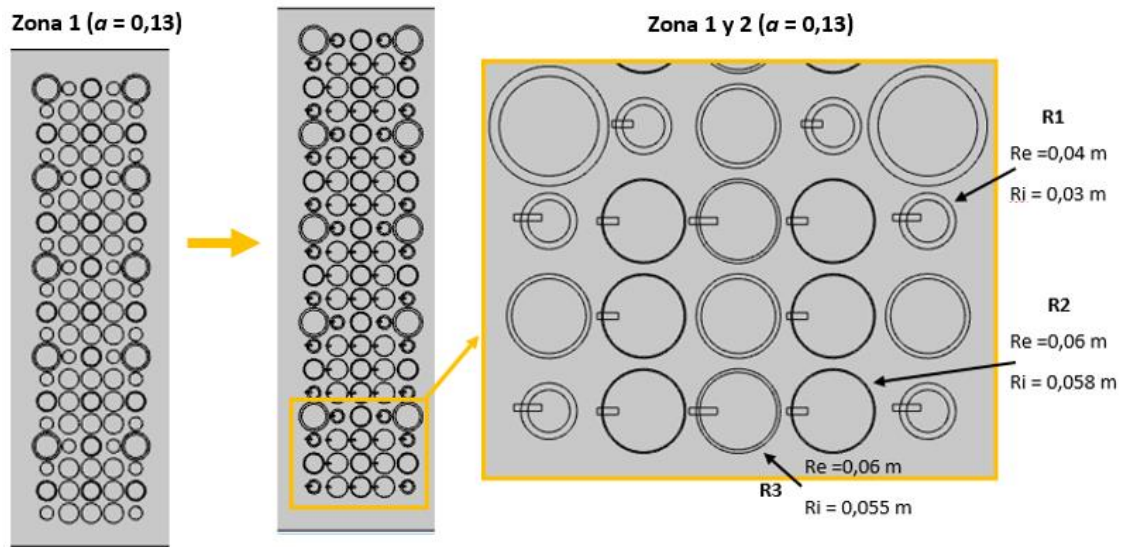


Figura 31. Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno para la red cuadrada con resonadores.

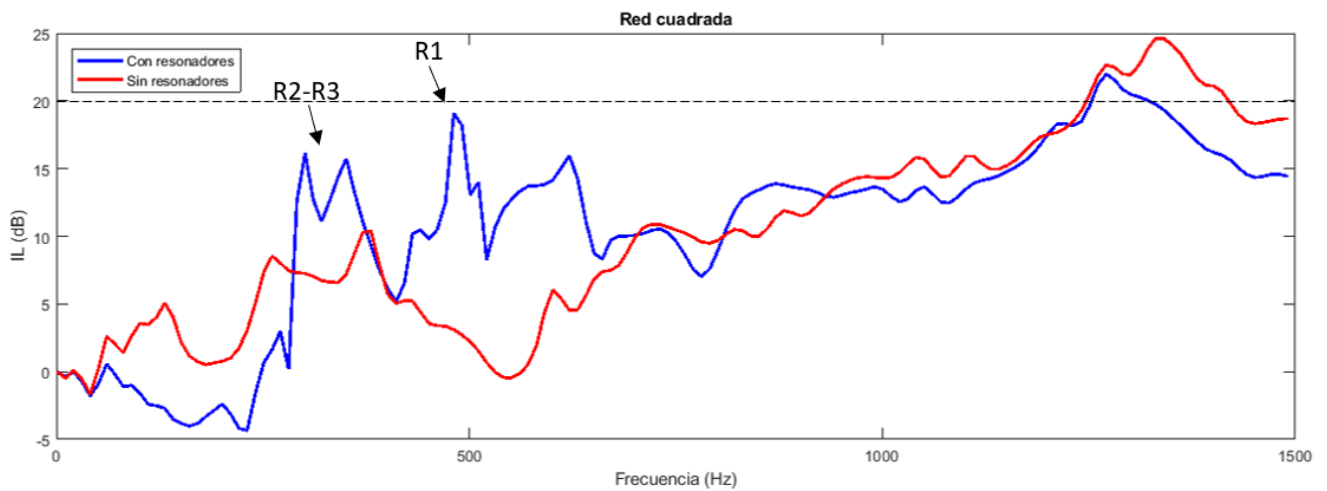


Figura 32. Espectro de atenuación acústica en dB del modelo con y sin resonadores en red cuadrada.

