

# UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS PARA EL DISEÑO TEÓRICO DE UNA PANTALLA ACÚSTICA BASADA EN CRISTALES DE SONIDO

**David Ramírez Solana**

**Tutor: Sergio Castiñeira-Ibáñez**

**Cotutor: Juan Vicente Sánchez-Pérez**

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2018-19

Valencia, 30 de junio de 2019



## Resumen

Las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido constituyen una de las apuestas tecnológicas más prometedoras de los últimos años en el campo de la acústica ambiental. Los cristales de sonidos se pueden definir como nuevos materiales formados por redes de dispersores acústicos embebidos en aire. Para el diseño de estas pantallas se emplean potentes modelos de simulación que aportan resultados fiables sin la necesidad de costosas pruebas experimentales. El objeto del presente Trabajo de Final de Grado (TFG) consiste en aplicar y modificar los modelos numéricos bidimensionales basados en el método de los elementos finitos basándose en la bibliografía existente, utilizándolos para hacer diseños teóricos de pantallas que tengan un espesor mínimo y similares prestaciones acústicas a las pantallas tradicionales. Para ello se utilizará un cristal de sonido formado por tres filas de dispersores acústicos de forma cilíndrica, de forma que se vayan variando los materiales que lo forman, utilizando materiales rígidos y absorbentes acústicos. Además, se introducirán en los dispersores resonadores de Helmholtz como un nuevo mecanismo de control de ruido y se estudiará el factor de corrección de estos. Se analizará la cantidad de material absorbente mínimo a utilizar y por último se propondrán nuevos diseños utilizando todas estas variables.

## Resum

Les pantalles acústiques basades en cristalls de so constituïxen una de les apostes tecnològiques més prometedores dels últims anys en el camp de l'acústica ambiental. Els cristalls de so es poden definir com nous materials formats per xarxes de dispersius acústics embeguts en aire. Per al disseny d'estes pantalles s'empren potents models de simulació que aporten resultats fiables sense la necessitat de costoses proves experimentals. L'objecte del present TFG consisteix a aplicar i modificar els models numèrics bidimensionals basats en el mètode dels elements finits basant-se en la bibliografia existent, utilitzant-los per a fer dissenys teòrics de pantalles que tinguen una grossària mínima i similars prestacions acústiques que les pantalles tradicionals. Per a això utilitzarem un cristall de so format per tres files de dispersors acústics de forma cilíndrica, de manera que es vagen variant els materials que ho formen, utilitzant materials rígids i absorbents acústics. A més, s'introduiran en els dispersors ressonadors de Helmholtz com un nou mecanisme de control de soroll i s'estudiarà el factor de correcció d'aquestos. S'analitzarà la quantitat de material absorbent mínim i finalment es proposaran nous dissenys utilitzant totes aquestes variables.

## Abstract

Acoustic screens based on sonic crystals constitute one of the most promising technological bets of recent years in the field of environmental acoustics. Sonic crystals are defined as new materials formed by arrays of acoustic scatterers embedded in air. The design of these screens is made using powerful simulation models that provide reliable results without the need of expensive experimental testing. The purpose of this final project is to apply and modify the two-dimensional numerical models based on the finite elements method based on the existing bibliography, using them to make theoretical designs of barriers that provide a minimum thickness and similar acoustic performance than traditional barriers. For this, we will use a sonic crystal formed by three rows of acoustic scatterers with cylindrical shape, so that the materials that form it will vary, using rigid materials and acoustic absorbers. In addition, we will use Helmholtz resonators in the design of scatterers, providing a new control mechanism in the design of the barriers, studying first their correction factor. The amount of minimum absorbent material will be analyzed and finally new designs will be proposed using all these variables.



## Índice

<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Pantallas Acústicas .....</b>	<b>5</b>
1.1.1 Conceptos básicos .....	5
1.1.2 Experimento de Maekawa .....	6
1.1.3 Atenuación por efecto de la pantalla. Insertion Loss (IL).....	7
<b>1.2 Cristales de sonido.....</b>	<b>8</b>
1.2.1 Conceptos teóricos .....	8
1.2.1.1 Características geométricas .....	8
1.2.1.2 Características de propagación en redes .....	10
1.2.1.3 Ley de Bragg .....	10
1.2.1.4 Bandas prohibidas de propagación (BG).....	11
1.2.2 Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación .....	13
1.2.2.1 Resonadores de Helmholtz .....	13
1.2.2.2 Materiales absorbentes – Lana de Roca.....	15
<b>Capítulo 2. OBJETIVOS DEL TFG.....</b>	<b>18</b>
<b>Capítulo 3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Realización del proyecto.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Distribución de tareas .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Diagrama temporal .....</b>	<b>19</b>
<b>Capítulo 4. DESARROLLO Y RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 Parámetros generales de diseño .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2 Metodología de simulación.....</b>	<b>20</b>
4.2.1 Modelo 2D de campo libre. ....	21
4.2.2 Modelo 2D de un CS Ideal .....	22
<b>4.3 Variación del número de filas de dispersores (Anchura de pantalla).....</b>	<b>22</b>
<b>4.4 Variación del orden de colocación de resonadores y dispersores rígidos .....</b>	<b>24</b>
4.4.1 Bajas frecuencias .....	24
4.4.2 Altas frecuencias.....	26
4.4.3 Análisis general.....	27
<b>4.5 Variación de la frecuencia de resonancia en red .....</b>	<b>29</b>
<b>4.6 Parametrización del Factor de Corrección.....</b>	<b>31</b>
<b>4.7 Incorporación de material absorbente.....</b>	<b>34</b>
<b>4.8 Modelo finito en cámara anecoica.....</b>	<b>36</b>
<b>4.9 Conclusiones .....</b>	<b>39</b>
<b>Capítulo 5. Agradecimientos .....</b>	<b>40</b>
<b>Capítulo 6. Bibliografía.....</b>	<b>40</b>
<b>Capítulo 7. HOJA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>43</b>
<b>Capítulo 8. ANEXOS.....</b>	<b>44</b>
<b>8.1 Método de los elementos finitos.....</b>	<b>44</b>
<b>8.2 Conceptos teóricos de las simulaciones.....</b>	<b>44</b>
8.2.1 Ecuación de ondas.....	44



8.2.2	Condiciones de contorno .....	45
8.2.3	Condiciones de contorno coincidentes o adaptadas: PML.....	46
8.2.4	Cámara anecoica .....	46
8.2.5	Programa Matlab para calcular el AA .....	47

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Pantallas Acústicas

### 1.1.1 Conceptos básicos

El ruido se define como cualquier sonido de carácter desagradable que puede llegar a provocar serios problemas fisiológicos o psicológicos sobre las personas. Estos problemas afectan a su calidad de vida causando la pérdida de audición temporal a corto plazo y permanente a largo plazo, así como estrés, insomnio o fatiga entre otras consecuencias [1] [2].

Cuando no es posible reducir la emisión de ruido actuando sobre la fuente que lo origina, se suele optar por reducirlo durante su fase de transmisión, siendo las pantallas acústicas el método más utilizado. Una pantalla acústica clásica se define como cualquier obstáculo sólido entre el emisor y el receptor que produce en la zona de este último, un efecto de atenuación del ruido debido a la Ley de masas. La energía que recibe el receptor situado tras la pantalla, es la contribución energética de la onda directa transmitida a su través y de la difractada por el borde de ésta. En la práctica, el nivel de la onda transmitida siempre es muy inferior al de la onda difractada.

La eficacia de una pantalla 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 fuente y 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, cortes o aberturas en toda su superficie. La densidad superficial de la pantalla deberá ser al menos de  $20 \text{ kg/m}^2$ .

En la Figura 1, se muestra un esquema del comportamiento acústico de una pantalla tradicional. Se observa que el ruido emitido viaja desde la fuente al receptor en línea recta. Esta trayectoria se interrumpe por la pantalla cuando se sitúa entre la fuente y el receptor. Una fracción de la energía acústica emitida es o bien reflejada o bien dispersada hacia la fuente. Otra fracción de energía es transmitida a través de la pantalla, difractada por el borde superior o absorbida por el material del que está construida la misma [4].

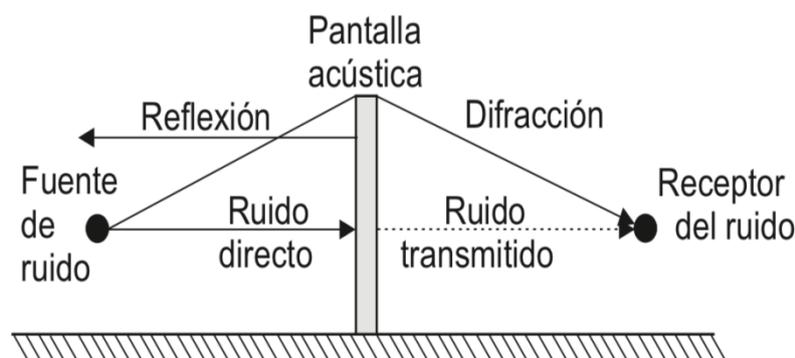


Figura 1 - Esquema del comportamiento acústico de una pantalla acústica tradicional [4].

### 1.1.2 Experimento de Maekawa

En 1965, Maekawa propuso un método de cálculo de la atenuación sonora debido a una pantalla acústica tradicional a través de una teoría aproximada de la difracción óptica bajo condiciones simples. El estudio realizado se basó en datos experimentales de difracción sonora con una pantalla plana semi-infinita en campo libre.

Utilizó un pulso tonal de una duración suficientemente corta para poder distinguir la señal reflejada y retardada, y evitando, por lo tanto, la influencia de otras superficies en los resultados.

En la zona protegida por el efecto de la pantalla, midió los niveles de presión sonora en varios puntos y sus resultados se muestran en una sola curva de atenuación sonora versus el parámetro adimensional Número de Fresnel  $N$  [5].

El Número de Fresnel se define como:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (1.1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda estudiada y  $\delta$  es la diferencia de camino entre la fuente y receptor con y sin la interposición de la pantalla acústica. Que según la Figura 2 sería:

$$\delta = A + B - d \quad (1.2)$$

Este es el método más simple y confiable para el cálculo de la difracción sonora con muy buena aproximación. En función de si  $N > 0$  ó  $N < 0$  la posición del receptor estará en la zona de atenuación producida por la pantalla o fuera de ella.

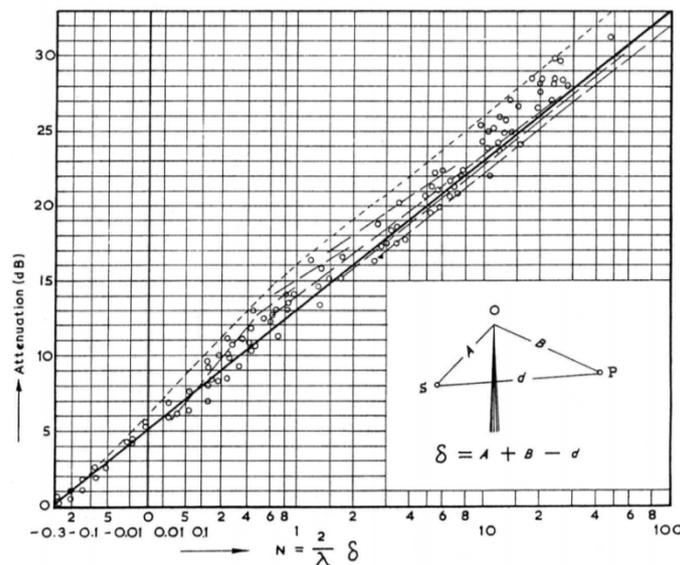


Figura 2 - Ábaco de Maekawa [5]

### 1.1.3 Atenuación por efecto de la pantalla. Insertion Loss (IL)

La zona protegida acústicamente por la pantalla, se denomina **zona de sombra**, y la atenuación que proporciona, se suele caracterizar por las **pérdidas por inserción**, (*Insertion Loss* en inglés, IL) que se puede definir como la disminución del nivel de presión sonora en el punto o zona considerada por la interposición de la pantalla o dispersor acústico, respecto al nivel existente antes de su instalación.

Las pérdidas por inserción de una pantalla acústica vienen dadas por la expresión:

$$IL = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_d}{P_i} \right| \quad (dB) \quad (1.3)$$

donde  $P_d$  es el valor de la presión eficaz que llegaría directamente al receptor en ausencia de la pantalla y  $P_i$  el valor de la presión eficaz que llega al receptor una vez ha intervenido el efecto de la pantalla instalada. Con este parámetro se obtienen espectros en banda fina que representan la variación de IL respecto a la frecuencia, esta última en pasos pequeños.

Según el método de Maekawa explicado en el apartado anterior, se ha calculado la variación de IL en función de la frecuencia estimada en banda fina para una pantalla acústica tradicional, de características geométricas (espesor y altura) similares a la basada en cristales de sonido que se estudia en este trabajo (70-80 cm).

Los resultados que se muestran en la Figura 3 indican el valor máximo de atenuación que se podría obtener para una pantalla tradicional teniendo en cuenta únicamente la difracción por el borde superior como mecanismo de generación de ruido en la zona de sombra. Este límite, en función de la frecuencia, será la referencia con la que comparar la atenuación conseguida con los diseños llevados a cabo en este trabajo.

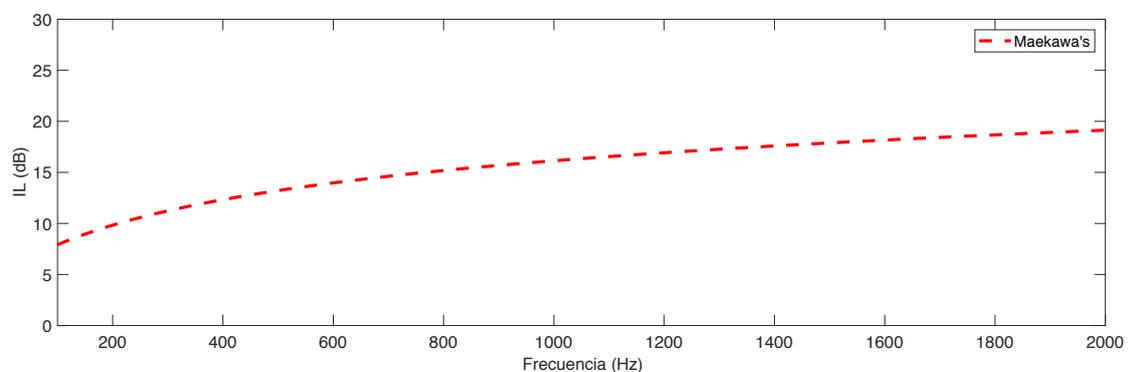


Figura 3 -Estimación del IL según el método de Maekawa para una pantalla tradicional de 70-80 cm de espesor

En el presente trabajo, se analizarán los diferentes diseños de pantallas utilizando dos tipos de representación de datos acústicos [4]:

- Espectros de frecuencia.** Es la representación del IL frente a la frecuencia en banda fina, tal y como se puede observar en la Figura 3.
- Mapas de presión.** Se elaboran para una frecuencia en concreto, y muestran en régimen estacionario como se distribuye la energía acústica en el espacio. Este tipo de representación es crucial en el proceso de diseño para analizar cómo influyen los cambios en la geometría de los dispersores en el flujo de energía acústica en el entorno de la pantalla. Se pueden obtener mapas de presión en Pa o mapas de nivel de presión sonora en dB.

El espectro normalizado de ruido de tráfico (UNE-EN 1793-2:1998), que indica el valor relativo de nivel sonoro desde 100 Hz hasta 5000Hz, mostrando por tanto las siguientes frecuencias en tercios de octava: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2500, 3100, 4000, 5000 Hz

Estas frecuencias son las correspondientes a las  $i$ -ésimas bandas de tercio de octava que se consideran en el espectro normalizado ponderado del nivel de presión sonora en dB.

Este trabajo se centra en el intervalo de frecuencias que va de 100 a 1500Hz, ya que ahí están incluidas 12 de las 18 bandas de frecuencia. Dado que las bajas frecuencias son las más difíciles de atenuar, se hace mayor hincapié en el intervalo que va de 100 a 800 Hz en el análisis espectral.

## 1.2 Cristales de sonido

### 1.2.1 Conceptos teóricos

Las pantallas acústicas y los métodos de atenuación del ruido están ampliamente desarrollados desde hace tiempo; sin embargo, los cristales de sonido (CS) y su aplicación experimental en el campo de la acústica ambiental son mucho más recientes y surgen como principal alternativa a las pantallas acústicas tradicionales [6].

Los CS tienen una estructura propia de una red periódica, presentando elementos distribuidos de forma regular y repetitiva en el espacio denominados dispersores acústicos. En la naturaleza encontramos una gran cantidad de sólidos con esta estructura atómica, los sólidos cristalinos. En función del número de direcciones en las que se presente la repetición de dispersores, los CS pueden ser unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) [7]. A lo largo de este trabajo se consideran únicamente CS bidimensionales.

