



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

ESTUDIO DE BARRERAS ACÚSTICAS DE CRISTALES  
DE SONIDO Y RESONADORES ORIENTADOS

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Acústica

AUTOR/A: Martínez Muñoz, Irene

Tutor/a: Martínez Mora, Juan Antonio

Cotutor/a: Bravo Plana-Sala, José María

Cotutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA  
Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“ESTUDIO DE BARRERAS ACÚSTICAS  
DE CRISTALES DE SONIDO Y  
RESONADORES ORIENTADOS”**

***TRABAJO FINAL DE MASTER***

Autor/a:

**Martínez Muñoz, Irene**

Tutor/a:

**Martínez Mora, Juan Antonio  
Bravo Plana-Sala, José María  
Castiñeira-Ibáñez, Sergio**

***GANDIA, 2022***

## Resumen

En los últimos años han aparecido nuevas tecnologías de materiales empleados para el apantallamiento acústico. Entre estos encontramos las barreras basadas en cristales de sonido, barreras que replican la estructura atómica cristalina basada en la repetición periódica de elementos denominados dispersores acústicos. En este estudio se trabajará con estas barreras añadiéndoles un fenómeno de absorción acústica basado en el resonador de Helmholtz que se inserta en cada dispersor. Este trabajo presenta un doble objetivo: - Trabajar con una cámara doble que permita situar las resonancias de las cámaras de Helmholtz a ambos lados de la frecuencia Bragg, frecuencia fundamental de trabajo basada en el efecto de dispersión múltiple. - Estudiar el efecto de la orientación en este doble cámara en relación con la dirección de la onda incidente. Se persigue llegar a estudiar el efecto de una doble cámara helicoidal. El modelo planteado se realizará en 3D con el objeto de que sea lo más realista posible ya que añadirá características de límite (cumbre y lateral) al modelo de barrera planteado. Este planteamiento es una alternativa fiable mientras no sea posible volver a realizar medidas acústicas en cámara anecoica cerrada por la situación derivada del COVID 19.

## Resum

En els últims anys han aparegut noves tecnologies de materials emprats per a l'apantallament acústic. Entre aquests trobem les barreres basades en cristalls de so, barreres que repliquen l'estructura atòmica cristal·lina basada en la repetició periòdica d'elements denominats dispersors acústics. En aquest estudi es treballarà amb aquestes barreres afegint-les un fenomen d'absorció acústica basat en el ressonador de Helmholtz que s'insereix en cada dispersor. Aquest treball presenta un doble objectiu: - Treballar amb una cambra doble que permeti situar les ressonàncies de les cambres de Helmholtz a banda i banda de la freqüència Bragg, freqüència fonamental de treball basada en l'efecte de dispersió múltiple. - Estudiar l'efecte de l'orientació en aquesta doble cambra en relació amb la direcció de l'ona incident. Es persegueix arribar a estudiar l'efecte d'una doble cambra helicoidal. El model plantejat es realitzarà en 3D a fi que siga el més realista possible ja que afegirà característiques de límit (carener i lateral) al model de barrera plantejat. Aquest plantejament és una alternativa fiable mentre no siga possible tornar a realitzar mesures acústiques en cambra anecoica tancada per la situació derivada del COVID 19.

## Abstract

In recent years, new technologies for acoustic shielding materials have appeared. Among these we find the barriers based on sound crystals, barriers that replicate the crystalline atomic structure based on the periodic repetition of elements called acoustic scatterers. In this study we will work with these barriers by adding an acoustic absorption phenomenon based on the Helmholtz resonator inserted in each scatterer. This work presents a double objective: - To work with a double chamber that allows placing the resonances of the Helmholtz chambers on both sides of the Bragg frequency, the fundamental working frequency based on the multiple scattering effect. - To study the effect of the orientation in this double chamber on the direction of the incident wave. The aim is to study the effect of a double helical chamber. The proposed model will be made in 3D to be as realistic as possible since it will add boundary features (ridge and lateral) to the proposed barrier model. This approach is a reliable alternative if it is not possible to perform acoustic measurements in a closed anechoic chamber due to the situation derived from COVID 19.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mis tutores, Sergio y Chema, por haberme dado la oportunidad de continuar lo que empezamos hace más de un año en el TFG, por su ayuda, paciencia y esfuerzo. Y a Joan, por su ayuda y por todo lo que he aprendido gracias a sus clases. Gracias al resto de profesores por todo lo que nos han enseñado a lo largo del máster.