### 3.4.2 RED TRIANGULAR

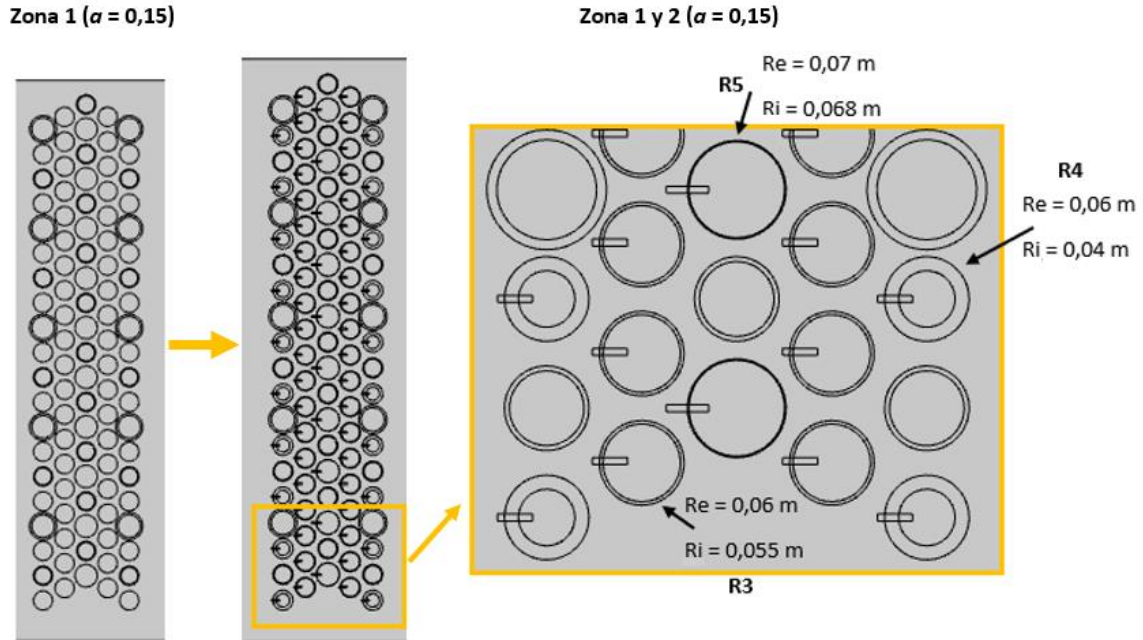


Figura 33. Esquema del modelo numérico y condiciones de contorno para la red triangular con resonadores.