La distribución periódica de los dispersores de un CS se encuentra inmersa en un medio huésped con propiedades físicas distintas. Esta relación estructural entre el medio dispersor y los dispersores determina la topología de la red, que puede ser:

- **Topología Cermet**, donde los dispersores son inclusiones aisladas, totalmente rodeadas por el material huésped.
- **Topología Network**, donde los dispersores están conectados formando una red continua a través de toda la estructura.

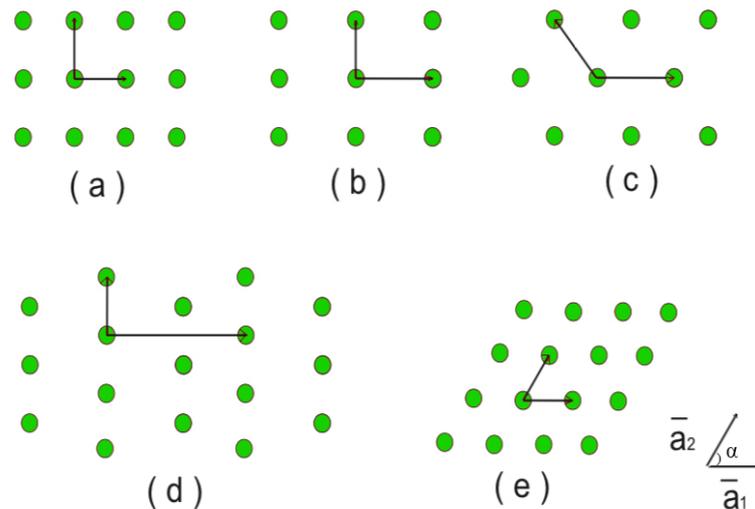
Este trabajo se centra en CS bidimensionales con topología Cermet, ya que los dispersores rígidos estarán embebidos en aire, siendo éste el material huésped a través del cual se transmite el sonido. Se ha demostrado que esta geometría es la que más favorece la atenuación en ondas acústicas, mientras que para ondas electromagnéticas es más conveniente utilizar la topología Network [8].

#### 1.2.1.1 Características geométricas

Los CS son redes periódicas, formadas por un conjunto de unidades elementales denominadas **bases**, y por una red periódica de puntos donde están situadas estas bases denominada **red de Bravais**. Puede definirse la red de Bravais como una disposición infinita de puntos discretos que presentan una estructura y orientación invariable independientemente del punto de orientación [9].

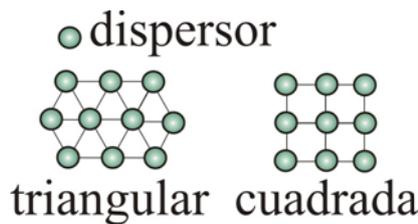
Este trabajo se centra en los cristales bidimensionales, por lo que a continuación se muestran los cinco tipos de red de Bravais más comunes en dos dimensiones, según los ángulos ( $\alpha$ ) y la distancia entre nodos ( $a$ ):

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



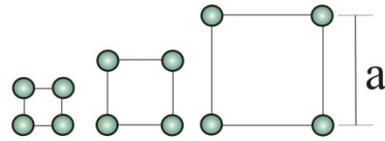
**Figura 4 - Redes de Bravais más comunes en 2D [10]**

El tipo de simetría utilizada en el cristal para la colocación de los elementos dispersores condicionará el modo en que las reflexiones se producen en su interior. En el presente trabajo se utilizará simetría cuadrada, una de las más utilizadas para las pantallas acústicas, junto con la triangular.



**Figura 5 - Distribución espacial de dispersores**

Un concepto importante en los CS es la unidad básica que al repetirse periódicamente conforma la red; ésta se llama **celda unidad** o celda, y se puede caracterizar por el parámetro de red  $a$ . Este parámetro viene dado por el mallado constante del cristal, depende de la simetría utilizada, indica la separación de los dispersores del cristal y su número viene dado por el tipo de red de Bravais utilizado.



a: parámetro de red

Figura 6 – Esquema del parámetro de red para la red cuadrada

### 1.2.1.2 Características de propagación en redes

Cuando una onda incide sobre un CS, es reflejada por los dispersores que lo forman un número infinito de veces. Éste fenómeno se conoce como **dispersión múltiple** y dependerá de la forma de la estructura del cristal y de la longitud de onda incidente.

Si la longitud de onda incidente es comparable al parámetro de red  $a$  en la dirección de propagación de la onda, la dispersión múltiple genera una nueva onda, debido a las interferencias destructivas y constructivas que se producen en el interior del cristal, que viaja en sentido opuesto al de la onda incidente.

### 1.2.1.3 Ley de Bragg

Suponiendo estructuras cristalinas en la que inciden ondas y se reflejan en otras direcciones de los planos paralelos de los dispersores que forman el cristal, la **Ley de Bragg** permite estudiar las direcciones en las que se producen interferencias constructivas.

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  $\lambda$ .

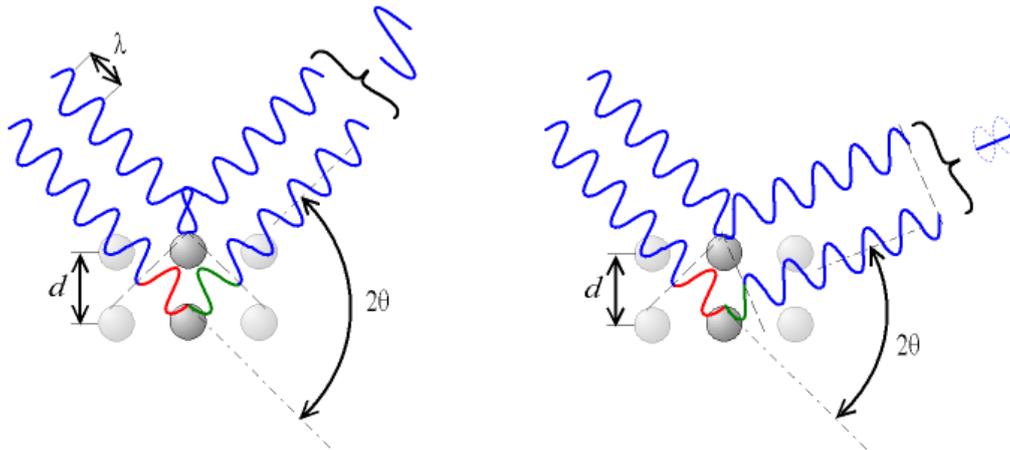


Figura 7 - Interferencia constructiva (izq.) y destructiva (dcha.) según el ángulo de desviación ( $2\theta$ ) [9]

La expresión matemática es la siguiente:

$$2a \sin \theta = n\lambda \quad (1.4)$$

donde  $a$  representa el parámetro de red,  $\theta$  es el ángulo que forman la onda incidente y la onda reflejada y  $\lambda$  la longitud de onda sonora [11].

Podemos concluir pues que únicamente se producirá reflexión de Bragg si la longitud de onda  $\lambda$  es menor al menos dos veces la distancia entre planos paralelos del cristal y para ciertos valores del ángulo  $\theta$ .

Para el presente trabajo donde se diseñarán cristales con simetría cuadrada e incidencia normal de onda, se estudiará siempre el caso  $n=1$ , donde la ecuación anterior queda como:

$$2a = \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow f = \frac{c}{2a} \quad (1.5)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido y  $f$  la frecuencia de la onda sonora. Por lo tanto, para ciertas frecuencias, dadas por la ecuación 1.5, y debido a la periodicidad del cristal, cuando se satisfaga la condición de Bragg se formará una onda estacionaria por las reflexiones sucesivas y las anteriormente mencionadas interferencias destructivas. Cuando esto se cumple la onda no se propagará mas allá del cristal y aparecerán intervalos de frecuencia llamados bandas prohibidas de propagación (*Band gaps* en inglés).

#### 1.2.1.4 Bandas prohibidas de propagación (BG)

El fenómeno de los *Band Gaps* (BG) es uno de los más interesantes de los cristales de sonido y de su aplicación como pantallas acústicas. Con relación al tamaño y posición de los BG en el espectro de frecuencia influyen una serie de características del cristal que se describen a continuación:

- **El parámetro de red  $a$** , previamente descrito, se relaciona directamente con la fórmula de Bragg, ya que a menor distancia entre dispersores la posición de los BGs en el dominio de las frecuencias aumenta, es decir, se encontrará a frecuencias más elevadas y viceversa. También al aumentar el parámetro de red se puede producir una atenuación a bajas frecuencias [12].
- **El factor de llenado (*filling factor*,  $ff$ , en inglés)**; este factor adimensional hace referencia a la fracción de volumen que ocupan los dispersores en una celda unidad con respecto al volumen total de la celda, viene expresado matemáticamente como:

$$ff = \frac{N_{dispersores} V_{dispersors}}{V_{celda\ unidad}} \quad (1.6)$$

Que, para redes cuadradas, siendo  $r$  el radio del dispersor cilíndrico, queda de la siguiente manera:

$$ff = \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (1.7)$$

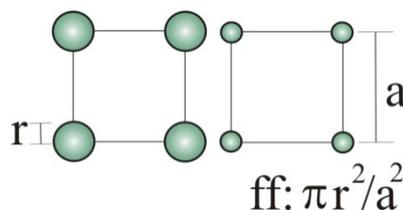
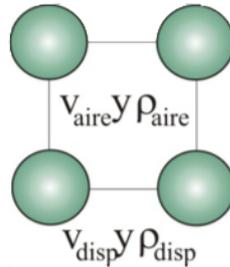


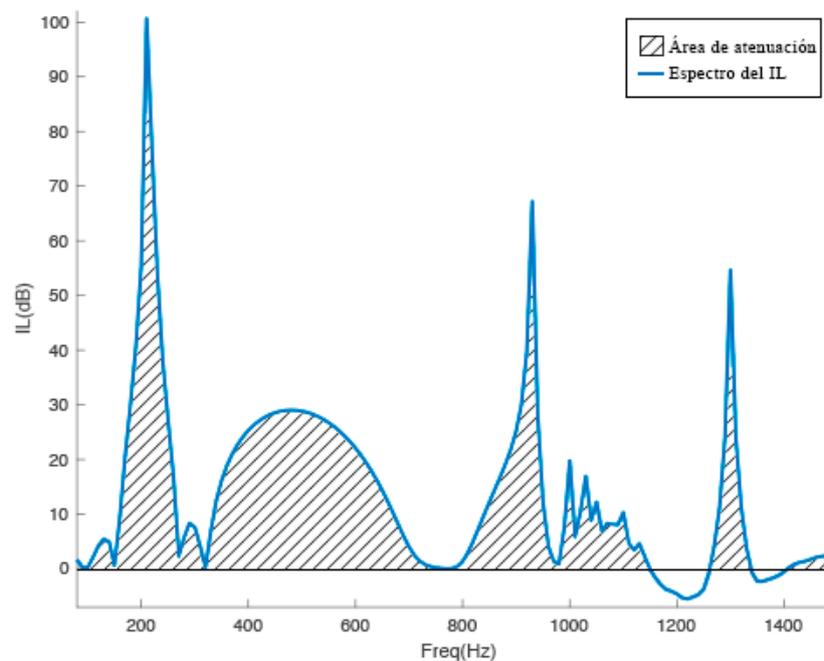
Figura 8 – Esquema de redes con diferentes factores de llenado ( $ff$ )

- El **cociente entre densidades de los elementos del cristal**, que en el caso de los cristales de sonido suele ser elevado, ya que la densidad del sólido y su velocidad de propagación son muy superiores a las del aire y éste primero actúa como cuerpo rígido, transmitiéndose el sonido únicamente por el aire, material de menor densidad. Este cociente determina el tamaño de los BGs y también influye en su posición en el espectro de frecuencia. Gracias a este cociente podemos modelar CS con dispersores de todo tipo de materiales.



*Figura 9 - Cociente entre densidades y velocidades de propagación*

- El **área de atenuación (AA)** es el parámetro utilizado para cuantificar la atenuación producida por un dispositivo [13] [14]. Está definida 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. Su unidad es dB·Hz y un valor elevado de este parámetro nos indicará unas buenas propiedades de atenuación del dispositivo.



*Figura 10 - Espectro completo y área de atenuación*

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

Con el propósito de mejorar las propiedades de atenuación de los CS, se han implementado modificaciones en los dispersores, que aportan nuevas ventajas acústicas, como son la resonancia y la absorción, a la ya explicada dispersión múltiple. Los **resonadores de Helmholtz** y el uso de materiales absorbentes como la **lana mineral** que se explicarán posteriormente, son los responsables de estas mejoras. Las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido donde el mecanismo de control de ruido que actúa es únicamente la dispersión, se llaman de primera generación mientras que las que incorporan las nuevas mejoras de resonancia y absorción, se denominan de segunda generación.

### 1.2.2.1 Resonadores de Helmholtz

Podemos definir un resonador de Helmholtz ideal como una cavidad rígida con un volumen ( $V$ ) que presenta un conducto abierto llamado *cuello*, de longitud ( $L$ ), y sección de abertura ( $S$ ). El modelo teórico puede compararse con un oscilador amortiguado (sistema masa-muelle) como se describe a continuación [15]. Partiendo del esquema mostrado en la Figura 11 la masa de aire encerrada en el volumen ( $V$ ) sería:

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

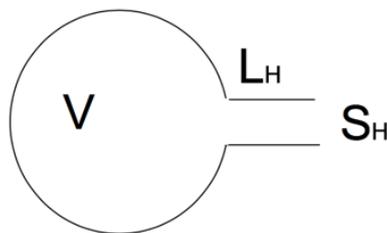


Figura 11 - Esquema de un resonador de Helmholtz [16]

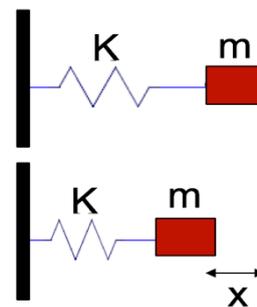


Figura 12 - Esquema oscilador amortiguado [16]

Cuando la longitud de onda  $\lambda$  es mayor que las dimensiones de  $L$ ,  $\sqrt{S}$  ó  $\sqrt[3]{V}$ , el fluido que encierra el cuello se mueve como si se tratara de un bloque mientras que el volumen de fluido contenido dentro de la cavidad rígida actúa como un muelle.

En este proceso, que se considera adiabático<sup>1</sup>, la longitud efectiva del cuello del resonador es la carga de radiación y el resonador sigue la siguiente ecuación diferencial de oscilador forzado, donde la excitación es la onda plana incidente:

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

Las pérdidas por radiación son el factor de amortiguamiento viscoso, que vienen moduladas por la impedancia mecánica equivalente:

<sup>1</sup> Un proceso es adiabático cuando no se produce intercambio de calor con el exterior

$$Z_m = \frac{F}{\frac{dx}{dt}} = R_m + jX_m \quad (1.10)$$

En la que, a la frecuencia de resonancia,  $X_m = 0$ , queda el término despejado como se muestra en la ecuación (1.12).

Se utiliza el equivalente eléctrico del fenómeno resonante, mediante un circuito resonante RLC, donde la impedancia del circuito es:

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

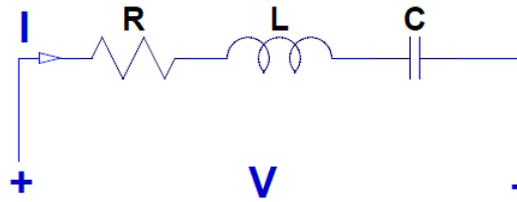


Figura 13 - Esquema circuito RLC

Que para la condición de resonancia  $X=0$ , la frecuencia angular queda despejada como:

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

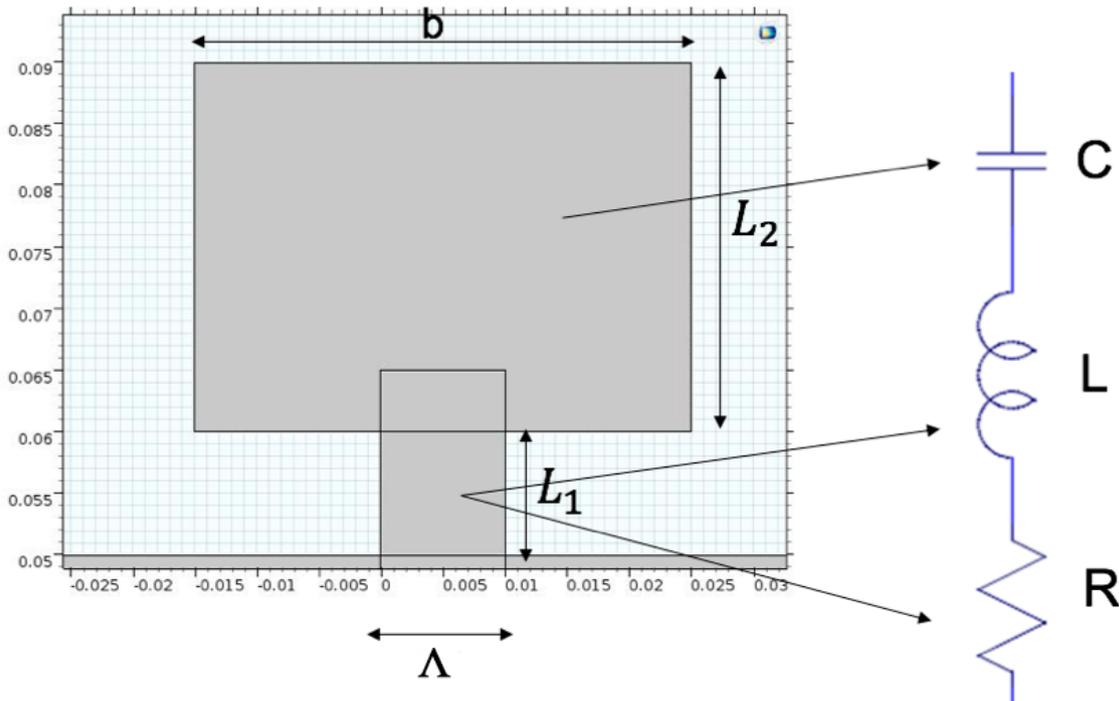


Figura 14 - Equivalente entre esquemas de resonador de Helmholtz y circuito RLC [16]

En la figura 14 observamos 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. En el equivalente físico las impedancias siguen las ecuaciones [17]:

$$\bar{Z}_L = j \frac{\rho L_H \omega}{S_H} \quad (1.13)$$

$$\bar{Z}_C = -j \frac{\rho c^2}{\omega V} \quad (1.14)$$

La frecuencia de resonancia, sustituyendo y despejando en 1.12, y en relación a la Figura 14, queda como sigue [18]:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_H}{L_H * V}} = \sqrt{\frac{\Lambda}{L_H b L_2}} \quad (1.15)$$

siendo  $c$  la velocidad del sonido en el medio (en este trabajo se utiliza 343 m/s, aire). Para los modelos bidimensionales, y en relación con la figura 14, el cuello es una superficie plana de longitud  $L_1$  en la que el radio del cuello es la mitad de la sección de abertura y llamaremos únicamente abertura ( $\Lambda$  para no confundir con el parámetro de red  $a$ ) y el volumen encerrado en la cavidad es una nueva superficie  $S = b * L_2$ .