Muchas gracias también a mi familia porque sin ellos esto no habría sido posible, y a mis amigos, por su apoyo incondicional.

Por último, agradecer a mis compañeros y amigos del máster por haber hecho que este año haya sido inolvidable y haber creado una pequeña familia, por todas las experiencias vividas dentro y fuera de la universidad.

## Abreviaturas

$\lambda$	Longitud de onda (m)
<b>a</b>	Parámetro de red, distancia entre los centros de dos dispersores consecutivos (m)
<b>AA</b>	Área de atenuación (dB·Hz)
<b>BG</b>	<i>Band gap</i> , banda de atenuación que aparece alrededor de la $f_{\text{Bragg}}$ debido al fenómeno de dispersión que ocurre en la barrera
<b>c</b>	Velocidad de sonido en el aire ( $\approx 340$ m/s)
<b>CS</b>	Cristales de sonido
<b>d</b>	Distancia entre dispersores (m)
<b>f</b>	Frecuencia (Hz)
<b>ff</b>	Factor de llenado
$f_{\text{Bragg}}$	Frecuencia de Bragg (Hz)
$f_h$	Frecuencia de resonancia (Hz)
$f_{h1}$	Frecuencia resonancia del primer resonador (R1)
$f_{h2}$	Frecuencia resonancia del segundo resonador (R2)
<b>HR</b>	Resonador de Helmholtz
<b>IL</b>	Pérdidas por inserción ( <i>Insertion Loss</i> ) (dB)
<b>L</b>	Longitud de la barrera (a lo ancho, en dirección x) (m)
$L_H$	Longitud del cuello de un resonador de Helmholtz (m)
$L_{H1}$	Longitud del cuello del resonador 1
$L_{H2}$	Longitud del cuello del resonador 2
<b>LRG</b>	<i>Band gap</i> localmente resonante, banda de atenuación que aparece alrededor de la $f_h$ debido al fenómeno de resonancia que ocurre en el resonador
<b>LRG1</b>	<i>Band gap</i> localmente resonante 1, banda de atenuación que aparece alrededor de la $f_{h1}$ debido al fenómeno de resonancia que ocurre en el Resonador 1 (R1)
<b>LRG2</b>	<i>Band gap</i> localmente resonante 2, banda de atenuación que aparece alrededor de la $f_{h2}$ debido al fenómeno de resonancia que ocurre en el Resonador 2 (R2)
<b>R1</b>	Primer resonador, se ha denominado así al resonador diseñado cuyo LRG se encuentra por debajo del BG
<b>R2</b>	Segundo resonador, se ha denominado así al resonador diseñado cuyo LRG se encuentra por encima del BG
$r_{\text{ext}}$	Radio de dispersor acústico
$r_c$	Radio de la cavidad del resonador de Helmholtz
$r_{c1}$	Radio de la cavidad del resonador 1
$r_{c2}$	Radio de la cavidad del resonador 2
$r_p$	Radio de la pared separadora que divide la cavidad el R1 y el R2
$S_H$	Sección de abertura del cuello de un HR ( $\text{m}^2$ / en 2D equivale a una longitud, m)
$S_{H1}$	Sección de abertura del cuello del resonador 1
$S_{H2}$	Sección de abertura del cuello del resonador 2

# Índice

Capítulo 1. Marco teórico .....	4
1.1 Conceptos básicos de las barreras basadas en CS .....	4
1.2 Fenómenos acústicos.....	4
1.2.1 Dispersión acústica.....	5
1.2.1.1 Frecuencia Bragg, $f_{\text{Bragg}}$ .....	5
1.2.2 Resonancia acústica.....	6
1.2.2.1 Frecuencia de resonancia, $f_h$ .....	6
1.3 Otros parámetros .....	7
1.3.1 Factor de llenado, $ff$ .....	7
1.3.2 Área de atenuación, $AA$ .....	8
1.4 Método de simulación: método de elementos finitos (FEM).....	8
1.4.1 Diseñar geometría .....	9
1.4.2 Definir dominio: materiales.....	9
1.4.3 Definir dominio: ecuaciones y condiciones de contorno .....	10
1.4.3.1 Ecuación de ondas .....	10
1.4.3.2 Módulo de presión acústica.....	11
1.4.3.3 Condición de fuente de presión .....	11
1.4.3.4 Condición de contorno rígido.....	11
1.4.3.5 Condición de radiación.....	11
1.4.3.6 Condición periódica .....	11
1.4.4 Discretizar dominio (crear el mallado).....	12
1.5 Resultados: pérdidas por inserción, $IL$ .....	12
Capítulo 2. Trabajos previos .....	14
Capítulo 3. Objetivos .....	15
3.1 Objetivos generales .....	15
3.2 Objetivos específicos.....	15
Capítulo 4. Estructura y metodología del proyecto.....	16
4.1 Estructura .....	16
4.2 Metodología .....	17
Capítulo 5. Exposición de los estudios y análisis de resultados.....	18
5.1 Parametrización de la rotación de los resonadores.....	18
5.1.1 Dispersor aislado .....	19
5.1.1.1 Estudio de las $IL$ , punto receptor a 1 m.....	19
5.1.1.2 Estudio de la presión acústica dentro de R1 y R2 .....	20