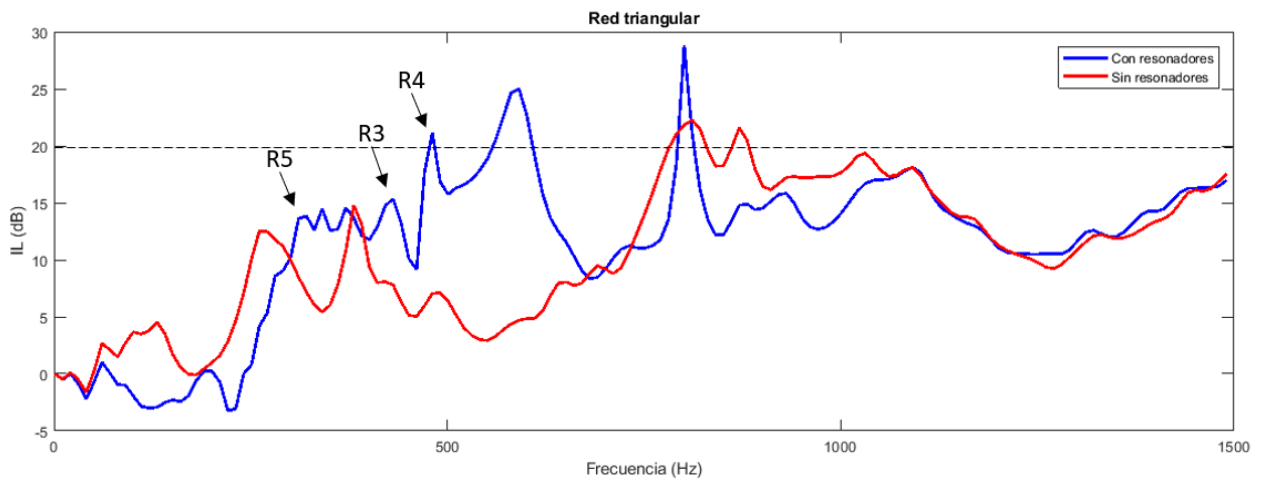


Figura 34. Espectro de atenuación acústica en dB del modelo con y sin resonadores en red triangular.

En ambas gráficas (Figura 32 y 34), se observa como la inclusión de resonadores mejora la capacidad de atenuación de los modelos a bajas frecuencias, viendo también ligeramente mejores resultados con la configuración triangular.

### 3.5 COMPARATIVA RED CUADRADA FRENTE A RED TRIANGULAR

Por último, en este apartado se va a realizar una comparativa de los resultados que se han obtenido en el apartado anterior 3.4, tanto para el modelo en red cuadrada como en red triangular. Cabe mencionar que, debido a la situación vivida por la pandemia, ha sido imposible realizar medidas en condiciones controladas, por lo que este trabajo se ha completado gracias a los modelos numéricos diseñados.

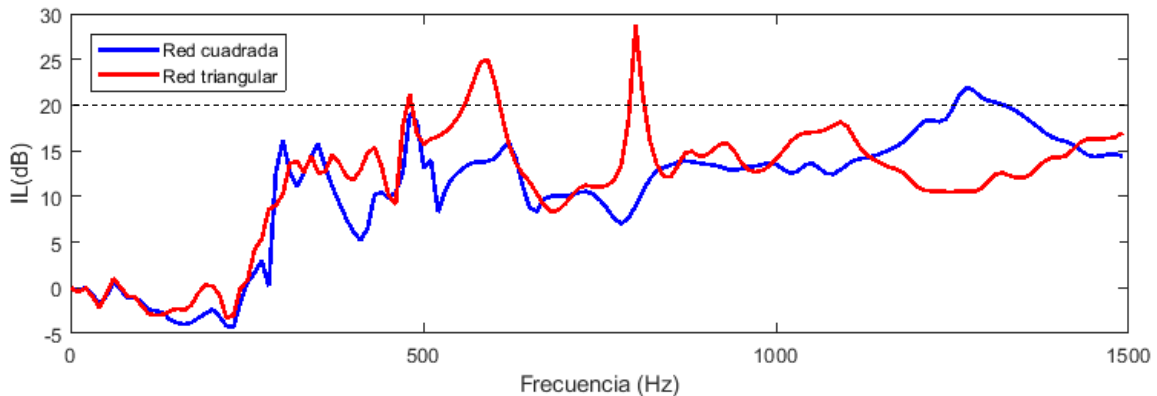


Figura 35. Espectro de atenuación acústica en dB de los modelos con resonadores en red cuadrada y triangular.

En la figura anterior se observa y se comprueba que, tal y como cabría esperar, para bajas frecuencias, las redes triangulares, en general, consiguen mayores atenuaciones, en cambio, a frecuencias más elevadas, la red cuadrada presenta un mayor rango de frecuencias donde consigue una atenuación mayor.

Dicho esto, en este proyecto se propone el modelo en red cuadrada, pues los resultados obtenidos con esta configuración no distan tanto de los obtenidos en red triangular y también son óptimos. Además, la distribución en red cuadrada se armoniza mejor con el medio ambiente, es decir, permite ver a su través sin que la pantalla suponga un obstáculo continuo y, por consiguiente, provoca un menor impacto visual.

#### 4. CONCLUSIONES

Tras la realización de este trabajo, se ha conseguido presentar una propuesta de pantalla acústica verde abierta con la finalidad de reducir el ruido procedente principalmente del tráfico, respetuosa con el medio ambiente, que pasa desapercibida, y con vistas a su posible puesta en el mercado que contribuir con la resolución de la problemática que supone la contaminación acústica.