Por último  $L_H$  es la longitud efectiva o longitud acústica del cuello del resonador que sigue la ecuación:

$$L_H = L_1 + \Delta \frac{\Lambda}{2} \quad (1.16)$$

donde  $L_1$  es la longitud real del cuello y  $\Delta$  será un factor de corrección que se estudiará posteriormente. Dependiendo de si la sección de la abertura es circular o cuadrada se toma 1.6 o 1.8 veces el valor del radio del cuello, respectivamente [18], [19].

Sustituyendo en la ecuación 1.15, quedaría como sigue:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\Lambda}{(L_1 + \Delta \frac{\Lambda}{2}) * S}} \quad (1.17)$$

Por lo tanto, en función de los parámetros anteriores, podemos seleccionar la frecuencia de resonancia de nuestro CS utilizando los resonadores de Helmholtz como dispersores de la red [20] [21].

### 1.2.2.2 Materiales absorbentes – Lana de Roca

El término "lana mineral" hace referencia a las materias primas de partida, que pueden ser rocas, escorias o composiciones sintéticas análogas a las de los vidrios convencionales. Por ejemplo, la conocida como la Lana de Roca, nace a partir de la roca volcánica (basalto).

Gracias a su estructura fibrosa multidireccional y elástica, la lana mineral es capaz de frenar el movimiento de las partículas de aire, por tanto, disipa la energía sonora. Además de la absorción acústica y el aislamiento térmico, su incombustibilidad, elevada inercia química y el no favorecer el crecimiento ni el desarrollo de microorganismos, constituyen sus principales

ventajas frente a otros materiales aislantes como, por ejemplo, los plásticos porosos (espumas) [22].

En este trabajo se va a emplear un modelo de absorbente que utiliza lana mineral (Lana de Roca) para cubrir los dispersores cilíndricos rígidos y así, obtener una mayor atenuación sonora.

Se conocen numerosos estudios, llevados a cabo por Zwicker, Biot y Koster encaminados a predecir el comportamiento de estos materiales, desde el punto de vista acústico. En nuestro caso, emplearemos el modelo empírico de Delany & Bazley.

Las expresiones desarrolladas por Delany & Bazley dependen de la resistencia específica al flujo ( $\sigma$ ) y también de la frecuencia ( $f$ ). A continuación, se muestra la expresión de la impedancia característica compleja ( $Z$ ) y de la constante de propagación compleja ( $\Gamma$ ):

$$Z = \rho c \left[ 1 + 0.0571 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j0.087 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] (\text{Rayls}) \quad (1.18)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c} \left[ 1 + 0.0978 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.7} - j0.189 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] (\text{m}^{-1}) \quad (1.19)$$

Siendo  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) la densidad del aire,  $c$  ( $\text{m/s}$ ) la velocidad del sonido en el aire,  $f$  ( $\text{Hz}$ ) la frecuencia y  $\sigma$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$ ) es la resistencia específica al flujo por unidad de espesor. Esta última guarda una dependencia directa con el diámetro de la fibra y con la densidad del material.

Finalmente, se debe de destacar que estas ecuaciones presentadas por Delany & Bazley tienen validez dentro del siguiente intervalo de frecuencias: [23]

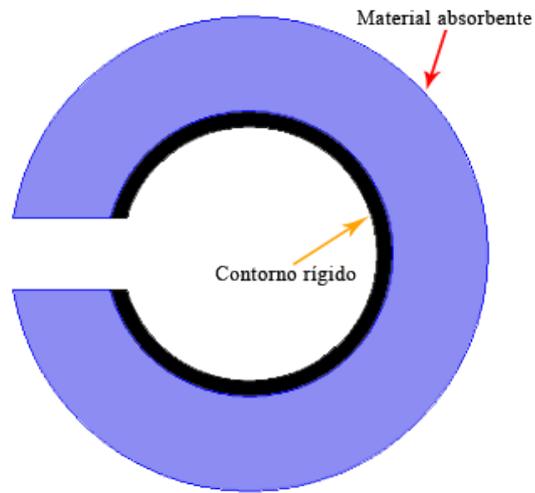
$$10^{-2} \leq \frac{\rho f}{\sigma} \leq 1 \quad (1.20)$$

Frecuencia (Hz)	80	500	1500
<b>Valor <math>\frac{\rho f}{\sigma}</math></b> <b>Para <math>\sigma = 23000</math></b> <b><math>\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2</math> y</b> <b><math>\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3</math></b>	$4.3478 * 10^{-3} \ll 10^{-2}$	$10^{-2} \leq 0.0272 \leq 1$	$10^{-2} \leq 0.0815 \leq 1$

*Tabla 1 - Valores para el cumplimiento de las ecuaciones de Delany & Bazley*

De donde se desprende, que para una resistencia al flujo de  $23000 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$  la atenuación del material empezará a ser efectiva a partir de 230 Hz.

Uno de los diseños más avanzados de dispersores para los CS que trabajan como pantallas acústicas fue presentado por Romero García [24] y propone un dispersor rígido con material absorbente y comportamiento de resonador que combina los tres mecanismos de control de ruido: dispersión múltiple, resonancia y absorción.



*Figura 15 - Dispersor ideal con 3 mecanismos de control de ruido: dispersión, resonancia y absorción.*



## Capítulo 2. OBJETIVOS DEL TFG

El objetivo principal del presente TFG consiste en aplicar y modificar los modelos numéricos bidimensionales basados en el método de los elementos finitos basándose en la bibliografía existente, utilizándolos para desarrollar diseños teóricos de pantallas acústicas basadas en CS. También se proponen modificaciones en los diseños para observar las características más provechosas de cara a la obtención de la mayor atenuación posible. Se estudian los parámetros de diseño principales como son el número de dispersores, el orden de los mismos y la incorporación de nuevos mecanismos de control de ruido como son los resonadores Helmholtz y la lana mineral, de resistencia al flujo elevado, como material absorbente. Además, se pretende parametrizar el factor de corrección de la expresión teórica del resonador de Helmholtz, y las variaciones sufridas en ésta con respecto a los resultados numéricos. Por último, se plantean diseños bidimensionales finitos en condiciones adaptadas, que producen resultados más reales.

## Capítulo 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Realización del proyecto

El desarrollo del proyecto consta de las siguientes fases:

- La primera fase ha sido de documentación, lectura y estudio de los cristales de sonido y toda la teoría física subyacente a ellos. La fase se ha ido actualizando durante el proceso de realización del trabajo ya que esta línea de investigación continúa siendo puntera, homologando pantallas acústicas basadas en este mecanismo de control del ruido.
- La segunda fase consiste en el aprendizaje y la práctica de simulaciones con el software específico COMSOL Multiphysics [25], tanto para la creación de modelos, modificación de los mismos y para la exportación de resultados.
- La tercera fase es la implementación de nuevos modelos con COMSOL y creación de funciones de Matlab que modelarán los resultados exportados desde COMSOL para una mejor explicación en la memoria.
- Como última fase, la extracción de conclusiones a raíz de las simulaciones realizadas, comparando y buscando siempre el modelo más óptimo.

De manera transversal a todas ellas, y hasta el último día de redacción, se ha ido actualizando la bibliografía, con la lectura de nuevos artículos publicados en esta línea de investigación que sigue activa.

### 3.2 Distribución de tareas

El presente TFG se puede dividir en las tareas siguientes:

1. Búsqueda bibliográfica.
2. Aprendizaje del nuevo Software específico de simulación COMSOL Multiphysics.

3. Simulaciones de modelos ideales de CS ya existentes.
4. Simulaciones modificadas de los modelos anteriores con nuevos elementos de diseño.
5. Parametrización del factor de corrección de la frecuencia de Helmholtz.
6. Procesado de los resultados de las simulaciones mediante algoritmos de Matlab.
7. Creación de nuevas funciones específicas de Matlab para el análisis de resultados.
8. Análisis de los resultados y extracción de conclusiones.
9. Redacción de la memoria.

### 3.3 Diagrama temporal

Las anteriores tareas mencionadas se organizan en un diagrama temporal, donde las marcas X son semanas de cada mes, del siguiente modo:

Tarea	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	X X X X	X X X X						
2		X X	XXXX					
3			XXXX	XXX				
4				XX	XXXX	XXXX	XXXX	X
5				XXX	XXXX			
6				XXXX				
7					XXXX	XXXX		
8					XXXX	XXXX	XXXX	X
9						X	XXXX	XXXX

*Tabla 2 - Diagrama temporal de tareas*

## Capítulo 4. DESARROLLO Y RESULTADOS

### 4.1 Parámetros generales de diseño

Actualmente existen modelos bidimensionales que aportan un rendimiento muy bueno, y servirán de punto de partida para los diseños de este trabajo. El principal reto de diseño para los CS será hacerlos competitivos con respecto a las pantallas acústicas tradicionales. Para ello se buscará minimizar la anchura de la pantalla manteniendo los niveles de atenuación para los intervalos de frecuencias objetivo. A continuación, se describirán las principales características de los modelos empleados:

- Como se ha descrito previamente, la **forma de los dispersores** determina en gran medida las prestaciones de nuestro diseño final del CS; por ello, y debido a la facilidad de cálculo que aporta la simetría de la forma circular, nuestros dispersores serán cilíndricos, y en el caso de la utilización de resonadores de Helmholtz, el cuello rectangular conectará con una cavidad circular, por lo que en estos casos hablaremos de radio externo y radio interno.
- En las simulaciones realizadas, las dimensiones físicas de los modelos se diseñarán en función de las frecuencias de interés. El parámetro de red del CS vendrá dado por la frecuencia Bragg que a partir de la ecuación (1.5) quedará como:

$$a = \frac{c}{2 * f_{Bragg}} \quad (4.1)$$

- En nuestros CS, los elementos dispersores estarán siempre inmersos en aire, cuya velocidad de propagación del sonido y densidad son, respectivamente,  $c=343$  m/s y densidad  $\rho=1,25$  kg/m<sup>3</sup>. El material utilizado para los dispersores será rígido y en los diseños con material absorbente, este será lana mineral con gran resistencia al flujo (1.2.4.2.).

### 4.2 Metodología de simulación

Utilizando el software COMSOL Multiphysics que aplica el Método de Elementos Finitos en sus simulaciones (ver anexos), se analiza la atenuación obtenida por estructuras de CS mediante el parámetro IL (1.1.3) Debido al ahorro computacional de los modelos 2D respecto a los de 3D, se realizarán simulaciones en el plano OXY, evitando calcular la altura del eje Z. Además, al no existir variación en el diseño de los dispersores según el eje OZ, la simulación 2D se presenta como la mejor elección para la obtención de resultados de forma rápida.

Como fuente emisora se empleará una onda plana incidente (OPI) con  $p = 1 atm$  que viajará de izquierda a derecha en el dominio escogido, el aire, el cual se encuentra dentro del dominio de simulación, con un valor inicial de  $p = 0 atm$ .

El tamaño de la malla utilizada determinará la precisión de la simulación, pero también el tiempo de cálculo. Para obtener unos resultados precisos que no empleen un tiempo excesivo de simulación se ha optado por un mallado con un tamaño de la octava parte de la frecuencia superior de trabajo,  $f=1500$  Hz, y que viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{8} = \frac{c}{8 * f_{max}} = \frac{343}{1500} = 0.2286 m \quad (4.2)$$

Mediante el software comercial de simulación COMSOL y su análisis armónico-temporal, exportaremos espectros de frecuencia en banda fina del IL, para delimitar con mayor precisión los BG, mediante un barrido desde 100-1500 Hz con pasos de 1 Hz. Para los espectros de IL

mostrados en el intervalo reducido de 100-800 Hz, el paso de banda fina y el tamaño de malla será el mismo.

El punto de medida dependerá de cada estudio y del interés que tenga la colocación dentro del dominio.

Posteriormente mediante el software Matlab [26] se analizarán con detalle los espectros exportados, obteniéndose las gráficas que se muestran en este trabajo.

Por último, a partir de funciones propias creadas en Matlab se calcularán las AA de los espectros para determinar con precisión con cuál de ellos se obtienen unos mejores resultados de atenuación acústica y confirmar los resultados gráficos obtenidos.

#### 4.2.1 Modelo 2D de campo libre.

Mediante el modelo 2D de campo libre, se estudian diversos diseños de dispersores, que incluyen resonadores Helmholtz para la caracterización de la frecuencia de resonancia de los mismos y observar posteriormente las modificaciones sufridas al colocarlos en una red periódica.

En una simulación de una cámara anecoica de 3 x 3 m, con capas perfectamente adaptadas, condiciones de contorno PML (ver anexo) se simulan las condiciones de campo libre (sin reflexiones indeseadas en las paredes). Se dispone el resonador en el centro y se establece un punto de medida dentro del resonador, situándolo en el interior de la cavidad resonante para obtener de forma precisa la frecuencia de resonancia característica del diseño a estudiar.

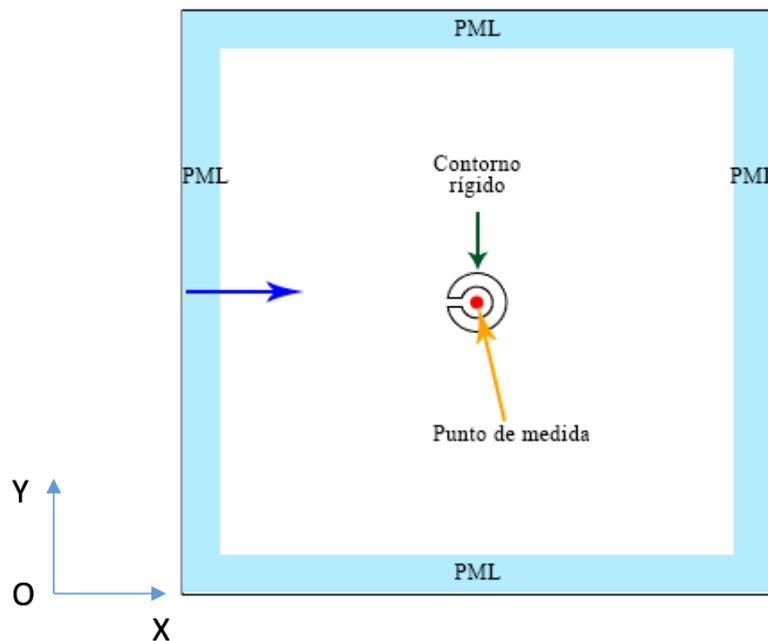


Figura 16 - Modelo de simulación de campo libre

### 4.2.2 Modelo 2D de un CS Ideal

En el modelo 2D de un CS ideal se analiza su comportamiento acústico en general, y de cada una de sus partes, con un bajo coste computacional, obteniendo resultados de manera casi inmediata. En nuestro caso lo adaptaremos para analizar simetrías cuadradas, elegidas anteriormente. Este modelo además de explicar el funcionamiento de la pantalla 2D puede ser de importante ayuda para determinar si la frecuencia de resonancia calibrada con el modelo 2D de campo libre ha cambiado.

En la siguiente imagen se observan los dispersores colocados en red donde las paredes horizontales (inferior y superior) tienen una condición periódica, haciendo que la red tenga unas características propias de una pantalla de longitud semi-infinita, acercándose así a una simulación más realista de modelos que se aplicarían a la vida real, pero reduciendo enormemente el tiempo de cálculo.

