



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

DISEÑO DE BARRERA SONORA BASADA EN  
CRISTALES DE SONIDO CON RESONADORES DE  
HELMHOLTZ DE DOBLE CÁMARA

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Biosca Narduzzi, Federico Gaston

Tutor/a: Bravo Plana-Sala, José María

Cotutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



## Resumen

Las barreras acústicas constituyen uno de los métodos de control de ruido más utilizados y eficientes en el campo de la acústica ambiental. Rompiendo con la tipología general de barreras continuas ciegas, han aparecido las barreras denominadas cristales de sonido (CS), que se definen como materiales formados por redes de dispersores acústicos embebidos en aire. Para el diseño de estas barreras se utilizan potentes modelos de simulación que aportan unos resultados finales muy fiables sin necesidad de realizar costosas pruebas experimentales. El objetivo de este Trabajo Final de Grado consiste en aplicar y modificar modelos teóricos bidimensionales de barreras acústicas con el fin de mejorar la capacidad de atenuación de estas. Para ello se utilizarán CS bidimensionales con dispersores circulares, de forma cilíndrica, que suelen ser los más utilizados en su implantación real. El objetivo del trabajo en su fin último pretende utilizar resonadores de Helmholtz estudiando y variando su orientación con el fin de mejorar el espectro de las pérdidas por inserción que generen estas barreras y con ello hacerlas más eficientes.

## Resum

Les barreres acústiques constitueixen un dels mètodes de control de soroll més utilitzats i eficients en el camp de l'acústica ambiental. Trencant amb la tipologia general de barreres contínues cegues, han aparegut les barreres denominades cristalls de so (CS), que es defineixen com a materials formats per xarxes de dispersors acústics embeguts en aire. Per al disseny d'aquestes barreres s'utilitzen potents models de simulació que aporten uns resultats finals molt fiables sense necessitat de realitzar costoses proves experimentals. L'objectiu d'aquest Treball Final de Grau consisteix a aplicar i modificar models teòrics bidimensionals de barreres acústiques amb la finalitat de millorar la capacitat d'atenuació d'aquestes. Per a això s'utilitzaran CS bidimensionals amb dispersors circulars, de forma cilíndrica, que solen ser els més utilitzats en la seua implantació real. L'objectiu del treball en la seua fi última pretén utilitzar ressonadors de Helmholtz estudiant i variant la seua orientació amb la finalitat de millorar l'espectre de les pèrdues per inserció que generen aquestes barreres i amb això fer-les més eficients.

## Abstract

Acoustic barriers are one of the most widely used and efficient noise control methods in the field of environmental acoustics. Breaking with the general typology of continuous blind barriers, barriers known as sound crystals (SC) have appeared, which are defined as materials formed by networks of acoustic scatterers embedded in air. Powerful simulation models are used for the design of these barriers, which provide very reliable final results without the need for costly experimental tests. The aim of this Final Degree Project is to apply and modify two-dimensional theoretical models of acoustic barriers in order to improve their attenuation capacity. For this purpose, two-dimensional SC with circular, cylindrical-shaped dispersers will be used, which are usually the most commonly used in their real implementation. The ultimate aim of the work is to use Helmholtz resonators by studying and varying their orientation in order to improve the spectrum of insertion losses generated by these barriers and thus make them more efficient.



## Índice

1. Marco teórico .....	3
1.1 Barreras acústicas.....	3
1.1.1 Conceptos básicos .....	3
1.1.2 Pérdidas por Inserción (IL).....	4
1.2 Cristales de sonido .....	6
1.2.1 Conceptos teóricos .....	6
1.2.2 Barreras acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación .....	11
2. Objetivo del TFG .....	15
3. Realización del TFG.....	16
3.1 Fases del TFG .....	16
3.2 Distribución de las tareas .....	17
3.3 Diagrama de Gantt .....	18
4. Metodología utilizada.....	19
4.1 Parametrización general de diseño .....	19
4.2 Metodología de simulación .....	20
5. Análisis de los resultados .....	22
5.1 Análisis $f\bar{f}$ y simetría red.....	22
5.2 Estudio del efecto de los resonadores en los dispersores .....	25
5.3 Estudio del efecto de los resonadores de doble cámara (DC) .....	27
5.3.1 Análisis del efecto de la orientación en los resonadores de DC.....	28
5.3.2 Variación de la orientación en resonadores de DC .....	29
5.3.3 Variación de la orientación en resonadores de DC (rotación).....	32
5.3.4 Combinación resonadores DC rotados .....	33
5.4 Reducción de elementos en la red de dispersores .....	35
5.4.1 Comparativa general .....	38
5.5 Conclusiones, relación con ODS y trabajo futuro .....	39
6. Bibliografía .....	42
7. Anexos.....	44
7.1 Acrónimos utilizados.....	44
7.2 Script de MATLAB.....	45

## 1. Marco teórico

### 1.1 Barreras acústicas

#### 1.1.1 Conceptos básicos

El **ruido ambiental** se define como un sonido exterior no deseado o desagradable generado por el transporte y la industria. Es uno de los principales problemas ambientales de ámbito local en los países de la Unión Europea [1] y en general de todos los países industrializados. Dichos sonidos pueden llegar a provocar efectos negativos y nocivos sobre la salud auditiva, física y mental de las personas. Estos efectos negativos, comúnmente conocidos como *Contaminación acústica*, surgirían a raíz de exponerse a cualquier sonido que supere los 75 decibelios (dB) [2].

Para reducir la emisión de ruido, sin hacerlo desde la fuente, se puede actuar durante la fase de transmisión de la onda sonora, siendo las barreras acústicas uno de los métodos más utilizados. Las barreras acústicas se definen como cualquier obstáculo sólido que se sitúa entre el emisor y el receptor de una onda sonora, produciendo en la zona de este último un efecto de atenuación debido a la ley de masas [3]. La energía recibida por el receptor situado tras la barrera es la suma de la contribución energética de la onda directa transmitida a través de la barrera y de la difractada por el borde de ésta. En la práctica, el nivel de presión de la onda transmitida siempre es muy inferior al de la onda difractada.

Así, una barrera acústica tradicional depende principalmente de dos factores [3]:

- Sus **dimensiones**, de forma que sean suficientemente amplias para producir la ruptura de la línea visual entre la fuente y el punto de recepción.
- Su **situación relativa**, con relación a la fuente y a la zona a proteger.

Para que estas pantallas tradicionales sean efectivas, deben construirse con materiales rígidos continuos, sin agujeros ni cortes a lo largo de toda su superficie. La densidad superficial de la pantalla deberá ser al menos de 10 Kg/m<sup>2</sup>.

En la **Figura 1** se observa un esquema del comportamiento acústico de una barrera tradicional en el que la onda sonora emitida por la fuente viaja en línea recta de izquierda a derecha. Esta trayectoria se ve interrumpida por la barrera acústica, situada entre la fuente y el receptor, provocando que una fracción de la energía acústica emitida sea reflejada hacia la fuente. Otra fracción es transmitida a través de la barrera, otra difractada por el borde superior y otra, absorbida o disipada en el material.

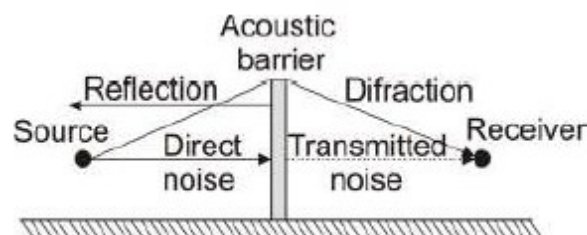


Figura 1. Esquema del comportamiento de una barrera acústica tradicional [4].

### 1.1.2 Pérdidas por Inserción (IL)

La zona protegida por la barrera acústica se denomina **zona de sombra** y la atenuación que proporciona se suele caracterizar por el parámetro denominado **pérdidas por inserción**, IL (del inglés, *Insertion Loss*). Este parámetro se define como la disminución del nivel de presión sonora en un punto considerado por la interposición de una barrera o dispersor acústico, respecto al nivel existente previo a la instalación, cuya expresión es:

$$IL = 20 * \log_{10} \left| \frac{P_d}{P_i} \right| \text{ (dB)} \quad (1.1)$$

donde  $P_d$  es el valor de la presión eficaz que llegaría directamente al receptor si no existiera la barrera acústica y  $P_i$  el valor de la presión eficaz que llega al receptor teniendo en cuenta los efectos de la barrera acústica. Mediante este parámetro se obtienen la atenuación proporcionada por la barrera acústica.

Siguiendo la literatura sobre pantallas acústicas basadas en CS [4-8], para el análisis de los diferentes diseños presentados en este Trabajo Final de Grado (TFG) se utilizan: espectros de frecuencia, mapas acústicos y el área de atenuación acústica (AA). A continuación, se describen brevemente estos conceptos:

- **Espectros de frecuencia.** Se obtiene representando el IL (dB) frente a la frecuencia (Hz). En este trabajo se utilizará banda fina desde 100 a 3000 Hz, como se observa en la **Figura 2**, que son las frecuencias más difíciles de atenuar.

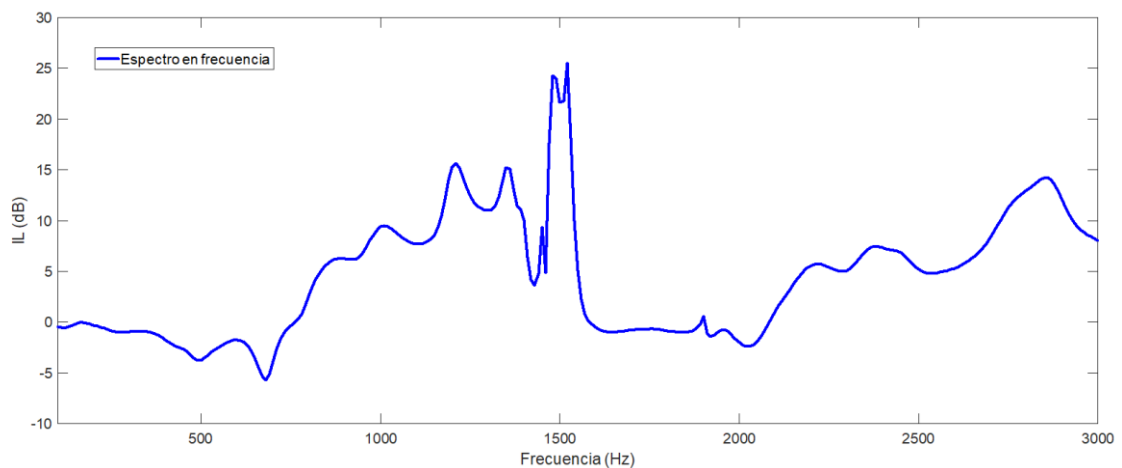


Figura 2. Ejemplo de espectro de frecuencia.

- **Mapas de presión sonora.** Se trata de una representación de los valores de presión o nivel de presión sonora para un valor único de frecuencia en régimen estacionario. Representa cómo se distribuye la energía acústica en el espacio. Este tipo de representación se utiliza para observar cómo influye el cambio de diseño en la geometría de los dispersores en el flujo de energía acústica alrededor de la barrera acústica. En la **Figura 3** podemos observar un mapa de nivel de presión sonora, en el que las circunferencias representan el obstáculo (dispersores de la barrera acústica) y justo a la derecha se observa el espacio denominado zona de sombra, donde el nivel de presión sonora es menor para esa frecuencia concreta (1200 Hz, en este caso).

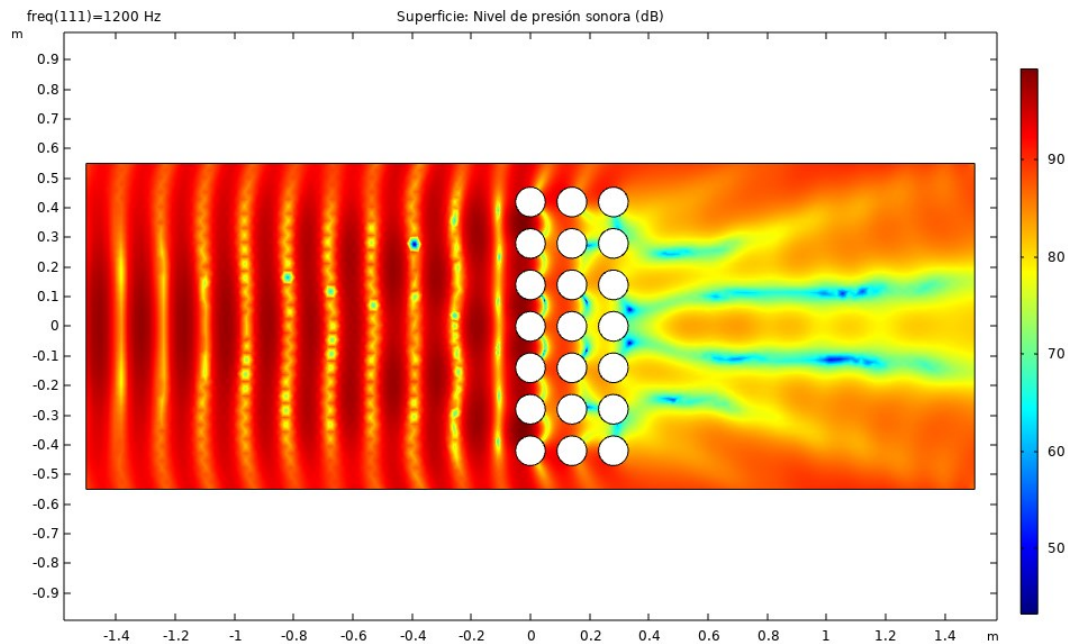


Figura 3. Ejemplo de mapa de nivel de presión sonora en dB para la frecuencia de 1200 Hz.

- **Área de atenuación (AA).** Este parámetro se utiliza para valorar la capacidad de atenuación de la red dentro de un rango de frecuencias establecido. Se define como el área comprendida entre el rango positivo de los espectros de atenuación y el umbral de la línea de 0 dB en el rango de frecuencias seleccionado, como vemos en la **Figura 4**. Su unidad es dB\*Hz. En general, este parámetro se emplea para poder comparar resultados de diferentes configuraciones desde un punto de vista global.

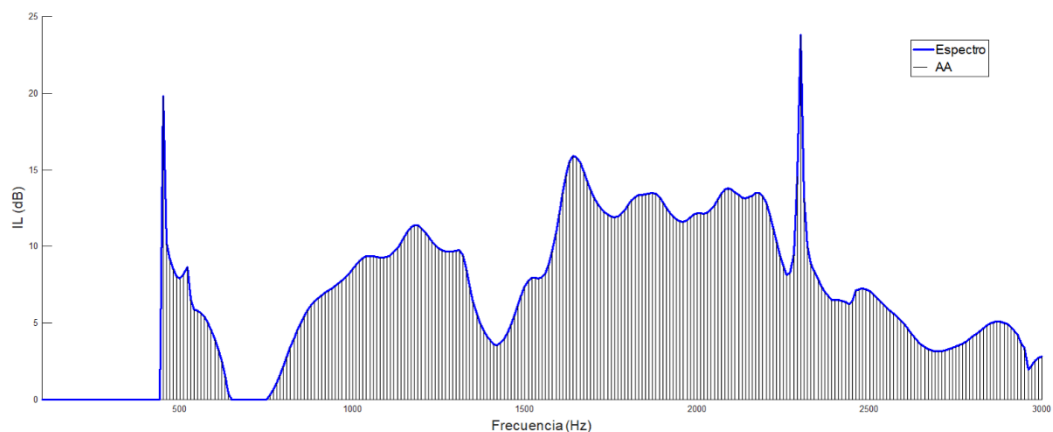


Figura 4. Ejemplo de área de atenuación.

## 1.2 Cristales de sonido

### 1.2.1 Conceptos teóricos

El uso de barreras acústicas tradicionales (ciegas, de alta densidad y basadas en la ruptura de la línea óptica emisor/receptor) es muy común y lo podemos encontrar a nuestro alrededor de forma habitual, especialmente en carreteras. No es el caso de los CS, los cuales su aplicación en la acústica ambiental es más reciente y surgen como alternativa a las barreras acústicas tradicionales.

