



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA SOBRE LA ATENUACIÓN  
ACÚSTICA OBTENIDA POR UNA PANTALLA BASADA  
EN CRISTALES DE SONIDO DEPENDIENDO DE LA  
MORFOLOGÍA DE LOS DISPERSORES ACÚSTICOS  
UTILIZADOS

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: García San Félix, Pablo

Tutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

Cotutor/a: Bravo Plana-Sala, José María

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## Resumen

Una de las soluciones para el control del ruido en su transmisión viene dada por la utilización de pantallas acústicas. Una pantalla acústica clásica consiste básicamente en un medio continuo de material rígido que se interpone entre la fuente emisora de sonido y el receptor. Este tipo de pantallas presenta una atenuación debida fundamentalmente a la Ley de masas. En los últimos años han surgido pantallas acústicas alternativas, basadas en unos dispositivos formados por dispersores acústicos inmersos en aire y ordenados de manera periódica, conocidos como cristales de sonido. El mecanismo de control de ruido utilizado por estos dispositivos se basa en el fenómeno de la "dispersión múltiple". Hasta ahora la geometría utilizada para el diseño de los dispersores que forman las pantallas acústicas basadas en cristales de sonido ha sido la geometría cilíndrica. En este proyecto se analizan, mediante la herramienta informática COMSOL MULTIPHYSICS, basada en el análisis por elementos finitos, diferentes soluciones para el apantallamiento del ruido utilizando dispersores elípticos.

## Resum

Una de les solucions per al control del soroll en la seua transmissió ve donada per la utilització de pantalles acústiques. Una pantalla acústica clàssica consisteix bàsicament en un medi continu de material rígid que s'interposa entre la font emissora de so i el receptor. Aquest tipus de pantalles presenta una atenuació deguda fonamentalment a la Llei de masses. En els últims anys han sorgit unes pantalles acústiques alternatives a aquestes, basades en uns dispositius formats per dispersors acústics inmersos en aire i ordenats de manera periòdica, coneguts com a cristalls de so. El mecanisme de control de soroll utilitzat per aquests dispositius es basa en el fenomen de la "dispersió múltiple". Fins ara la geometria utilitzada per al disseny dels dispersors que formen les pantalles acústiques basades en cristalls de so ha sigut la geometria cilíndrica. En aquest projecte s'analitzen, mitjançant l'eina informàtica COMSOL MULTIPHYSICS, basada en l'anàlisi per elements finits, diferents solucions per a l'apantallament del soroll utilitzant diferents geometries relacionades amb la xarxa elemental de disseny i la pròpia geometria dels dispersors que la componen.



## Abstract

One of the solutions to control noise transmission is the use of acoustic barriers. An acoustic barrier basically consists of a continuous medium of rigid material being interposed between a sound source and a receiver. These kinds of barriers have an attenuation mainly due to the Mass Law. In recent years, some alternatives to these acoustic barriers have emerged, based on devices formed by acoustic scatterers immersed in air and arranged in a periodic manner, known as sonic crystals. The noise control mechanism used by these devices is based on the phenomenon of “multiple scattering”. So far, the geometry used for the design of the scatterers that form the acoustic barriers based on sonic crystals has been the cylindrical one. In this project, using the COMSOL MULTIPHYSICS software tool, based on finite system analysis, different solutions for noise shielding are analyzed using different geometries related to the elementary design network and the geometry of the scatterers that compose it.



# Índice

## Tabla de contenido

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Capítulo 1. | Introducción .....   | 1  |
| 1.1         | Pantallas acústicas: conceptos básicos.....  | 1  |
| 1.1.1       | Ruido .....  | 1  |
| 1.1.2       | Breve historia de las pantallas acústicas .....  | 1  |
| 1.1.3       | Perdidas por inserción (IL).....   | 2  |
| 1.2         | Pantallas acústicas tradicionales .....  | 3  |
| 1.2.1       | Geometría.....   | 3  |
| 1.3         | Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido .....   | 4  |
| 1.3.1       | Conceptos básicos .....  | 4  |
| 1.3.2       | Difracción de Bragg .....  | 5  |
| Capítulo 2. | Objetivos .....  | 7  |
| 2.1         | Objetivos generales .....  | 7  |
| 2.2         | Objetivos específicos .....  | 7  |
| Capítulo 3. | Metodología .....  | 8  |
| 3.1         | Proceso de realización del proyecto .....  | 8  |
| 3.2         | Tareas .....   | 9  |
| Capítulo 4. | Análisis de resultados .....   | 10 |
| 4.1         | Descripción de los modelos numéricos empleados.....  | 10 |
| 4.1.1       | Herramientas de análisis .....   | 10 |
| 4.1.2       | Método de análisis.....  | 11 |
| 4.2         | Estudio de forma de red y factor de llenado.....   | 12 |
|             | .....  | 12 |
| 4.2.1       | Estudio básico de las características de una red de cristales de sonido .....                        | 12 |
| 4.2.2       | Diseño de un modelo ideal.....   | 16 |
| 4.2.3       | Análisis de la primera versión de redes de cristales de sonido.....                                  | 19 |
| 4.3         | Estudio de la implementación de resonadores de Helmholtz en una red de cristales de sonido.....      | 21 |
|             | .....  | 21 |
| 4.3.1       | Diseño de los resonadores de Helmholtz .....   | 21 |
| 4.3.2       | Análisis de resultados .....   | 24 |
| 4.3.3       | Conclusiones sobre el uso de resonadores de Helmholtz en el interior de dispersores circulares. .... | 25 |



|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 4.4         | Estudio de la implementación de dispersores elipsoidales en una red de cristales de sonido.   | 26 |
| 4.4.1       | Metodología de diseño de los dispersores elípticos. ....  | 26 |
| 4.4.2       | Análisis de resultados. ....  | 27 |
| 4.4.3       | Conclusiones acerca de la viabilidad de dispersores elípticos.....  | 31 |
| 4.5         | Estudio de la implementación de resonadores de Helmholtz en el interior de dispersores elipsoidales en una red de cristales de sonido.....            | 32 |
|             | .....   | 32 |
| 4.5.1       | Metodología de diseño de los resonadores implementados en el interior de los dispersores elípticos. ....  | 32 |
| 4.5.2       | Análisis de resultados. ....  | 33 |
| 4.5.3       | Conclusiones sobre de la implementación de resonadores de Helmholtz en el interior de resonadores elipsoidales en una red de cristales de sonido..... | 36 |
| Capítulo 5. | Conclusiones .....  | 37 |
| Capítulo 6. | Apéndice .....  | 39 |
| 6.1         | Abreviaturas .....  | 39 |
| Capítulo 7. | Bibliografía .....  | 40 |
| Capítulo 8. | Agradecimientos .....   | 41 |

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Pantallas acústicas: conceptos básicos

#### 1.1.1 Ruido

El fin último de las barreras acústicas es el de atenuar el ruido tanto como sea posible. En un contexto de un aumento de densidad de población en las ciudades y, con ello, un aumento del tráfico es cada vez más necesario contar con herramientas para luchar contra el ruido. Se define el ruido como todo sonido no deseado, molesto o peligroso. Tradicionalmente, el uso de barreras de sonido ha estado enfocado en frenar el ruido proveniente del tráfico y/o industria, ya que estas fuentes son las más comunes y problemáticas. El ruido en los países industrializados puede llegar a generar problemas de salud pública, pudiendo generar pérdidas de audición o problemas de insomnio o estrés [1]. Es por ello por lo que las pantallas acústicas tienen un papel fundamental en la salud pública ahora y en el futuro.

#### 1.1.2 Breve historia de las pantallas acústicas

Las primeras barreras acústicas nacieron a raíz de los también primeros estudios sobre el ruido en autopista en la California de los años 50 [2], aunque la primera de ellas no se construyera hasta el 1968 [3]. Tradicionalmente una pantalla acústica es un elemento sólido en forma de pared rectangular alargada horizontalmente que tiene como fin último evitar el paso de parte de la energía acústica que impacta en ella. Más recientemente nace, a raíz del trabajo con cristales de sonido por parte de John Pendry en los años 90, un nuevo diseño de pantalla acústica, las pantallas basadas en cristales de sonido [4], las cuales proporcionan atenuación acústica pero además son permeables, por lo que ofrecen cierta transmisión de luz, generando menor impacto paisajístico. En estas va a estar enfocado este proyecto.



Figura 1: Pantalla basada en cristales de sonido



Figura 2: Pantalla acústica tradicional

### 1.1.3 *Perdidas por inserción (IL)*

Para poder estudiar la eficacia de las barreras acústicas, tradicionalmente se ha empleado el parámetro de “pérdidas por inserción” que, atendiendo a sus siglas anglosajonas, recibe la nomenclatura (IL). Se definen las pérdidas por inserción como la reducción del nivel de presión de sonora en la recepción de un ruido, con relación al nivel que hubiera habido si no hubiese habido una pantalla que afecte a la transmisión de la onda sonora. Este dato ayuda a comparar y entender la eficacia de las pantallas acústicas y tomará un valor diferente para cada frecuencia de estudio. La forma de calcularlo será a través de la siguiente expresión:

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

donde  $P_d$  es la presión acústica en ausencia de pantalla acústica y  $P_i$  es la presión acústica empleándose la pantalla [5].

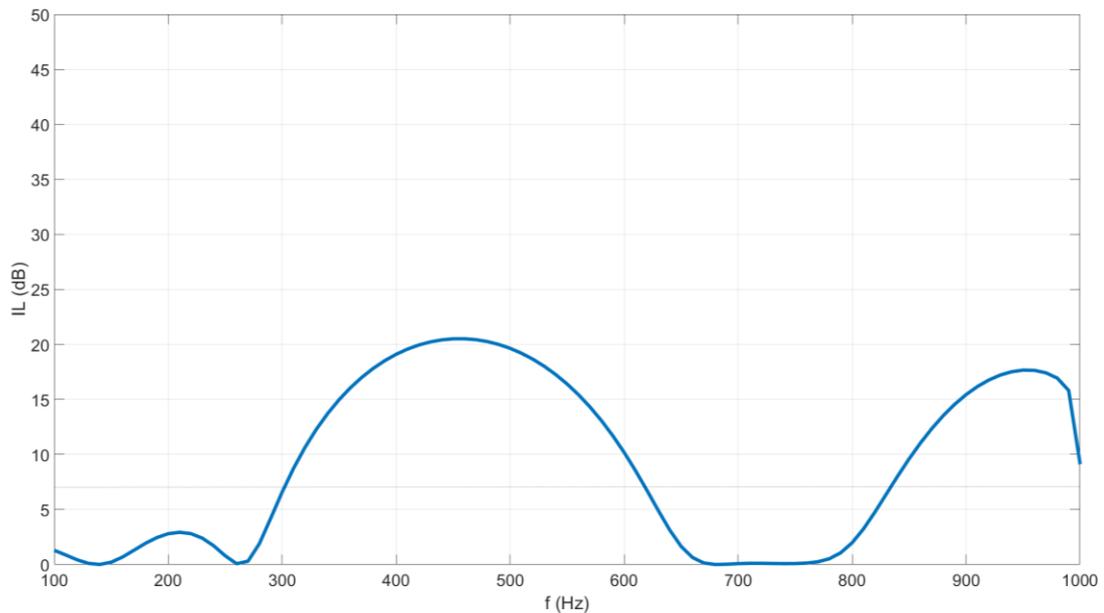


Figura 3: Ejemplo de una gráfica de IL dependiente de la frecuencia.

## 1.2 Pantallas acústicas tradicionales

### 1.2.1 Geometría

Las pantallas acústicas tradicionales consisten, fundamentalmente, en elementos sólidos y uniformes, no permeables, que se interponen entre una fuente y un receptor con el fin de atenuar el ruido causado por dicha fuente. La eficacia de la pantalla en cuestión depende tanto de la posición su posición relativa entre emisor y receptor, así como de su geometría, básicamente de su altura y espesor. [5]

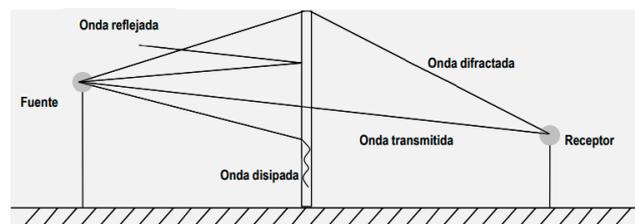


Figura 4: Pantalla acústica tradicional [1].

La señal más importante (con mayor energía sonora) que llega al receptor es la señal refractada por el borde o cumbrera de la barrera.

## 1.3 Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido

### 1.3.1 Conceptos básicos

El uso de la tecnología de cristales de sonido (CS, a partir de ahora) en pantallas acústicas es muy reciente y aún tiene un carácter fundamentalmente experimental. Hay tres parámetros básicos que podemos usar para definir el tipo de pantalla de CS:

- Tipo de red (cuadrada, triangular, etc.)
- Parámetro de red,  $a$ , se puede observar en las Figuras 6 y 7. Expresa la distancia más corta entre centros geométricos de los nodos que componen la red.
- Factor de llenado, representado en la Figura 5, que indica el porcentaje del área de la red está ocupado por los dispersores al área de la red total y cuya forma de ser calculado se encuentra expresado en la Tabla 1.