Las paredes verticales como en el modelo anterior, tendrán condición de contorno adaptada propia de las PMLs, simulando así un modelo ideal de CS.

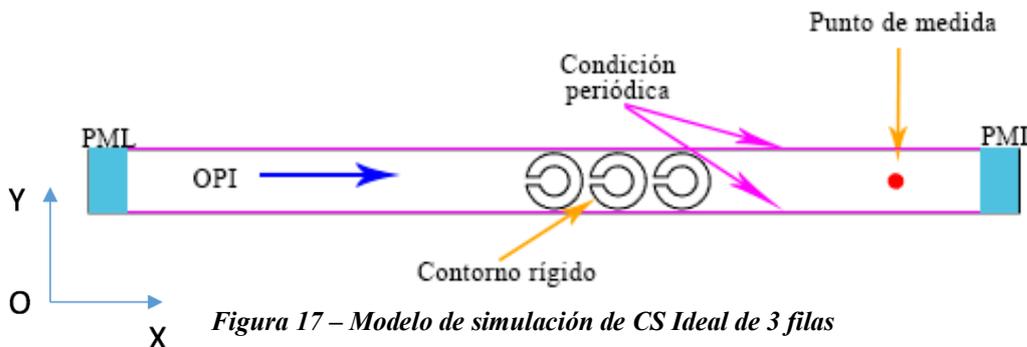


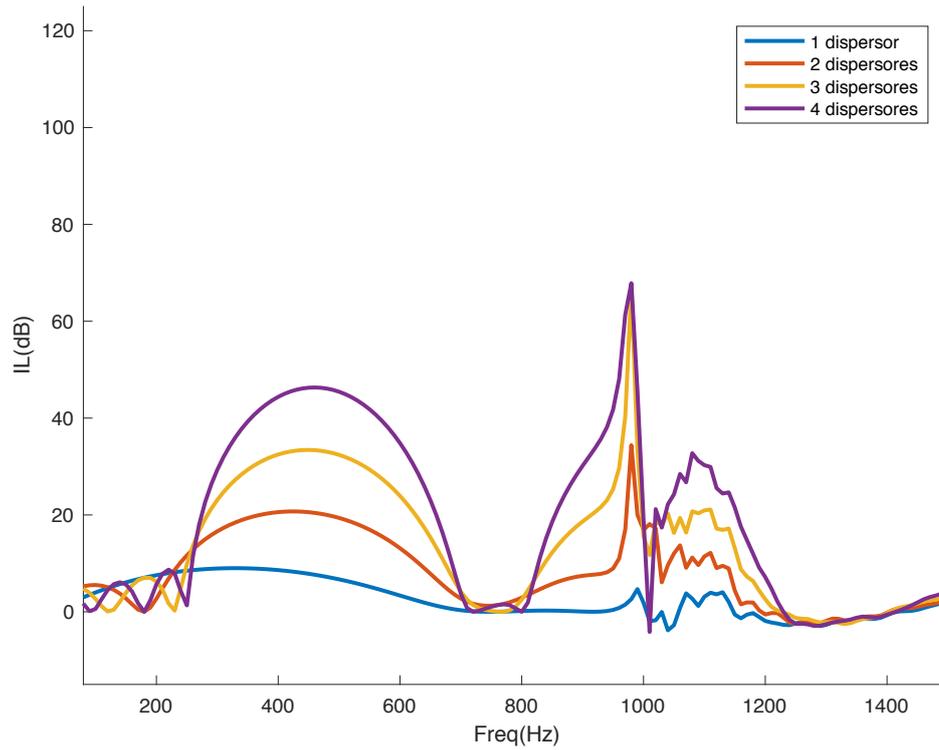
Figura 17 – Modelo de simulación de CS Ideal de 3 filas

### 4.3 Variación del número de filas de dispersores (Anchura de pantalla)

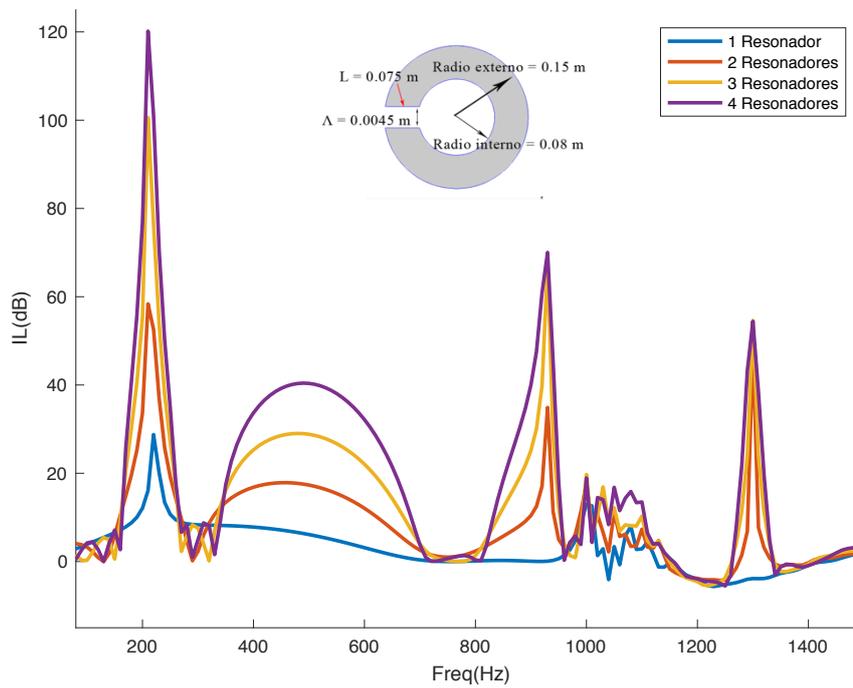
El primer punto de este estudio se centra en determinar el número óptimo de filas de dispersores acústicos en un CS. Para ello, mediante el modelo de simulación de un CS ideal descrito en el apartado anterior, se realizarán diferentes simulaciones que variarán desde 1 fila hasta 4 filas, tomando medidas a  $d = 1$  m de distancia del contorno del último dispersor de la red en cada caso. En las simulaciones se analizará el parámetro IL en el espectro de frecuencia.

En las figuras 18 y 19 se observan los espectros de IL de CS formados por dispersores cilíndricos de radio  $r = 0.15$  m y situados con un parámetro de red  $a = 0.343$  m. El  $ff$  tiene un valor de  $ff = 0.6008$  y un BG situado a 500 Hz según la frecuencia de Bragg (ecuación 1.5). En la Figura 18 se muestran los espectros de atenuación obtenidos con este CS y con dispersores rígidos, por lo cual únicamente se observa el BG en torno a la frecuencia Bragg.

En la figura 19 se analiza el mismo CS pero con los dispersores incorporando resonadores Helmholtz con una abertura de  $\Lambda = 0.045$  m, una longitud de cuello de 0.075 m y un radio interno de  $r_i = 0.08$  m. Con esta configuración, se puede observar, además del BG a 500 Hz, la frecuencia de resonancia debida a la existencia de los resonadores Helmholtz. Además, de la Figura 19 se concluye que, para el caso de la red de una sola fila de resonadores, la frecuencia de resonancia será  $f_h = 220$  Hz mientras que para el resto de casos será  $f_h = 210$  Hz, siendo el valor teórico de esta frecuencia según la expresión (1.10) de  $f_h = 246.746$  Hz. La variación observada en la frecuencia de resonancia de los resonadores, se estudiará en profundidad en el apartado 4.5.



**Figura 18 - Espectros de la variación del número de niveles de dispersores rígidos**



**Figura 19 – Espectros de la variación del número de niveles de resonadores de Helmholtz y esquema del modelo con sus parámetros físicos**

Se fijan 3 filas de dispersores como número óptimo para el resto de diseños de este trabajo, siendo la anchura total de la pantalla de  $L=0.836$  m, que se considera una anchura aceptable para hacer esta pantalla competitiva con las pantallas acústicas tradicionales, buscando no sobrepasar 1 m de anchura de pantalla. Por otro lado, la atenuación ha quedado demostrada experimentalmente que, a partir de 3 filas, no experimenta un aumento significativo [27].

#### 4.4 Variación del orden de colocación de resonadores y dispersores rígidos

Una vez justificado el número de filas de nuestros futuros diseños, se procede a extraer conclusiones acerca del mejor orden posible y sus diferentes usos en las pantallas de tres filas.

Se utilizará en todos los casos el modelo 2D ideal de tres filas con parámetro de red  $a = 0.343$  m y midiendo siempre a una distancia de  $d=1$  metro respecto al contorno del último elemento. Se variará el orden de colocación de los dispersores rígidos cilíndricos y de los resonadores Helmholtz. Las dimensiones de los dispersores rígidos serán las descritas en el apartado anterior. Para denominar las distintas combinaciones de resonadores (R) y dispersores rígidos (D) se utilizarán tres caracteres, dependiendo de que el dispersor sea rígido o un resonador. Así, por ejemplo, DDD se corresponde con tres filas de dispersores rígidos y RRR con tres filas de dispersores con resonadores Helmholtz.

Los espectros del IL se dividirán en bajas y altas frecuencias, aportando siempre el gráfico de barras de las AA. Se ha considerado el intervalo del espectro que va de 100 a 400 Hz en el estudio para bajas frecuencias y el que va de 400 a 800 Hz para altas frecuencias. La finalidad de la división del espectro en dos zonas es el análisis los picos de atenuación producidos por la frecuencia de resonancia Helmholtz y el producido por el mecanismo de dispersión múltiple.

Los resultados comparativos de las diferentes combinaciones se muestran en las Figuras 20 y 21. Se ha optado por comparar cada una de las combinaciones con la disposición de tres dispersores rígidos (DDD), considerada la referencia. La última de ellas es la que presenta mayor diferencia de construcción, es decir, con los tres dispersores formados por resonadores de Helmholtz (RRR). Los espectros se muestran a pares, izquierda y derecha para observar aquellos pares más coincidentes. Sin embargo, para demostrar que no hay ningún espectro igual a otro, en las tablas, se presentan las AA, parámetro que proporciona información precisa de cada combinación.

##### 4.4.1 Bajas frecuencias

En la Figura 20 se muestran los resultados obtenidos para el intervalo del espectro que va de 100 Hz a 400 Hz, en el estudio para bajas frecuencias. Se observa que:

- 1) La sustitución de dispersores rígidos D por dispersores con resonador Helmholtz R, provoca una disminución del BG.
- 2) Además, cuando la segunda y tercera fila son diferentes entre ellas se crean pares en el espectro, DDR y DRD o RDR y RRD. Esto quiere decir que la segunda y tercera fila manteniendo la primera fila fija en dispersor rígido o resonador, producen el mismo espectro a bajas frecuencias, tal y como se muestra en la Figura 20.
- 3) El caso de mayor atenuación, como se podía esperar al introducir un nuevo mecanismo más avanzado de control de ruido como son los resonadores de Helmholtz, es aquel que

lo incorpora en las tres filas, (RRR). Para el caso RRR se obtiene según la Tabla 3 un 32,7 % más de atenuación que en el caso DDD.

Modelo	AA (x 10 <sup>3</sup> ) (dB·Hz)
1-DDD	4.3307
2-DRR	5.8969
3-DDR	5.1339
4-DRD	5.1349
5-RDR	5.6800
6-RRD	5.6781
7-RDD	4.8757
8-RRR	6.4327

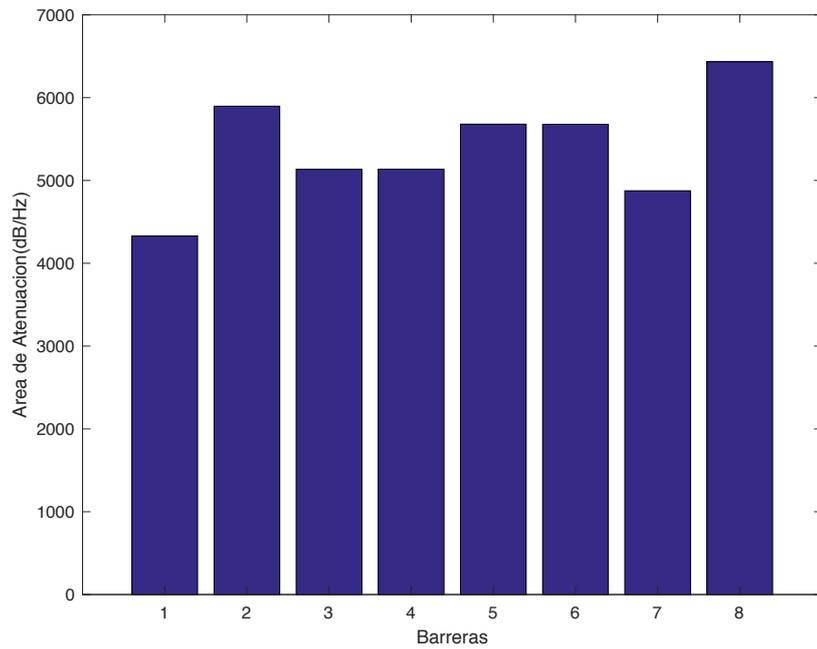


Tabla 3 - Áreas de atenuación a bajas frecuencias y diagrama de barras

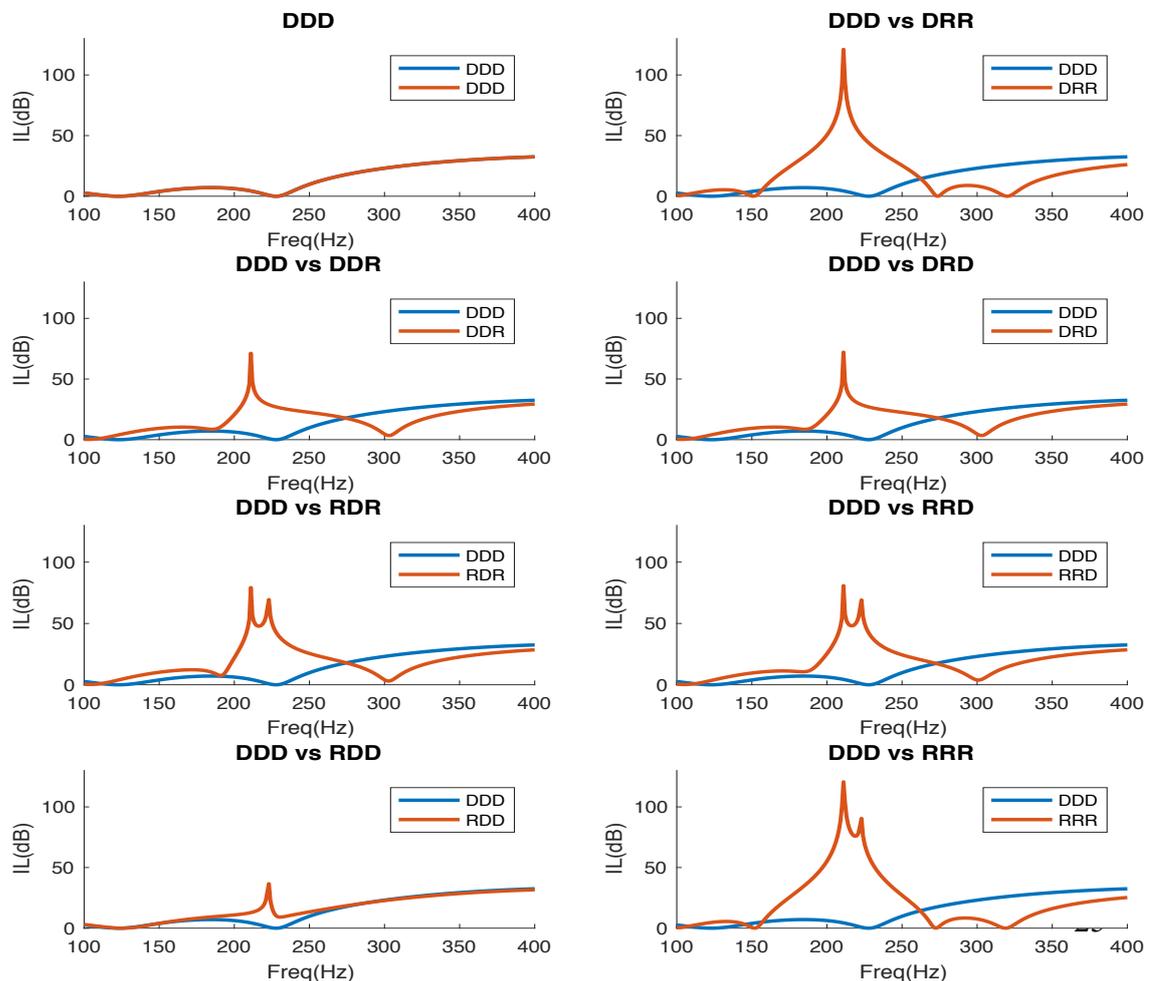


Figura 20 - Espectros de combinaciones de orden a bajas frecuencias

#### 4.4.2 Altas frecuencias

Si analizamos ahora los espectros de altas frecuencias de la Figura 21, observamos que:

- 1) La mayor atenuación se encuentra en el caso de utilizar tres dispersores rígidos, ya que es el caso en el que el BG de 500 Hz no se ve influenciado por la cercanía de la frecuencia de resonancia  $f_h$ .
- 2) En el resto de casos, como hemos observado de forma más evidente en el análisis de las bajas frecuencias, la combinación de resonadores y dispersores modifica la forma de los BGs, es decir, la posición de la frecuencia de resonancia en el espectro reduce notablemente parte del BG.
- 3) De nuevo se forman pares de espectros similares en los mismos casos que antes, para las parejas 2-3(DDR y DRD) y 5-6 (DDR y DRD). En la Tabla 4 se muestran los valores de las AA que aportan información más precisa. Así el caso DDD aporta un 11.5 % más de atenuación que el caso RRR para este intervalo de frecuencias.