A finales del siglo XX, surge una nueva línea de investigación para conseguir atenuar el ruido mediante los CS. Presentan elementos distribuidos de forma regular y repetitiva en el espacio denominados dispersores acústicos que poseen una red periódica propia. Similares a los sólidos cristalinos que encontramos en la naturaleza y poseen esta estructura atómica. En función del número de direcciones en las que se presenta la repetición de estos dispersores, los CS pueden ser unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), **Figura 5**.



*Figura 5. Ejemplo cristales de redes periódicas 1D, 2D y 3D [9].*

En este trabajo se utilizan CS bidimensionales. Estos materiales presentan una propiedad denominada dispersión múltiple que genera bandas de frecuencia en las que no se propaga el sonido, siendo la geometría, la posición y el tipo de red de los dispersores, quien determina el rango de frecuencias que resultado afectado por la interposición de la barrera. Así, varios estudios han realizado el diseño de pantallas acústicas basadas en CS con dispersores cilíndricos. Los primeros diseños utilizaban dispersores rígidos [10], donde sólo aparecía el fenómeno de la dispersión múltiple, denominando a este tipo de pantallas de primera generación. Pronto se vio la posibilidad de incorporar nuevos mecanismos de control del ruido con la idea de que estos se superpusieran de forma constructiva a la dispersión múltiple intrínseca a los CS [11]. A este tipo de pantallas se les denominó de segunda generación e incorporaban el fenómeno de la absorción y el de la resonancia [4].

La distribución periódica de los dispersores de un cristal de sonido varía según las propiedades físicas del medio huésped de este. Esta relación estructural entre el medio dispersor y los dispersores determina la topología de la red. Existen dos topologías de red [12]:

- **Cermet**, en la que los dispersores son inclusiones aisladas, rodeadas completamente por el material huésped.
- **Network**, en la que el material dispersor está conectado y forma una red continua de trabajo a lo largo de toda la estructura.

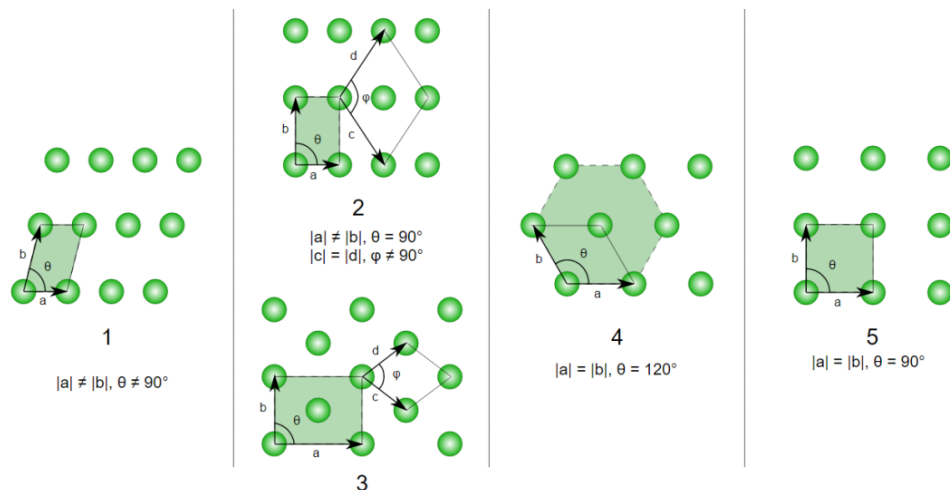
En este trabajo se utilizará la topología Cermet, ya que los dispersores están embebidos y rodeados por aire. Además, estudios teóricos han demostrado que esta geometría favorece la atenuación de ondas sonoras más que la topología Network, que funciona mejor con ondas electromagnéticas.

### 1.2.1.1 Red de Bravais

Como ya se ha comentado, los CS son redes periódicas formados por un conjunto de unidades elementales llamadas bases o dispersores y por una red periódica de puntos donde están situadas estas bases llamada **red de Bravais** [9], la cual se define como una disposición infinita de puntos discretos que presentan una estructura y orientación invariable independientemente del punto de orientación.

Al utilizar CS bidimensionales en este trabajo, interesa saber los tipos de red de Bravais más comúnmente utilizados para las 2D según la distancia entre nodos y los ángulos que conforman estos.

En la **Figura 6** se observan estos tipos de red:

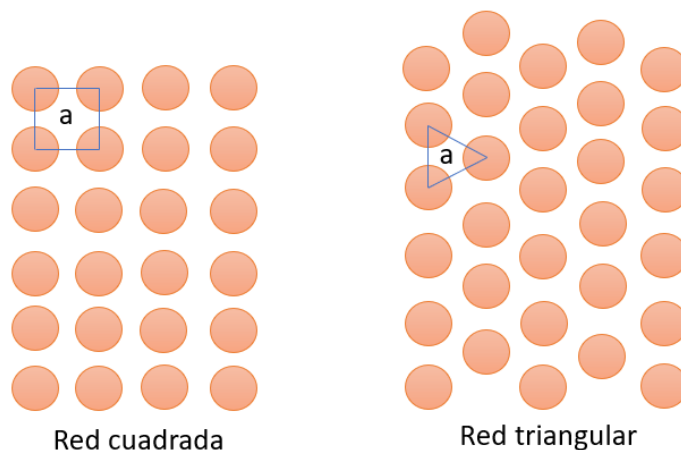


**Figura 6.** Redes de Bravais más comunes en 2D: (1) Red oblicua, (2) Red rectangular centrada, (3) Red rectangular, (4) Red hexagonal, (5) Red cuadrada.

El tipo de simetría que se utilice en un cristal de sonido afectará a la eficacia y a la eficiencia de este. En este trabajo se utilizan redes triangulares y cuadradas, que son las más utilizadas en los cristales bidimensionales.



Para construir estas redes se debe de tener en cuenta la repetición espacial periódica de una celda unidad. Una celda unidad se caracteriza mediante el parámetro de red  $a$ , como se observa en la **Figura 7**. Este parámetro indica la separación que existe entre los dispersores del cristal y se mide en metros (m). Dependiendo del tipo de red de Bravais que se utilice, el parámetro de red se define como la longitud entre los centros de los dispersores, en el caso de la red cuadrada, mientras que para la triangular se define como la base del triángulo equilátero que separa los dispersores.



*Figura 7. Redes más comúnmente utilizadas en los CS 2D: cuadrada y triangular.*

### 1.2.1.2 Propagación en redes

El fenómeno de dispersión múltiple fue establecido, en primer término, por W. L. Bragg en su estudio sobre la determinación de estructuras cristalinas con rayos X. En estos primeros estudios se dedujo una relación entre la periodicidad de la estructura, el ángulo de difracción y la longitud de onda incidente.

Como en muchas ocasiones, los estudios desarrollados para ondas electromagnéticas se adaptan para la propagación de ondas elásticas, como en este caso, donde se aplican al estudio de la atenuación de la onda sonora.

Así, cuando una onda sonora incide sobre un cristal de sonido es reflejada por cada dispersor y cada una de estas ondas resultado de la dispersión inciden de nuevo en otros dispersores y así infinitas veces. Este fenómeno es conocido como dispersión múltiple y varía según la forma de la estructura y de la longitud de la onda incidente [8][9].

En caso de que la longitud de onda incidente sea de un valor similar al parámetro de red en la dirección de propagación de dicha onda, la dispersión múltiple generará una nueva onda, producto de las interferencias constructivas y destructivas en la que hay bandas de propagación prohibidas o *Band Gaps* (BGs), en inglés.

### 1.2.1.3 Band Gap

Este fenómeno de las bandas prohibidas de propagación es uno de los más interesantes en el diseño de los CS, ya que se permite atenuar una banda deseada, ateniendo al diseño del cristal. Con relación al tamaño y a la posición de los BGs en el espectro generado por el cristal, influyen las siguientes características:

- **Cociente entre densidades de los elementos presentes en el cristal.** Atiende a la expresión:

$$y = \frac{\rho_s}{\rho_h} \quad (1.2)$$

donde  $\rho_s$  es la densidad del medio dispersor y  $\rho_h$  la del medio transmisor. En este trabajo se utilizará como medio transmisor el aire y se utilizarán dispersores embebidos en este.

El aumento de BG se ve favorecido en dispersores de alta densidad inmersos en un medio transmisor de baja densidad.

- **Parámetro de red a.** Anteriormente descrito, se relaciona directamente con la ecuación de Bragg, ya que cuanto menor sea la distancia que separa los dispersores, mayor será la banda de frecuencia en la que aparezcan los BGs.
- **Factor de llenado, o *filling factor* (*ff*) en inglés.** Se trata de un factor adimensional que representa el volumen ocupado por el medio dispersor respecto del volumen total del cristal. Según la simetría de la red, la expresión del *ff* cambiará. En el presente trabajo se utilizarán para las redes cuadradas:

$$ff = \frac{\pi D^2}{4a^2} \quad (1.3)$$

Mientras que para las redes triangulares se utilizará:

$$ff = \frac{\pi 4r^2}{2\sqrt{3}a^2} \quad (1.4)$$

donde  $r$  representa el radio del dispersor,  $D$  su diámetro y  $a$  el parámetro de red del cristal.

En general, cuanto mayor es el *ff* más ancho es el pico de Bragg en el espectro.

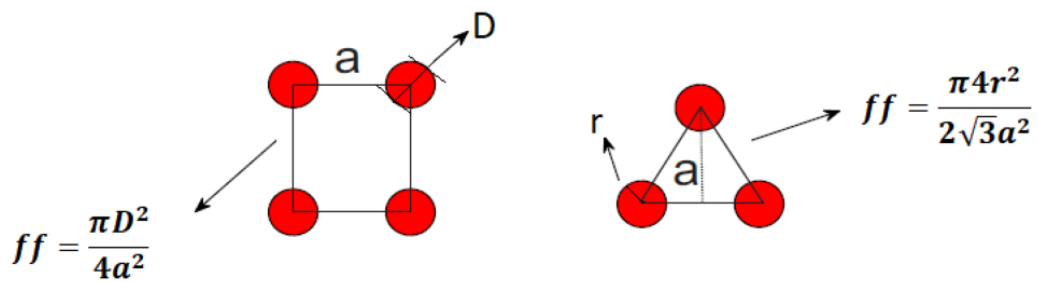


Figura 8. Factor de llenado ( $ff$ ) y parámetro de red ( $a$ ) para redes cuadrada y triangular.

#### 1.2.1.4 Ley de Bragg

La ley de Bragg permite estudiar las direcciones en las que se producen las interferencias constructivas mediante la diferencia de caminos entre los rayos reflejados. Esta diferencia ha de ser un múltiplo entero  $n$ , de longitud de onda  $\lambda$  [9], **Figura 9**.

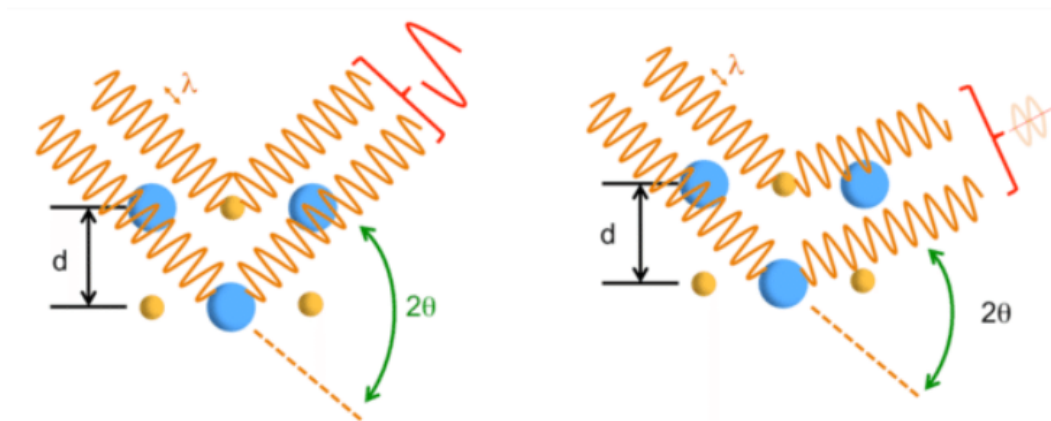


Figura 9. Interferencia constructiva (izda.) y destructiva (dcha.) [9].

La ley de Bragg viene definida por la siguiente expresión [9]:

$$2a \sin \theta = n\lambda \quad (1.5)$$

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

Únicamente se producirá reflexión de Bragg cuando la longitud de onda  $\lambda$  sea menor que la distancia entre planos paralelos del cristal, así como para algunos valores de  $\theta$ .

En este trabajo se diseñarán cristales teniendo en cuenta que la propagación de la onda plana incidente será de izquierda a derecha en el eje  $X$ , se utilizará la simetría cuadrada y la simetría triangular y se partirá siempre del caso  $n = 1$ .

Por lo cual, sustituyendo en la ec. 1.5 y aplicando la simetría para cada caso, obtenemos las siguientes expresiones para las frecuencias atenuadas o frecuencias de Bragg ( $f_{Bragg}$ ). Para la red cuadrada:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{2a} \quad (1.6)$$

Para la red triangular:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3}a} \quad (1.7)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido en el aire y  $a$  es el parámetro de red del cristal de sonido. Debido a la periodicidad del cristal de sonido, para estas frecuencias atenuadas, cuando se satisfaga la condición de Bragg, se formará una onda estacionara creando interferencias destructivas que no se propagarán más allá del cristal y aparecerán unos intervalos de frecuencia llamados bandas prohibidas de propagación o BGs [9].

## 1.2.2 Barreras acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación

Con el fin de mejorar las propiedades atenuadoras de la dispersión múltiple en los CS, se han implementado modificaciones en los diseños de los dispersores de los CS introduciendo resonadores de Helmholtz que aportan una disipación de energía adicional mediante el fenómeno de resonancia [5][14][15].

### 1.2.2.1 Resonadores de Helmholtz

Estos resonadores se pueden definir como una cavidad rígida que posee un volumen  $V$  y presenta una abertura alargada llamada cuello, el cual posee una longitud  $L$  y una sección de abertura  $S$ . El modelo teórico de este resonador puede compararse a un sistema masa-muelle [16]. En la **Figura 10** podemos observar el esquema de ambos sistemas.

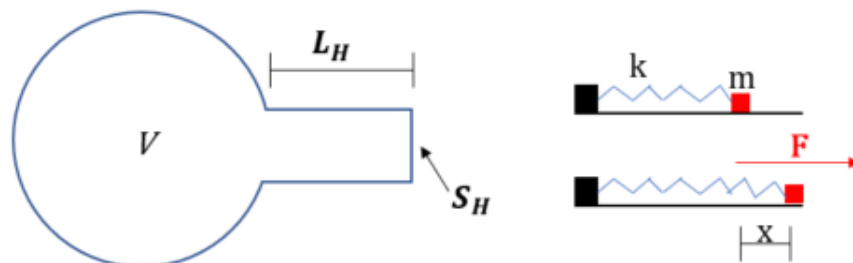


Figura 10. Esquema de resonador de Helmholtz (izda.) y sistema masa-muelle (dcha.) [17].

Cuando la longitud de la onda incidente  $\lambda$  tiene un valor superior que el de las dimensiones  $L$ ,  $\sqrt{S}$  o  $\sqrt[3]{V}$ , el fluido que encierra el cuello se mueve como si se tratara de un bloque, mientras que el volumen del fluido contenido dentro de la cavidad rígida actúa como muelle, de masa  $m$  [18]:

$$m = \rho S_H L_H \quad (1.8)$$

En este proceso, el resonador actúa según la ecuación diferencial de un oscilador forzado, donde la excitación es la onda plana incidente [18][19]:

$$m \frac{d^2}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = \rho S_H e^{j\omega t} \quad (1.9)$$

Además, se puede considerar un proceso adiabático, por lo que no se produce intercambio de calor con el exterior del resonador.