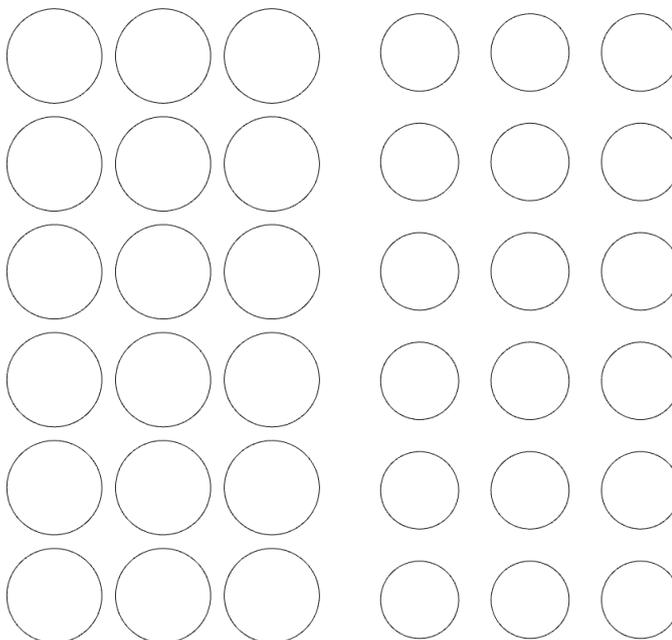


Figura 5: Redes cuadradas con un factor de llenado de 60 (izquierda) y 40 (derecha).

| Red cuadrada                | Red triangular                       |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| $ff = \frac{\pi D^2}{4a^2}$ | $ff = \frac{\pi 4r^2}{2\sqrt{3}a^2}$ |

Tabla 1: Formula de factor de llenado (ff) según las características de la red, donde  $D$  es el diámetro del dispersor y  $r$  su radio

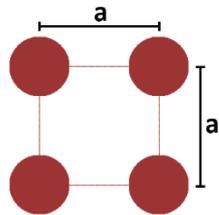


Figura 6: Red cuadrada.

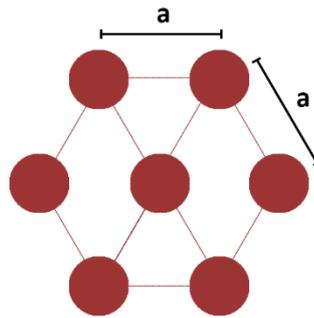


Figura 7: Red triangular.

### 1.3.2 Difracción de Bragg

El motivo principal para emplear redes de dispersores es su capacidad para atenuar bajas frecuencias. Esta atenuación se produce gracias a la diversas reflexiones que sufrirá una onda incidente sobre los dispersores acústicos, como es observable en la Figura 8. Mientras una pantalla acústica tradicional ofrece una atenuación constante en el espectro de frecuencias, aunque poco efectiva a bajas frecuencias, una pantalla acústica basada en CS permite ajustar dicha atenuación modificando las características descritas en el apartado 1.3.1.

Para saber cómo diseñar la red en función de donde se desea situar la banda de atenuación de Bragg se necesita conocer la fórmula de Bragg, para una red cuadrada:

$$f_{\text{Bragg}} = \frac{c}{2a} \text{ (Hz)} \quad (1.2)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido en el medio y  $a$  el parámetro de red.

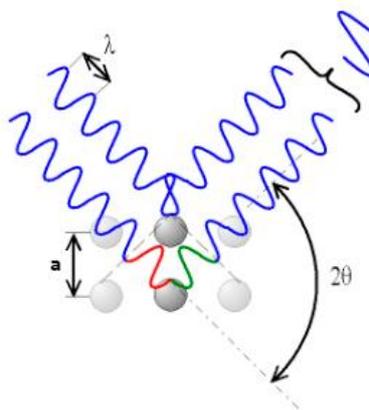


Figura 8: Interferencia constructiva según el ángulo  $2\theta$ . [6]



El origen de esta fórmula esta su definición analítica:

$$2a \sin \theta = n\lambda \quad (1.3)$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre la onda incidente y la refractada. De esta forma podemos comprobar que para que se produzca una reflexión de Bragg en el caso de una incidencia normal de onda y una red cuadrada, la longitud de onda deberá ser el doble de el parámetro de red.

En el caso de redes triangulares se sabe que la frecuencia de Bragg obedecerá la siguiente fórmula:

$$f_{\text{Bragg}} = \frac{c}{\sqrt{3}a} \text{ (Hz)} \quad (1.4)$$



## Capítulo 2. Objetivos

### 2.1 Objetivos generales

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el de estudiar la viabilidad del uso de dispersores elípticos con y sin resonadores integrados en el diseño de barreras de CS. Se pretende, además, compararlas con sus homólogas con dispersores circulares.

### 2.2 Objetivos específicos

Para la ejecución de este proyecto será necesario aprender a emplear una herramienta de simulación física, en este caso COMSOL MULTIPHYSICS. Además, también será necesario obtener conocimientos a nivel teórico sobre las pantallas acústicas tradicionales, pero, sobre todo, sobre las pantallas basadas en CS, para lo que se requerirá una revisión trabajos previos. Otro objetivo para desarrollar este proyecto será el de crear un ecosistema y unos estándares de trabajo para el estudio de modelos teóricos, obtención de resultados y representación de estos. Será clave, por último, plantear los diferentes diseños que pavimentaran el camino a un modelo elíptico solvente y extraer de ellos la información necesaria para mejorarlo.



## Capítulo 3. Metodología

### 3.1 Proceso de realización del proyecto

Atendiendo a los objetivos descritos, se establecen las siguientes tareas que servirán de guía en el desarrollo del TFG. Para completar este proyecto han sido necesarias las siguientes fases:

- Aprendizaje de la base teórica tanto de las pantallas acústicas tradicionales como de las basadas en SC empleando, tantos apuntes de clase como artículos de investigación proporcionados por los tutores del proyecto.
- Aprendizaje del uso del programa de simulación de análisis de elementos finitos COMSOL para la creación de redes de dispersores sencillas y posteriormente avance en el manejo del programa para lograr crear modelos más complejos.
- Recopilación y procesado de datos de diversos modelos a través de Matlab de forma ordenada para así crear un proceso lógico.
- Análisis de resultados con el fin de llegar a conclusiones. Para ello se emplean una de representación gráfica de espectros de IL, así como de áreas de atenuación.
- Paralelamente al diseño de modelos y procesado de datos, se fueron generando de informes acerca de los distintos modelos que luego han servido para redactar esta memoria.



### 3.2 Tareas

| Tareas   | Año 2022 |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   | Año 2023 |   |   |   |   |    |    |
|--|----------|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|----------|---|---|---|---|----|----|
|  | E        | F | M | A | M | Jn | Jl | A | S | O | N | D | E        | F | M | A | M | Jn | Jl |
| Familiarización el marco teórico                                 | ■        |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |          |   |   |   |   |    |    |
| Aprendizaje de manejo de COMSOL                                  |          | ■ | ■ |   |   |    |    |   |   |   |   |   |          |   |   |   |   |    |    |
| Modelización. Primeros estudios básicos                          |          |   |   | ■ | ■ | ■  |    |   |   |   |   |   |          |   |   |   |   |    |    |
| Modelización. Análisis de los distintos entornos de modelización |          |   |   |   |   |    | ■  | ■ | ■ |   |   |   |          |   |   |   |   |    |    |
| Diseño de la primera versión de red de dispersores               |          |   |   |   |   |    |    |   |   | ■ | ■ |   |          |   |   |   |   |    |    |
| Modelos de resonadores integrados                                |          |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   | ■        | ■ |   |   |   |    |    |
| Estudio de orientación   |          |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |          |   | ■ | ■ |   |    |    |
| Redacción de memoria   |          |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |          |   |   |   | ■ | ■  |    |
| Presentación Final   |          |   |   |   |   |    |    |   |   |   |   |   |          |   |   |   |   |    | ■  |

## Capítulo 4. Análisis de resultados

### 4.1 Descripción de los modelos numéricos empleados

Se diseñarán modelos en dos dimensiones con la red de dispersores como único elemento entre la fuente y el punto de medida. Este último se situará siempre a 1 metro de la barrera. El objetivo de estas las simulaciones será lograr resultados parecidos a los que podrían obtenerse en una cámara anecoica. Los puntos que seguir a lo largo del proceso de diseño de los siguientes modelos será el siguiente:

- Definir una frecuencia de Bragg para así calcular el parámetro de red necesario.
- Decidir que geometría de red emplearemos.
- Definir un área delimitada por paredes a las que se asignan una condición de radiación de onda plana que permite que una onda plana salga del recinto diseñado con mínimas reflexiones si la incidencia es normal.
- Se define un campo de presión en segundo plano de tipo onda plana con una amplitud de presión de un pascal y una dirección de onda de unidad en el eje x.
- Se construyen los elementos dispersores dándoles un contorno rígido y situándolos según se haya decidido anteriormente.
- Se definen las pérdidas por inserción y se reflejan en un resultado gráfico junto a un conjunto de frecuencias desde 0 hasta 2000 Hz, que es donde se ubican los ruidos más dañinos y comunes.
- Por último, se inicia el cálculo y se guardan los resultados en archivos de texto que luego se procesan en Matlab con el fin de lograr una mayor personalización y una mejor comprensión a la hora de comparar gráficas.

#### 4.1.1 Herramientas de análisis

Para el análisis de los datos generados por los modelos creados emplearemos dos herramientas: IL, de la que se ha hablado en punto 1.1.3, y el AA (Área de atenuación). Definiremos el AA como el área comprendida entre el rango positivo de los espectros de atenuación (IL) y el umbral de la línea 0dB en el rango de frecuencias seleccionado. Este último parámetro valora la capacidad de atenuación de la red dentro de un rango de frecuencias establecido.

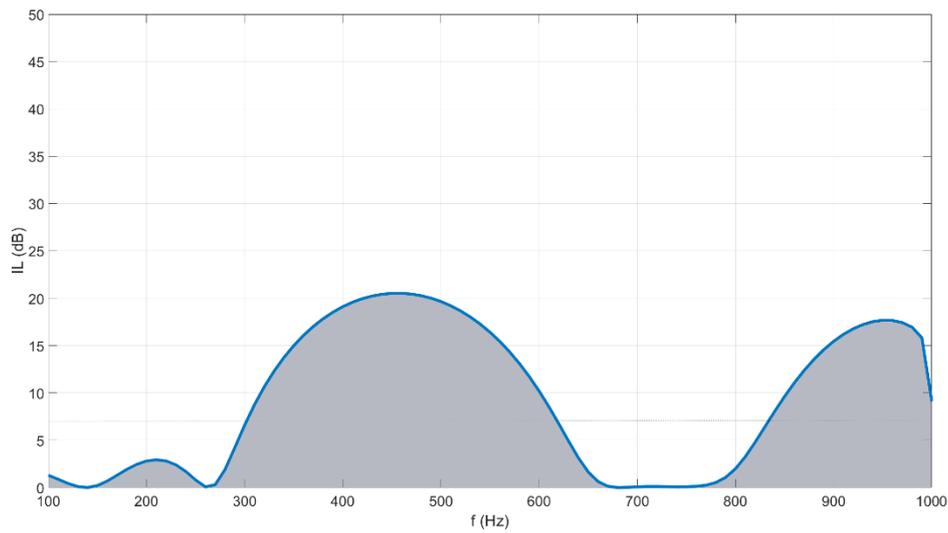
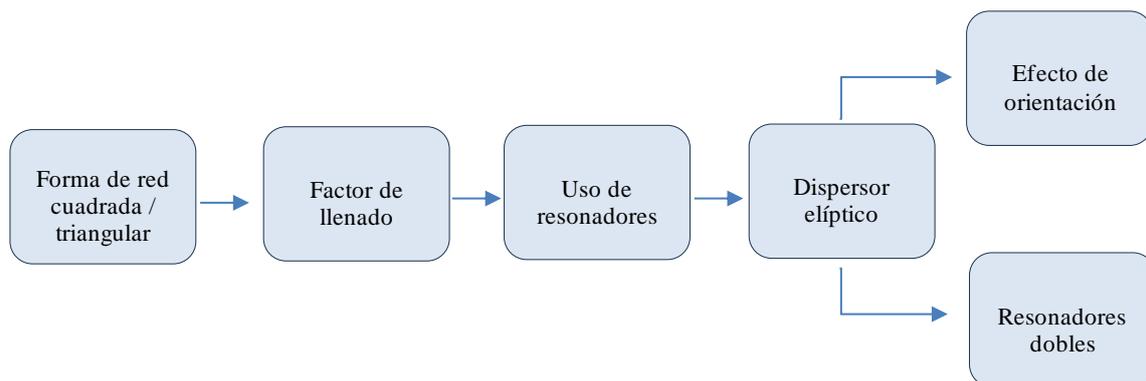


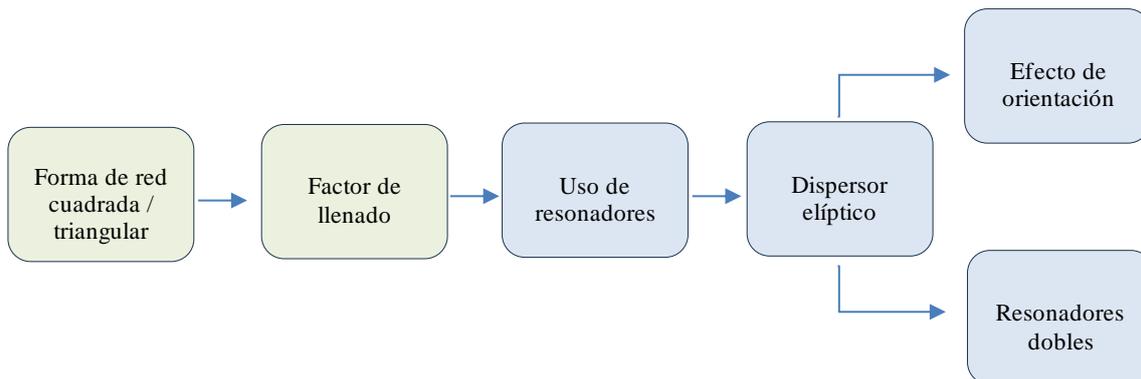
Figura 9: Gráfico de pérdidas de inserción con la AA marcada en gris

#### 4.1.2 Método de análisis

Para lograr un procesamiento de datos ordenado y eficaz, se diseña un camino basado en estudios individuales con el fin de que el trabajo realizado sea comprensible y la conclusión del trabajo se asiente sobre resultados sólidos. Se representa en el siguiente diagrama los diferentes modelos a estudiar.