Modelo	AA ( $\times 10^3$ ) (dB·Hz)
1-DDD	7.7879
2-DRR	7.0163
3-DDR	7.4059
4-DRD	7.4055
5-RDR	7.2872
6-RRD	7.2854
7-RDD	7.669
8-RRR	6.8965

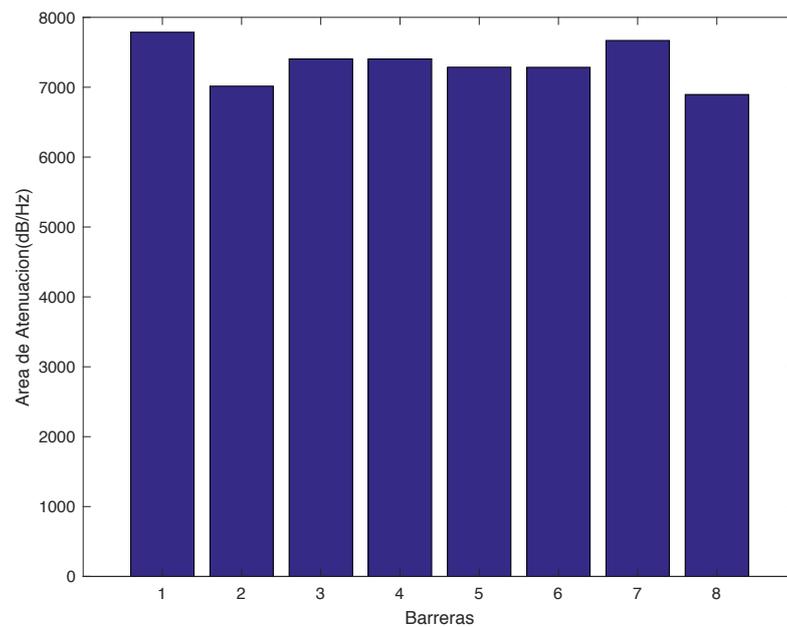
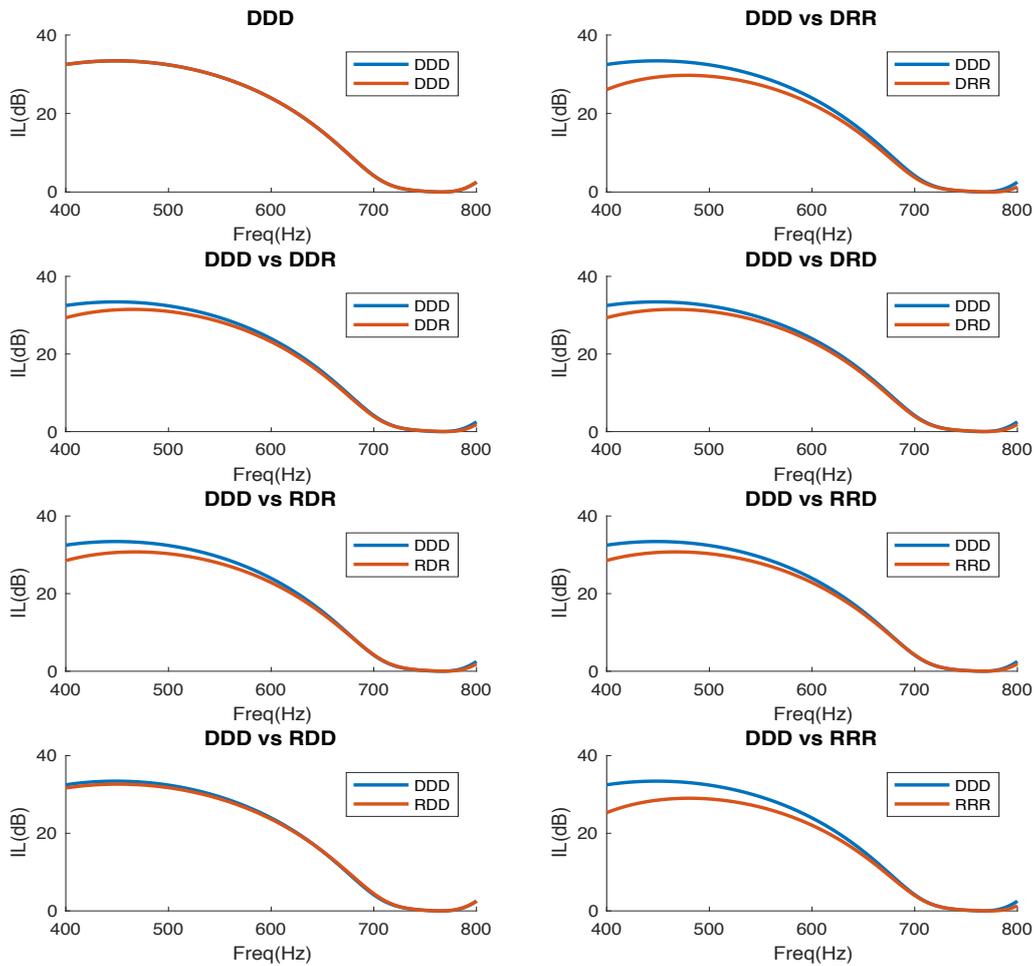


Tabla 4 - Áreas de atenuación a altas frecuencias y diagrama de barras



*Figura 21 - Espectros de combinaciones de orden a altas frecuencias*

#### 4.4.3 Análisis general

Una vez analizadas las dos secciones del espectro, se procede a analizar desde una perspectiva más global, el intervalo de 100-800 Hz para todas las combinaciones anteriores. En la Figura 22 se observa que la combinación que proporciona mayor atenuación es aquella que incorpora resonadores de Helmholtz en todas sus filas. Exactamente la combinación RRR consigue un 9 % más de AA que la DDD, tal y como se desprende de los datos de la Tabla 5. También se observa como las combinaciones denominadas pares siguen, de manera global, dando resultados análogos.

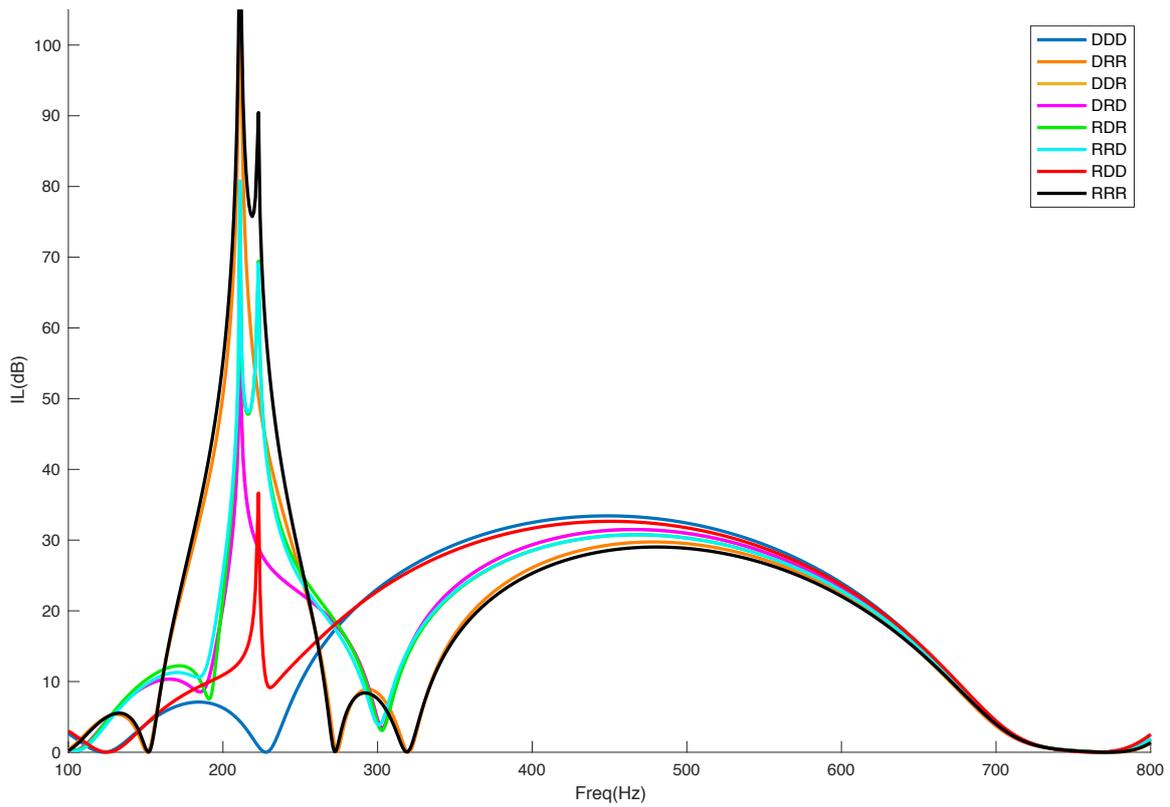


Figura 22 - IL de las combinaciones entre dispersores y resonadores para CS de 3 filas

Modelo	AA (x 10 <sup>4</sup> ) (dB·Hz)
1-DDD	1.2119
2-DRR	1.2913
3-DDR	1.254
4-DRD	1.2541
5-RDR	1.2967
6-RRD	1.2964
7-RDD	1.2545
8-RRR	1.3329

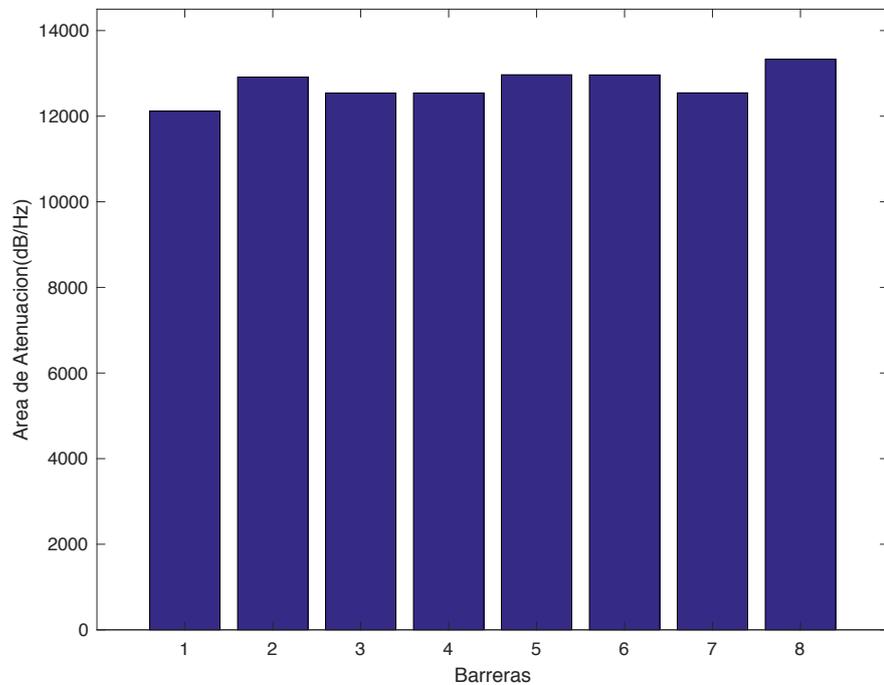


Tabla 5 – Áreas de atenuación totales y diagrama de barras

En la figura 23 se puede observar los mapas de nivel de presión sonora (dB) para el resonador sintonizado a 210 Hz, y las pantallas **DDD** y **RRR**, trabajando a 500 Hz y 210 Hz respectivamente. Se observa para el caso **DDD**, figura 23b, como el nivel de presión sonora en la zona de sombra se reduce considerablemente a 500 Hz, debido a la dispersión múltiple. En el caso **RRR**, figura 23c, los resonadores tienen mayor nivel de presión sonora en su interior a 210 Hz como es de esperar.

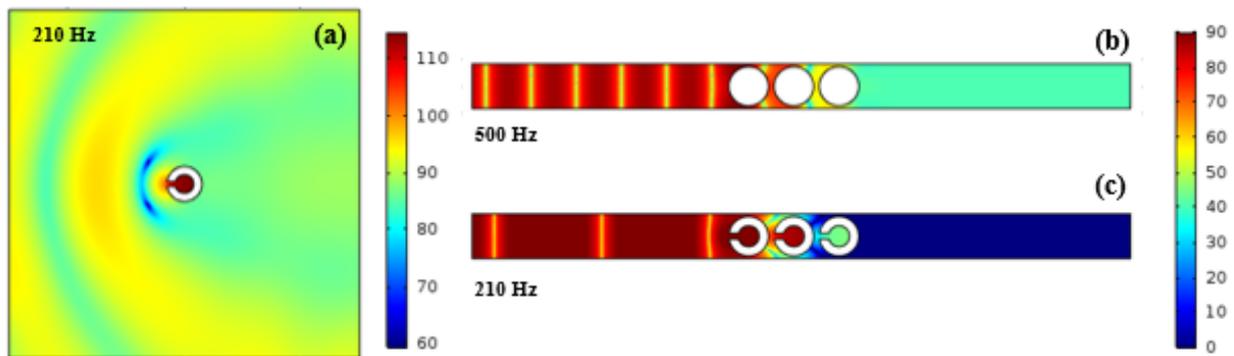


Figura 23 - Mapas de nivel de presión sonora: (a) Resonador sintonizado a 210 Hz, (b) DDD a 500 Hz, (c) RRR a 210 Hz

#### 4.5 Variación de la frecuencia de resonancia en red

Uno de los fenómenos más interesantes de los espectros de IL observado en los diseños que incorporan resonadores de Helmholtz al colocarlos en red, es la variación de la frecuencia de resonancia,  $f_h$ . Se procede a analizar ahora esta variación y su relación con la variación del tamaño y posición del BG.

Como punto de partida se busca la frecuencia de resonancia en el interior de la cavidad interna del resonador de Helmholtz utilizando el modelo de simulación de campo libre (4.2.1). Se extrae de estos resultados el espectro de IL que se muestra en la Figura 24.

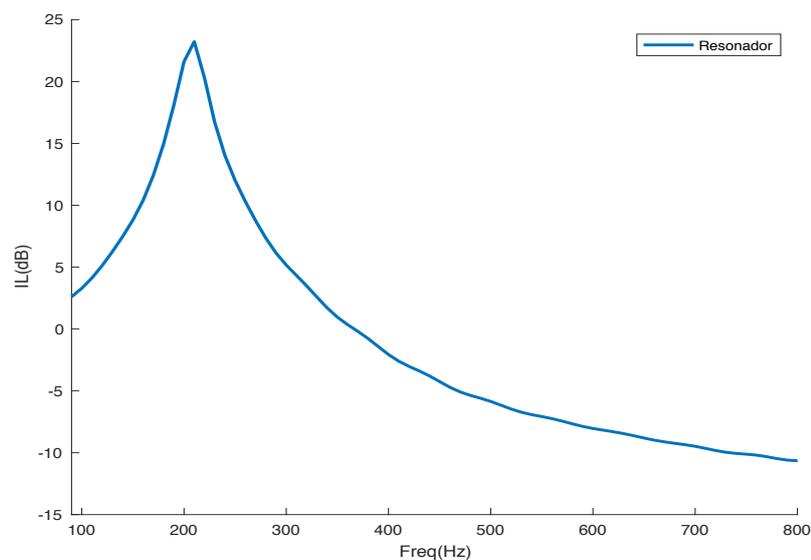


Figura 24 - Espectro del interior del resonador en campo libre

Se observa claramente el pico de la frecuencia de resonancia a 210 Hz, debido a un único resonador de Helmholtz con los parámetros descritos en el apartado 4.3.

De nuevo en este apartado se ha optado por una reducción del espectro de frecuencia, entre 100 y 800 Hz siendo este intervalo suficiente para el estudio del pico de resonancia y del primer BG de Bragg.

En la figura 25 se muestran los espectros de atenuación acústica para redes con diferentes pasos de red, pero situando como dispersor en todas ellas el resonador descrito anteriormente. Se analiza la variación sufrida en la anchura del BG con relación al parámetro de red  $a$ , fijando el resto de parámetros físicos del cristal y siguiendo el modelo ideal de simulación donde se toman medidas a una distancia de 1 m respecto del contorno del último resonador, Tabla 6.

Se observa como se produce una leve variación en la posición de la frecuencia de resonancia, una acusada variación en la anchura de la misma y la modificación de la anchura del pico debido a la influencia del BG de Bragg.