Para ello, se ha realizado un estudio teórico de las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación. Partiendo de esta base, se han llevado a cabo diversos modelos numéricos empleando COMSOL Multiphysics 5.5.

Tras los estudios pertinentes realizados se pueden concluir los siguientes puntos:

- Se han tenido en cuenta diferentes combinaciones de dispersores con la finalidad de conseguir atenuaciones altas con el menor coste posible.
- La pantalla propuesta presenta niveles de atenuación similares a los de las barreras tradicionales; no obstante, se pueden diseñar y construir bajo demanda, seleccionando las frecuencias que quieren ser atenuadas.
- Se ha comprobado que la configuración triangular obtiene ligeramente mejores resultados que la cuadrada. No obstante, en este trabajo se propone el modelo en red cuadrada pues los resultados obtenidos son óptimos y no distan tanto de los obtenidos con la configuración triangular. Además, la distribución en red cuadrada se armoniza de forma respetuosa con el medio ambiente y consigue un impacto visual mínimo, pues logra atenuar el ruido a su través sin que visualmente haga un obstáculo continuo.
- La pantalla acústica verde diseñada es sintonizable. Se disponen de varios grados de libertad: el paso de red ( $a$ ), que fija la frecuencia Bragg, el diseño de las cavidades resonantes y cómo no, la absorción de la propia pantalla al estar formada por árboles de diferentes características. Además, la inclusión de resonadores mejora la capacidad de atenuación de los modelos a bajas frecuencias. Esta es una de las ventajas que tienen las pantallas acústicas basadas en CS respecto a la barrera tradicional, la atenuación en las bajas frecuencias y la atenuación adaptable en las diferentes bandas de frecuencia según interese para cada tipo de ruido.
- La inclusión de esta pantalla supondría un beneficio para la vida de los pequeños insectos y mamíferos que habitan en la zona 1, los grandes mamíferos que viven en la zona 2, y las aves e insectos voladores que habitan la zona 3.

- Además, esta pantalla diseñada presenta otras ventajas como son: la resistencia al medio, ya que el viento la puede atravesar al estar basada en CS sin causar daños en su estructura, a diferencia de lo que ocurre con las pantallas tradicionales, que al tratarse de un muro sólido la fuerza del viento puede romperlas. Y la permeabilidad al agua, que a diferencia de lo que ocurre en las barreras tradicionales, el agua puede pasar a su través sin retenerse y por lo tanto sin generar riesgo al vuelco.



## 5. TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se van a comentar algunas de las tareas pendientes que pueden realizarse en un futuro para completar el trabajo:

- Realizar medidas en condiciones controladas para verificar los resultados obtenidos en este trabajo.
- Analizar otras tipologías de vegetación.
- Estudiar materiales reciclables que puedan asemejarse a la propia vegetación y hacerlos compatibles con el medio ambiente.
- Realizar los modelos numéricos en tres dimensiones, aunque estos requieren mayor coste computacional.
- Estudiar nuevos ordenamientos de los árboles, como por ejemplo geometrías fractales.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Castiñeira-Ibáñez S., García Soro J. M., Loustalot T., & Rubio Michavila C. (2018) Contaminación acústica medioambiental: proyecto de pantalla acústica verde abierta, 22nd International Congress on Project Management and Engineering Madrid, 11th – 13th July 2018
- [2] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., & Garcia-Raffi L. M. (2012). Design, manufacture, and characterization of an acoustic barrier made of multi-phenomena cylindrical scatterers arranged in a fractal-based geometry. *Archives of Acoustics*, 37, 455-462
- [3] Sánchez-Pérez J. V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Gandía R., & Gómez V. (2002). Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. *Applied Physics Letters*, 81(27), 5240-5242
- [4] Maekawa Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied acoustics*, 1(3), 157-173
- [5] Harris C.M. (1991). *Handbook of acoustical measurements and noise control*. 3rd ed. McGraw-Hill, Inc
- [6] Martínez-Sala R., Sancho J., Sánchez J. V., Gómez V., Llinares J., & Meseguer F. (1995). Sound attenuation by sculpture. *Nature*, 378, 241
- [7] Martínez-Sala R., Rubio C., García-Raffi L. M., Sánchez-Pérez J. V., Sánchez-Pérez E. A., & Llinares J. (2006). Control of noise by trees arranged like sonic crystals. *Journal of sound and vibration*, 291(1-2), 100-106
- [8] Castiñeira Ibáñez S. (2015). Análisis y modelado de la fenomenología ondulatoria asociada al diseño de barreras acústicas basadas en conjuntos de dispersores aislados. Homologación de dispositivos (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València)
- [9] Ley de Bragg - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved August 31, 2021, from [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Bragg](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Bragg)
- [10] Solana D. R., Castiñeira-Ibáñez S., Bravo-Plana-Sala J. M., Peiró-Torres M. P., Ferri M., Sánchez-Pérez J. V., Redondo J., & Picó R. Análisis de la interacción de resonadores de Helmholtz en metamateriales acústicos periódicos en función de la orientación de incidencia de la fuente sonora. XI Congreso Ibérico de Acústica. 51 Congreso Español de Acústica. Tecniacústica 2020