## 4.2 Estudio de forma de red y factor de llenado



### 4.2.1 Estudio básico de las características de una red de cristales de sonido

Se pretende realizar dos modelos de red de dispersores, uno para una red cuadrada y otro para una red triangular, ambas con dimensiones escogidas para atenuar a 500 y 1000 Hz. El parámetro de red elegido obedecerá la fórmula de la frecuencia Bragg para una red cuadrada (1.1). Sabiendo esto se calculará, tanto las pérdidas de inserción (IL), como el área de atenuación. Para el cálculo esto último emplearemos la siguiente línea de código en Matlab:

$$\text{AreaAt}=\text{trapz}(\text{abs}(\text{IL}))$$

Se ha decidido estudiar los resultados variando el radio de los dispersores y modificando así el factor de llenado de la red, el cual variará entre el 40 y 50%.

Se realiza un modelo de once filas y tres columnas de dispersores, se define un punto de cálculo a un metro de la barrera y se estudian las pérdidas de inserción a diferentes frecuencias.

|                      | Red cuadrada |      |
|----------------------|--------------|------|
| f (Hz)               | 500          | 1000 |
| Parámetro de red (m) | 0.34         | 0.17 |

Tabla 2: Cálculo de los diferentes parámetros de red según la frecuencia de Bragg deseada.

| f (Hz)     | 500  |       | 1000  |       |
|------------|------|-------|-------|-------|
| <i>ff</i>  | 40%  | 50%   | 40%   | 50%   |
| Radio (m)  | 0.12 | 0.136 | 0.061 | 0.068 |
| AA (dB*Hz) | 1670 | 1400  | 1118  | 1260  |

Tabla 3: Cálculo de los parámetros necesarios para el diseño de la red cuadrada, así como el área de atenuación resultante.

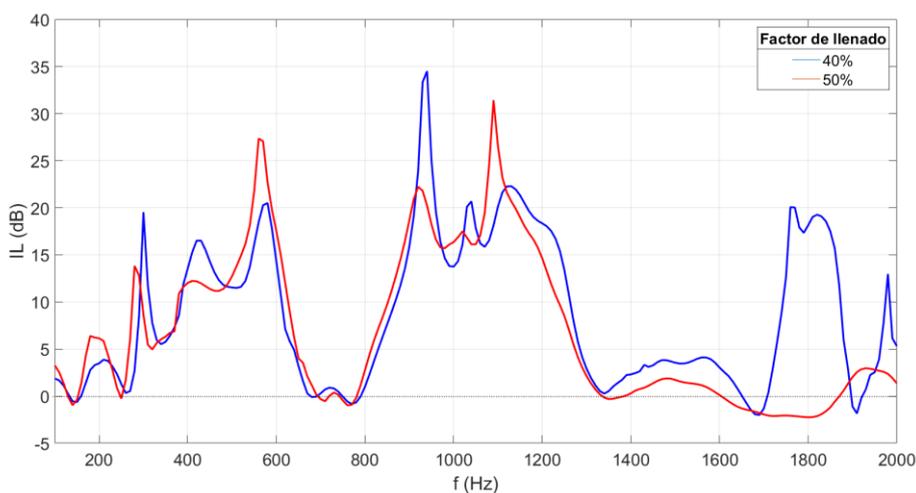
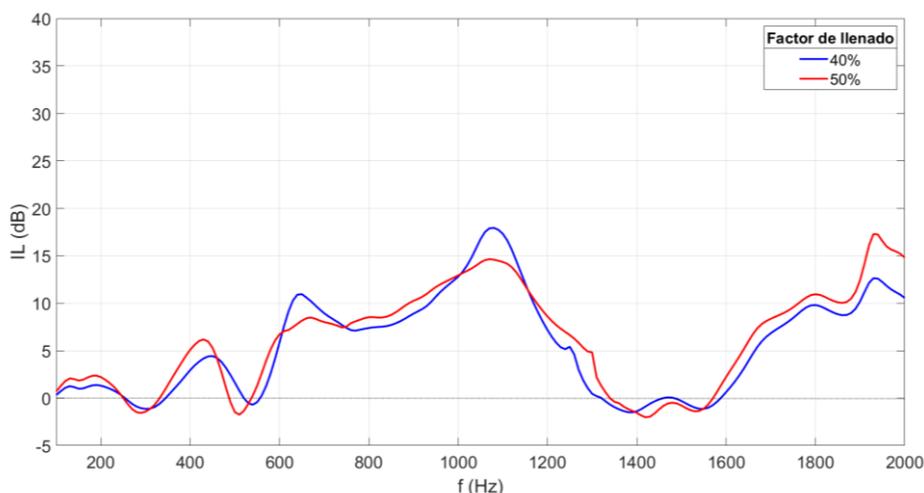
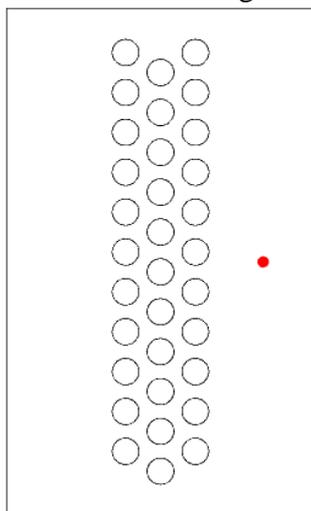


Figura 10: Perdidas de inserción en una red cuadrada con una frecuencia de Bragg de 500 Hz a diferentes *ff*



**Figura 11:** Perdidas de inserción en una red cuadrada con una frecuencia de Bragg de 1000 Hz a diferentes  $ff$

Con el fin de observar cómo se comportan modelos con diferentes geometrías de red, se estudian también a continuación redes con los mismos parámetros con que se ha trabajado anteriormente, solo que ahora la estructura de la red será de carácter triangular, como se puede observar en la Figura 12 y empleando los parámetros de red definidos en la Tabla 4. Con ello los resultados que se muestran en las Figuras 13 y 14.



|                      | Red triangular |       |
|----------------------|----------------|-------|
| f (Hz)               | 500            | 1000  |
| Parámetro de red (m) | 0.393          | 0.196 |

**Tabla 4:** Cálculo de los diferentes parámetros de red según la frecuencia de Bragg deseada.

**Figura 12:** Modelo diseñado para una frecuencia de 500 Hz y un  $ff$  de 40%

| f (Hz)     | 500  |       | 1000  |       |
|------------|------|-------|-------|-------|
| $ff$       | 40%  | 50%   | 40%   | 50%   |
| Radio (m)  | 0.13 | 0.146 | 0.065 | 0.073 |
| AA (dB*Hz) | 1374 | 1685  | 780   | 961   |

Tabla 5: Cálculo de los parámetros necesarios para el diseño de la red triangular, así como el área de atenuación resultante.

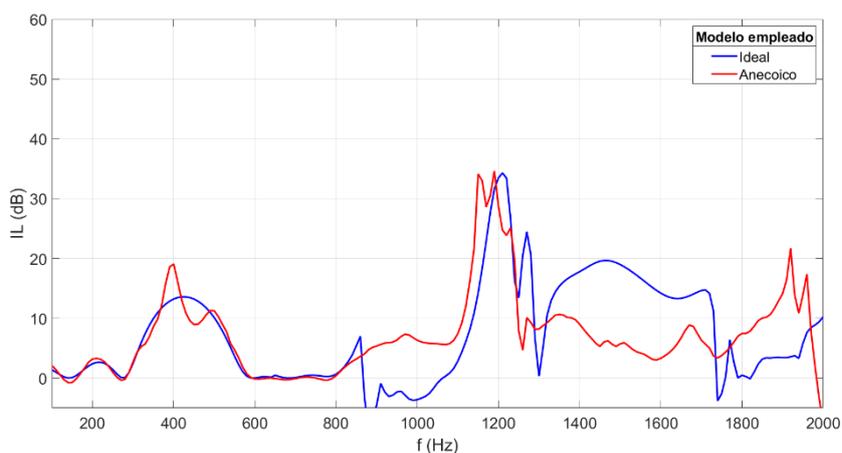


Figura 13: Comparación del modelo anecoico con el ideal para una red triangular para una frecuencia de Bragg de 500 Hz.

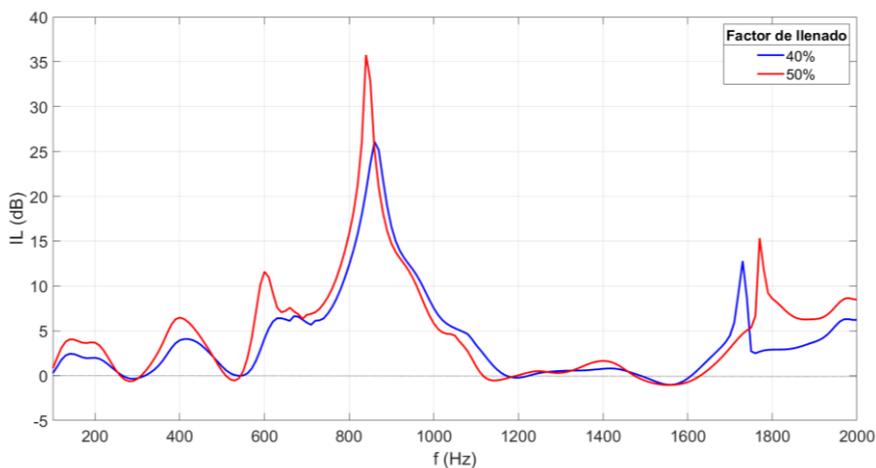


Figura 14: Pérdidas de inserción en una red triangular a con una frecuencia de Bragg de 1000 Hz a diferentes  $ff$

#### 4.2.2 *Diseño de un modelo ideal*

Se diseñan dos nuevas estructuras, usando esta vez un modelo ideal. Para ello se define una condición periódica en las paredes superior e inferior del área de estudio con la intención de crear un escenario de barrera infinita en el eje  $y$ . De esta forma, solo es necesario el diseño de un bloque vertical de la estructura. De nuevo, ambos casos serán de estructura cuadrada y triangular, aplicando en cada una de ellas un factor de llenado del 40%, ya que lo que se pretende es comparar este tipo de modelo con el anterior (4.1.2). Los radios de dispersores empleados, sí como los parámetros de red, son los mismos reflejados en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