Como se puede observar, conforme se va aumentando el parámetro de red, la anchura del pico de resonancia se reduce, y también su valor de pico, debido a la proximidad del BG, el cuál reduce su tamaño también de manera más intensa conforme se acerca al pico de resonancia. Este estudio sobre las interferencias del BG sobre la frecuencia de resonancia ha sido publicado recientemente [28].

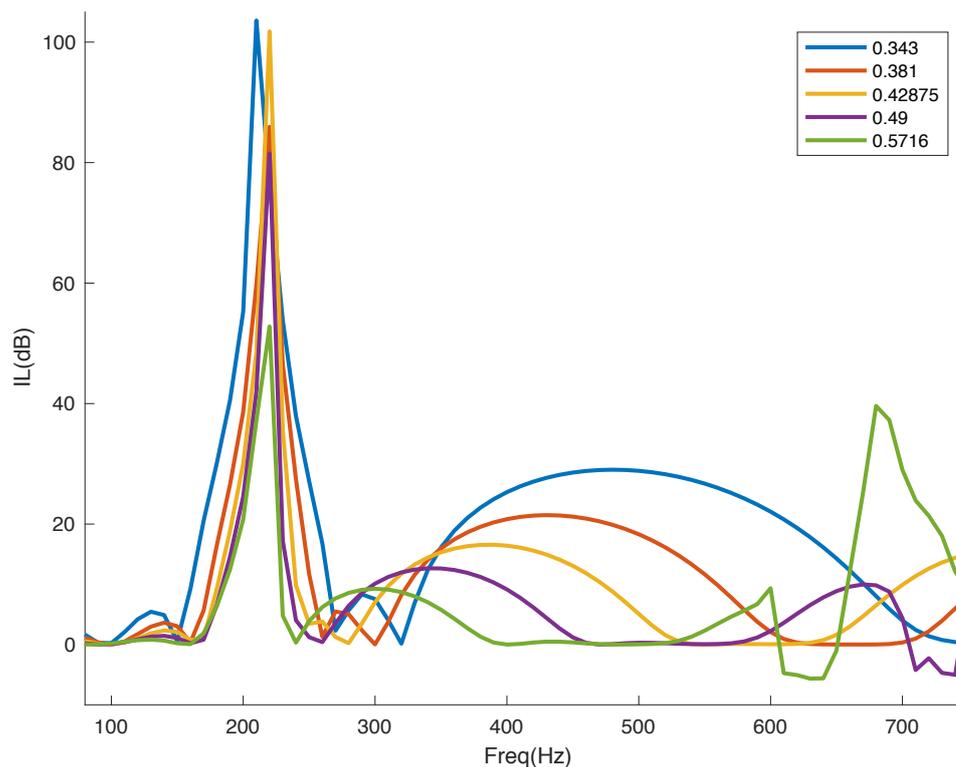


Figura 25 - Espectros de la variación del parámetro de red 'a'

Frec. Bragg (Hz)	300	350	400	450	500
Parámetro de red (m)	0.5716	0.49	0.42875	0.381	0.343

Tabla 6 - Relaciones de frecuencias de Bragg y parámetros de red

El caso inicial de frecuencia Bragg a 500 Hz es el único que mantiene el valor pico de la frecuencia de resonancia de Helmholtz a 210 Hz porque la influencia del BG aún no es muy pronunciada, pero en el resto de caso siempre encontramos el pico a 220 Hz.

A lo largo de este trabajo se ha trabajado con el pico de resonancia y el primer BG, en diseños que los sitúan cercanos entre si, para poder analizar esta interferencia.

Como conclusión, si se sintoniza la frecuencia de resonancia cerca del BG, se produce una interferencia entre ambos que puede ser beneficiosa o perjudicial, como en este caso, ya que obtendremos una menor AA total debido a la reducción de la banda de atenuación formada por la unión de pico de resonancia y el primer BG, en la que ambos se encuentran afectados.

#### 4.6 Parametrización del Factor de Corrección

El factor de corrección que se utiliza en la expresión teórica (1.17) para el cálculo de la frecuencia de resonancia Helmholtz que proponen la mayoría de referencias bibliográficas no es válido para el diseño de pantallas acústicas basadas en CS de segunda generación. Este hecho se comprueba cuando se realiza el cálculo teórico mediante la expresión (1.17) y se compara con el obtenido mediante cálculo numérico. A raíz estas diferencias observadas se buscará parametrizar el factor de corrección de la expresión (1.16) y obtener así unos resultados teóricos más precisos.

Se ha optado por realizar la parametrización en relación a la superficie resonante, es decir, la cavidad interna del resonador y dejando el resto de parámetros fijos. Por otro lado, se ha optado por el diseño de una cavidad interna cuadrada, que facilita el cálculo de su volumen, o su área en los casos 2D que se van a analizar. Para observar la posible influencia del intervalo de tamaños contenidos en el radio externo que se mantiene fijo, se ha reducido el tamaño de todo el CS al 75% y al 50%.

El método analítico que se ha seguido es sencillo: se calcula la frecuencia de resonancia utilizando la expresión teórica, mediante un programa de **Matlab**, en el cual se introducen los parámetros geométricos. Por otro lado, se introduce la geometría del resonador en el modelo 2D de campo libre (4.2.1) que da como resultado la frecuencia exacta del resonador. Se comprueba la discrepancia entre ambos resultados y se obtienen las gráficas mostradas en las Figuras 27, 28 y 29.

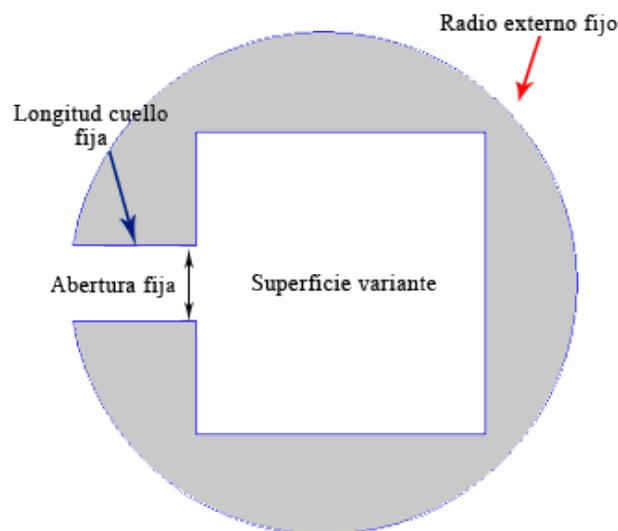


Figura 26 – Resonador con superficie interna rectangular

S.Resonante/S.Cuello*	Tamaño inicial (m)		Reducción al 75%(m)		Reducción al 50% (m)	
	x	y	x	y	x	y
10.0	0.185	0.182	0.120	0.1250	0.0919	0.0920
9.5	0.176	0.182	0.120	0.1190	0.0890	0.0901
9.0	0.190	0.160	0.121	0.1120	0.0870	0.0874
8.5	0.190	0.151	0.110	0.1160	0.0800	0.0895
8.0	0.180	0.150	0.110	0.1090	0.0800	0.0844
7.5	0.169	0.150	0.105	0.1070	0.0790	0.0800
7.0	0.155	0.152	0.100	0.1050	0.0750	0.0788
6.5	0.150	0.146	0.099	0.0985	0.0730	0.0750
6.0	0.145	0.140	0.094	0.0957	0.0700	0.0720
5.5	0.150	0.124	0.090	0.0915	0.0700	0.0650
5.0	0.140	0.120	0.090	0.0830	0.0700	0.0600

Tabla 7 -Relación de tamaños de la superficie resonante. \* S = Superficie

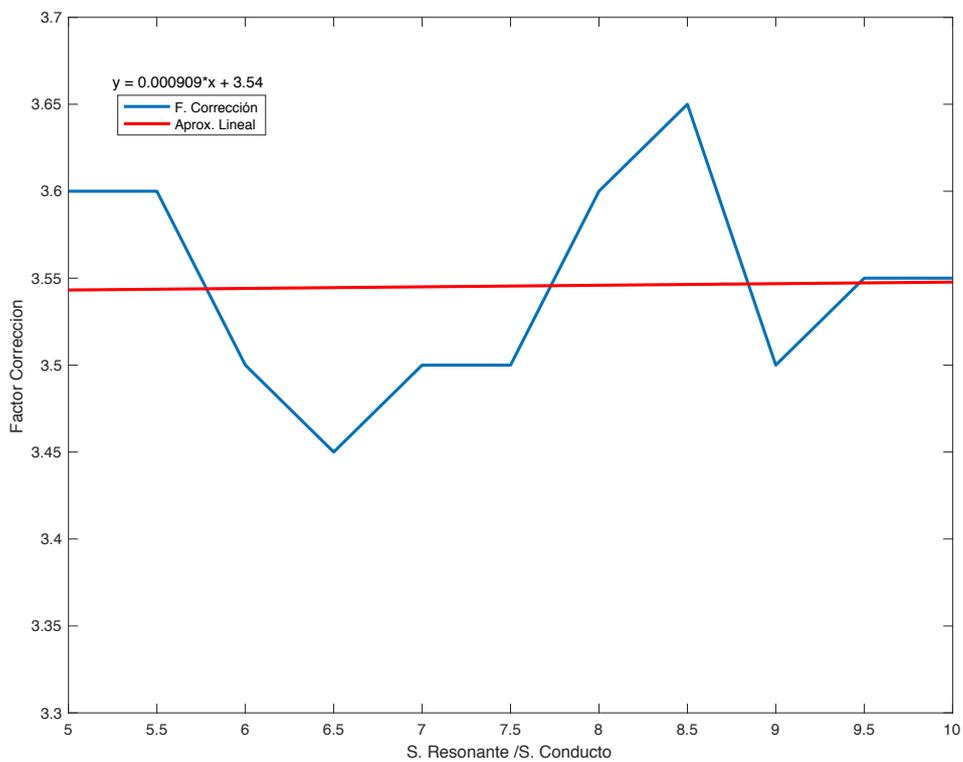
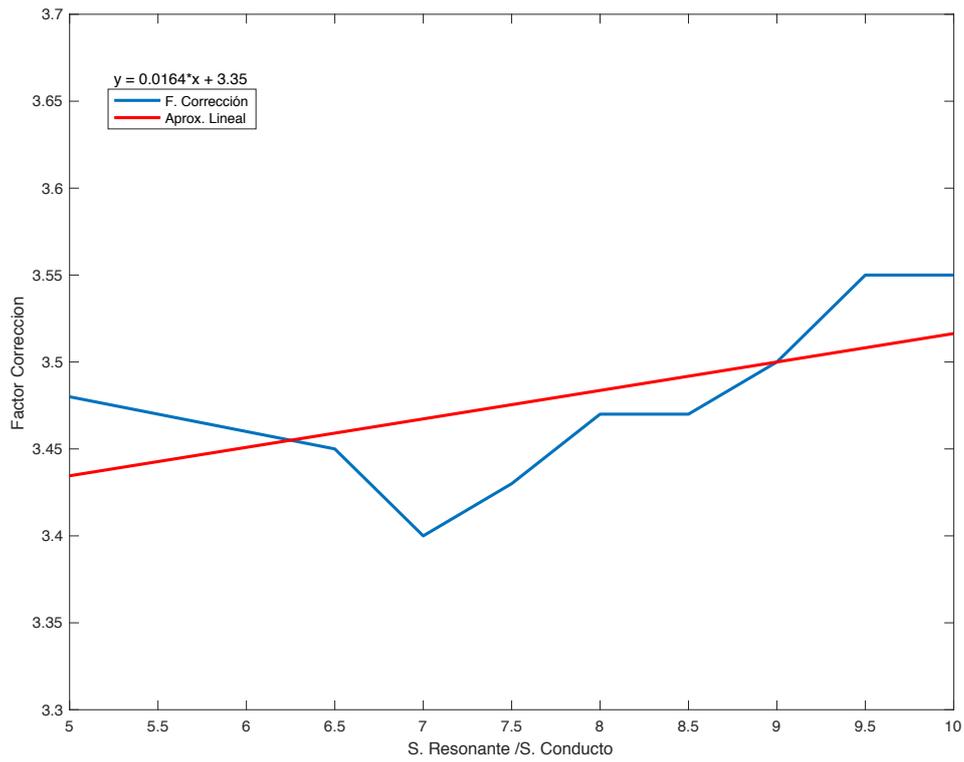
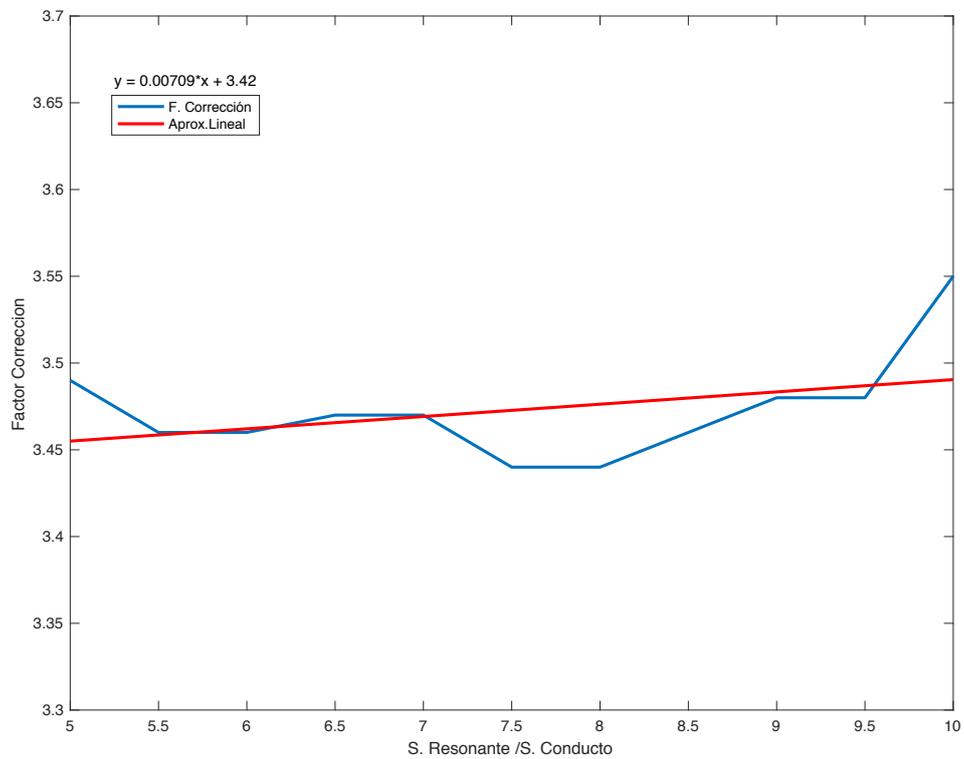


Figura 27 - F. Corrección 100%



**Figura 29 - F. Corrección 75%**



**Figura 28 - F. Corrección 50%**



Media valores 100% = 3.545

Media valores 75% = 3.475

Media valores 50% = 3.473

Conforme reducimos el tamaño del modelo, el intervalo de oscilación del factor de corrección se reduce también, como lo reflejan las modificaciones en el eje Y de las figuras **27**, **28** y **29**.

Es decir, a menor anchura de la pantalla, la precisión del factor de corrección es mayor. Esta información es un dato primordial para el diseñador. Podríamos concluir que para calcular de forma más precisa la frecuencia de resonancia en estos casos, deberíamos cambiar el factor de corrección de 1.6 o 1.8 que encontrábamos en la fórmula teórica y recomiendan [17] a valores comprendidos entre 3.4 y 3.65.

Se ha decidido tomar los valores en el eje de ordenadas con un paso de 0.5 en el cociente de relación entre S. Resonante y S. Cuello, pese a los abruptos resultados que se muestran en las gráficas.

La justificación de esta decisión es el ajuste al tercer decimal que se ha hecho en las relaciones de tamaño de la superficie resonante (tabla **7**), el cual contaba con un margen muy pequeño de variación debido al radio externo utilizado. Pese a ello, las gráficas ilustran el ajuste buscado con una buena precisión.

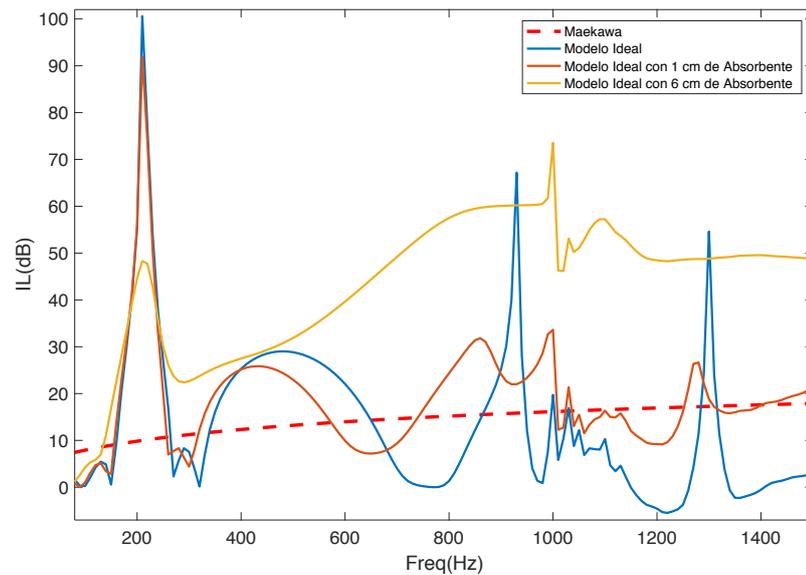
## 4.7 Incorporación de material absorbente

Para una mejora de la atenuación a altas frecuencias, se propone la incorporación de material absorbente en el diseño de los dispersores acústicos del CS, concretamente lana mineral que será efectiva a partir de 230 Hz (**1.2.2.2**). La incorporación de los resonadores de Helmholtz en los dispersores sirve como mecanismo de mejora de la atenuación del ruido, especialmente a la frecuencia de resonancia y ahora sumaremos el material absorbente al diseño anterior de resonadores de Helmholtz.