Las pérdidas por radiación son el factor de amortiguamiento viscoso, las cuales vienen dadas por la impedancia mecánica equivalente [20]:

$$Z_m = \frac{F}{\dot{x}} = R_m + jX_m \quad (1.10)$$

Utilizando un equivalente eléctrico, se puede calcular la impedancia de un circuito resonante RLC mediante la siguiente expresión [21]:

$$Z = R + jX = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \quad (1.11)$$

Para la condición de resonancia, que es  $X = 0$ , la expresión de la frecuencia angular sería la siguiente [21]:

$$\omega_H = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.12)$$

Utilizando una analogía electroacústica y comparando el resonador de Helmholtz con el circuito RLC mostrado en la **Figura 11**, se observa como el volumen ocupado dentro de la cavidad resonante equivaldrá a la impedancia capacitiva del condensador, mientras que el cuello del resonador será la impedancia producida por la resistencia y la reactancia inductiva de la bobina, como podemos observar en la **Figura 12**.

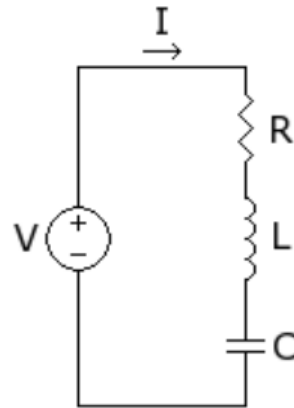


Figura 11. Circuito RLC [20].

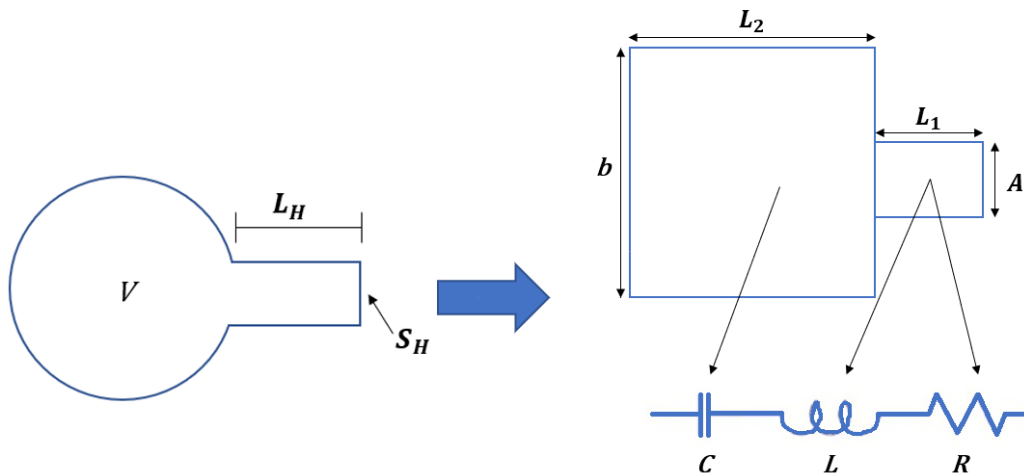


Figura 12. Analogía electroacústica de un resonador de Helmholtz y un circuito RLC [16].

Despejando de la ec. 1.12 y teniendo en cuenta los equivalentes de la **Figura 12**, la frecuencia de resonancia tendría la siguiente expresión [22]:

$$f_{Helm} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_H}{L_H V}} = \sqrt{\frac{A}{L_H b L_2}} \quad (1.13)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido en el medio; en este trabajo se considera 340 m/s y el medio será el aire. Teniendo de referencia la **Figura 10**, para los modelos 2D, el cuello se tomará como una superficie plana de longitud  $L_1$  en la que el radio del cuello es la mitad de la sección de abertura. El volumen encerrado en la cavidad rígida será una nueva superficie:  $S = bL_2$ .

Por último, la longitud efectiva del cuello del resonador  $L_H$  vendrá determinada por la siguiente expresión:

$$L_H = L_1 + \Delta \frac{A}{2} \quad (1.14)$$



donde  $L_1$  es la longitud real del cuello y  $\Delta$  es un factor de corrección que depende de la forma de la sección de abertura. Si es cuadrada, se toma un valor de 1.8 y si es circular, 1.6 veces el valor del radio del cuello del resonador [23]. En este trabajo se tomará el valor de 1.6, ya que se trabajará con secciones circulares.

Si sustituimos la ec. 1.14 en la 1.13, obtendremos la siguiente expresión:

$$f_{Helm} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{(L_1 + \Delta \frac{A}{2})S}} \quad (1.15)$$

Teniendo en cuenta estos parámetros, se puede realizar un diseño del resonador de Helmholtz para cualquier frecuencia de resonancia deseada [5][24].



## 2. Objetivo del TFG

El objetivo general del trabajo es llegar a diseñar una barrera de CS que permita mejorar la eficiencia de atenuación entre el primer y segundo BG de Bragg y hacerlo con un tamaño comercialmente viable.

Los objetivos específicos son:

- **Marco conceptual.** Puesta a punto de los conocimientos necesarios para la ejecución del proyecto: revisión del estado del arte y recopilación de información sobre los resonadores y toda la bibliografía que los engloba.
- **Conocimiento de herramientas software.** Aprendizaje del manejo de las herramientas software necesarias para la simulación del comportamiento de una barrera acústica basada en CS tales como COMSOL Multiphysics, en la que se realizan las simulaciones y MATLAB, la cual sirve para graficar y obtener las AA de cada barrera estudiada. Creación de diferentes prototipos para estudio de mejora de atenuación entre los BGs. Para ello, se analizarán diferentes configuraciones de CS de segunda generación intentado maximizar el AA de los prototipos planteados y atacando las zonas del espectro que presentan una peor atenuación.
- **Desarrollo de diseños propios.** Creación de diferentes prototipos para realizar un estudio de mejora de atenuación entre los BGs. Para ello, se analizarán diferentes configuraciones de CS de segunda generación intentado maximizar el AA de los prototipos planteados y atacando las zonas del espectro que presentan una peor atenuación.





### 3. Realización del TFG

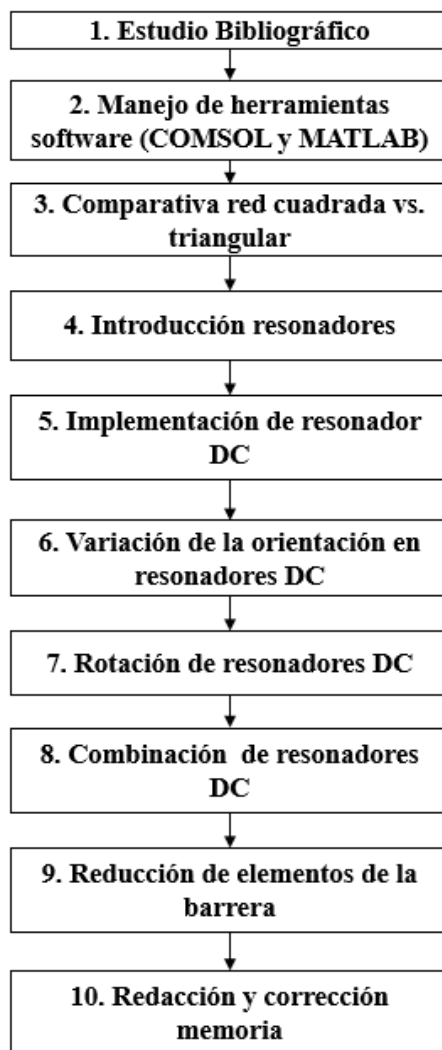
#### 3.1 Fases del TFG

La realización de este trabajo consta de las siguientes fases:

- **Primera fase.** Esta primera fase consistió en una búsqueda bibliográfica sobre los CS, los resonadores de Helmholtz y toda la teoría que los engloba, pues esta información era desconocida para mí. Esta fase se ha mantenido activa a lo largo de la elaboración de todo el proyecto.
- **Segunda fase.** Esta fase consistió en el aprendizaje de la utilización del software de simulación COMSOL Multiphysics [25]. Se partió de un diseño simple y se fue desarrollando y modificando en base a los objetivos y las demandas del TFG.
- **Tercera fase.** En esta fase se continuó el aprendizaje del COMSOL Multiphysics, así como la utilización de MATLAB para la creación de funciones mediante las cuales se graficaron los resultados de las simulaciones realizadas.
- **Cuarta fase.** En esta última fase se plantean diferentes prototipos de estudio, se analizan los resultados en cuanto a capacidad de atenuación sonora y se llega a las conclusiones descritas más adelante. Además, se piensa un posible desarrollo futuro para darle continuidad a este proyecto y se redacta la presente memoria.

### 3.2 Distribución de las tareas

La elaboración de este trabajo ha seguido el orden de tareas enumerado en el diagrama de flujo de la **Figura 13**:



*Figura 13. Diagrama de distribución de tareas.*

A continuación, se detallan las tareas mencionadas en la **Figura 13**:

1. Estudio bibliográfico y puesta a punto en el estado del arte.
2. Aprendizaje y desarrollo en el software de simulación COMSOL Multiphysics, así como realización de script de MATLAB para poder comparar las barreras estudiadas.
3. Se escogen estas simetrías, ya que son las más utilizadas, además en ambas redes se utilizan dispersores rígidos.

4. Se introducen resonadores de Helmholtz en los diseños para compararlos con una red de dispersores rígidos.
5. Se implementan resonadores de doble cámara (DC) y se posicionan de distintas maneras para estudiar su comportamiento.
6. Se cambia la posición de los resonadores DC; se mantiene uno de ellos fijo mientras se varía la posición del segundo para estudiar su comportamiento.
7. Se rotan ambos resonadores DC.
8. Se combinan las configuraciones de los resonadores DC rotados y sin rotar para evaluar cuál de ellas tiene mejores propiedades acústicas.
9. Con los resultados obtenidos, se cuestiona y se formula la idea de la reducción y simplificación de la barrera acústica eliminando una columna de dispersores y se realiza dicho estudio.
10. Se finaliza la redacción y corrección de la memoria.

### 3.3 Diagrama de Gantt

Las tareas anteriormente descritas se organizan en el siguiente diagrama de Gantt, como se muestra en la **Tabla 1**, siendo el símbolo I una representación de las semanas de cada mes dedicadas a cada una de las tareas:

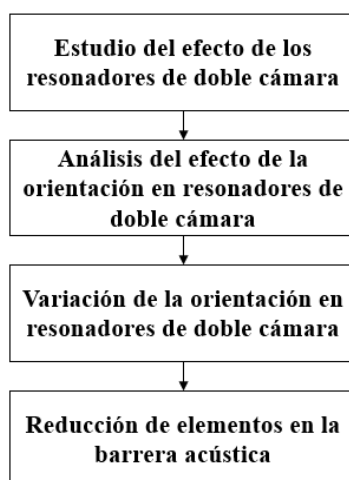
Tarea	Feb. 2022	Mar. 2022	Abr. 2022	May. 2022	Jun. 2022	Jul. 2022	Ago. 2022	Sep. 2022	Oct. 2022	Nov. 2022	Dic. 2022	Ene. 2023	Feb. 2023	Mar. 2023	Abr. 2023	May. 2023	Jun. 2023
1	III	II															
2		II	I														
3			III														
4			I	II													
5				III													
6				III													
7					III												
8					II	II											
9						II	III										
10							I	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III

*Tabla 1. Diagrama de Gantt para la repartición de tareas durante los meses de realización del TFG.*

## 4. Metodología utilizada

### 4.1 Parametrización general de diseño

En la actualidad existen muchas configuraciones de CS bidimensionales que poseen un rendimiento acústico bueno. Las pantallas de CS de segunda generación mejoran los resultados obtenidos respecto a la atenuación de las pantallas de cristales de sonido de primera generación, donde el único efecto acústico que actúa es la dispersión múltiple [24]. En este trabajo se parte de una base ya existente, con doble resonador integrado, y se van haciendo modificaciones en busca de una mejora del espectro de atenuación entre los dos primeros BGs de Bragg. En la **Figura 14** se observa un diagrama representado el desarrollo del actual TFG:



*Figura 14. Diagrama de diseño.*

En los estudios realizados se han mantenido constantes algunas variables de estudio que se comentan a continuación:

- Se trabaja con **dispersores cilíndricos**, ya que facilitarán los cálculos tratándose de una simetría circular. El material utilizado para su diseño será rígido.
- Los dispersores están embebidos y rodeados de aire, cuya velocidad de propagación y densidad se toman como  $c = 340$  m/s y  $\rho = 1,25$  Kg/m<sup>3</sup>.
- Se toman los valores de **factor de llenado** ( $ff$ ) de 0.4 y 0.6, que son los valores que se suelen utilizar para que la barrera sea lo suficientemente abierta sin perder demasiada efectividad y sin comprometer la atenuación generada por esta. De estos valores se deduce el valor del **parámetro de red** para la obtención de las  $f_{Bragg}$  sustituyendo en **1.3** y **1.4**, atendiendo al tipo de simetría de la red; cuadrada o triangular.
- Para el diseño de resonadores se establece como objetivo situar las frecuencias de resonancia a ambos lados del BG de Bragg. Para ello, se diseña en base a las variables del resonador (volumen, superficie y longitud del cuello) y las ec. **1.3** y **1.4**.

## 4.2 Metodología de simulación

Las simulaciones realizadas, mediante el software COMSOL Multiphysics [25], para el cálculo del espectro de IL se realizan con modelos bidimensionales con el objetivo de reducir el coste computacional.

Se estudian y comparan las propiedades acústicas de las redes de dispersores cuadrada y triangular, así como la modificación de la separación de los dispersores, añadiéndoles posteriormente a estos últimos resonadores de Helmholtz.

A lo largo de este trabajo se realizan simulaciones utilizando el método de simulación 2D en campo libre.

### - Modelo 2D en campo libre:

Se trata de un modelo de simulación realista, ya que introduce límites al sistema. Se simula un modelo de campo libre en una cámara anecoica (también simulada) de dimensiones 3 m de largo x 1.1 m de ancho para evitar reverberaciones y ondas reflejadas indeseadas, donde se utiliza como fuente emisora una onda plana con incidencia normal en el sentido positivo del eje OX, de izquierda a derecha, como se indica en la **Figura 15**, con una presión  $p = 1$  atm y que viaja por el aire como medio transmisor.

El tamaño de la malla utilizada en COMSOL determina la precisión de los resultados, pero también el tiempo de cálculo de estos. Por lo cual, se opta por una malla EXTRAFINA, que ofrece una buena calidad en los resultados sin demorarse en exceso en calcular.

Para el estudio de los BGs, se delimita la banda de frecuencias desde los 100 Hz hasta los 3000 Hz.

El punto de medida se sitúa a 1 metro en la zona de sombra de la pantalla.

Se trabaja con una pantalla con un espesor (m) que atiende a la siguiente expresión:

$$\text{Espesor} = 3a + 2R \quad (1.16)$$

siendo  $a$  el parámetro de red y  $R$  el radio del dispersor. En este caso se trabaja con un  $a = 0.14$  m y un  $R = 0.05$  m. Por lo cual, sustituyendo en la **ec. 1.16** se obtiene una pantalla de 0.52 m de espesor. Se toma de referencia para el diseño de la barrera los últimos prototipos de pantallas existentes, que se diseñan con espesores de alrededor de 0.5 m.