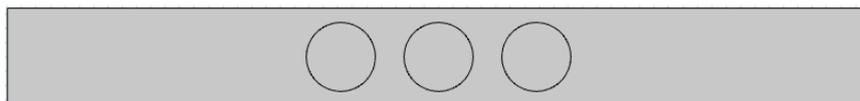
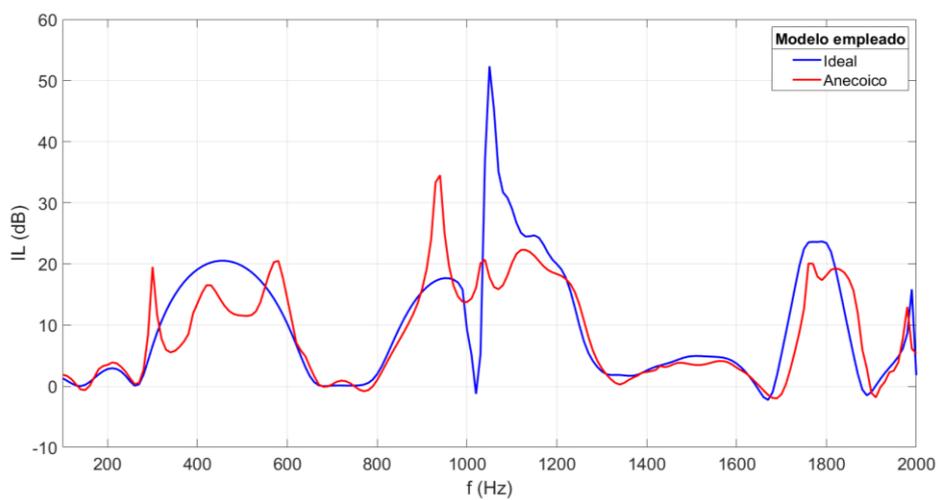


Figura 15: Modelo ideal para una red cuadrada para una frecuencia de Bragg de 500 Hz

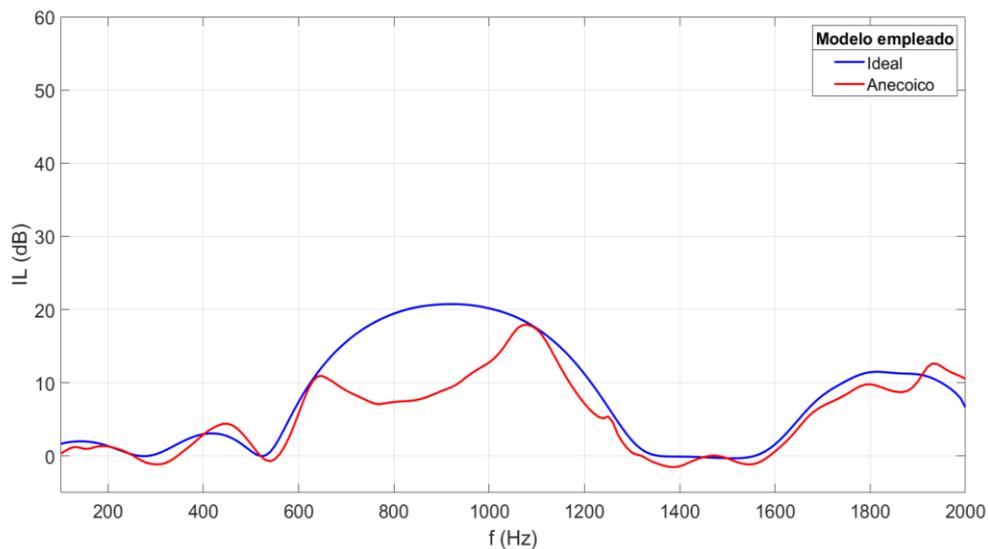


Figura 16: Modelo ideal para una red triangular para una frecuencia de Bragg de 500 Hz

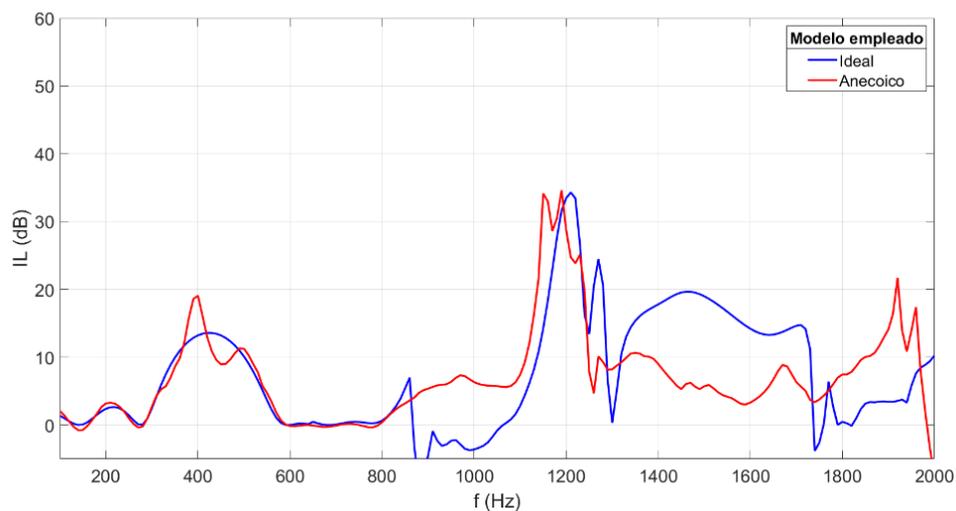
El empleo de esos modelos consigue resultados más cercanos a un modelo ideal, ya que se evitan efectos de borde que sí que se producen en los modelos vistos en el apartado 4.1.2, como se puede comprobar en las Figuras 13, 14, 15 y 16, donde se observan unas las curvas de atenuación mucho más definidas.



**Figura 17: Comparación del modelo anecoico con el ideal para una red cuadrada para una frecuencia de Bragg de 500 Hz.**



**Figura 18:** Comparación del modelo anecoico con el ideal para una red cuadrada para una frecuencia de Bragg de 1000 Hz.



**Figura 19:** Comparación del modelo anecoico con el ideal para una red triangular para una frecuencia de Bragg de 500 Hz.

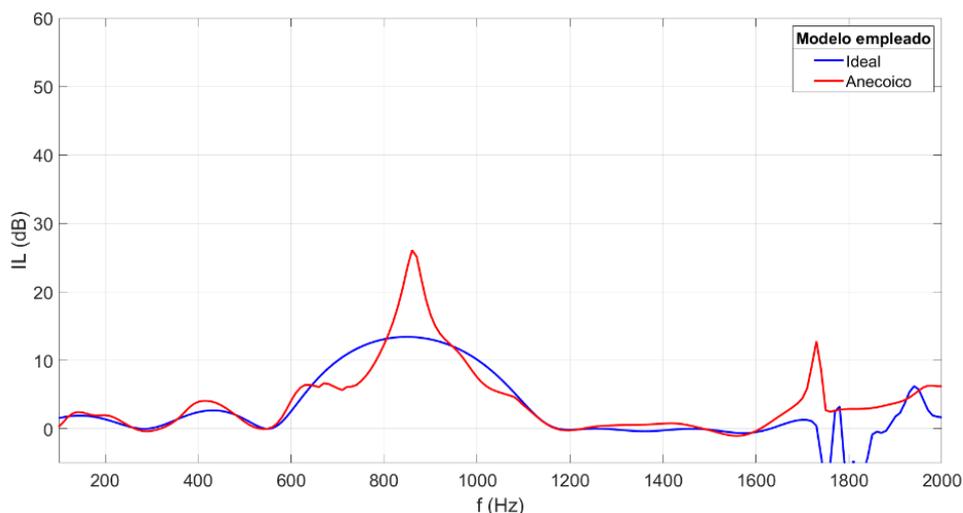


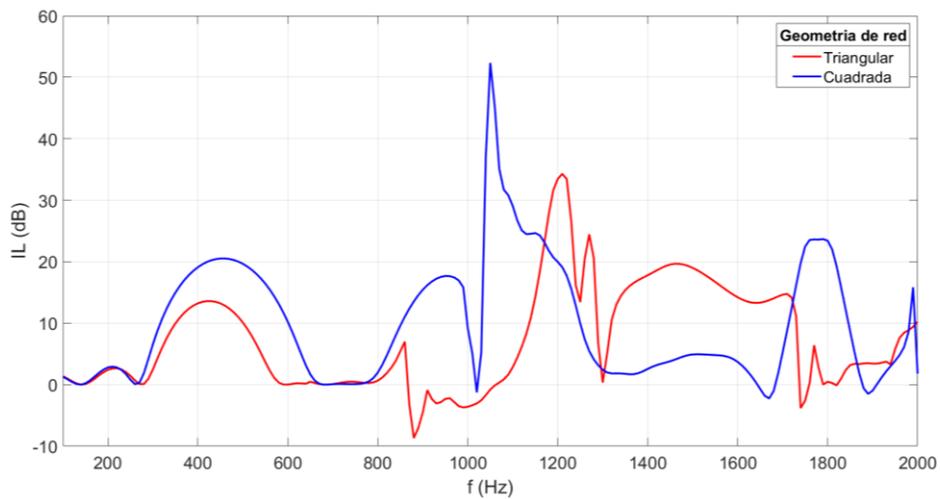
Figura 20: Comparación del modelo anecoico con el ideal para una red triangular para una frecuencia de Bragg de 1000 Hz.

#### 4.2.3 *Análisis de la primera versión de redes de cristales de sonido*

Las conclusiones iniciales las que se han llegado pueden separarse por las características de red con las que se han jugado a lo largo de este análisis de resultados. Para empezar, se ha comprobado que, como resultaba evidente, el empleo de diferentes parámetros de red genera atenuaciones mayores en las frecuencias deseadas. En cuanto las variaciones en el radio de los dispersores y, por tanto, en el factor de llenado, el aumento de estos genera unos anchos de pico mayores alrededor de las frecuencias deseadas.

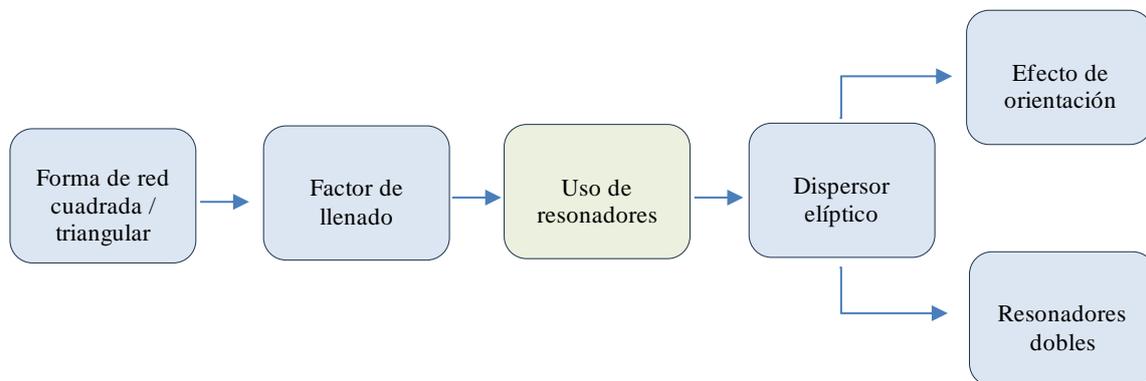
También se puede comparar los efectos que tiene la estructura de red. En la Figura 18 se puede comprobar como la banda de atenuación en la frecuencia de Bragg es menor en el caso de redes triangulares, mientras que, en las cuadradas, el pico de atenuación es mayor, es decir, que las redes cuadradas parecen ser más efectivas en los casos estudiados.

Por último, se ha demostrado tanto que el empleo de modelos ideales evita muchos efectos no deseados, como que la geometría de red más efectiva es la cuadrada. El resultado de este pequeño estudio nos lleva a decidir que una configuración de red cuadrada en un modelo ideal será el tipo de estudio que se empleará de este punto del proyecto en adelante.



**Figura 21: Efecto de la estructura de red con una frecuencia de Bragg de 1000 Hz y un  $ff$  del 40%.**

### 4.3 Estudio de la implementación de resonadores de Helmholtz en una red de cristales de sonido.



#### 4.3.1 Diseño de los resonadores de Helmholtz.

Con la intención de seguir evolucionando el modelo que se está estudiando se implementarán resonadores de Helmholtz en el interior de los dispersores. Para ello necesitamos definir que es un resonador de Helmholtz. Un resonador de Helmholtz se puede definir como una cavidad que encierra un volumen  $V$  con una apertura de sección  $\Lambda$  al final de un cuello de largo  $L1$ .

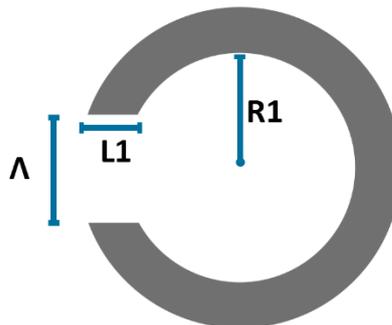


Figura 22: Esquema de un resonador de Helmholtz.

A efectos teóricos el resonador se comporta como un sistema masa-muelle, cuando la longitud de onda es mucho mayor que la raíz cúbica del volumen, el fluido en el interior del cuello se comporta como un bloque mientras que el volumen de fluido en el interior de la cavidad se comporta como un muelle [7]. En resumen, se diseñará una morfología de resonador de Helmholtz entorno a la frecuencia de Helmholtz se definirá más adelante.