Para no modificar el factor de llenado del cristal (ecuación **1.7**), el intervalo de variación de la relación rígido/material absorbente será de 7 cm, ya que es la diferencia entre radio externo (0.15 m) y radio interno (0.07 m), por eso en la figura de la tabla **8** se muestra la comparación entre el modelo ideal de 3 filas con resonadores de Helmholtz, el mismo modelo incorporando 1 cm de material absorbente de  $\sigma = 23000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  y otro diseño incorporando esta vez 6 cm de material absorbente, dejando 1 cm únicamente rígido en el resonador.

Se puede observar como esta mejora reduce los valores del pico de resonancia y del BG, pero aporta un nivel medio de atenuación mayor especialmente después de sobrepasar el BG de Bragg situado a 500 Hz.

Modelo	AA (x 10 <sup>4</sup> ) (dB·Hz)
RRR sin absorbente	1.9461
RRR 1 cm absorbente	2.6803
RRR 6 cm absorbente	6.1409



**Tabla 8 - Áreas de atenuación y espectros de frecuencia de la variación de la anchura del absorbente**

Debido al elevado precio del material, se proponen diseños en los que únicamente uno de los resonadores tenga recubrimiento absorbente y siendo éste de 1 cm. Se estudia de nuevo el orden de colocación que aporte mayor atenuación, siendo ahora **A** el resonador cubierto con el material absorbente.

Como muestra la siguiente tabla, el caso de mayor atenuación, es el RRA, aquel que presenta los resonadores en las primeras filas y la lana en la última. Pese a que las tres combinaciones no presentan unas variaciones muy significativas entre ellas, se procede a estimar el % de pérdida respecto a la colocación de lana en las tres filas. A continuación, se muestran en la Figura 30 los espectros comentados.

Modelo	RRR	ARR	RAR	RRA
AA (x 10 <sup>4</sup> ) (dB·Hz)	1.9461	2.2042	2.1796	2.2132
% de pérdida del AA respecto a AAA	-27.392 %	-17.763 %	-18.681 %	-17.427 %

**Tabla 9 - Áreas de atenuación de las combinaciones del resonador con absorbente y % de pérdidas respecto al modelo AAA**

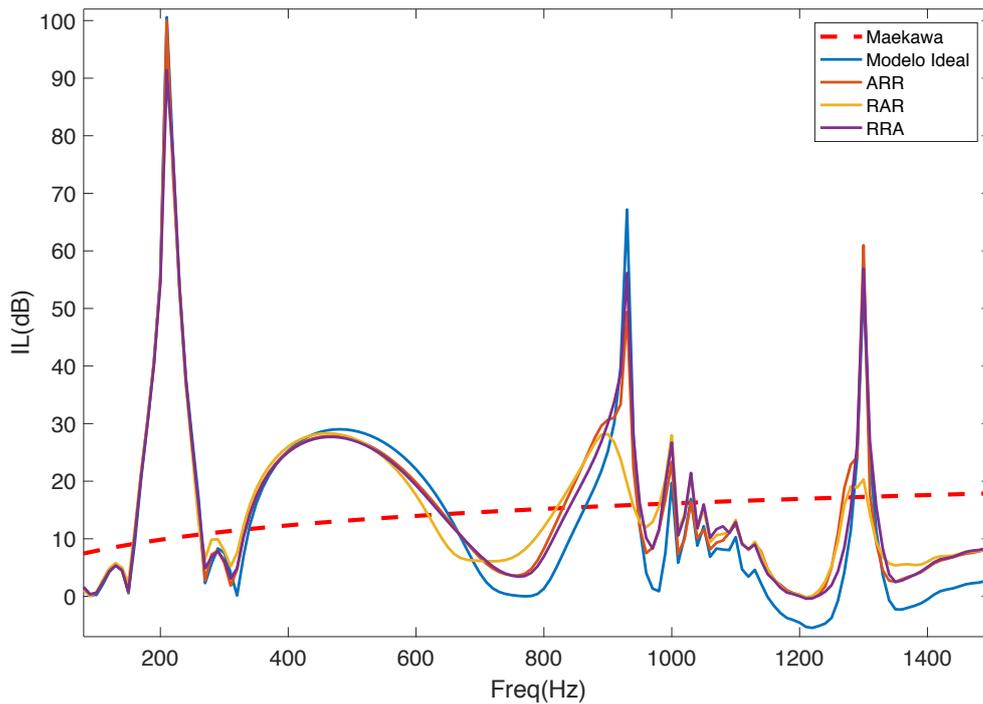


Figura 30 - Espectros de combinaciones en la colocación de la lana

#### 4.8 Modelo finito en cámara anecoica

Con el fin de crear un diseño que se acerque más a una pantalla real basada en CS de segunda generación, se procede a simular una pantalla acústica finita de tres filas con 12 resonadores por fila, situada en una cámara anecoica. Una cámara anecoica, es una cámara de medidas acústicas donde se pretende que el campo creado en su interior sea lo más parecido al campo acústico libre, evitando, asimismo, las posibles interferencias sonoras provenientes del exterior que podrían distorsionar los resultados. Es pues, una sala diseñada para poder reproducir las condiciones de un campo libre, es decir, sin reflexiones en las paredes, pudiendo, por tanto, efectuar en su interior medidas experimentales en condiciones controladas [29].

El diseño utiliza red cuadrada, como en casos anteriores y resonadores de Helmholtz sintonizados a 210 Hz (Figura 31).

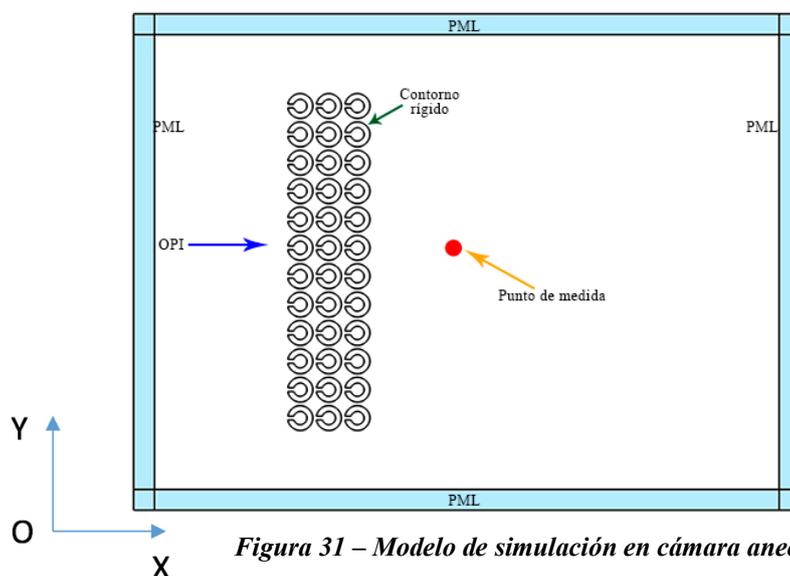
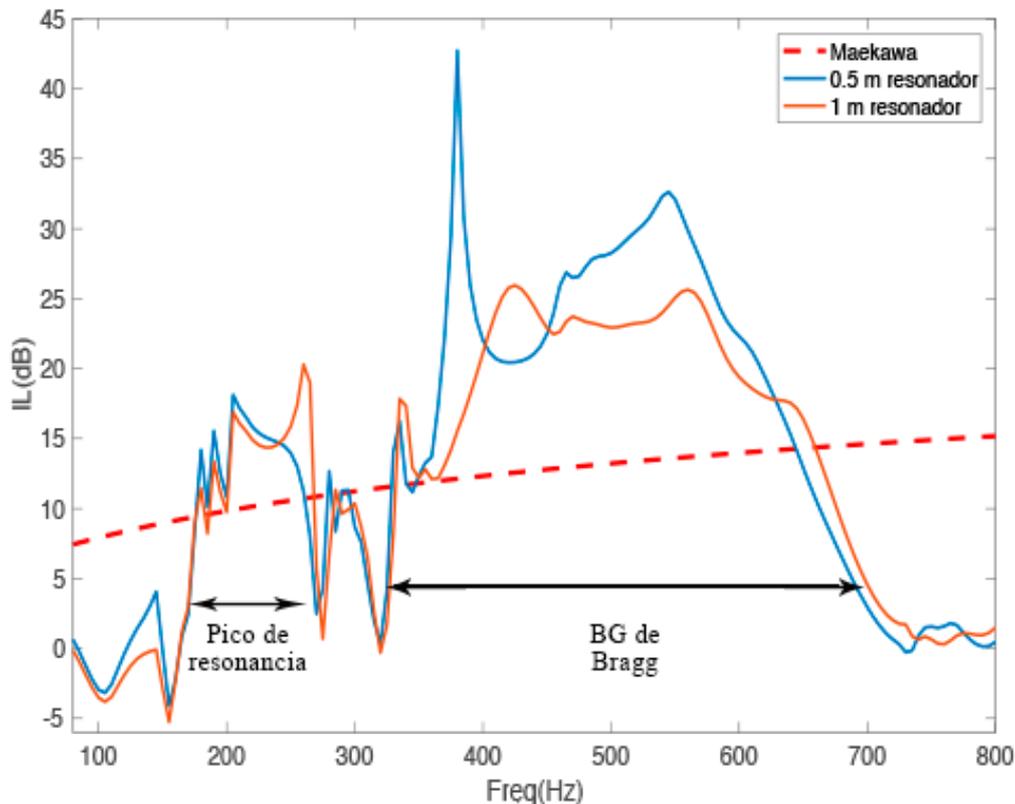


Figura 31 – Modelo de simulación en cámara anecoica

En las Figuras 32 y 33 podemos observar los fenómenos de interés a 210 Hz, el pico de resonancia y, a 500 Hz, el BG, pero esta vez con menor precisión al no tratarse de un modelo ideal. En las medidas tomadas entre dos resonadores (pasillo) se acentúa la atenuación por la dispersión múltiple, mientras que las medidas tomadas tras un resonador tienen mayor atenuación a la frecuencia de resonancia del resonador de Helmholtz.

Los resultados obtenidos para las pantallas basadas en CS son comparables a las pantallas tradicionales, tal y como se observa en las figuras 30, 32, 33 y en la figura de la tabla 8, donde se pueden contrastar los espectros con el del experimento de Maekawa (1.1.2.).

Por último, en la Figura 34 observamos claramente en el mapa de presión del IL a la frecuencia de resonancia de los resonadores (210 Hz) y la zona de sombra de la pantalla que atenúa con menor intensidad conforme aumenta la distancia respecto de la pantalla. También se aprecia como en la primera fila de resonadores se concentra mayor resonancia, siendo esta la que más trabaja mientras que la segunda y tercera fila no trabajan tanto. Esto abre la puerta para el diseño de pantallas basadas en CS incluyendo resonadores que trabajen a distintas frecuencias en la segunda y tercera fila, incrementando así la atenuación global del dispositivo.



*Figura 32 - IL medidos a diferentes distancias tras un resonador*

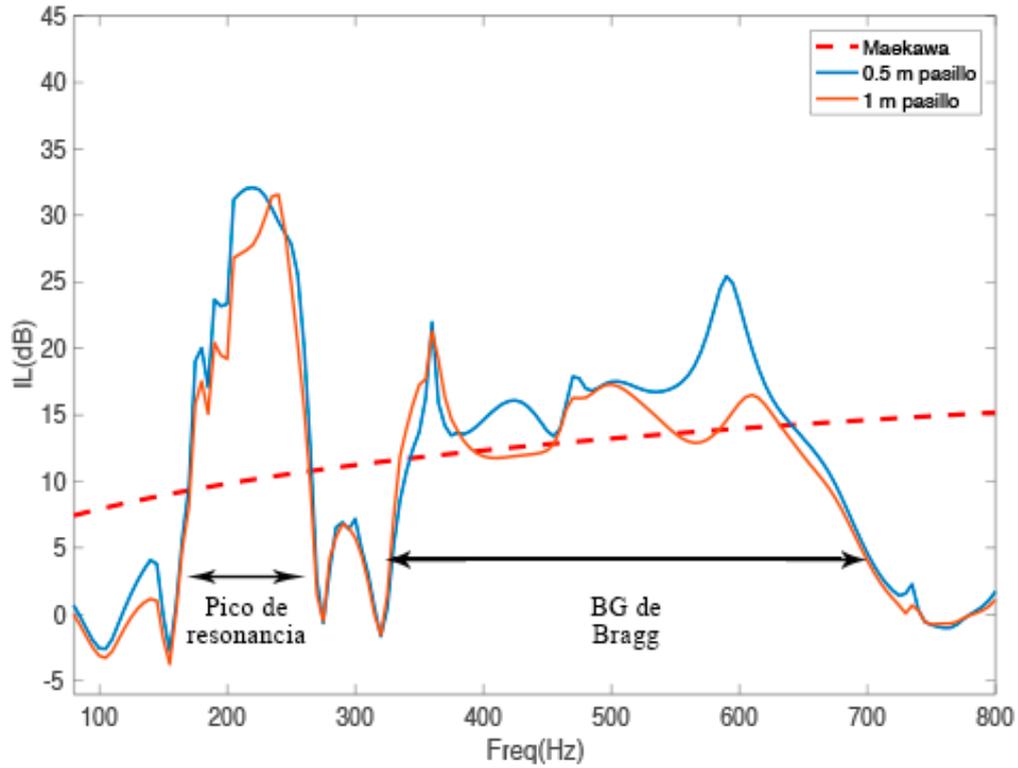


Figura 33 - IL medidos a diferentes distancias tras un pasillo entre resonadores

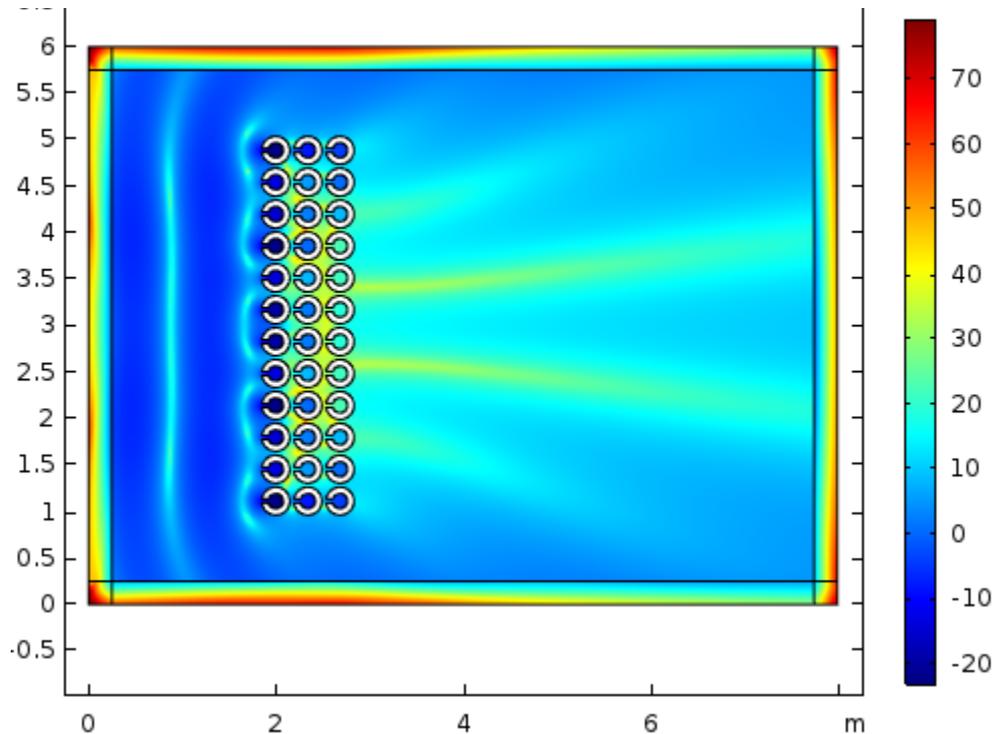


Figura 34 - Mapa de presión del IL (dB) a 210 Hz para el modelo finito de cámara anecoica



## 4.9 Conclusiones

En este trabajo final de grado se han desarrollado conceptos relacionados con materias impartidas en la titulación del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación y en especial aquellas cuya temática es la Acústica Aplicada.