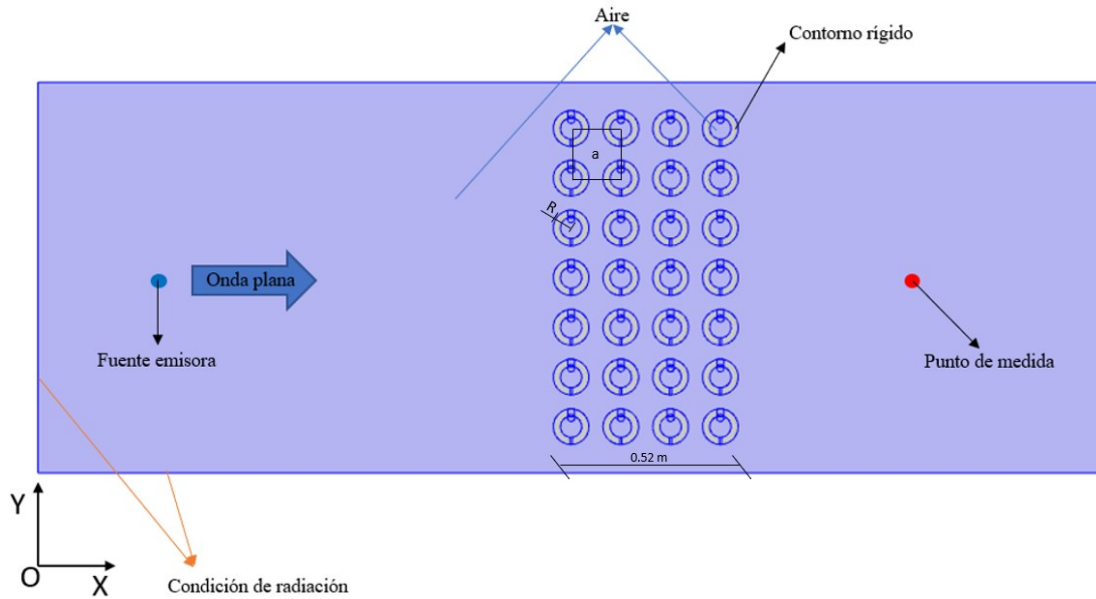


Figura 15. Modelo de simulación 2D en campo libre.

Una vez realizados los análisis mediante el método de elementos finitos (MEF) en el software de simulación, se trasladan los datos a MATLAB para realizar las gráficas y el cálculo de las áreas de atenuación, para tener así una medida objetiva y poder comparar las redes más allá del espectro generado por estas. El MEF divide estructuras geométricas complejas en las que se dan diferentes fenómenos acústicos en bloques más simples, convirtiendo así problemas de ecuaciones diferenciales en problemas algebraicos mediante la discretización de un modelo continuo en conjuntos de elementos interconectados entre sí [26], como se observa en la **Figura 16**. Para resolver problemas computacionalmente utilizando el MEF, es necesario definir la malla de cálculo, la geometría con la que se va a trabajar, las condiciones de contorno y discretizar el dominio de resolución.

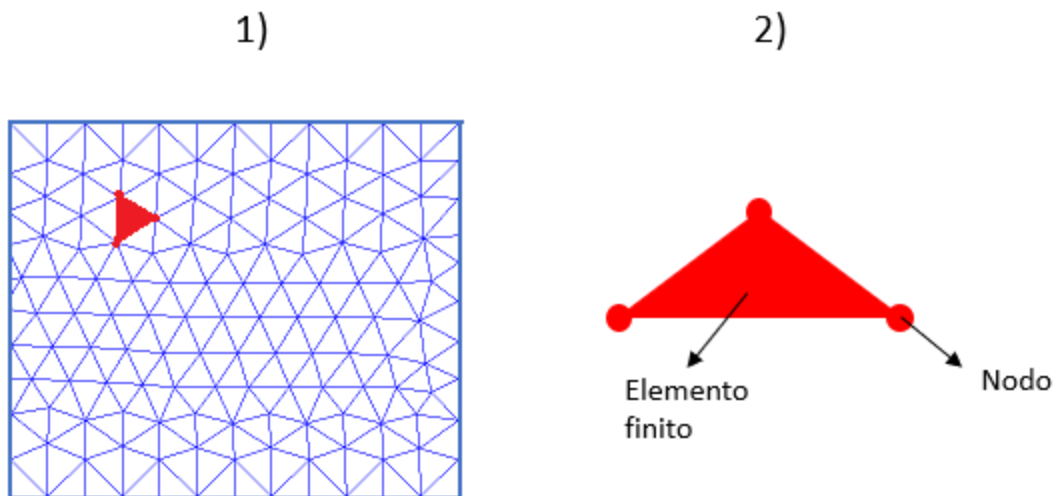


Figura 16. Ejemplo de mallado triangular (1) y elemento finito de malla con nodos (2).

## 5. Análisis de los resultados

En este apartado se presentan los resultados de diferentes análisis realizados persiguiendo los objetivos de mejora de eficiencia de atenuación y simplificación de la barrera. En la **Figura 17** se enumeran los pasos seguidos mediante un diagrama de flujo.

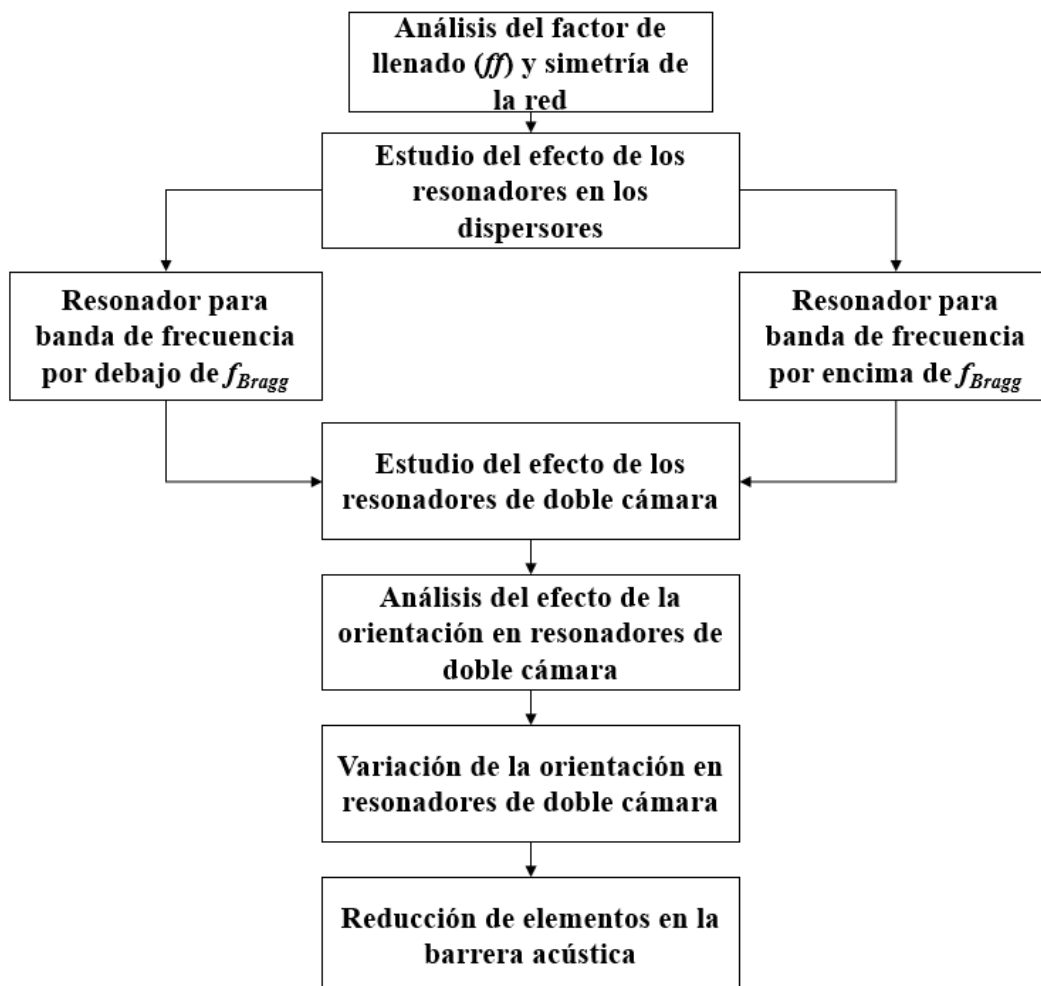


Figura 17. Diagrama de flujo seguido para el estudio de eficiencia de las barreras de CS en este trabajo.

### 5.1 Análisis $ff$ y simetría red

En este primer punto se determina mediante simulaciones realizadas en COMSOL Multiphysics con qué simetría de red de CS se utilizará a lo largo del trabajo, así como el valor de  $ff$  elegido. Para ello, como se ha comentado anteriormente, se toman las simetrías cuadrada y triangular, ya que son las más utilizadas en este tipo de barreras.

Se emplean dispersores rígidos [11], se toman los valores de  $ff=0.4$  y  $ff=0.6$  y se deduce el valor del parámetro de red  $a$  para la obtención de las  $f_{Bragg}$  sustituyendo en las ec. 1.3 y 1.4, atendiendo al tipo de simetría de la red; cuadrada o triangular. Una vez obtenido el valor de  $a$  para cada red,

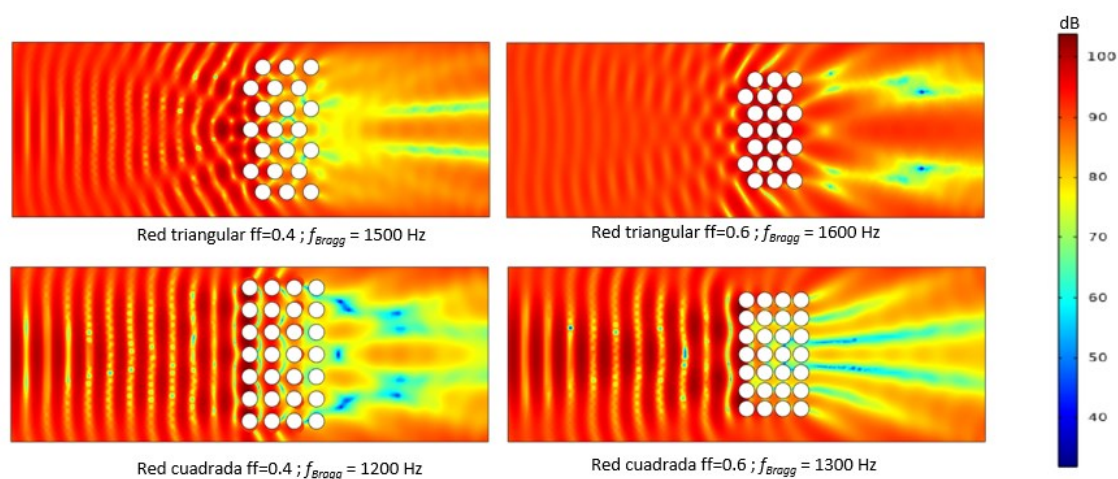
se pueden calcular las  $f_{Bragg}$  resultantes de estas características sustituyendo en las ec. 1.6 y 1.7, respectivamente. Se pueden observar los resultados en la **Tabla 2**.

	Red cuadrada	Red triangular
$f_{Bragg}(ff=0.4)(\text{Hz})$	1200	1500
$f_{Bragg}(ff=0.6)(\text{Hz})$	1300	1600

*Tabla 2. Frecuencias Bragg según ff y tipo de simetría de red.*

Una vez obtenidas estas frecuencias, se simula en COMSOL y se realiza una comparativa de mapas de presión y del espectro generado por las distintas redes.

En la **Figura 18** podemos observar en los mapas de nivel de presión sonora resultantes en las frecuencias de Bragg de la **Tabla 2**. En ellos se distinguen las zonas de mayor y menor atenuación que se generan en la zona de sombra de la barrera, alrededor del punto de medida situado a 1 metro de la barrera.



*Figura 18. Mapas de nivel de presión sonora atendiendo a las frecuencias de la Tabla 2 y a su simetría de red: redes cuadradas abajo y redes triangulares arriba.*

En cuanto al espectro, se puede ver en las **Figuras 19 y 20** que la red cuadrada presenta un mayor BG en las bandas de frecuencias medias-bajas.



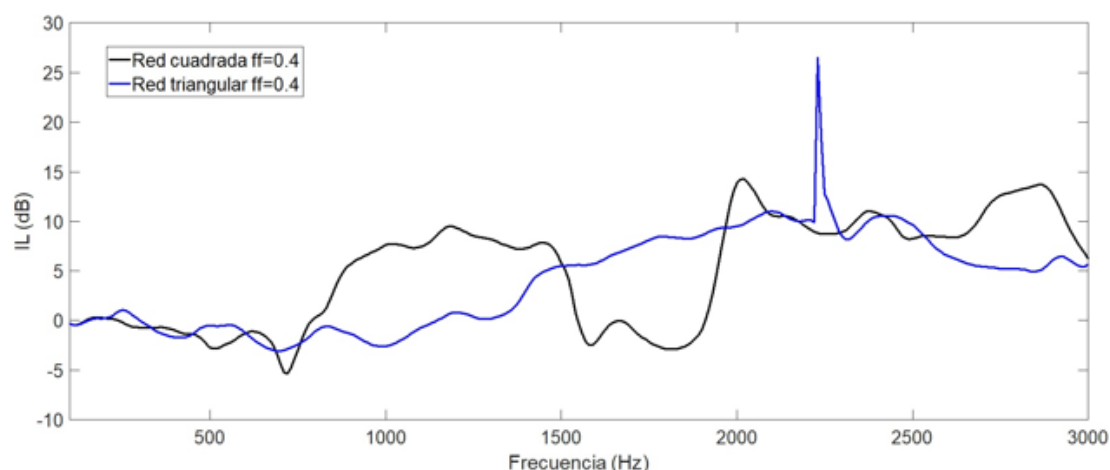


Figura 19. Comparativa espectros de red triangular vs. cuadrada para un  $ff=0.4$ .

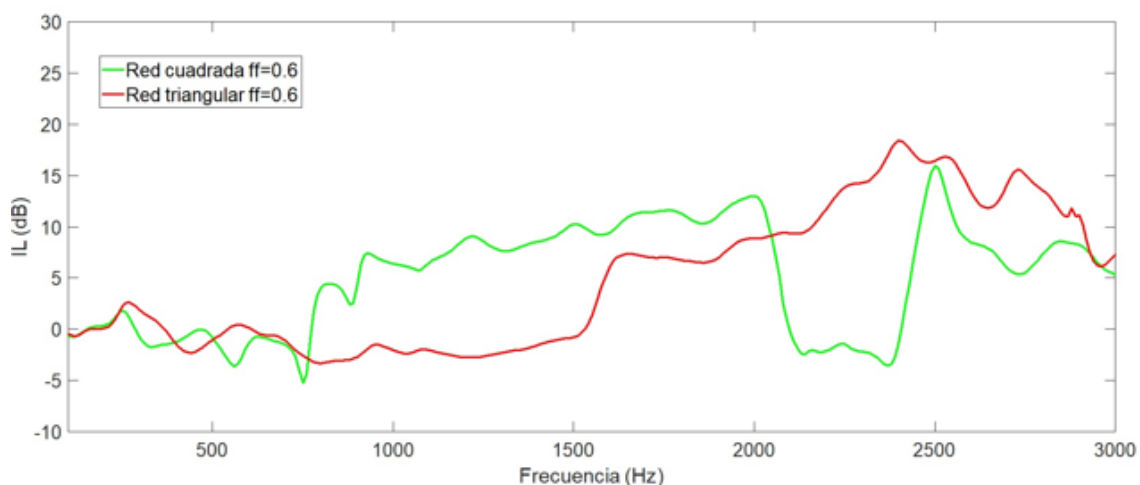


Figura 20. Comparativa espectros de red triangular vs. cuadrada para un  $ff=0.6$ .

Para poder comparar objetivamente las redes y determinar qué  $ff$  aporta mejores propiedades acústicas, se utiliza un script confeccionado de MATLAB (ver Anexo) para calcular el AA y expuesto en la **Tabla 3**.

	AA (dB*Hz) * 10 <sup>4</sup>
Red cuadrada $ff = 0.4$	1.615
Red cuadrada $ff = 0.6$	1.628
Red triangular $ff = 0.4$	1.283
Red triangular $ff = 0.6$	1.617

Tabla 3. Áreas de atenuación de redes cuadradas y triangulares para los  $ff$  con valores de 0.4 y 0.6.

A la vista de los resultados obtenidos, se escoge la simetría cuadrada, pues en este caso, al tratarse de una onda con incidencia normal, ofrece una ligera mejoría en el parámetro de AA evaluado frente a la triangular. Por otro lado, en cuanto a los valores del  $ff$  no se observa una gran diferencia

entre 0.4 y 0.6, por lo que se opta por el valor de 0.4 para trabajar con una barrera más abierta y así favorecer su integración con el entorno cuando sea instalada, además de permitir mayor paso de aire y poseer una óptica de visión más abierta.