A priori, la implementación de resonadores debería proporcionar una mayor área de atenuación al atacar estos a una frecuencia previamente establecida en el diseño de su morfología. Para el cálculo de las dimensiones del resonador a emplear se utiliza la formula:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\Lambda}{(L_1 + \Delta_2) * S}} \text{ (Hz)} \quad (4.1)$$

donde S es la superficie del cuerpo del resonador, mientras que el resto de los valores corresponden a las partes del resonador que se muestran en la Figura 19. El valor de corrección  $\Delta$  será de 1.6 para una apertura cuadrada. Se deberán tener en cuenta las posibles interferencias que pueden ocurrir entre la banda de atenuación de Bragg y las nuevas bandas de atenuación creadas por los resonadores de Helmholtz como se muestra en la Tabla siguiente.

| $f_h$ (Hz) | C (m/s) | Pi       | $\Lambda$ (m) | r2 (m) | L1 (m) | $\Delta$ | S (m <sup>2</sup> ) |
|------------|---------|----------|---------------|--------|--------|----------|---------------------|
| 250        | 340     | 3,141593 | 0,023         | 0,07   | 0,05   | 1,8      | 0,015394            |
| 750        | 340     | 3,141593 | 0,05          | 0,039  | 0,01   | 1,8      | 0,004778            |
| 800        | 340     | 3,141593 | 0,06          | 0,038  | 0,006  | 1,8      | 0,004536            |

Tabla 6: Características geométricas del resonador para una  $f_h$  de 250, 750 y 800 Hz

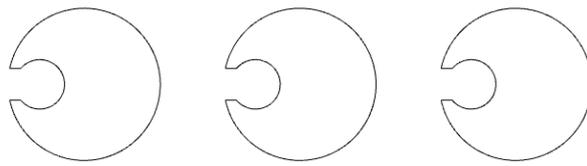
Los resonadores a emplear van a estar sujetos a unas limitaciones. Al estar insertados dentro de los dispersores, y con el fin de solo afectar a su diseño mediante la realización un orificio, el valor de largo del cuello (L1) no debe implicar un elemento que sobresalga del dispersor, sino que debe implicar estrictamente una modificación en la posición del resonador dentro del cuerpo principal.

Con el fin de obtener una frecuencia de Helmholtz alta sin ver el radio interior demasiado reducido, se descentra el resonador, que en el caso de frecuencias más bajas basta con que este centrado para obtener resultados satisfactorios. De esta forma se consigue reducir el valor de largo del cuello del resonador (L1).

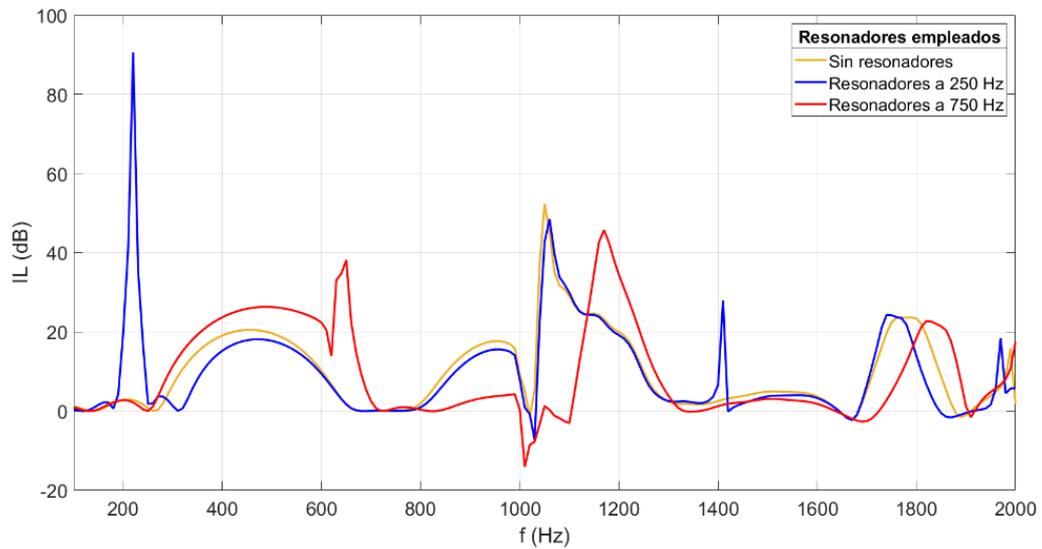
En cuanto a la  $f_h$  a utilizar, se decide experimentar a ambos lados de la banda de Bragg, es decir, 250 Hz por debajo y por encima de la frecuencia de Bragg con la que se está trabajando, es decir, 500 Hz.



Figura 23: Dispersores con un resonador de Helmholtz su interior, estando este diseñado para una  $f_h$  de 250 Hz



**Figura 24:** Dispersores con un resonador de Helmholtz su interior, estando este diseñado para una  $f_h$  de 750 Hz



**Figura 25:** Efecto de resonadores a 250 y 750 Hz, así como la ausencia de ellos, en las pérdidas de inserción.

### 4.3.2 Análisis de resultados.

Como se puede observar en la Figura 14, los resonadores a 250 Hz afectan levemente al lóbulo generado por los dispersores originalmente. Este se encuentra ahora desplazado a una frecuencia mayor, aunque su atenuación no se ve gravemente afectada. En el caso de los resonadores a 750 Hz, a pesar de estar a la misma distancia frecuencial que los anteriores, los picos de atenuación generados sí afectan notablemente al lóbulo original. Se puede observar que el pico generado por los resonadores interfiere con el efecto de los dispersores hasta el punto integrarse en parte el lóbulo generado en torno a la  $f_{BRAGG}$ . Con el efecto de obtener unas mejores soluciones a frecuencias por encima de la  $f_{BRAGG}$  se analiza también el efecto de unos resonadores ahora con una frecuencia de Helmholtz de 800 Hz. Tras este cambio y cómo podemos observar en la Figura 16, se consigue, ahora sí, generar un pico de atenuación por encima de la  $f_{BRAGG}$  que no afecta al lóbulo principal. Esto debería de resultar en un modelo mejor, en tanto que su área de atenuación debe ser mayor y la atenuación en sí abarcar un mayor rango de frecuencias.

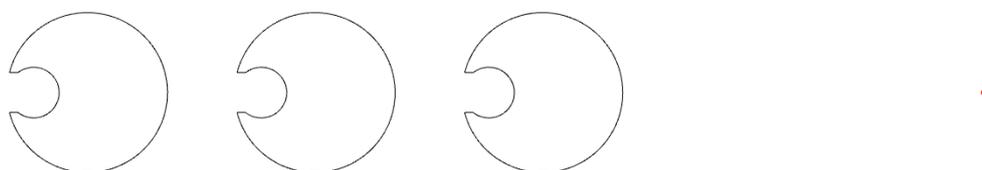


Figura 26: Dispersores con un resonador de Helmholtz su interior, estando este diseñado para una  $f_h$  de 800 Hz

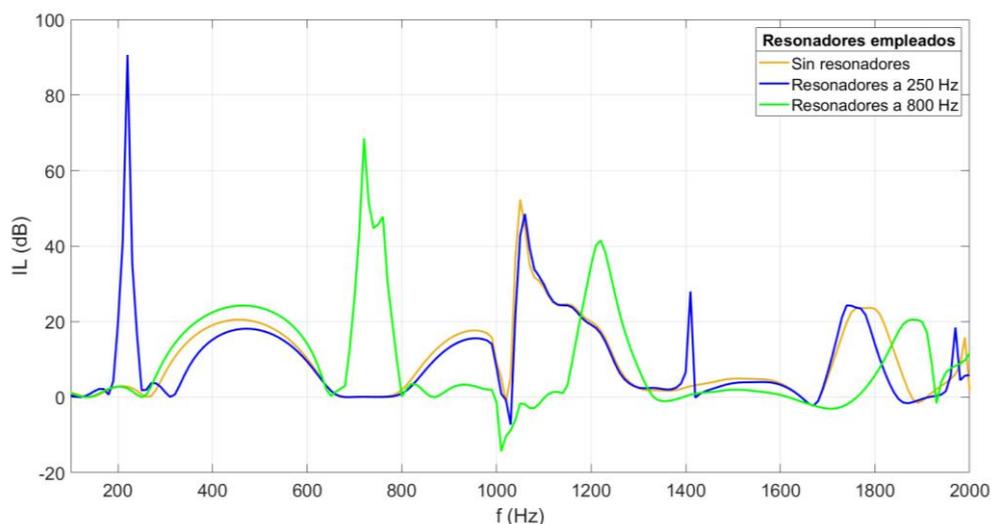


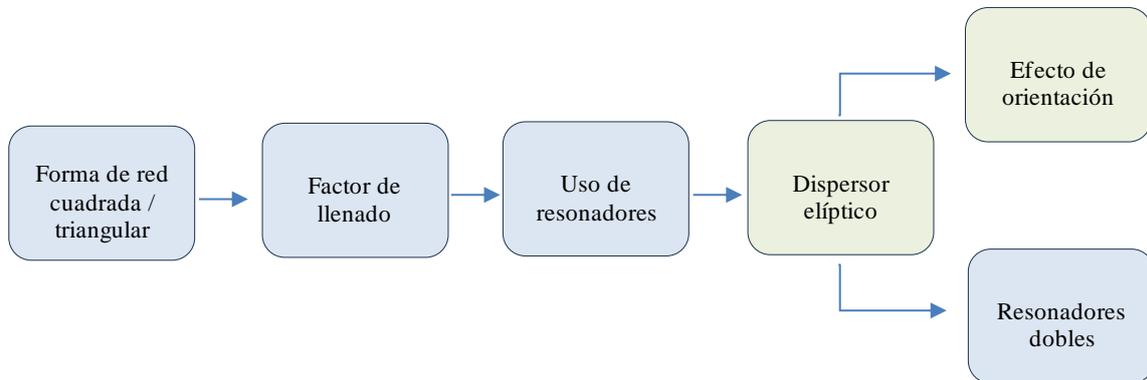
Figura 27: Efecto de resonadores a 250 y 800 Hz, así como la ausencia de ellos, en las pérdidas de inserción



#### 4.3.3 *Conclusiones sobre el uso de resonadores de Helmholtz en el interior de dispersores circulares.*

Vistos los resultados obtenidos se puede concluir que introducir resonadores dentro de dispersores circulares genera picos de atenuación de un orden mucho mayor que el de los lóbulos de atenuación de los propios dispersores, aunque, eso sí, mucho más estrechos en torno a la frecuencia de Helmholtz definida. Además, se ha podido concluir que, si no se mantiene cierta distancia frecuencial entre las frecuencias de Bragg y Helmholtz, estas tienden a superponer la atenuación que generan sus respectivos elementos de atenuación. Por último, se ha podido comprobar que la cercanía entre estos dos picos es más peligrosa en altas que en bajas frecuencias. Mientras que diseñando los resonadores para una frecuencia 250 Hz por debajo de la  $f_{BRAGG}$  no afectaba casi a este, cuando se ha querido emplazar dichos resonadores por encima de los 500 Hz de  $f_{BRAGG}$ , se ha tenido que aumentar la  $f_h$  a 800 Hz para no interferir gravemente en la banda de atenuación de Bragg.

#### 4.4 Estudio de la implementación de dispersores elipsoidales en una red de cristales de sonido.



##### 4.4.1 Metodología de diseño de los dispersores elípticos.

El objetivo de este capítulo es estudiar el efecto que conlleva modificar ciertos parámetros asociado a la geometría de los dispersores, como son, tanto su excentricidad, que los convertirá en elípticos, como su orientación. De esta forma se pretende comprobar si la geometría elíptica de dispersores, siendo estos dispersores simples, tiene algo interesante que ofrecer desde un punto de vista teórico.

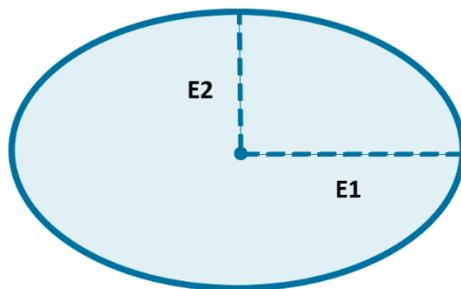


Figura 28: Esquema de los dispersores elipsoidales empleados

| Excentricidad | $E_1$ (m) | $E_2$ (m) |
|---------------|-----------|-----------|
| 0.4           | 0.126     | 0.115     |
| 0.5           | 0.13      | 0.113     |
| 0.6           | 0.135     | 0.108     |
| 0.7           | 0.144     | 0.103     |

Tabla 7: Tamaño de ejes empleados para cada excentricidad

Para modificar la forma de los dispersores, se variará su excentricidad, así como su posición. Para el cálculo de la excentricidad a partir de los semiejes  $E_1$  y  $E_2$  de la elipse se empleará la siguiente fórmula:

$$e = \frac{\sqrt{E_1^2 - E_2^2}}{E_1} \quad (4.3)$$

#### 4.4.2 Análisis de resultados.

En primer lugar se comprobará el efecto de los dispersores variando su excentricidad, pero estando estos a  $0^\circ$ , es decir, con su eje mayor en horizontal y paralelo a la dirección de la onda, como se puede observar en la Figura 2. Para el estudio de posiciones de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  se toman valores de excentricidad inferiores a 0.7 para evitar una excesiva cercanía entre los difusores, hecho que dejaría un flujo de aire muy reducido entre estos.