Se ha realizado un recorrido teórico por las actuales y novedosas pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación. Partiendo de esta base se han desarrollado tres modelos numéricos utilizando herramientas informáticas de uso extendido entre la comunidad científica internacional (COMSOL Multiphysics 3.5a Pressure Acoustics (Time Harmonic Analysis)):

Modelo 2D campo libre,

Modelo 2D ideal (semi-infinito)

Modelo 2D de cámara anecoica,

que se utilizan para diseñar a la carta este tipo de pantallas, con un coste computacional bajo.

Se ha hecho hincapié en la interacción que se produce entre la presencia de resonadores Helmholtz y los Band Gaps debidos al fenómeno de dispersión múltiple, visualizando dicha interacción en los espectros obtenidos.

Se han contemplado las diferentes combinaciones de dispersores con la finalidad de conseguir atenuaciones altas con el menor coste posible.

A la hora de diseñar el resonador, se han analizado los mecanismos más apropiados para sintonizarlo, presentando un estudio que permite ajustar el factor de corrección de la longitud de la boca del resonador para este caso en concreto.

Por último, se ha incorporado material absorbente al resonador utilizando para ellos modelos numéricos de materiales porosos. De nuevo se ha buscado la posición más provechosa de la colocación del absorbente, ya que, al ser este un material de precio elevado, se puedan diseñar pantallas con absorbente de precio más reducido.

En resumen, se han presentado modelos numéricos para el diseño a la carta de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación. Estas pantallas presentan niveles de atenuación similares a las tradicionales; no obstante, presentan ventajas frente a estas como que se pueden diseñar y construir bajo demanda, seleccionando las frecuencias que quieren ser atenuadas. Además, son permeables al agua y al aire, portables y estéticamente más acordes al medio que las rodea.

Como propuesta de trabajo futuro se propone la profundización en la parametrización del factor de corrección ya iniciada en este trabajo, para hacerla extrapolable a más diseños. También continuar concretando más detalles de diseño que contribuyan a la construcción de pantallas acústicas de CS con la mayor precisión posible según los parámetros deseados por la demanda.

En este trabajo se ha trabajado con resonadores Helmholtz cuya abertura está alineada con la dirección de propagación de la onda. Sin embargo, existen indicios que indican que la frecuencia de resonancia varía si se varía la orientación de dichas aberturas, como continuación de la línea de investigación se propone profundizar en esta variación relacionada con la orientación de la onda incidente en la abertura del resonador.



## Capítulo 5. Agradecimientos

*Quiero expresar mi mayor agradecimiento en primer lugar a mi familia, los que están y los que no, por el apoyo incondicional en todos estos años de larga carrera, y muy en especial a mi madre que contra toda adversidad ha seguido confiando en mí.*

*Mención especial a mis dos tutores, Sergio Castiñeira-Ibáñez y Juan V. Sánchez-Pérez, que me han hecho partícipe de un proyecto de investigación tan interesante como es el suyo con una pedagogía y paciencia inconmensurables, haciendo que salga adelante este trabajo de final de grado con mucha motivación.*

*Gracias también a todos mis profesores de la Universitat Politècnica de València, que a lo largo de estos años tantos conocimientos me han aportado para llegar hasta aquí. También a aquellos profesores de la Università degli Studi di Cagliari (Cerdeña) y tanta gente que en mi estancia en Paraguay me enseñó con su ejemplo y con su sabiduría en muchos campos de mi formación, académica y vital.*

*Agradecer por último a Rubén Flores, Nicolò Incardona, Guillermo Ayala, Sento Ferrer, Sara Dorado, Mar Torró, Noa Toledo, Blanca Molina, Juanma Aguilar, Pablo Querol, Fran Vila, Ángel Martínez, Andreu Climent, Jaume Soler, Irene García y todas mis amistades que habéis estado ahí en estos años de vida universitaria compartiendo alegrías y penas, estudio y dedicación, haciendo el camino más llevadero.*

## Capítulo 6. Bibliografía

- [1] Martínez Mora, J. A.; Sánchez-Pérez, J. V. “*Apuntes de Acústica Urbanística y Medioambiental*”, 2016.
- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS).
- [3] Bravo Plano-Sala, J. M. “*Apuntes de Acústica Ambiental*”, 2017.
- [4] Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J.V. and Garcia-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] Maekawa, Z., “*Noise reduction by screens*”. Applied Acoustics. N° 1, pp. 157-173. 1968.
- [6] Martínez-Sala R., Sancho J., Sánchez-Pérez J.V., Gómez V., Llinares J., Meseguer F., *Sound attenuation by sculpture*, Nature, **378**, 241, 1995.
- [7] Romero García, V. “*On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques*”. Tesis. Universidad Politècnica de Valencia, 2010.



- [8] Economu E. N. and Sigalas M. M., *Physical review B* 48, 13434, 1993.
- [9] Chilet Murgui, C., “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”. Tesina Final de Máster. EPSG, 2012.
- [10] Castiñeira-Ibáñez, S., “Análisis y modelado de la fenomenología ondulatoria asociada al diseño de barreras acústicas basadas en conjuntos de dispersores aislados. Homologación de dispositivos” Tesis Doctoral, 2014.
- [11] Kittel, C. – “*Introduction to Solid State Physics*” 8a Ed., 2004.
- [12] Rubio, C.; Castiñeira-Ibáñez, S.; Sánchez-Pérez, J. V.; Candelas, P.; Belmar F. and Uris, A.; “Open Acoustic Barriers: A New Attenuation Mechanism”, *Advances in Noise Analysis, Mitigation and Control*, Cap. 6, 2016.
- [13] Castiñeira-Ibáñez, S.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez J.V.; and L. M. Garcia-Raffi “*Overlapping of acoustic bandgaps using fractal geometries*” - EPL, 92, 2010.
- [14] Romero-García V.; Fuster E.; García-Raffi L.M.; Sánchez-Pérez E.A.; Sopena M., Llinares J.; Sánchez-Pérez J.V. “*Band gap creation using quasiordered structures based on sonic crystals.*” *Applied Physics Letters*, 2006.
- [15] Kinsler L.E.; Frey A. R., Coppers A. B.; and Sanders J.V., “*Fundamentals of acoustics*” 3rd Edn. Ed. Wiley, Nueva York, 1982.
- [16] Rossell Turull, I.; Soler Rocasalbas, S.; Vila Deutschbein, C., “*Resonadores de Helmholtz de boca rectangular y cuello de longitud pequeña*”, *Tecniacústica Terrassa*, 2005.
- [17] Calton M. F.; Sommerfeldt S. D., “*Modeling acoustic resonators: From theory to application*”, *Inter.noise*, San Francisco, 2015.
- [18] Alton Everest, F.; Pohlmann, K.C.; “*Master Handbook of Acoustics*”, Fifth Edition, 2009.
- [19] Movchan A.B. and S. Guenneau. S., “*Split-ring resonators and localized modes.*” *Phys. Rev B*, 70, 125116, 2004.
- [20] Hu X. and Chan C., “*Two-dimensional sonic crystals with Helmholtz resonators*”, *Physical Review E*, 71, 055601R, 2005.



- [21] 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.
- [22] Cáceres, J. M.; García Hernández, J.E. and Rincón, J.M., “*Characterization of fibers as rockwool for insulation obtained from Canary Islands basalts*” Tenerife, 1996.
- [23] Delany, M.E.; Bazley, E.N, “*Acoustical properties of fibrous absorbent materials*”, Applied Acoustics, Vol. 3, pp. 105 -116, 1970.
- [24] Romero-García, V.; García-Raffi L.M.; Sopena, M.; Sánchez-Pérez J.V.; Herrero, J.M.; García-Nieto, S and Blasco, J., Acoust. Soc. Am. **125**, No. 6, 2009.
- [25] Acoustics Module Users Guide, COMSOL 3.5a, 2008.
- [26] Houcque, D., “*Introduction to MATLAB for engineering students*”, 2005.
- [27] García-Raffi, L. M.; Romero-García, V.; and J.V. Sánchez-Pérez, J. V., “*Determination of the thickness of Sonic Crystal Acoustic Barriers using evanescent modes*”, Internoise 2010 the 39th Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 978-90-8578-133-2, Lisboa, 2010.
- [28] Peiró-Torres, M.P.; Redondo, J.; Castiñeira-Ibáñez, S.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez J.V. “*Interferences in locally resonant Sonic metamaterials formed from Helmholtz resonators*”, Appl.Phys. Lett. **114**, 2019.
- [29] Sánchez-Pérez, J. V. “*Cristales de sonido basados en estructuras minimalistas*”, Memoria de Tesis, UPV, 1998.
- [30] Atiénzar Navarro, R., “*Diseño y modelado de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido 2D para el ruido de ferrocarril*”, Tesina final de Máster, EPSG, 2016.
- [31] Thome Coppo, N. J. “*Ecuaciones en derivadas parciales*”, Apuntes de Matemáticas 3, 2014.
- [32] Berenger, J.P., “*A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves*”, Journal of Computational Physics, 114, 185-200, 1994.



## Capítulo 7. HOJA DE ABREVIATURAS

- **A** – Resonador de Helmholtz con material absorbente.
- **AA** – Área de atenuación.
- **BG** – Banda prohibida de transmisión (Bang Gap, en inglés).
- **CS** – Cristal de sonido.
- **D** – Dispersor cilíndrico rígido.
- **IL** – Pérdidas de Inserción o atenuación acústica en Decibelios (Insertion Loss, en inglés).
- **R** – Resonador de Helmholtz.
- **OPI** – Onda plana incidente.
- **PML** – Capas perfectamente adaptadas (Perfectly Matched Layers, en inglés).
- **TFG** – Trabajo de Fin de Grado
- **2D** – Que tiene dos dimensiones.

## Capítulo 8. ANEXOS

### 8.1 Método de los elementos finitos

En la actualidad encontramos diferentes técnicas matemáticas para la resolución de problemas relacionados con la transmisión, propagación y reflexión de ondas y su interacción con dispersores y resonadores acústicos. En el presente trabajo se ha optado por el método de los elementos finitos (MEF) utilizando un software de simulación llamado COMSOL Multiphysics, que implementa potentes simulaciones con los modelos de estructuras de dispersores y resonadores y aplica dicho método para analizar el comportamiento de las ondas en ellos. Este método resuelve formas geométricas complejas en las que se dan diversos fenómenos acústicos, convirtiendo problemas de ecuaciones diferenciales en problemas algebraicos por medio de la discretización de un modelo continuo en conjuntos de elementos interconectados entre sí. Para la resolución de los problemas, es necesario definir la malla de cálculo, la geometría, las condiciones de contorno y discretizar el dominio de resolución. [10]

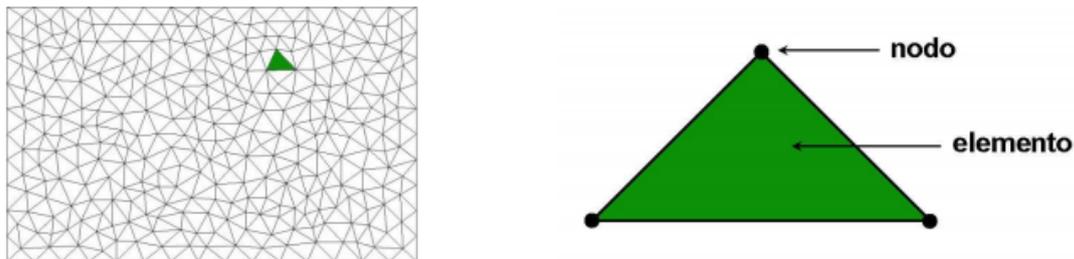


Figura 35 - Ejemplo de mallado triangular (izda) y elemento de malla con nodos (dcha) [30]

### 8.2 Conceptos teóricos de las simulaciones

#### 8.2.1 Ecuación de ondas

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

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

Para este trabajo, con COMSOL Multiphysics se realiza el análisis armónico temporal (**Time – harmonic analysis**) para obtener los espectros en frecuencia y los mapas de presión. Con este tipo de análisis, la ecuación queda de la siguiente manera:

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

con la presión dependiendo ahora de la posición y la frecuencia:

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

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

$$\omega = 2\pi f$$

En este trabajo se considera el caso de 2D, con la onda incidente plana y la ecuación adopta la forma:

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

siendo  $k_z$  el número de onda fuera del plano, que por defecto es nulo. Al no existir en este caso monopolos ni dipolos, también serán nulos  $\vec{q}$  y  $\vec{Q}$ , con lo que la ecuación de ondas para el análisis armónico temporal queda simplificada a:

$$\nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p) \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c_s^2} p = 0$$

### 8.2.2 Condiciones de contorno

A partir de la expresión anterior para el modelo de Ecuaciones en Derivadas parciales, las condiciones de contorno que se utilizan en este trabajo son las siguientes:

- **Contorno rígido (muro)**

La condición de contorno rígido es de tipo Neumann, lo que implica que la derivada parcial de la presión en la superficie es nula [31]. Esto significa que, la amplitud de la presión en la superficie será máxima o mínima.

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

- **Contorno blando**

La condición de contorno blando es de tipo Dirichlet, lo que implica que la amplitud de la presión en la superficie es nula [31]. Es una aproximación apropiada para una interfase líquido-gas.

$$p = 0$$

- **Fuente de presión**

Esta condición significa que se especifica la presión acústica en el contorno:

$$p = p_0$$

Para el análisis temporal,  $p_0$  es la amplitud de la presión de origen.

- **Radiación**

La condición de contorno radiación permite a la onda salir del dominio de modelado, con reflejos mínimos o nulos, es decir, el campo dispersado consiste solo en ondas salientes. Esta condición es también llamada condición de *Sommerfeld*. Se puede aplicar a ondas planas, cilíndricas y esféricas.

Para incluir una onda plana en el contorno, existen dos posibilidades:

–Utilizar  $p = p_0$ , valor por defecto pero que se puede cambiar. Este valor es el que se impone en el contorno y en la dirección dada por un vector unitario normal a la superficie  $\vec{n}_x$ .

–Utilizar  $p = p_i$ , donde la presión en la superficie toma el valor que se haya definido en la opción *Physics/Scalars Variables* del menú de Comsol.

La ecuación de esta condición de contorno viene dada por la expresión:

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

### 8.2.3 Condiciones de contorno coincidentes o adaptadas: PML

En los diseños de este trabajo se han empleado subdominios geométricos auxiliares como son las capas perfectamente adaptadas (*Perfectly Matched Layers* en inglés).

Este modelo fue presentado por Berenguer [32] en 1994 y ayuda a simular la anteriormente explicada condición de *Sommerfeld* para las situaciones en las que no se puede describir la radiación saliente con número de onda conocido y dirección de propagación. Sin ser una condición de contorno, una PML absorbe la radiación, disminuyendo las ondas acústicas en su interior de forma exponencial. Tiene una gran utilidad para una amplia gama de ángulos de incidencia ya que es capaz de emular límites evitando reflexiones. [32]

### 8.2.4 Cámara anecoica

Es un espacio de toma de medidas acústicas en el que el campo que se crea en su interior pretende ser lo más parecido al campo acústico libre, evitando las reflexiones en las paredes internas y eliminando las posibles interferencias sonoras del exterior que podrían alterar los resultados. El tamaño de los objetos y el intervalo de frecuencias de análisis dependen de las dimensiones de la cámara [10]. En el presente trabajo se utiliza una cámara con dimensiones de  $8 \times 6 \times 3 \text{ m}^3$ , estando comprendida entre 10 y 20 veces la periodicidad de los CS a analizar. Las paredes de esta cámara serán PMLs, explicadas en el anexo anterior.



Figura 36 - Fotografía de la cámara anecoica de la ETSA UPV

### 8.2.5 Programa Matlab para calcular el AA

A continuación, se muestra un programa de Matlab propio que ha sido utilizado a lo largo de este trabajo para el cálculo de las AA, parámetro de gran interés para el diseño de nuestras pantallas acústicas de CS.

```
##### Programa creado por David Ramirez Solana #####
#####                               Anyo 2019                               #####
#####                               #####
clear all
close all
clc

archivos = [];

varios_espectros ={'Espectro-dispersor1.txt','Espectro-
dispersor2.txt','Espectro-dispersor3.txt','Espectro-dispersor4.txt',};

for j=1:4
    archivos =[archivos load(varios_espectros{j})];

%Separamos las columnas de los archivos de texto de los espectros en:
%Valores
B= archivos(:,2*j-1);
%Frecuencias
A =archivos(:,2*j);

%Inicializamos las variables
n=length(B);
P=zeros(1,n);
F=zeros(1,n);

for i=1:n
%Si el valor es mayor de cero, se anyade al vector a representar y
calcular,
%sino, se iguala a cero
    if A(i)>=0
        P(i)=A(i);
        F(i)=B(i);
    else
        P(i)=0;
        F(i)=B(i);
    end
end
hold on;
%mostramos la grafica de todos las AA de los espectros
plot(F,P,'k');
%La funcion trapz calcular? el AA para cada caso y
%guardaremos los valores del AA de cada espectro en un vector
AREA(j) = trapz(F,P);
end
%mostramos el vector con los resultados
disp('EL AREA DE ATENUACION ES:');
AREA
```