## 5.2 Estudio del efecto de los resonadores en los dispersores

Una vez se escogen el  $f$  y la geometría de las redes que se presentan a estudio, se añaden resonadores de Helmholtz en cada dispersor de la red para intentar mejorar sus propiedades. Como se ha comentado anteriormente, se parte de un CS con  $f_{Bragg}$  a 1200 Hz y se escogen dos frecuencias, una que se sitúe por encima y otra por debajo de este BG generado, a 500 y 1700 Hz, las cuales denominan frecuencias de Helmholtz ( $f_{Helm}$ ).

Para facilitar el cálculo de los parámetros necesarios a la hora de diseñar los resonadores, se hace uso de una tabla de Excel, donde se combinan diferentes valores de las magnitudes implicadas, hasta dar con las frecuencias objetivo, 500 y 1700 Hz. Se sustituye en la ec. 1.15 y se tienen en cuenta las equivalencias de la **Figura 12**. Así, de la **Tabla 4** se obtienen los valores necesarios para el diseño de los resonadores, los cuales se muestran en la **Figura 21**.

S (m)	L (m)	ri(m)	$f_{Helm}$ (Hz)
0.006	0.002	0.03	500.937
0.02	0.016	0.012	2012.858
0.015	0.02	0.012	1743.186

Tabla 4. Cálculo de parámetros de diseño de resonadores de Helmholtz: S, L, ri y  $f_{Helm}$ .

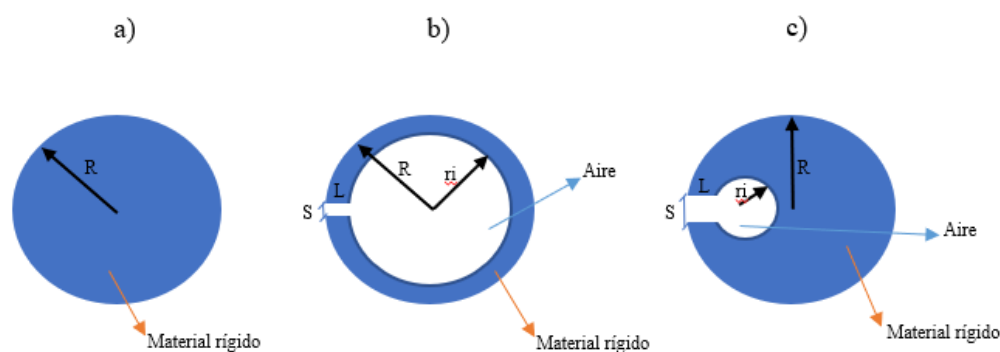
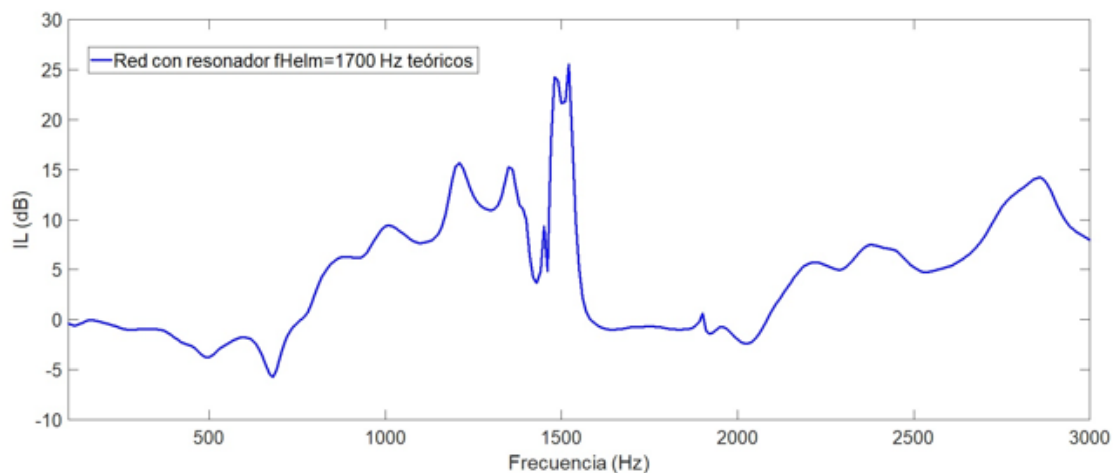


Figura 21. a) Dispersor rígido, b) dispersor con resonador de Helmholtz diseñado para la frecuencia de 500 Hz y c) dispersor con resonador de Helmholtz diseñado para la frecuencia de 1700 Hz.

Una vez obtenido el diseño de los resonadores para cada  $f_{Helm}$ , se realiza la simulación introduciendo estos resonadores en los dispersores de la red. Se simula una red de 7 filas de 4 dispersores cada una, siendo cada una de las filas de la red las representadas en la **Figura 22**.



Utilizando los datos obtenidos anteriormente, se procede a la simulación de COMSOL. Se puede observar en la **Figura 23** que la frecuencia atenuada  $f_{Helm} = 1700$  Hz, se desplaza hacia los 1500 Hz. Por lo que el diseño inicial parametrizado para esos 1700 Hz, que se calcula teóricamente con la ec. 1.15, no se corresponde con el resultado esperado, pues el BG se desplaza cerca de los 1500 Hz al simular y realizarse el MEF.



Para intentar hacer que el BG coincida con su valor teórico, 1700 Hz, se modifican los parámetros de diseño del resonador para una frecuencia aproximada de 2000 Hz. De esta manera, se consigue hacer coincidir mediante el nuevo diseño parametrizado para los 2000 Hz el BG de los 1700 Hz teóricos, como se observa en la **Figura 24**.

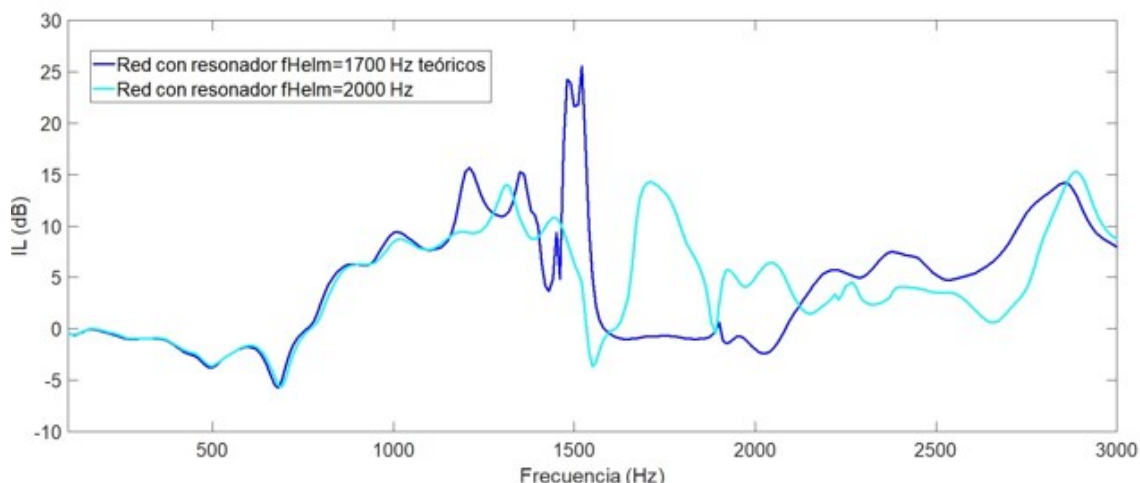


Figura 24. Espectro resonador  $f_{Helm} = 1700$  Hz teórico vs. nuevo diseño ajustando el BG para resonador con  $f_{Helm} = 2000$  Hz.

Una vez solventado este problema, se procede a comparar las redes en las frecuencias escogidas por debajo y por encima del BG: 500 Hz y 1700 Hz. En la **Figura 25** se observa un aumento de IL en las redes en las cuales se incluyen los resonadores diseñados para 500 y 1700 Hz.

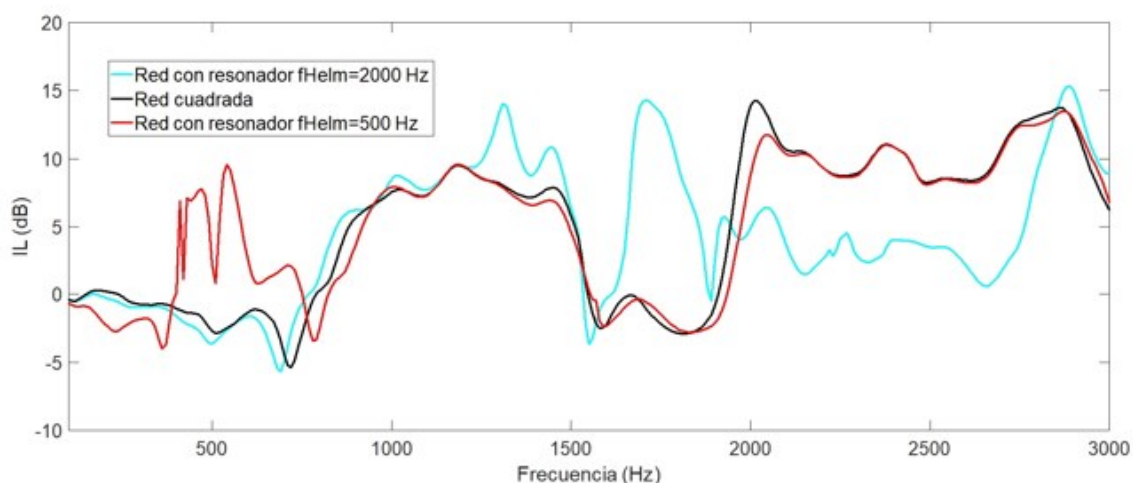


Figura 25. Comparativa red cuadrada vs redes con resonadores.

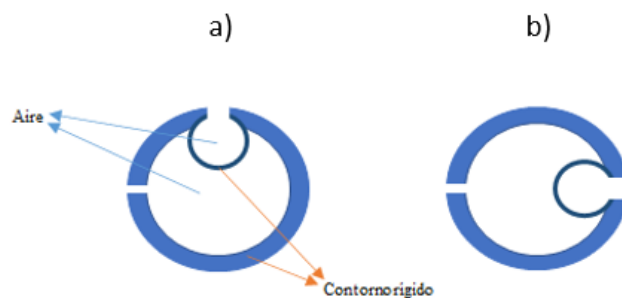
Como se observa en la **Figura 25**, el hecho de añadir resonadores a los dispersores de la red mitiga esta falta de atenuación por debajo y por encima del BG.

### 5.3 Estudio del efecto de los resonadores de doble cámara (DC)

Ya se ha demostrado que la inclusión de un resonador en los dispersores de una barrera construida con CS 2D resulta efectiva a la hora de atenuar una frecuencia concreta. A continuación, se estudia el efecto que puede presentar la adición de un segundo resonador a un mismo dispersor de la red.

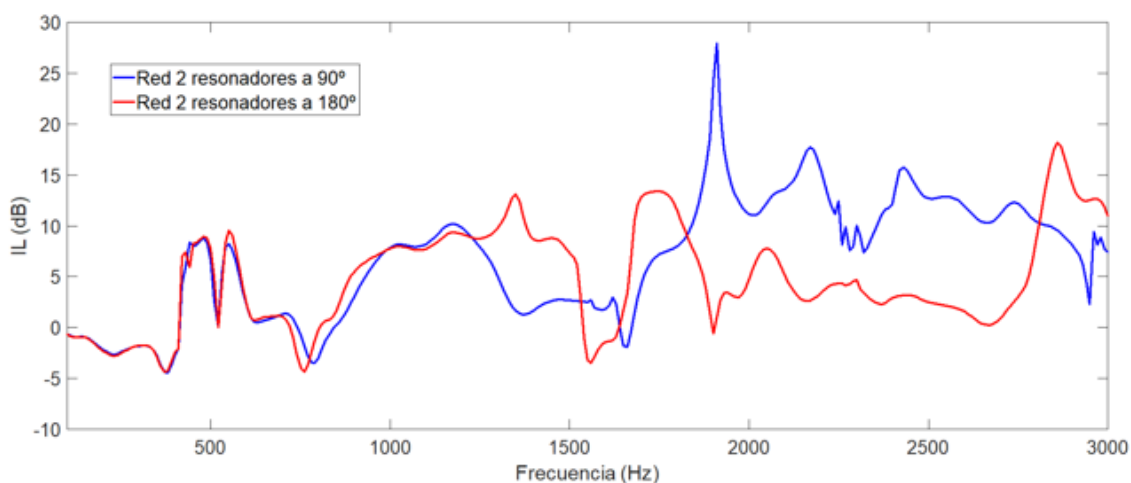
### 5.3.1 Análisis del efecto de la orientación en los resonadores de DC

Se utilizan los resonadores diseñados anteriormente para las  $f_{Helm}$  de 500 Hz y 1700 Hz. Se disponen a  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , como se observa en la **Figura 26**, para observar su efecto en las IL.



**Figura 26.** a) Resonadores dispuestos a  $90^\circ$  y b) a  $180^\circ$ .

En la **Figura 27** se puede observar cómo a frecuencias bajas ambos diseños funcionan prácticamente igual, pero, si nos situamos a frecuencias medias, se observa un mejor comportamiento en la red con los resonadores dispuestos a  $90^\circ$ .



**Figura 27.** Comparativa red  $90^\circ$  vs.  $180^\circ$ .

Por otra parte, se hace uso del script confeccionado en MATLAB para calcular las AA (ver Anexo). Previa simulación, se pensaba que el diseño con los dos resonadores dispuestos a  $180^\circ$  podría obtener unos resultados mejores que el de  $90^\circ$ , pues el hecho de tener enfrentados dos resonadores podría implicar una mayor atenuación, ya que no entraría la onda directamente al resonador, sino que esa misma onda habría sufrido previamente los efectos del primer resonador hasta llegar al segundo. Esto no resultó así, ya que como se observa en la **Tabla 5**, la red con mayor atenuación es la de los dos resonadores dispuestos a  $90^\circ$ .

	AA (dB*Hz) * 10 <sup>4</sup>
Red cuadrada	1.615
Red 2 resonadores 90°	2.037
Red 2 resonadores 180°	1.506

Tabla 5. Áreas de atenuación de las redes: Red cuadrada, Red con 2 resonadores a 90° y Red con 2 resonadores a 180°.

En ambas redes se observa un buen comportamiento a bajas frecuencias, pero a frecuencias medias la diferencia de atenuación favorece al diseño de 90°, como se ve en la **Figura 28**. Se mantienen el espectro de la red cuadrada para observar cómo se modifica el espectro en las frecuencias por encima y por debajo del primer BG.

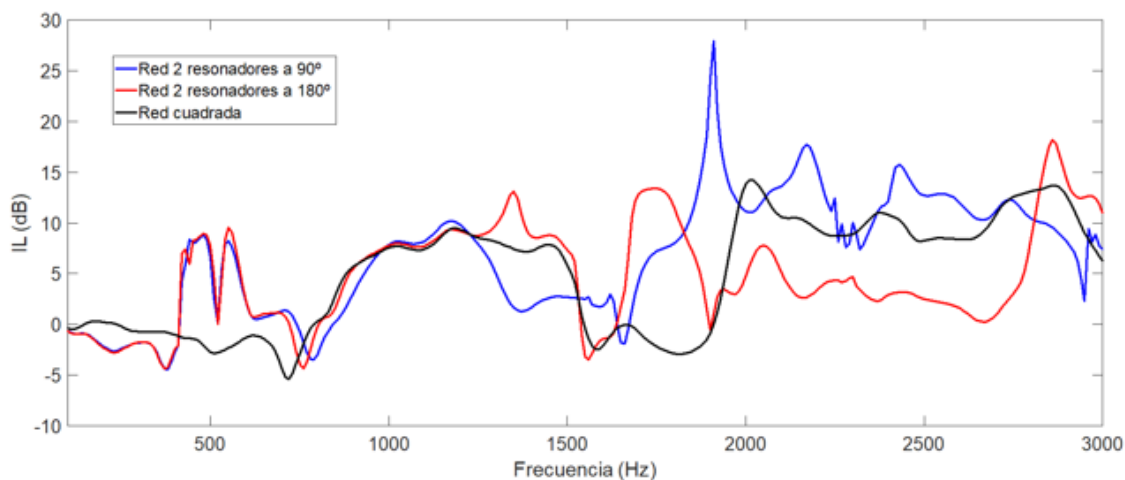


Figura 28. Comparativa espectros de las redes: Red con 2 resonadores dispuestos a 90°, Red con 2 resonadores dispuestos a 180° y Red cuadrada.