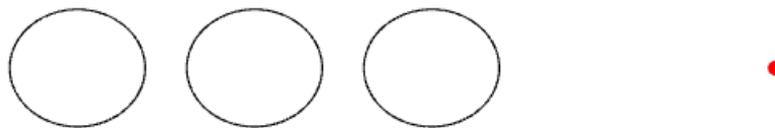


Figura 29: Modelo de dispersores elípticos con una excentricidad de 0.6 y  $0^\circ$ .

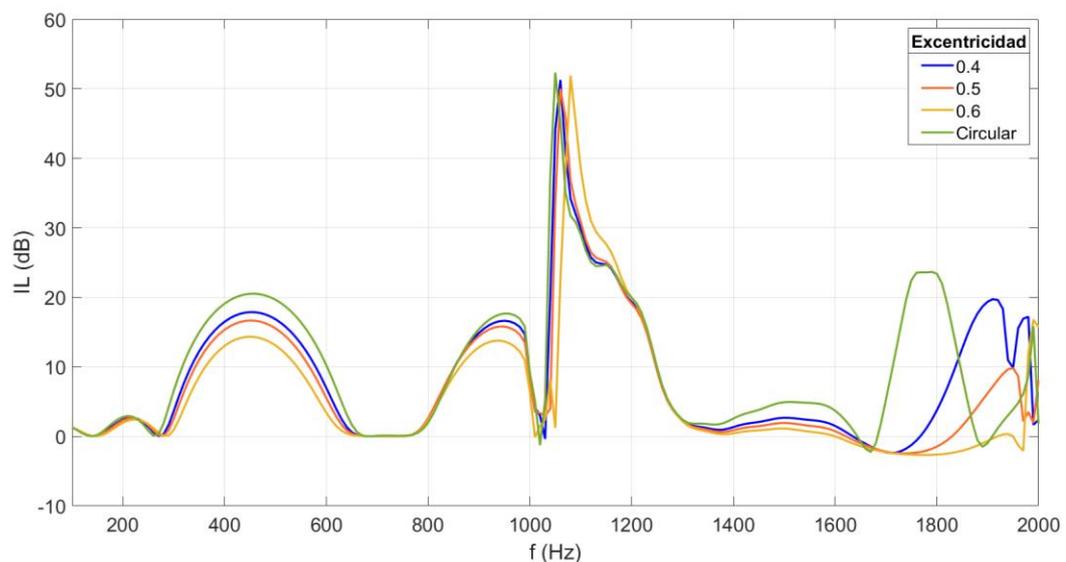


Figura 30: Efecto de la excentricidad en la atenuación con los dispersores a  $0^\circ$ .

| Excentricidad | 0    | 0.4  | 0.5  | 0.6  |
|---------------|------|------|------|------|
| AA (dB*Hz)    | 1895 | 1655 | 1403 | 1245 |

Tabla 8: Tamaño de ejes empleados para cada excentricidad.

Podemos observar que, con la orientación empleada en este caso, es contraproducente el uso de dispersores elípticos, ya que estos generan una menor atenuación a medida que su forma se aleja de la circular. Es por esto por lo que se procederá a aplicar diferentes ángulos de rotación en los siguientes modelos a estudiar.

En una situación de dispersores a  $90^\circ$  sí que podemos observar que el aumento de la excentricidad produce un ligero aumento de atenuación (Figura 5), aunque esta sea de unos pocos decibelios. Este efecto no se produce hasta elevar la excentricidad a un 0.6 y, además, aumenta significativamente al elevar dicho parámetro. Esto puede deberse a que cerrando la apertura de la red se está reduciendo la entrada de aire entre los difusores.

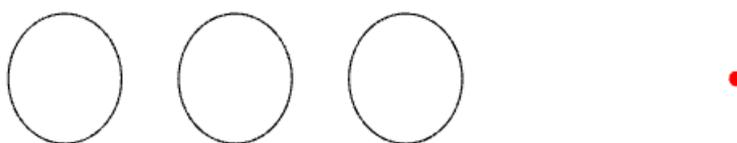


Figura 31: Modelo de dispersores elípticos con una excentricidad de 0.6 y  $90^\circ$

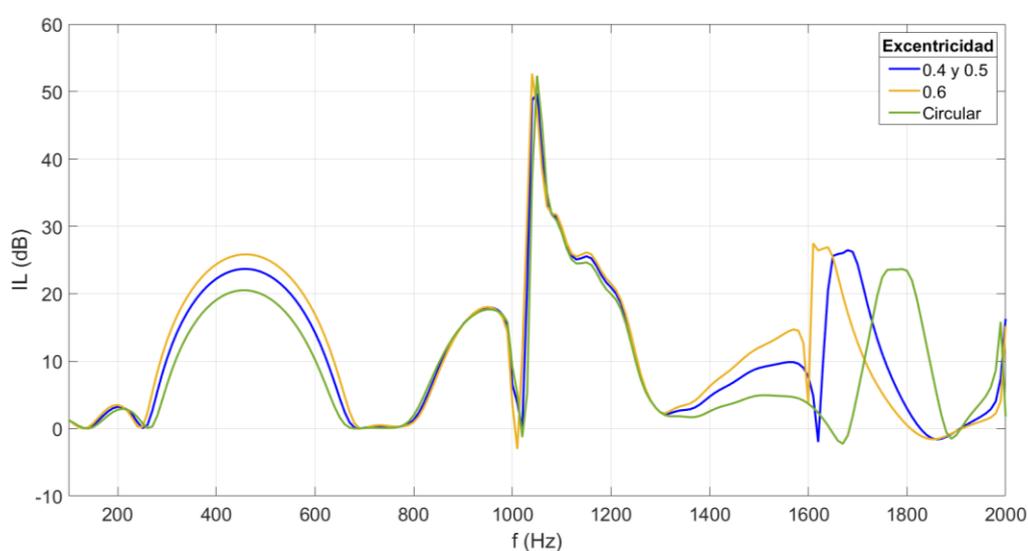


Figura 32: Efecto de la excentricidad en la atenuación con los dispersores a  $90^\circ$

También se experimentará con varias orientaciones. Para ello se barrera una angulación que irá desde los  $15^\circ$  hasta los  $75^\circ$  con intervalos de  $15^\circ$  (Tabla 2). Podemos comprobar en la Figura 6 que, a medida que el ángulo se acerca a  $90^\circ$ , la banda de atenuación de Bragg crece. También vemos que al aumentar el ángulo también aumenta el área de atenuación (Tabla 3) al, no solo aumentar el lóbulo de atenuación en 500 Hz, sino también empezar a atenuar alrededor de los 1100 Hz y 1500 Hz.

| Angulo (grados)            | 15   | 30   | 45   | 60   | 75   |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| Figura                     |      |      |      |      |      |
| Área de atenuación (dB*Hz) | 1280 | 1419 | 1720 | 1948 | 2230 |

Tabla 9: Aspecto y área de atenuación resultante con dispersores con excentricidad de 0.6 y un ff de 0.4

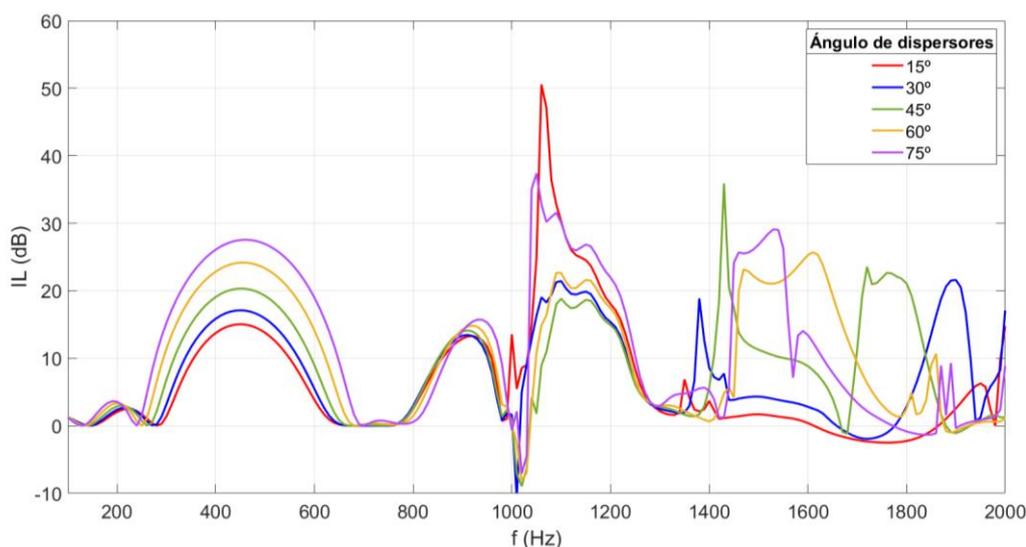


Figura 33: Efecto de la variación del ángulo de los dispersores elípticos con un ff de 0.4 y una excentricidad de 0.6

Al emplear ahora orientaciones que dejan a más espacio a los dispersores, se decide experimentar con una excentricidad mayor, en este caso de 0.7, para comprobar si trabajando con ángulos entre los 30 y 60 se consigue aprovechar esta zona de atenuación nueva. El resultado es un área de atenuación bastante inferior en los casos de 30° y 60°, pero solo ligeramente inferior en el caso de 45°. Este descenso generalizado del área de atenuación se debe a la desaparición del pico de atenuación alrededor de los 1100 Hz que, solo en el caso de los dispersores a 45° se traduce en una mayor atenuación entre los 1400 y 1800 Hz que puede ser interesante a efectos prácticos.

| Angulo (grados)            | 30   | 45   | 60   |
|----------------------------|------|------|------|
| Área de atenuación (dB*Hz) | 1170 | 1653 | 1566 |

Tabla 10: Aspecto y área de atenuación resultante con dispersores con excentricidad de 0.6 y un ff de 0.4

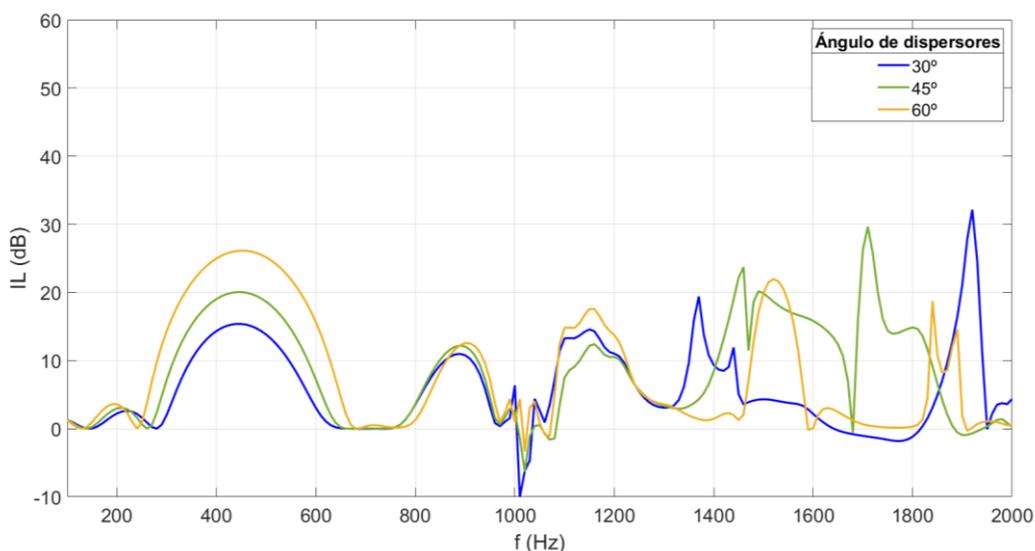


Figura 34: Efecto de la variación del ángulo de los dispersores elípticos con un ff de 0.4 y una excentricidad de 0.7

#### 4.4.3 Conclusiones acerca de la viabilidad de dispersores elípticos.

Tras el estudio realizado se pueden dilucidar varias cuestiones. Una es que los dispersores necesitan de unas características y posición específica para tener ciertas ventajas respecto sus versiones circulares. Sin embargo, situándolos en posiciones horizontales o verticales ofrecen algunos inconvenientes. El primero de ellos es que la excentricidad de los dispersores se ve limitada por el parámetro de red, haciendo que un estiramiento excesivo de los elementos provoque que prácticamente se toquen. Este acercamiento en el caso de situarlos con su eje mayor en la dirección de las ondas solo hace que reducir la atenuación de Bragg, mientras que, en el caso contrario, reducir la atenuación por el mero hecho de que se reduce la cantidad de aire que pasa entre los dispersores, cosa que rompe la base de una red de cristales de sonido.