- [11] Peiró-Torres M. P., Bravo J. M., Redondo J., Ferri M., & Sánchez-Pérez J. V. (2015). Pantallas acústicas abiertas. Cuadernos tecnológicos de la PTC, Nº6
- [12] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio Michavila C., Sánchez-Pérez J.V., Romero-García V., García-Raffi L.M., (2011). Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación. Tecniacústica 2011. 42 Congreso Español de Acústica; Encuentro Ibérico de Acústica; EAA European Symposium on Environmental Acoustics and on Buildings Acoustically Sustainable: Cáceres, 26-28 Octubre 2011 (p. 6). Sociedad Española de Acústica
- [13] Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and Garcia-Raffi L. M., J. Appl. Phys. 110, 014904 (2011)
- [14] Acoustics Module User's Guide. (n.d.). Retrieved August 2, 2021, from <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>
- [15] Alba J., Ramis J., Lorenzana M., & Rey R. D. (2008). Propuesta de modelo empírico para materiales absorbentes acústicos. Revista Internacional de Métodos numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería, 24(2), 147-162
- [16] Chilet Murgui C. (2012). Análisis de la variabilidad de la capacidad de atenuación de redes de dispersores bidimensionales en función de factores geométricos. Aplicación al diseño de pantallas acústicas. Tesis Final de Máster, EPSG
- [17] Atiénzar Navarro R. (2016). Diseño y modelado de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido 2D para ruido de ferrocarril. Tesis Final de Máster, EPSG

# **DOCUMENTO II:**

# **PRESUPUESTO**



## 1. PRESUPUESTOS PARCIALES

En este apartado se van a calcular por separado los presupuestos de los distintos elementos necesarios para llevar a cabo este proyecto, teniendo en cuenta la mano de obra, las distintas especies arbóreas necesarias, los trabajos previos y la maquinaria requerida.

Para hallar el importe final, se multiplica la cantidad empleada por el precio unitario. Teniendo en cuenta, además, un porcentaje de Costes Directos Complementarios (CDC) igual al 3% que corresponde a los costes difíciles de cuantificar.

Los precios de las especies arbóreas se han consultado en la página web Planfor.es especializada en viveros y jardinería [1], y los demás valores utilizados se han consultado en el pliego de prescripciones técnicas de un proyecto de construcción de pantallas acústicas para la reducción de niveles sonoros en una urbanización [2].

### 1.1 MANO DE OBRA

En este apartado se tienen en cuenta tanto las horas dedicadas por el alumno y los tutores, como por los trabajadores necesarios para llevar a cabo la obra (presentes en la Tabla 9).

*Tabla 9. Importe total (en €) de la mano de obra empleada.*

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
h	Alumna	300	15,00	4.500,00
h	Tutora	150	20,00	3.000,00
h	Cotutor	150	20,00	3.000,00
h	Capataz	10	20,54	205,40
h	Oficial 1º	15	20,36	305,40
h	Ayudante	30	16,87	506,10
h	Peón especialista	30	16,77	503,10
h	Peón ordinario	30	16,60	498,00
%	Costes Directos Complementarios	3	12.518,00	375,54
<b>Importe total de mano de obra (€)</b>				<b>12.893,54</b>

## 1.2 ESPECIES ARBÓREAS

A continuación, en la Tabla 10 se presenta el coste de las distintas especies arbóreas empleadas.