### 5.3.2 Variación de la orientación en resonadores de DC

Partiendo de las configuraciones con los resonadores a 90° y 180°, se deja un resonador fijo ( $f_{Helm} = 500$  Hz) y el segundo ( $f_{Helm} = 1700$  Hz) se va modificando su orientación con un paso de 15° en el rango de [90-180]°.

Por lo cual, el segundo resonador queda en las siguientes posiciones: 105°, 120°, 135°, 150° y 165°, como se muestra en la **Figura 29**.

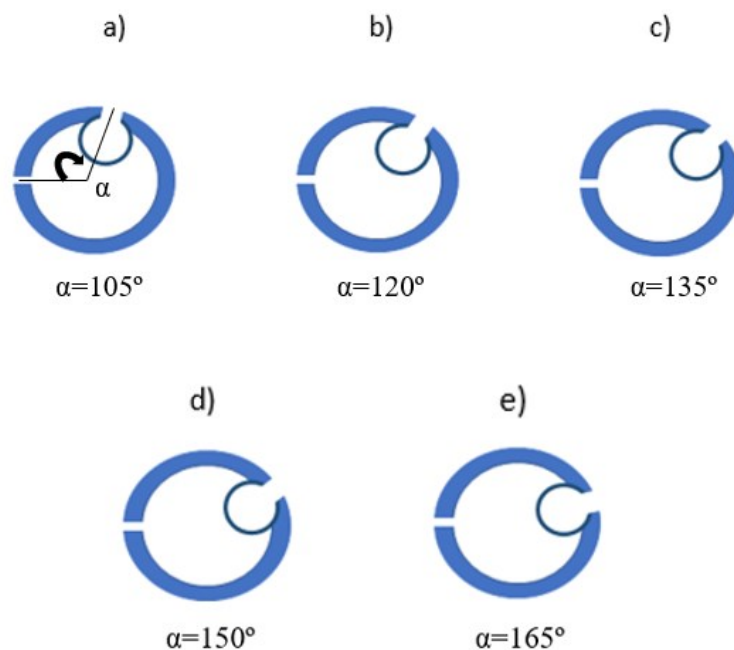


Figura 29. Resonadores dispuestos a a) 105°, b) 120°, c) 135°, d) 150° y e) 165°, respectivamente.

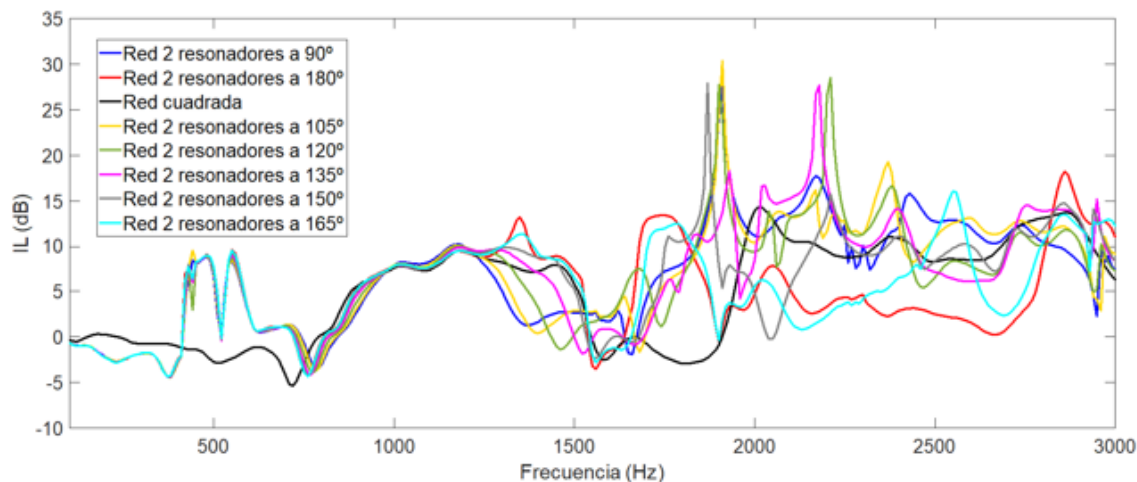
Tras la simulación, se observa que sólo 2 orientaciones obtienen una atenuación mayor a la de 90°: 105° y 135°.

	AA (dB*Hz) * 10 <sup>4</sup>
Red cuadrada	1.615
Red 2 resonadores 90°	2.037
Red 2 resonadores 180°	1.506
Red 2 resonadores 105°	2.076
Red 2 resonadores 120°	1.988
Red 2 resonadores 135°	2.044
Red 2 resonadores 150°	1.907
Red 2 resonadores 165°	1.639

Tabla 6. Áreas de atenuación de las distintas orientaciones con un rango de 15° de variación: Red cuadrada, Red con 2 resonadores a 90°, Red con 2 resonadores a 180°, Red con 2 resonadores a 105°, Red con 2 resonadores a 120°, Red con 2 resonadores a 135°, Red con 2 resonadores a 150° y Red con 2 resonadores a 165°.

Se observan tres resultados de orientación con mayor AA: 90°, 105° y 135°. Sin embargo, las diferencias entre ellos son poco relevantes, variaciones cercanas al 2%. Por ello, no se va a considerar una orientación diferente a 90° a lo largo del resto de la memoria.

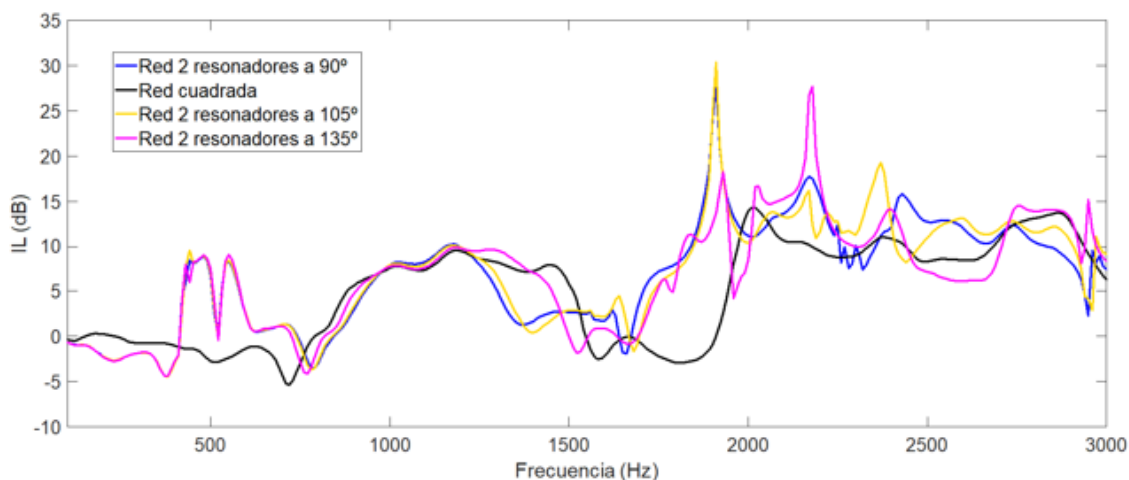
Por otro lado, se observa que en las orientaciones en las que el resultado del AA obtiene resultados menores, es debido a que el BG principal es afectado, como se aprecia en la **Figura 30**.



*Figura 30. Comparativa de las redes: cuadrada y con dos resonadores a 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, 165° y 180°.*

Se puede observar cómo una simple modificación de 15° en la disposición de uno de los resonadores puede modificar notoriamente el espectro obtenido en la zona de sombra de la barrera.

Dicho esto, si se partiese de la necesidad de atenuar X frecuencia, se podría establecer una configuración inicial e ir variando la posición de uno de los resonadores para observar el efecto de esta variación en su espectro y conseguir la mayor atenuación posible en la frecuencia objetivo. En este caso, al tratarse de dos frecuencias, 500 y 1700 Hz, es algo más complicado. Si se observan los espectros de las redes con 2 resonadores a 90°, 105° y 135° en la **Figura 31**, la atenuación en 500 Hz es prácticamente la misma en todas las redes. Pero para las frecuencias más cercanas a 1700 Hz, conforme la orientación del segundo resonador se acerca a los 180°, se observa una peor atenuación y un espectro menos estable.



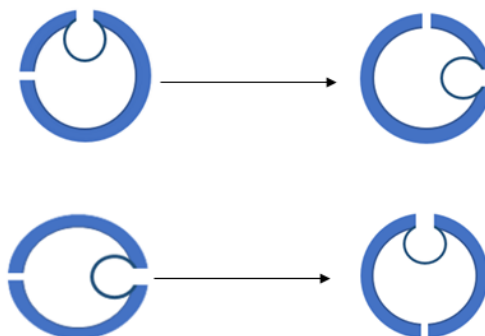
*Figura 31. Comparativa de las redes: cuadrada y con dos resonadores a 90°, 105° y 135°.*

Tras comprobar que los mejores resultados se han obtenido en las distribuciones de 90°, 105° y 135°, se toma la distribución de 90° como referencia, ya que es el espectro más estable en toda la banda de frecuencias y para no complicar el estudio.



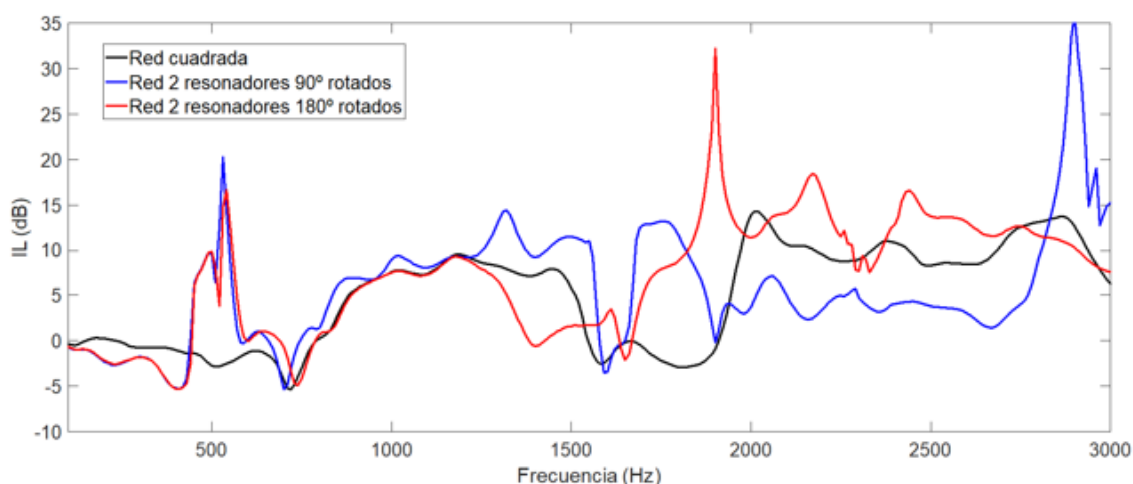
### 5.3.3 Variación de la orientación en resonadores de DC (rotación)

A continuación, se procede al rotado de los diseños de los dispersores con 2 resonadores dispuestos a  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , como vemos en la **Figura 32**, para comprobar y estudiar su efecto en las propiedades acústicas de la barrera.



**Figura 32.** Resonadores dispuestos a a)  $90^\circ$  rotados y a b)  $180^\circ$  rotados.

Se toman los resonadores dispuestos a  $90^\circ$  y  $180^\circ$  rotados y se comparan con la red cuadrada para comprobar el efecto de la rotación en el espectro. Como se muestra en la **Figura 33**, se observan unos espectros muy similares a los obtenidos previamente sin haberle introducido una rotación, como vemos en la **Figura 28**, pero con la peculiaridad que son similares en las posiciones cruzadas, es decir, el espectro conseguido con los resonadores a  $90^\circ$  rotados resulta parecido al de los resonadores a  $180^\circ$  y viceversa.



**Figura 33.** Espectro red con 2 resonadores a  $90^\circ$  vs red con 2 resonadores a  $90^\circ$  rotado.

Pese a estas similitudes, se consigue una ligera mejora sobre el espectro de la red con mayor atenuación tomada para el estudio anteriormente, la red con los 2 resonadores dispuestos a  $90^\circ$ . Esta mejora en el espectro conlleva también un aumento del AA, como se refleja en la **Tabla 7**.

	AA (dB*Hz) * 10 <sup>4</sup>
Red cuadrada	1.615
Red 2 resonadores 90°	2.037
Red 2 resonadores 180°	1.506
Red 2 resonadores 90° rotados	1.805
Red 2 resonadores 180° rotados	2.143

Tabla 7. Áreas de atenuación de las distintas distribuciones estudiadas: Red cuadrada, Red con 2 resonadores a 90°, Red con 2 resonadores a 180°, Red con 2 resonadores a 90° rotados y Red con 2 resonadores a 180° rotados.

### 5.3.4 Combinación resonadores DC rotados

En este apartado se va a estudiar la combinación de las configuraciones de redes que mejores resultados han obtenido: con 2 resonadores a 90° y 2 resonadores a 180° rotados, respectivamente. En la **Figura 37** se presentan 2 combinaciones de resonadores: a 90° y 180° alternos y 2 resonadores a 180° rotados y a continuación otros 2 resonadores a 90° rotados. En total, se van a estudiar 6 combinaciones diferentes; todas las combinaciones posibles formadas por los 2 resonadores (90° rotado y 180° rotado) en una fila conformada por 4 dispersores. A partir de ahora, se denominan los resonadores a 90° rotados como “L” y los resonadores a 180° como “I” para simplificar su visualización en gráficas y tablas, por lo que los dos ejemplos de redes que se muestran a continuación quedarían como: Red LILI y Red IILL.



Figura 37. Ejemplos de combinaciones posibles de 90° rotados y 180° rotados con la nueva nomenclatura: a) Red LILI (se superpone la nueva nomenclatura “IL” sobre los dispersores para aclarar el concepto) y b) Red IILL.

El objetivo que se persigue mediante estas combinaciones es aprovechar las propiedades atenuantes de los resonadores dispuestos en distintas posiciones de cada dispersor. En principio, se pretende disminuir el efecto de la caída en las IL justo después de la frecuencia de Bragg y antes del resonador de alta frecuencia como se aprecia en las **Figuras 33**. Es decir, intentar dar una mayor continuidad a los valores de IL.

Una vez simulado utilizando los diseños combinatorios, se procede al estudio de sus espectros. En la **Figura 38** se observa que todos los espectros resultantes prácticamente no difieren hasta aproximadamente los 1200 Hz, que es la  $f_{Bragg}$ , y es a partir de esta frecuencia donde podemos ver los cambios más significativos y de mayor interés.