Es en los ángulos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  donde cobran sentido los dispersores elípticos. Según lo estudiado el beneficio principal de estos consiste en que permiten generar bandas de atenuación nuevas que, en el caso de redes diseñadas para una frecuencia de Bragg de 500 Hz, se encuentran entre los 1400 y los 1800 Hz. Se ha comprobado anteriormente que, al menos para una excentricidad de 0.7, es en con un ángulo de  $45^\circ$  como se obtiene esta nueva banda de atenuación sin que el área general de atenuación disminuya drásticamente. De hecho, en la Figura 8 se puede comprobar que la banda de atenuación de Bragg no disminuye sustancialmente y que la atenuación que aparecía en forma de pico sobre los 1050 Hz, siendo esta probablemente una inexactitud generada por el modelo teórico debido a su máximo de casi 50 dB ahora aparece de forma relativamente plana en este nuevo espacio frecuencial.

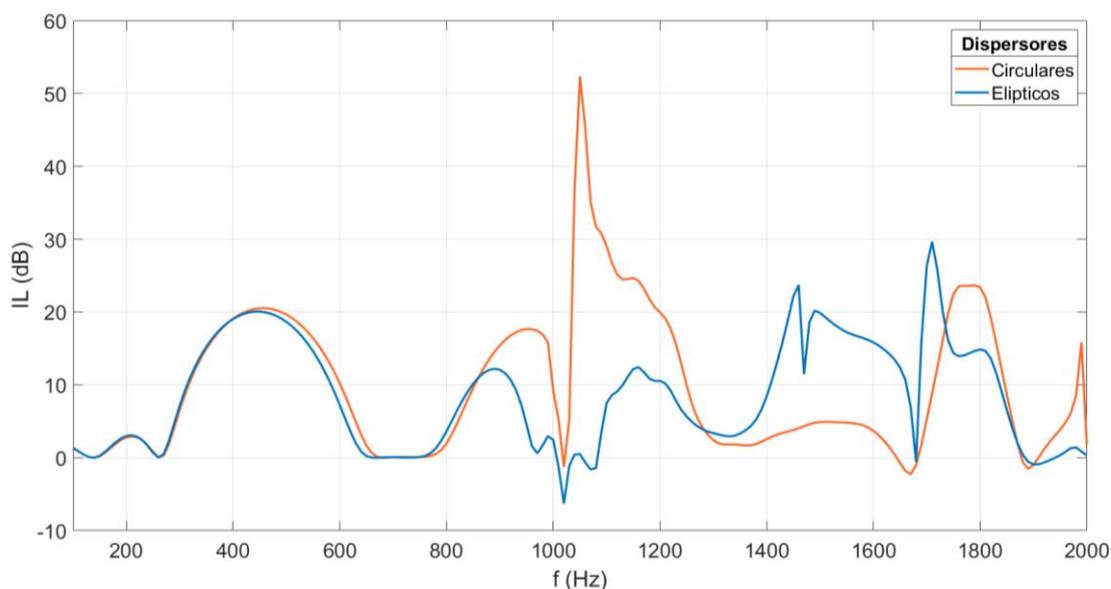
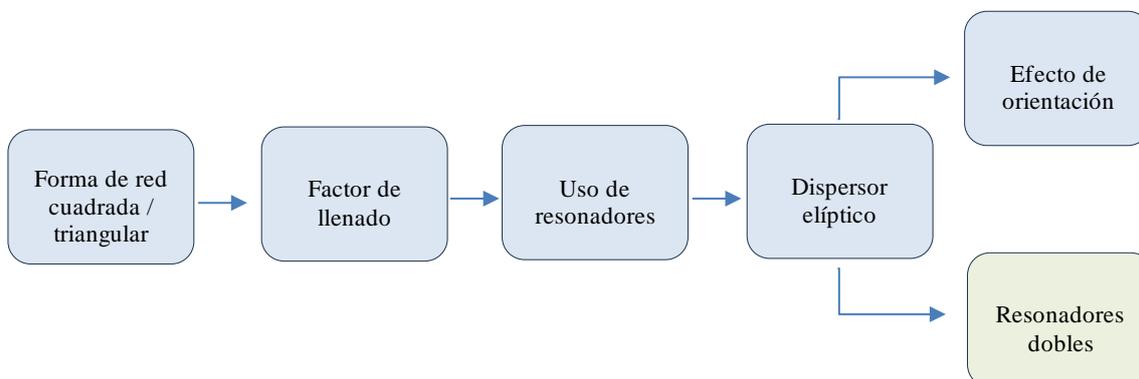


Figura 35: Comparación entre una red con dispersores circulares con un  $ff$  de 0.4 y otra elíptica con su mismo factor de llenado cuyos dispersores tienen una excentricidad de 0.7 y están colocados a un ángulo de  $45^\circ$

#### 4.5 Estudio de la implementación de resonadores de Helmholtz en el interior de dispersores elipsoidales en una red de cristales de sonido.



##### 4.5.1 Metodología de diseño de los resonadores implementados en el interior de los dispersores elípticos.

Con el fin de conseguir mejor atenuación en bandas frecuenciales en las que el efecto de atenuación de Bragg tiene un efecto menor, se decide implementar resonadores de Helmholtz diseñados de forma que estos atenúen alrededor de la primera banda de atenuación de Bragg, en este caso un resonador cuya  $f_h$  sea 250 Hz y otro cuya  $f_h$  sea 750 Hz, es decir, ambos separados 250 Hz de la primera banda de atenuación de Bragg, que seguirá estando centrada en 500 Hz. Los resonadores, como puede verse en la Figura 25, se situarán sobre el semieje mayor de la elipse principal, pero con su semieje mayor perpendicular al del dispersor, con el fin de aprovechar al máximo el espacio disponible. Este diseño, además, permite situar las aperturas de los resonadores en los extremos de la elipse contenedora, como puede observarse en la Figura 26.

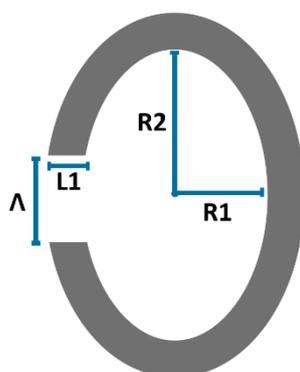


Figura 36: Características geométricas del resonador elíptico.

| $f_h$ (Hz) | C (m/s) | Pi       | $\Lambda$ (m) | r1 y r3 (m) | r2 y r4 (m) | L (m) | $\Delta$ | S (m2)   |
|------------|---------|----------|---------------|-------------|-------------|-------|----------|----------|
| 250        | 340     | 3,141593 | 0,02          | 0,08        | 0,1         | 0,02  | 1,8      | 0,025133 |
| 750        | 340     | 3,141593 | 0,03          | 0,044       | 0,024       | 0,015 | 1,8      | 0,003142 |

Tabla 11: Características geométricas del resonador elíptico para una  $f_h$  de 250 y 750 Hz.

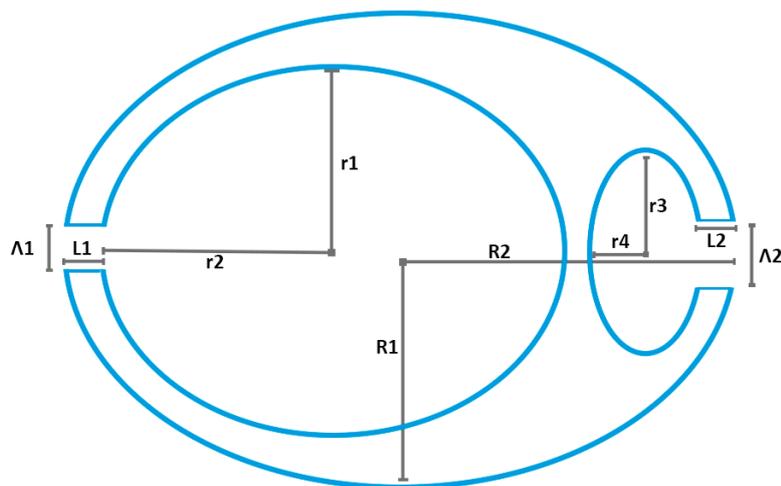


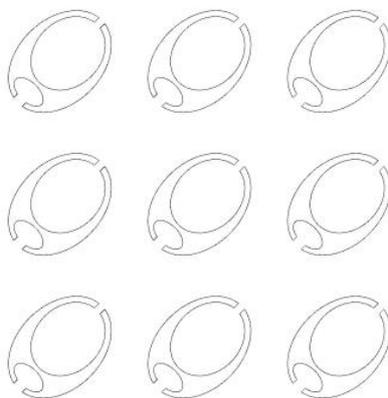
Figura 37: Diseño de los elementos dispersores y resonadores a estudiar con los diversos ángulos de prueba.

#### 4.5.2 Análisis de resultados.

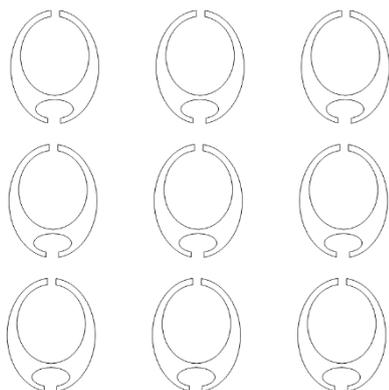
Una vez comprobada la efectividad de los resonadores de Helmholtz en un dispersor circular, ahora se pretende implementar estos en dispersores de geometría elíptica. El objetivo es el de diseñar modelos de red de cristales de sonido lo más parecidos entre sí posible, a excepción de la excentricidad de los dispersores para, de esta forma, poder comprobar en un contexto lo más justo posible si esta nueva geometría empeora, mejora o es equivalente a la empleada tradicionalmente. Por tanto, se comparan el diseño circular con dos resonadores Helmholtz con el diseño elíptico también con el mismo tipo de resonadores adaptados a la nueva forma que los contiene. Se comprobará la efectividad de ambos diseños en diferentes ángulos respecto a una posición horizontal como la que se puede observar en la Figura 26. Antes de realizar las simulaciones necesarias es previsible que con los dispersores a  $0^\circ$  la atenuación generada sea menor en el caso de los cuerpos elípticos, ya que es evidente que ofrecen una menor superficie contra la onda incidente, mientras que situados a un ángulo de  $90^\circ$ , generaran una atenuación claramente superior al dar lugar a un paso entre dispersores relativamente estrecho, como podemos ver en la Figura 27.

Una vez realizados cálculos a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  se presentan los resultados en la Tabla **11**, además de en las Figuras **29**, **30** y **31**. El motivo por el que se estudian estos ángulos es para comprobar los casos extremos de apertura y cierre de la barrera, además de un punto medio que se decide de  $45^\circ$  ya que en el capítulo **4.3.2** se demostraba que los dispersores generaban mayor área de atenuación en este ángulo que en el caso de otras posiciones cercanas.

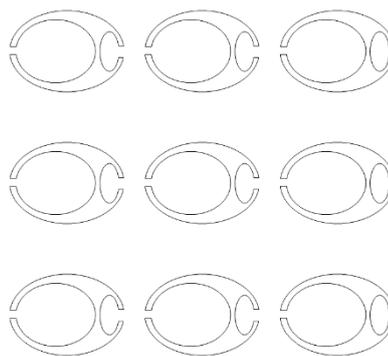
El resultado es en parte positivo. Se demuestra que en la posición  $0^\circ$ , que se definirá como “barrera abierta”, el área de atenuación en el caso de los dispersores elípticos es mucho menor, mientras que la posición de dispersores a  $90^\circ$ , a la que, se nombrará como “barrera cerrada” el área de atenuación es mucho mayor, alcanzando los 4500 dB/Hz. Pero lo más importante es que en el punto intermedio, el de dispersores a  $45^\circ$ , conseguimos una atenuación equivalente a la obtenida con dispersores elípticos. Esto puede ser positivo porque, a pesar de no ofrecer mayor atenuación, este modelo nos un mayor rango áreas de atenuación dependiendo de la movilidad de sus dispersores.



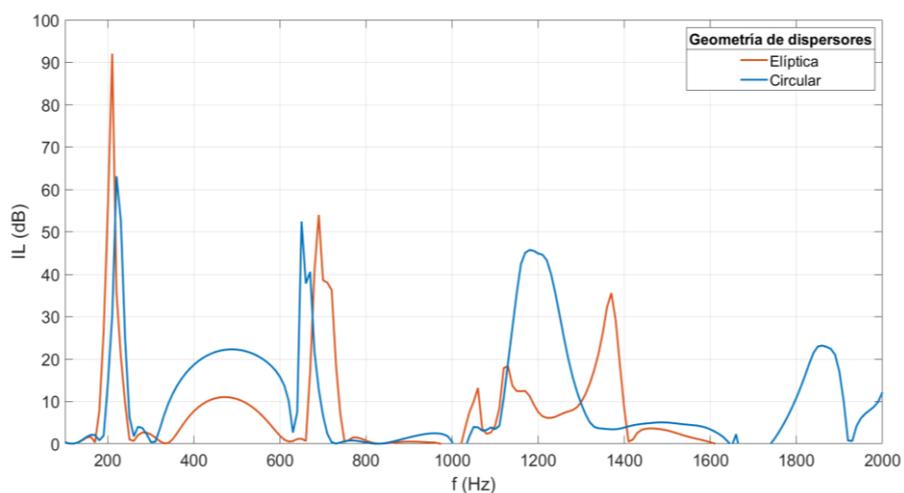
**Figura 38:** Representación de red de cristales de sonido con dispersores elípticos de excentricidad 0.7 situados en un ángulo de  $45^\circ$ .