Tabla 10. Importe total (en €) de los distintos tipos de árboles empleados.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
ud	Alcornoque - Quercus suber (Planta en maceta de 7 litros)	20	64,50	1.290,00
ud	Pino carrasco - Pinus halepensis (Planta en maceta de 1,3 litros)	10	13,50	135,00
ud	Bambú Fargesia robusta Campbell (Planta en maceta de 5 litros)	70	42,50	2.975,00
%	Costes Directos Complementarios	3	4.400,00	132,00
<b>Importe total de especies arbóreas (€)</b>				<b>4.400,00</b>

## 1.3 TRABAJOS PREVIOS

En este apartado se muestran los costes correspondientes a los trabajos previos a llevar a cabo para la construcción de la pantalla (Tabla 11).

Tabla 11. Importe total (en €) de los trabajos previos realizados.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
ud	Señalización de desvíos provisionales	1	92,00	92,00
m	Barrera de seguridad simple	5	43,18	215,90
m	Levantamiento de barrera metálica bionda	5	5,00	25,00
m	Levantamiento de vallas metálicas	5	3,66	18,30
m <sup>2</sup>	Despeje y desbroce del terreno	3,5	0,58	2,03
m <sup>3</sup>	Excavación manual de zanjas	0,75	5,00	3,75
%	Costes Directos Complementarios	3	356,98	10,71
<b>Importe total de trabajos previos (€)</b>				<b>367,69</b>

## 1.4 MAQUINARIA

Por último, se presenta en la Tabla 12 la maquinaria necesaria para realizar el trabajo.

Tabla 12. Importe total (en €) de la maquinaria empleada.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
h	Camión cisterna para riego. Cantidad de 8000 litros	1	80,74	80,74
h	Máquina colocación bionda. Automotriz de 10 kW de potencia	2	11,29	22,58
h	Retroexcavadora hidráulica sobre ruedas de 11 t de masa	30	65,92	1.977,60
%	Costes Directos Complementarios	3	2.080,92	62,43
<b>Importe total de maquinaria empleada (€)</b>				<b>2.143,35</b>

## 2. PRESUPUESTO TOTAL

En primer lugar, se suman los costes totales de cada uno de los presupuestos parciales para obtener el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) mostrado en la Tabla 13.

Tabla 13. Obtención del presupuesto de ejecución material (en €) a partir de los distintos presupuestos parciales.

Apartado	Concepto	Importe (€)
1.1	Mano de obra	12.893,54
1.2	Especies arbóreas	4.400,00
1.3	Trabajos previos	367,69
1.4	Maquinaria	2.143,35
<b>Presupuesto total de Ejecución Material (PEM)</b>		<b>19.804,58</b>

A continuación, se incluye un coste cuyo concepto es Gastos Generales (GG) que corresponde al 15% del PEM y engloba los costes eléctricos y de mantenimiento, siendo de 2.970,86€. También se tiene en cuenta el Beneficio Industrial (BI), que corresponde al 6% del PEM, 1.188,27€. A partir de estos valores se obtiene el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC) que resulta ser la suma del PEM, los GG y el BI, que asciende a una cuantía de 23.963,54€. Por último, se aplica el 21% de I.V.A sobre el PEC para obtener el presupuesto base de licitación, es decir, el coste total del proyecto, que consta de la suma del PEC más el IVA. Todos estos resultados se muestran en la Tabla 14.



Tabla 14. Presupuesto total.