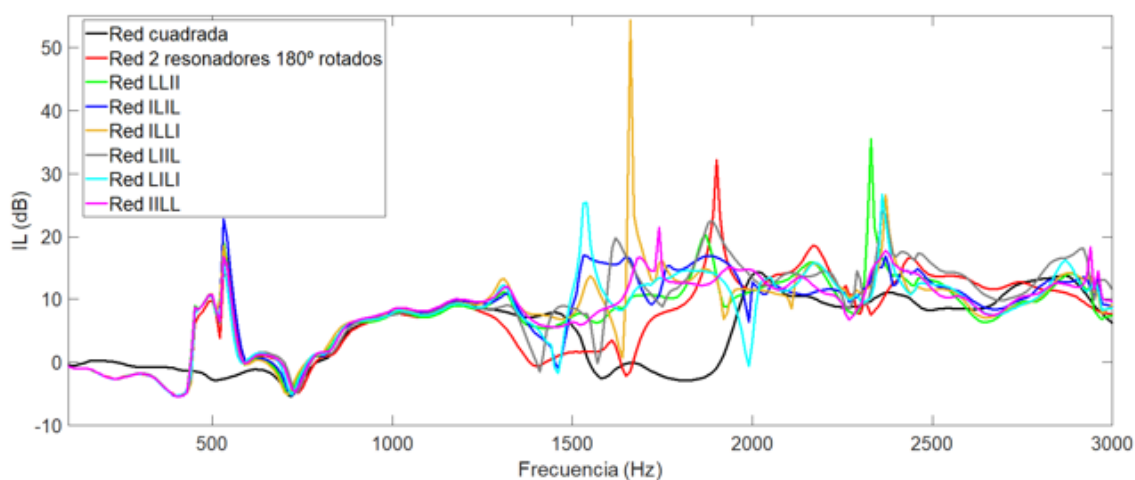


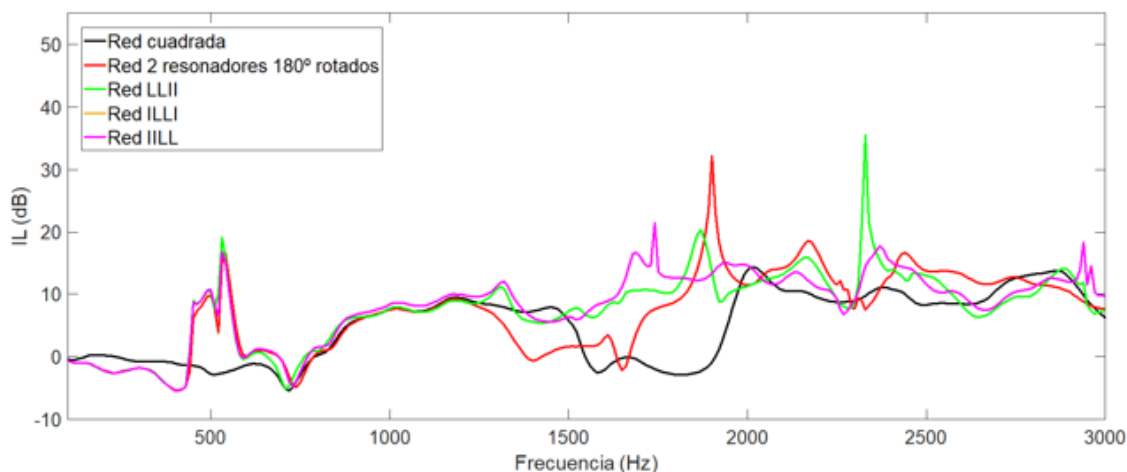
Figura 38. Espectro de todas las combinaciones de redes con resonadores rotados posibles: Red cuadrada, Red con 2 resonadores a 180° rotados, Red LLII, Red ILIL, Red ILLI, Red LIII, Red LILI y Red ILLL.

Como se puede observar en la **Tabla 8**, la mayor atenuación obtenida la proporciona la red LIII.

	AA (dB*Hz) * 10 <sup>4</sup>
Red LLII	2.335
Red ILLL	2.445
Red ILIL	2.521
Red LILI	2.415
Red LIII	2.670
Red ILLI	2.501
Red 2 res. 180 rot.	2.143

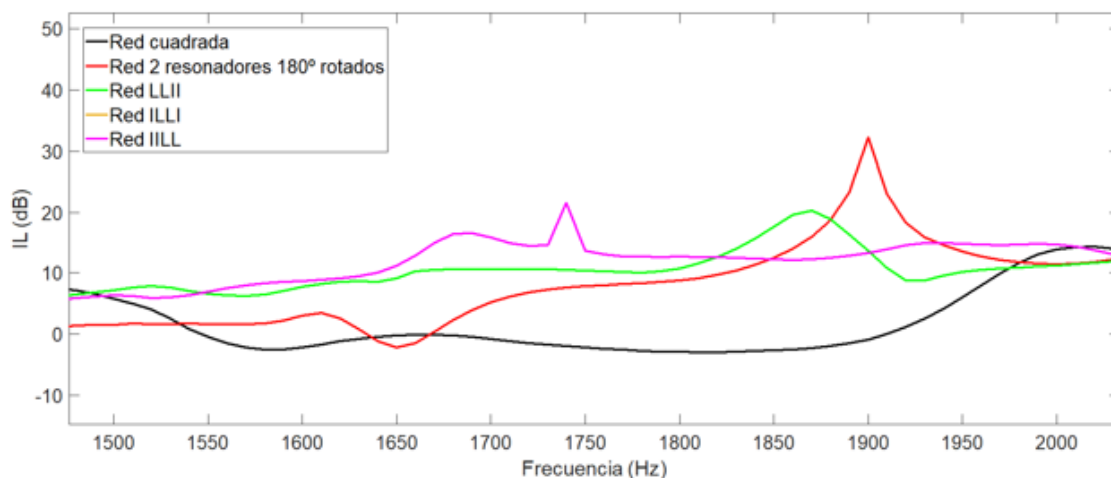
Tabla 8. Áreas de atenuación de todas las combinaciones de redes de resonadores a 90° y 180° y de la red de resonadores a 180° rotados.

Sin embargo, la red ILLL presenta una atenuación más constante y regular a lo largo de todo el espectro, como se ve en la **Figura 39**, manteniendo un valor de AA bastante alto.



**Figura 39.** Comparativa de los espectros con mayor atenuación y más regulares extraída de la Figura 38: Red cuadrada, Red con 2 resonadores a  $180^\circ$  rotados, Red LLII, Red ILLI y Red ILLL.

Utilizando la configuración de la red ILLL se consigue cubrir la falta de atenuación de la barrera entre el primer y segundo BG de Bragg de una manera más efectiva que con los anteriores diseños. En la **Figura 40** se puede observar cómo en la zona donde menos atenuación había, entre 1500 y 2000 Hz, se obtiene un resultado bastante bueno aumentando esta atenuación.



**Figura 40.** Ampliación rango [1500-2000]Hz de la Figura 39.

#### 5.4 Reducción de elementos en la red de dispersores

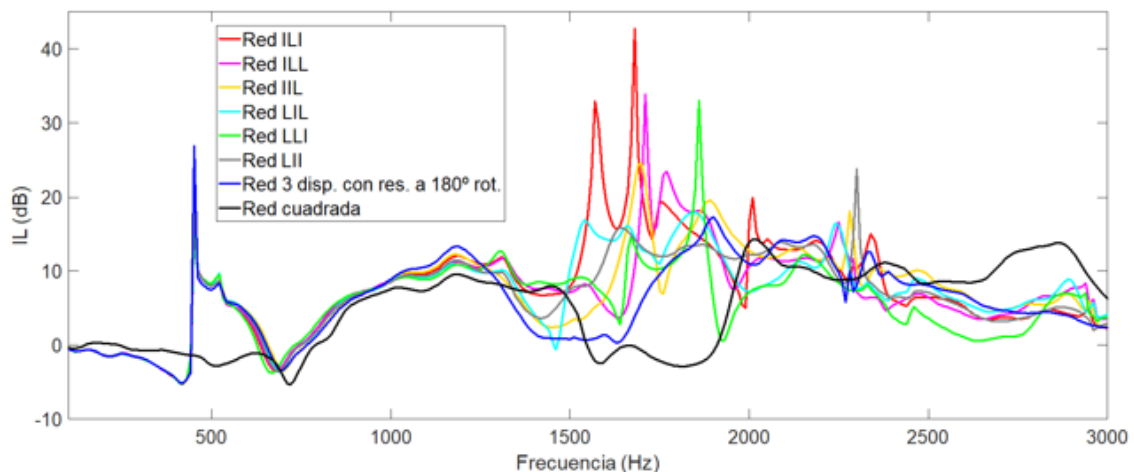
En general, los CS de 4 dispersores ocupan demasiado espesor. A nivel de aplicación, lo apropiado es ir reduciendo al máximo el espesor de la barrera, es decir, ocupar el menor espacio manteniendo una atenuación aceptable. Por ese motivo y para concluir este trabajo, se intenta ver si el estudio realizado de las combinaciones de configuraciones de dispersores con resonadores a  $90^\circ$  y  $180^\circ$  rotados mantiene sus propiedades al eliminar un dispersor de cada una de sus filas. Además, se añade la configuración de la red cuadrada para tenerla de referencia.

En la **Figura 41** se pueden observar 2 de las configuraciones posibles, de un total de 6, en las que se combinarán configuraciones rotadas de  $90^\circ$  y  $180^\circ$ . Se mantiene la nomenclatura anteriormente descrita como “IL”.



**Figura 41.** Ejemplo de una fila de 3 dispersores de las redes que combinan dispersores a  $90^\circ$  rotados y  $180^\circ$  rotados: a) Red LIL y b) Red ILL.

En este caso, la mayoría de los cambios con respecto a las configuraciones anteriores se presentan en la zona media de la banda de frecuencias, ya que el espectro no varía a frecuencias bajas, como se observa en la **Figura 42**.



**Figura 42.** Espectro de redes de 3 columnas de dispersores: Red ILI, Red ILL, Red IIL, Red LIL, Red LLI, Red LII, Red 3 resonadores a  $180^\circ$  rotados y Red cuadrada.

Una vez se han calculado las AA se puede observar en la **Tabla 9** que la red que proporciona mayor atenuación es la red ILI.

	AA (dB*Hz) * 10 <sup>4</sup>
Red cuadrada	1.615
Red 3x180 rot.	1.842
Red IIL	2.161
Red ILI	2.332
Red LII	2.029
Red ILL	2.119
Red LIL	2.117
Red LLI	1.747

Tabla 9. Áreas de atenuación de redes de 3 columnas: Red cuadrada, Red 3 resonadores a 180°, Red IIL, Red ILI, Red LII, Red ILL, Red LIL y Red LLI.

Si se separan y comparan los espectros de las redes que mejores AA han obtenido, se puede ver que la red ILI presenta tanto la mayor AA como el espectro más estable en toda la banda de frecuencias **Figura 43**.

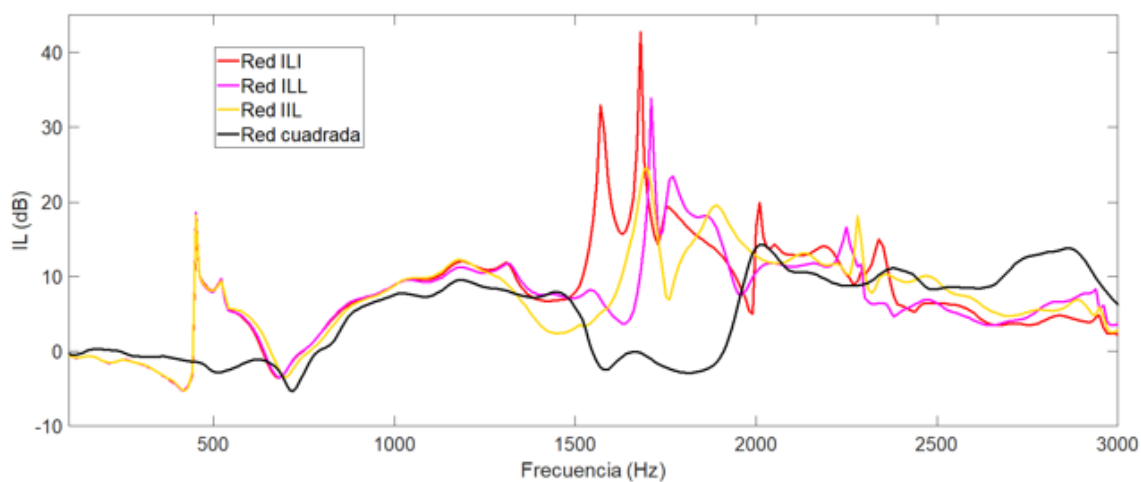


Figura 43. Comparativa mejores espectros obtenidos de las redes de 3 columnas: Red 3 rígidos, Red 90-180-90, Red 180-90-180 y Red 90-180-180.

En la **Figura 44** se observa la mejora más relevante en la zona que separa el primer y el segundo BG.

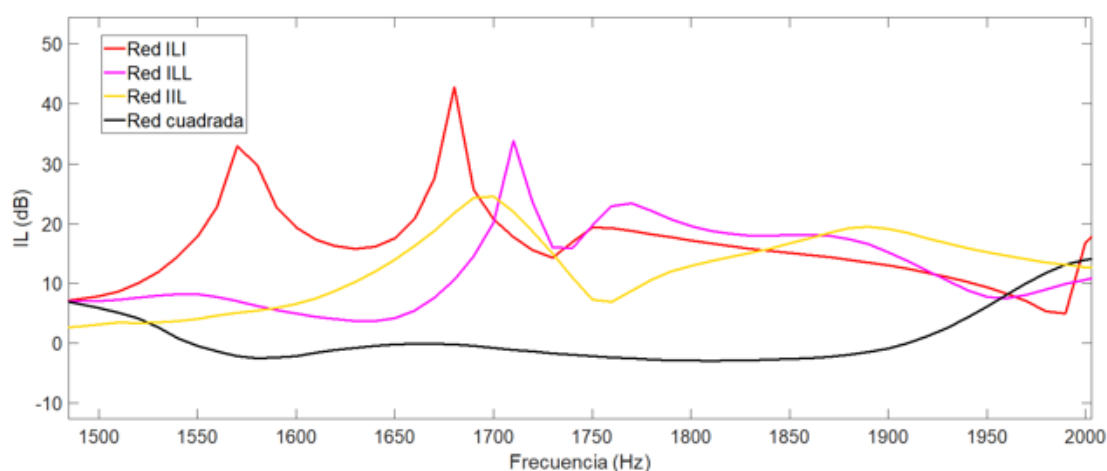


Figura 44. Ampliación rango [1500-2000]Hz de la Figura 43.

### 5.4.1 Comparativa general

Una vez reducido en 1 el número de elementos de cada fila de la barrera, y, a la vista de los buenos resultados, se comparan, a continuación, las combinaciones que mejores propiedades acústicas han obtenido a lo largo de este trabajo.

Se toman las AA de las redes con los mejores espectros obtenidos utilizando las diferentes configuraciones y se comparan entre ellas para saber cuál tiene mejores propiedades acústicas, como se muestra en la **Tabla 10**.

	AA (dB*Hz) * 10 <sup>4</sup>
Red ILL	2.445
Red cuadrada	1.615
Red ILI	2.332
Red 180 rotados	2.143

Tabla 10. Áreas de atenuación de las mejores redes: Red ILL, Red cuadrada, Red ILI y Red con 2 resonadores a 180° rotados.

En la **Figura 45** se observa la mejora del espectro entre el primer y el segundo BG de Bragg, sobre todo en la red que tiene una columna de dispersores menos.

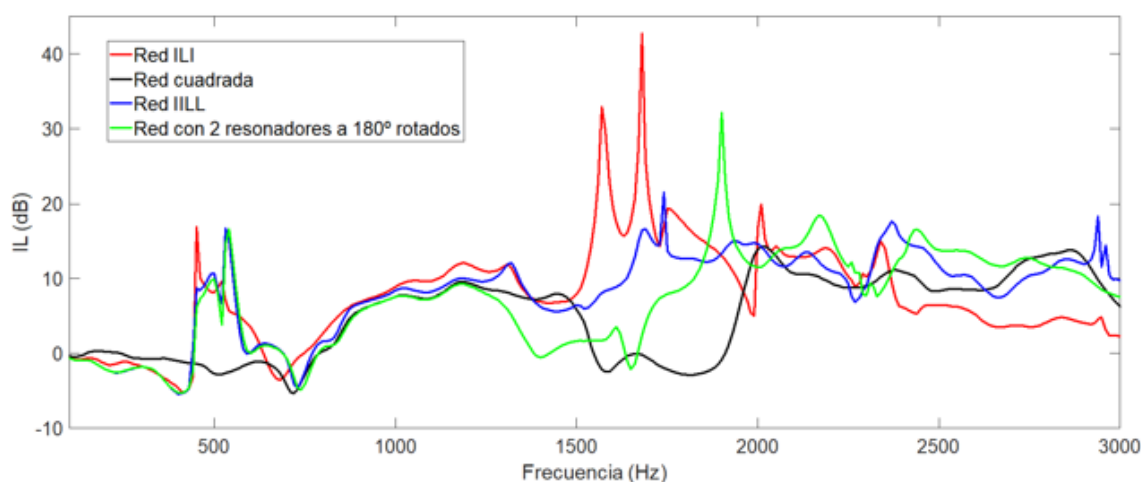


Figura 45. Comparativa general de redes con mejores resultados: Red ILI, Red cuadrada, Red IILL y Red con 2 resonadores a 180° rotados.