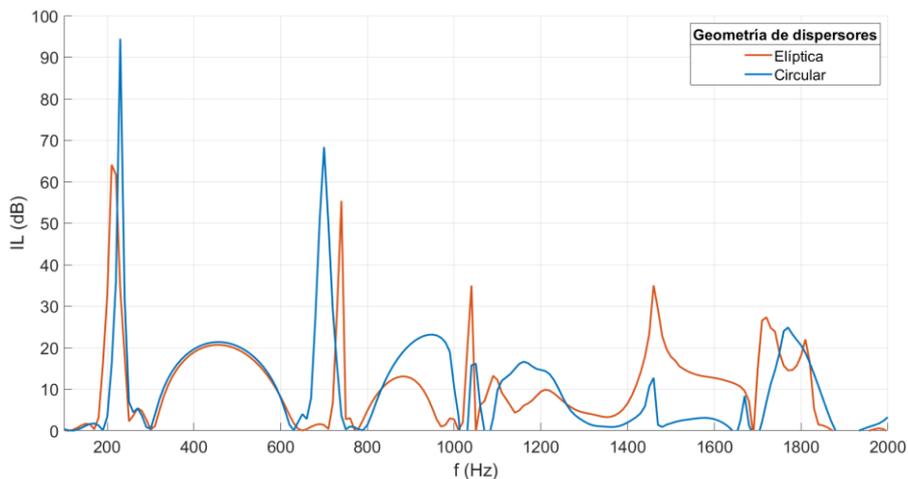
**Figura 39:** Representación de red de cristales de sonido con dispersores elípticos de excentricidad 0.7 situados en un ángulo de 90°.



**Figura 40:** Representación de red de cristales de sonido con dispersores elípticos de excentricidad 0.7 situados en un ángulo de 90°.



**Figura 41:** Comparación entre las pérdidas de inserción generadas por el modelo circular y el modelo elíptico situados ambos a 0°.



**Figura 42:** Comparación entre las pérdidas de inserción generadas por el modelo circular y el modelo elíptico situados ambos a 45°.

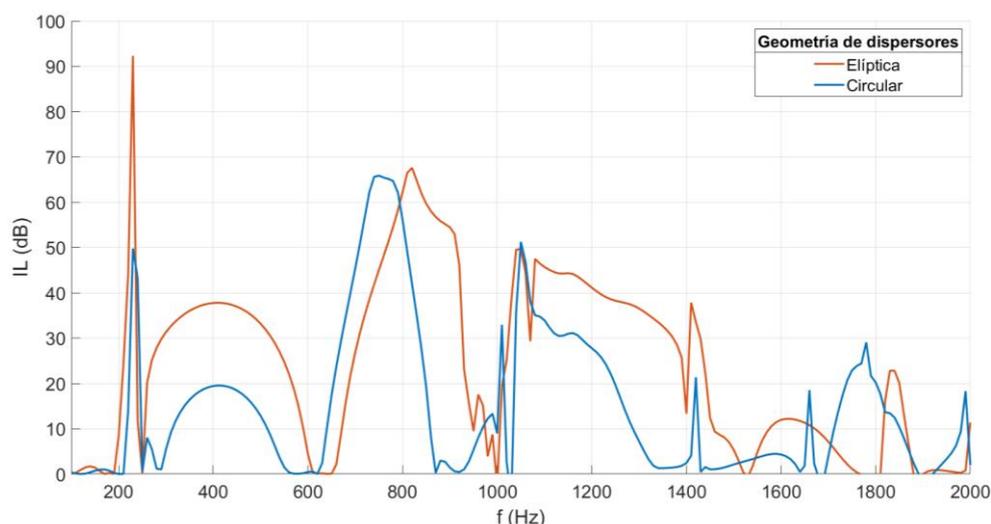


Figura 43: Comparación entre las pérdidas de inserción generadas por el modelo circular y el modelo elíptico situados ambos a 90°.

| Área de atenuación (dB/Hz) |          | Ángulo de los dispersores |      |      |
|----------------------------|----------|---------------------------|------|------|
|                            |          | 0°                        | 45°  | 90°  |
| Morfología de dispersores  | Circular | 2055                      | 1983 | 2832 |
|                            | Elíptica | 1315                      | 2000 | 4585 |

Tabla 12: Resultado de los cálculos realizados expresado en área de atenuación por ángulo y geometrías de dispersores empleados.

#### 4.5.3 Conclusiones sobre de la implementación de resonadores de Helmholtz en el interior de resonadores elipsoidales en una red de cristales de sonido.

La conclusión principal, después de realizar el procesado de datos mostrado anteriormente, es la de que este nuevo modelo de elementos de atenuación parece tener algo prometedor que ofrecer. La ventaja de este diseño de dispersores y resonadores elípticos radica en ser, no tanto unos mejores elementos de atenuación en sí, sino en ser versátiles por la funcionalidad que adquieren al ser rotados. Esto puede conllevar aplicaciones reales muy interesantes que se analizarán en las conclusiones del proyecto.

## Capítulo 5. Conclusiones

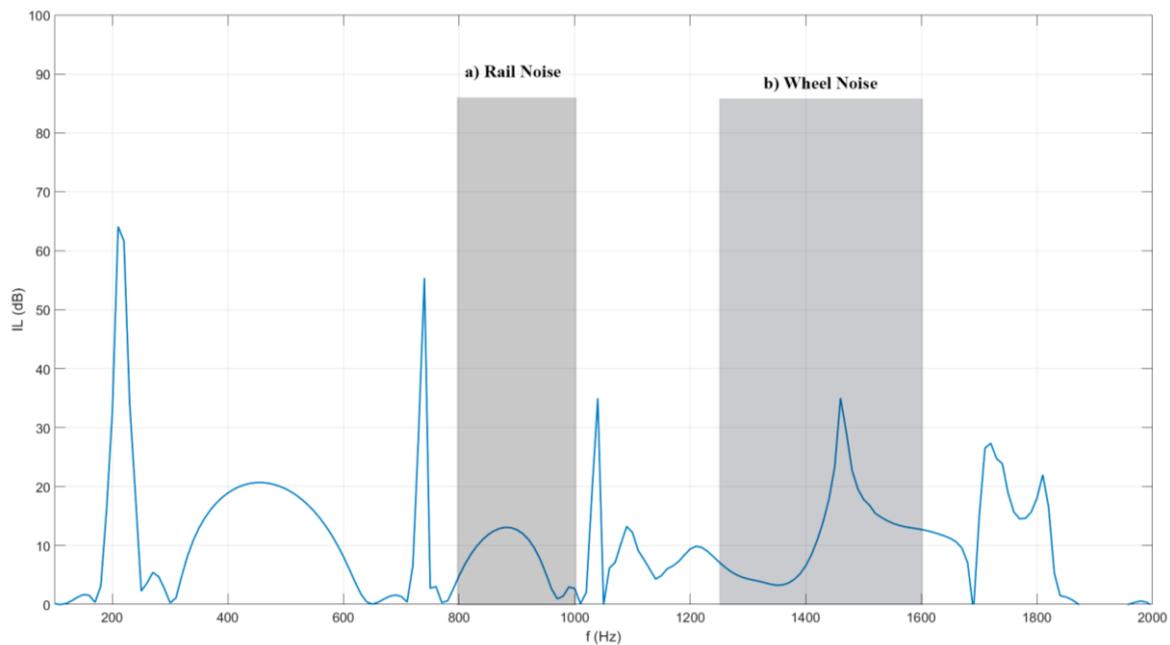
Para la elaboración de este trabajo de fin de grado se ha mostrado progresivamente el diseño de una pantalla acústica basada en SC hasta llegar al punto de ofrecer un nuevo diseño y ponerlo a prueba. Con todo esto se han logrado resultados que se demuestran verídicos y hemos aportado nuestra miga de pan en un campo de investigación tan complejo como es la acústica y, más en concreto, la de las pantallas acústicas de segunda generación. Ahora bien, una vez se extrae el diseño final de resonadores y dispersores, ¿qué papel podría ocupar en un entorno real, suponiendo que esta fuera económicamente viable o que su coste no fuera un problema? Como se ha comentado en el apartado 4.4.3, la posibilidad de rotar los elementos dispersores y resonadores sobre un eje central generaría una amalgama de posibilidades que resultan interesantes. En un entorno público, por ejemplo, la pantalla podría adaptarse al nivel de ruido de tráfico. De esta forma, en momentos de mucha densidad de tráfico los elementos rotativos podrían cerrarse (Figura 28) dando lugar a una pantalla con una gran superficie de incidencia pero que ofrece una visibilidad nula. Cuando exista un nivel de ruido medio, los elementos giratorios podrían situarse a  $45^\circ$  (Figura 29) y de esta forma se comportaría de la misma forma que su equivalente circular. Por último, en un caso de tráfico relajado o nulo, la pantalla podría quedar abierta (Figura 30) de forma que, aunque ofrezca una menores pérdidas por inserción, de lugar a una mejor visibilidad. Sería por tanto un diseño, no solamente funcional en cuanto a su comportamiento, si no que podría hacer de las pantallas acústicas un elemento más amigable con las personas.

Es cierto que el estudio está limitado en tanto que se ciñe a simulaciones en dos dimensiones y con una onda incidente a  $90^\circ$  de la pantalla, mientras que las ondas sonoras emitidas por vehículos incidirían desde todos los ángulos posibles. Es suficientemente riguroso, aun así, como para que sus resultados merezcan ser tenidos en cuenta.

Un ejemplo de aplicación de estas pantallas acústicas estaría en la atenuación del ruido producido por trenes de alta velocidad. El ruido generado por estos proviene de tres fuentes principales: La primera es el rail, cuyo pico se encuentra la banda de 1/3 de octava de 800-100Hz, la segunda la rueda, cuyo pico se encuentra en la banda de 1250-1600Hz y la última es el ruido aerodinámico, que no tendremos en cuenta por estar por encima de los 2000Hz, frecuencia a partir de la cual no se están tomando datos [8].

Al fin y al cabo el objetivo final de el proyecto es estudiar una solución tecnológica para lograr un mayor bienestar. Todo elemento que ayude a luchar contra el ruido implica un avance en favor de la salud pública. Este proyecto es especialmente sensible al bienestar social ya que, no solo previene problemas relacionados por el ruido, si no que, además, intenta hacer de unos elementos que generan tanto impacto visual como las pantallas acústicas, infraestructuras más amigables con la sociedad.

Por último destacar que este proyecto se ha realizado con la intención de servir como un paso adelante en la ingeniería acústica y de ser de utilidad en un futuro, ya sea para el autor como para cualquier otro profesional.



**Figura 44:** Representación de las bandas de frecuencia críticas en un tren de alta velocidad respecto a las pérdidas por inserción de la pantalla acústica con dispersores elípticos y resonadores situados a 40°.



## Capítulo 6. Apéndice

### 6.1 Abreviaturas

- **IL**, Insertion Loss o pérdidas por inserción en decibelios.
- $f_h$ , frecuencia de Helmholtz.
- $f_{BRAGG}$ , frecuencia de Bragg.
- $ff$ , Filling Factor o factor de llenado.
- **AA**, área de atenuación acústica en dB\*Hz
- **SC**, cristal de sonido.
- **D**, diámetro del dispersor.
- **R**, radio del dispersor



## Capítulo 7. Bibliografía

- [1] 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
- [2] B.A. Kugler, D.E. Commin, *The Characteristics of Highway Noise Propagation*, Jan 1971
- [3] Kate Wagner, *Building the Wall: Highway Sound Barriers and the Evolution of Noise*, 2016
- [4] Sánchez-Pérez J.V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandia R., Gómez V, (2002), Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers, *Applied Physics Letters*, 81, 5240-5242
- [5] Bravo, JM, *Apuntes de Acústica Ambiental*, 2020.
- [6] 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.
- [7] María Pilar Peiró-Torres, Sergio Castiñeira-Ibáñez, Javier Redondo, and Juan Vicente Sánchez-Pérez, *Interferences in locally resonant sonic metamaterials formed from Helmholtz resonator*, May 2019
- [8] Xu Zheng, Zhiyong Hao, Xu Wang, Jie Mao. *A full-spectrum analysis of high-speed train interior noise under multi-physical-field coupling excitations*. 2016, Vol. 75.



## Capítulo 8. Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia y a mis amigos su apoyo, porque sin ellos no hubiera tenido la fuerza suficiente para continuar. También quiero dar las gracias a Laura por su apoyo a lo largo de estos años, a Fran por sus ideas, a Javi y Josep por ser unos buenos amigos y mejores compañeros de prácticas, a Gloria por recordarme que me gusta la ingeniería, a mis tutores por su paciencia y a la música por sonar en mis oídos.