<b>Presupuesto total de Ejecución Material (PEM)</b>	<b>19.804,58 €</b>
Gastos Generales (GG) – 15%	2.970,69 €
Beneficio Industrial (BI) – 6%	1.188,27 €
<b>Presupuesto total de Ejecución por Contrata (PEC)</b>	<b>23.963,54 €</b>
Impuesto Valor Añadido (IVA) – 21%	5.032,34 €
<b>Presupuesto de licitación</b>	<b>28.995,88 €</b>

El presupuesto total asciende a la cantidad de **VEINTIOCHO MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y CINCO EUROS CON OCHENTA Y OCHO CÉNTIMOS.**

### 3.BIBLIOGRAFÍA

- [1] Viveros y Jardinería online - Planfor. (n.d.). Retrieved August 31, 2021, from <https://www.planfor.es/>
- [2] 39-Z-50125 | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (n.d.). Retrieved August 31, 2021, from <https://www.mitma.gob.es/informacion-para-el-ciudadano/contratacion/licitaciones/dir-gral-de-carreteras/obras/39-z-50125>

# **ANEXO ODS**



**ANEXO AL TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Relación del TFM “Diseño de una pantalla acústica verde abierta para la reducción del ruido” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.**

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

<b>Objetivos de Desarrollo Sostenibles</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>	<b>No Procede</b>
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				<b>X</b>
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>				<b>X</b>
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>	<b>X</b>			
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>				<b>X</b>
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				<b>X</b>
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>				<b>X</b>
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>				<b>X</b>
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				<b>X</b>
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>		<b>X</b>		
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>				<b>X</b>
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>		<b>X</b>		
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>				<b>X</b>
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>	<b>X</b>			
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>				<b>X</b>
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>	<b>X</b>			
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				<b>X</b>
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>				<b>X</b>

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

A continuación, se detallan aquellos Objetivos de Desarrollo Sostenible elegidos con un alto grado de relación con el presente Trabajo Final de Máster.

### **ODS 3. Salud y bienestar.**

Garantizar una vida sana y promover el bienestar es fundamental para el desarrollo sostenible.

Entre las diferentes metas relacionadas con este ODS, la 3.9 indica que en 2030 se pretende reducir el número de muertes y enfermedades relacionadas con la contaminación física. En este sentido, la contaminación acústica estaría perfectamente ubicada aquí.

En este caso, este objetivo presenta una gran relación con el tema tratado en este TFM, pues el ruido es un problema medioambiental que afecta a la vida de las personas, y el objetivo de la pantalla diseñada en este trabajo, consiste en acabar con la problemática del ruido de tráfico, el cual es, en parte, responsable de determinadas dolencias auditivas, dolores de cabeza, estrés e irritabilidad, entre otras afecciones referidas a la salud humana.

### **ODS 13. Acción por el clima.**

La lucha contra el cambio climático, tanto la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como la adaptación al cambio climático, es una prioridad en España.

Uno de los beneficios que presenta la pantalla verde diseñada en este trabajo es que se implanta de forma respetuosa con el medio ambiente, lo cual es de gran importancia ecológica y, además, ayuda a proteger a las ciudades en la moderación del CO<sub>2</sub>, pues los árboles podrían moderar el CO<sub>2</sub> que emiten los vehículos que pasaran cerca de la pantalla.

Además, el empleo de este tipo de pantallas ayudaría a mitigar el calentamiento global y a largo plazo, liberar oxígeno y reducir la huella de carbono.

### **ODS 15. Vida ecosistemas terrestres.**

Este objetivo pretende gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

Como se ha comentado en el punto anterior, dicha pantalla verde se armoniza de forma respetuosa con el medio ambiente, por lo que el hecho de implantar una pantalla verde en lugar de una tradicional evitaría la degradación del terreno.

Además, también sirven para limitar el paso de fauna en zonas no permitidas, lo que evitaría la muerte de muchas especies animales.

Varios artículos indican que los insectos se ven afectados por la contaminación acústica, hecho que puede provocar grandes desequilibrios en el ecosistema, pues

estos son parte fundamental de la cadena trófica de especies superiores como las aves y, lo más importante, son esenciales en el ciclo de los nutrientes y el reciclaje de estos en el ecosistema. Además, el ruido también afecta a capacidad para detectar las señales acústicas necesarias para la reproducción y sociabilización en diferentes vertebrados. Por lo que, implantar dicha pantalla acústica verde sería de gran importancia para este objetivo.

La utilización de árboles pondría freno a la pérdida de diversidad biológica y protegería la flora y fauna. Además, el empleo de especies autóctonas contribuye a la restauración de los ecosistemas restaurando de este modo el medio ambiente que pudiera estar degradado y combatiendo el cambio climático y favoreciendo la biodiversidad.