En cuanto a la atenuación, si se evaluara el recorte de una columna en la red con una ratio riesgo/beneficio, este saldría positivo para el beneficio, ya que la atenuación no disminuye en exceso, y se estarían simplificando la producción de la barrera reduciendo su espesor, haciéndola así más fácil de instalar. Además, en la **Figura 46** se observa que la red ILI, pese a tener un elemento menos por fila y una atenuación menor que otra red con 4 elementos/fila, suple mejor esa falta de atenuación entre el primer y el segundo BG.

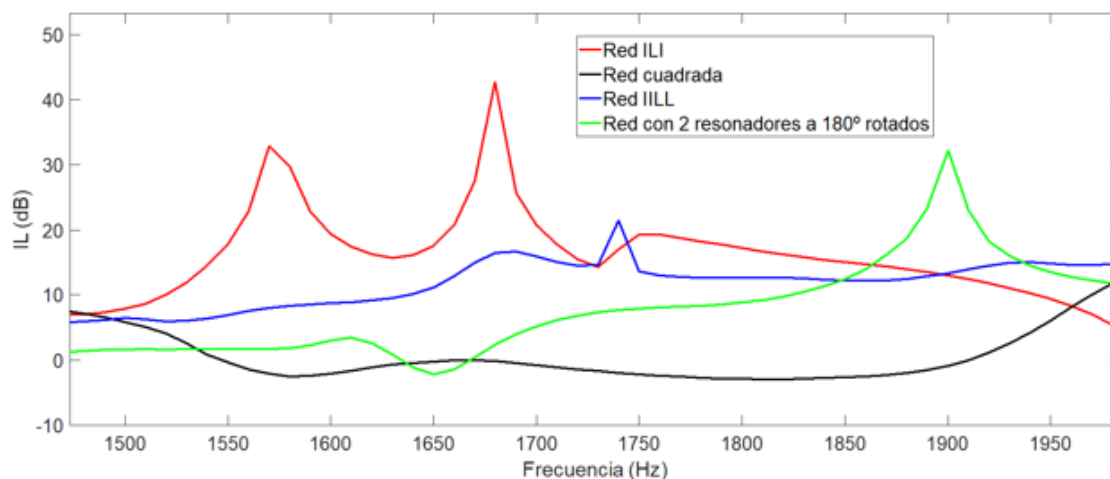


Figura 46. Ampliación rango [1500-2000] Hz de la Figura 45.

## 5.5 Conclusiones, relación con ODS y trabajo futuro

En este TFG se han desarrollado conceptos estudiados en las asignaturas relacionadas con la Acústica de la rama de Imagen y Sonido impartidas en la titulación del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación.

Primeramente, se ha realizado una introducción teórica pasando por las primeras barreras acústicas hasta las desarrolladas en este TFG, las barreras acústicas basadas en cristales de



segunda generación. Partiendo de estas últimas, mediante el uso del software de simulación COMSOL Multyphysics, se realizaron estudios para averiguar la mejor configuración y diseño de dispersores rígidos que implementaban resonadores de Helmholtz, en los que se hizo uso de modelos 2D de campo libre.

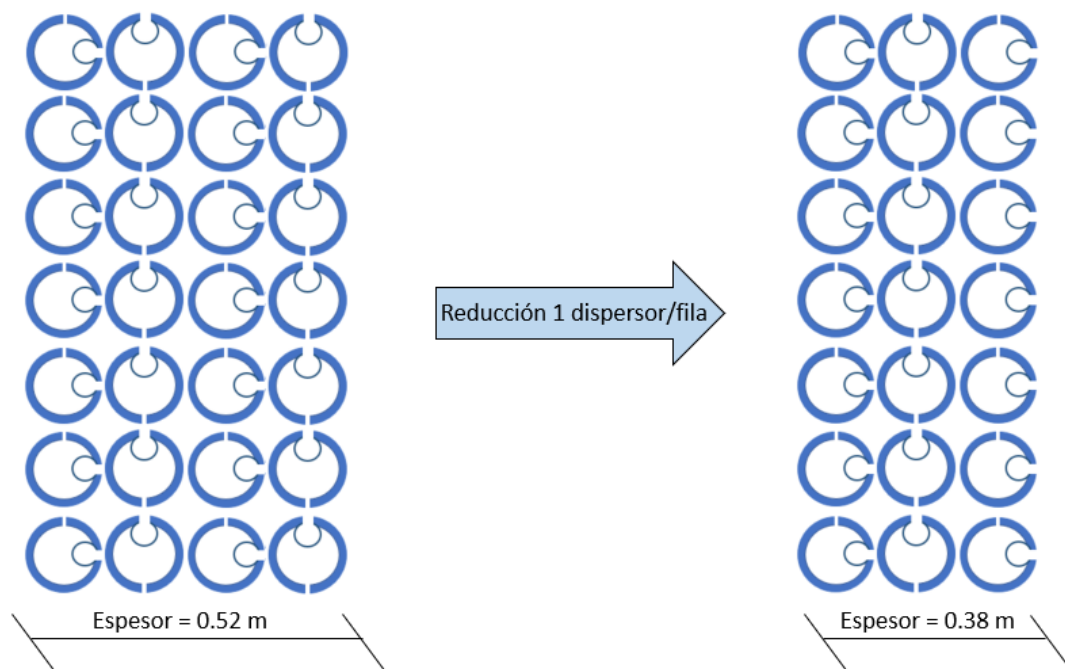
Durante este trabajo se han barajado distintos tipos de diseño y combinaciones de resonadores, intentando que cada nueva implementación dotara a las barreras de unas propiedades acústicas mejores, basándose en el estudio de los espectros en frecuencia generados por estas y, a su vez, utilizando un script de Matlab para poder realizar una comparativa objetiva de las AA generadas por dichos espectros de frecuencia.

Se establecieron dos configuraciones de dispersores con resonadores, dispuestos a 90° y 180°, los cuales obtuvieron buenos resultados desde un primer momento, y se fueron haciendo modificaciones en las redes que los incorporaban. Estas modificaciones abarcaron desde combinaciones de ambos diseños y rediseños con distinta orientación hasta rotaciones de los diseños y combinaciones con los anteriores.

Por último, se procedió a eliminar una columna entera de las redes propuesta a estudio para observar su efecto, ya que esta propuesta simplificaría la producción e instalación de la barrera. Al reducir en uno los elementos de cada fila, la **ec. 1.16** se quedó se la siguiente manera:

$$\text{Espesor} = 2a + 2R \quad (1.17)$$

manteniendo  $a$  y  $R$  los mismos valores que se utilizaron para la **ec. 1.16**. Por lo que el espesor anterior pasó de ser de 0.52 m a 0.38 m, como vemos en la **Figura 47**.



**Figura 47.** Ejemplo de reducción de espesor convirtiendo la Red LILI en la Red LIL.

Se puede concluir que, una vez realizadas y comprobadas todas las configuraciones llevadas a estudio en este trabajo, la introducción de resonadores dispuestos en una situación y orientación determinada y la eliminación de una columna entera de dispersores de un CS, no se traduce en

una diferencia excesivamente grande en los resultados de IL obtenidos con barreras de 3 y 4 columnas de dispersores, pero sí en una mejora sustancial del espectro y, lo más importante, en cubrir la falta de atenuación de la barrera acústica entre el primer y segundo BG de Bragg, además de reducir el espesor de esta. Por lo cual, el hecho de reducir en 1 el número de columnas totales de la red, abarataría los costes de fabricación de las barreras acústicas manteniendo una atenuación bastante alta, siendo así su diseño más competitivo en el mercado, y la utilización de las distintas combinaciones de resonadores conseguiría corregir esa falta de atenuación generada entre las bandas prohibidas de propagación consiguiendo un espectro mucho más regular en toda la banda, que era el objetivo de este TFG.

Por otro lado, en cuanto a los ODS, este trabajo entraría en el marco de dos de estos objetivos de la agenda 2030.

Cumple metas de los objetivos 9 y 11. Se moderniza la infraestructura utilizando CS fabricados con materiales que no impacten en exceso con el entorno donde se instalen, además de cuidar también el impacto visual.



*Figura 48. Objetivos 9 y 11 de la agenda 2030.*

En cuanto al trabajo futuro de este proyecto, hay varias vertientes abiertas y propuestas de estudios a realizar:

- Optimizar las barreras diseñadas.
- Intentar reducir en filas o columnas la barrera acústica para seguir simplificando las barreras.
- Realizar y estudiar diseños 3D de situación.

## 6. Bibliografía

- [1] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental Noise, Official Journal of the European Communities (18.7.2002)
- [2] Organización Mundial de la Salud, OMS
- [3] Bravo Plana-Sala, J. M., “*Propagación del sonido en campo abierto II. Barreras acústicas*”, Apuntes de Acústica Ambiental, 2016
- [4] Castiñeira-Ibáñez, S.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez, J.V.; García-Raffi, L.M., “*Periodic systems as road traffic noise reducing devices: prototype and standardization*”, Environmental Engineering and Management Journal, 14 (12) 2759-2769, Rumanía, 2015
- [5] Castiñeira-Ibáñez, S.; Rubio, C.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez, J.V.; García-Raffi, L.M., “*Design, manufacture and characterization of an acoustic barrier made of multi-phenomena cylindrical scatterers arranged in a fractal-based geometry*”, Archives of Acoustics 37(4), 455-462, 2012
- [6] Castiñeira-Ibáñez, S.; Rubio, C.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez, J.V., “*Acoustic wave diffraction at the upper edge of a two-dimensional periodic array of finite rigid cylinders. A comprehensive design model of periodicity-based devices*”, EPL 101, 64002, 2013
- [7] Bravo, José María; Buchón Moragues, Fernando Francisco; Redondo, Javier; Ferri García, Marcelino; Sánchez-Pérez, Juan Vicente, “*Integrated Photogrammetric-Acoustic Technique for Qualitative Analysis of the Performance of Acoustic Screens in Sandy Soils*” Sensors, 22 (19), 1-17. 10.3390/s19224881, 2019
- [8] Peiró-Torres, María del Pilar; Castiñeira-Ibáñez, Sergio; Redondo, Javier; Sánchez-Pérez, Juan Vicente, “*Interferences in Locally Resonant Sonic Metamaterials Formed from Helmholtz Resonators*”, Applied Physics Letters, 17 (114), 1-4. 10.1063/1.5092375, 2019
- [9] Martínez-Sala R.; Sancho J.; Sánchez-Pérez J. V.; Llinares J.; Meseguer F., “*Nature*”, London, 387, 241, 1995
- [10] Sánchez-Pérez, J.V., Rubio, C., Martínez-Sala, R., Sánchez-Grandia, R., Gómez, V., “*Applied Physics Letters*”, 81, 5240-5242, 2002
- [11] Economou, E. N. and Sigalas, M. M., “*Classical wave propagation in periodic structures: Cermet Vs Network topology*”. Physical review B, vol 48
- [12] Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and Garcia-Raffi L. M., “*J. Appl. Phys.*”, 110, 014904, 2011
- [13] Rubio, C.; Caballero, D.; Sánchez-Pérez, J.V.; Martínez-Sala, R.; Sánchez-Dehesa, J.; Meseguer, F.; Cervera, F., “*Journal of Lightwave Technology*”, 17 (11), 2202-2207, 1999
- [14] Kittel, C., “*Introduction to Solid State Physics*”. 8ª Ed., 2004
- [15] Romero-García, V.; Krynkin A.; García-Raffi, L. M.; Umnova, O.; Sánchez-Pérez, J. V., “*Journal of Sound and Vibration*”, 332, 184-198, 2013
- [16] Kinsler L.E., Frey A. R., Coppens A. B., and Sanders J.V., “*Fundamentals of acoustics*”, 3rd Edn. Ed. Wiley, Nueva York, 1982
- [17] Rossell Turull, I.; Soler Rocasalbas, S.; Vila Deutschbein, C., “*Resonadores de Helmholtz de boca rectangular y cuello de longitud pequeña*”, Tecnicacústica Terrassa, 2005



- [18] Kinsler, L.E.; Frey, A.R.; Coppens, A.B.; Sanders, J.V., “*Fundamentals of Acoustics*”, 3<sup>a</sup> Ed., Ed. Wiley, Nueva York, 1982
- [19] Ochoa, L., “*Dinámica Clásica Vol. I*”, Qualucrom, 1994
- [20] Alonso, M.; Finn, E.J., “*University Physics Mechanics*”, Addison-Wesley Publishing Company, EEUU, 1967
- [21] Alexander, C.K.; Sadiku, M.N.O, “*Fundamentos de circuitos eléctricos*”, 5<sup>a</sup> Ed., MacGraw-Hill Education, 2013
- [22] Alster, M., “Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators”, *J. Sound Vib.* 24, 63–85, 1972
- [23] Alton Everest, F.; Pohlmann, K.C.; “*Master Handbook of Acoustics*”, 5<sup>th</sup> Ed., 2009
- [24] Castiñeira-Ibáñez, S.; Romero-García, V.; Rubio C.; García-Raffi, L.M.; Sánchez-Pérez, J.V., “*Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación*”, Tecniacústica Cáceres, 2011
- [25] COMSOL Multiphysics Reference Manual. COMSOL v.5.5, noviembre, 2019
- [26] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, “*El Método de los Elementos Finitos*”, MacGraw-Hill Barcelona, CIMNE 1994
- [27] Ramírez Solana, D., “*Utilización del método de los elementos finitos para el diseño teórico de una pantalla acústica basada en cristales de sonido*”, TFG, Dpto. acústica, Universidad Politécnica de Valencia, 2019



## 7. Anexos

### 7.1 Acrónimos utilizados

- **2D**: bidimensional.
- **3D**: tridimensional.
- **AA**: área de atenuación.
- **BG/BGs**: band gap/band gaps.
- **CS**: cristales de sonido.
- **DC**: Doble cámara
- **Ec.**: ecuación.
- $f_{Bragg}$ : frecuencia de Bragg.
- **ff**: factor de llenado.
- **IL**: pérdidas por inserción.
- **MEF**: método de elementos finitos
- **ODS**: Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- **OMS**: Organización Mundial de la Salud.
- **TFG**: Trabajo Final de Grado.



## 7.2 Script de MATLAB

Se toma de referencia el script realizado por David Ramírez Solana en su TFG [27].

```
clear all
files = [];
spectrum = {'espectro1.txt','espectro2.txt','espectro3.txt'};
for j = 1:length(spectrum)
files = [files load(spectrum{j})]; %Separo columnas de archivos de espectros:
F = files(:,2*j-1); %Frecuencias; metemos las frecuencias en un vector.
V = files(:,2*j); %Valores; metemos los valores de cada frecuencia en la función del espectro en
otro vector.
%Inicializamos variables:
n = length(V); %Longitud de V para recorrerlo posteriormente.
P = zeros(1,n); %Creamos un vector de 0's para ir añadiendo valores.
for i = 1:n
%Si valor >0, se suma al vector a representar y calcular.
if F(i) >= 0
P(i) = V(i);
%Si no, se iguala a cero.
else
P(i) = 0;
end
end
AREA(j) = trapz(F.',P); %Calculamos AREA ATENUACION (AA) para cada caso y guardamos
valores del AA de cada espectro en un vector.
end
disp('EL ÁREA DE ATENUACIÓN ES:'); %Mostramos resultados del vector, valor numérico
de AA:
AREA
```