5.1.2	Barrera basada en CS .....	21
5.1.2.1	Estudio de las IL, punto receptor a 1 m.....	21
5.1.2.2	Estudio de la presión acústica dentro de R1 y R2 .....	22
a)	En los tres dispersores, R1 y R2 orientados 0° .....	23
b)	En el primer dispersor, variando orientación de R1 y R2 .....	24
5.2	Estudio del Resonador 2.....	25
5.2.1	Estudio de las IL, punto receptor a 1m.....	25
5.3	Estudio y mejora del diseño del Resonador 2 .....	26
5.3.1	Modificar estructura del R2.....	27
5.3.1.1	Variando $r_c$ .....	27
5.3.1.2	Añadiendo otro R2 a -90° .....	28
5.3.2	Añadiendo a esta nueva estructura el R1.....	28
5.4	Estudio y mejora del diseño de la barrera .....	29
5.4.1	Modificar la combinación de los dispersores .....	30
5.4.1.1	1 dispersor formado por resonadores y 2 dispersores rígidos .....	30
5.4.1.2	2 dispersores formados por resonadores y 1 dispersor rígido .....	31
5.4.2	Modificar la estructura una vez elegida la combinación de dispersores .....	32
5.4.3	Nueva modificación de la combinación de los dispersores.....	34
5.5	Comparación de los principales modelos diseñados .....	34
5.6	Combinación de distintas orientaciones de dispersores (modelos 2D) .....	35
5.6.1	Modelos formados por 16x3 dispersores compuestos por R1.....	36
5.6.2	Modelos formados por 16x3 dispersores compuestos por R2.....	38
5.6.3	Modelos formados por 16x3 dispersores compuestos por doble cámara de resonancia (R1+R2) .....	40
5.7	Combinación de distintas orientaciones en un mismo dispersor mediante modelos helicoidales en 3D.....	43
5.7.1	Modelos en 3D (base teórica).....	43
5.7.2	Modelos helicoidales: 3 columnas de dispersores compuestos por R1 .....	45
5.7.3	Modelos helicoidales: 3 columnas de dispersores compuestos por R2.....	46
5.7.4	Modelos helicoidales: 3 columnas de dispersores compuestos por doble cámara de resonancia (R1+R2) .....	49
5.7.5	Análisis de un modelo más realista .....	50
Capítulo 6.	Conclusiones .....	51
6.1	Comparación de los principales modelos diseñados (3D).....	51
Capítulo 7.	Futuros trabajos .....	54
Capítulo 8.	Bibliografía.....	55

## Introducción

Uno de los principales campos de la acústica es el **control de ruido**, es decir, el control de todo sonido no deseado. La **contaminación acústica** es una forma de contaminación atmosférica que amenaza la salud y el bienestar del ser humano y otras especies, convirtiéndose en un problema de primera magnitud hoy en día. [1] [2]

A las **personas** el ruido les puede provocar tanto **problemas fisiológicos** como **problemas psicológicos**, por lo que es importante tratar este gran problema de salud pública. Algunas de las molestias que puede provocar un entorno contaminado acústicamente es: pérdida de audición, trastornos del sueño, enfermedades cardiovasculares, reducción de la productividad, comportamiento social negativo, absentismo y accidentes [1]. Según ha publicado la Sociedad Española de Acústica (SEA) en un comunicado, los datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente afirman que la **exposición prolongada al ruido ambiental** causa 12000 muertes prematuras cada año en Europa y contribuye a 48000 nuevos casos de cardiopatía isquémica, además, unos 22 millones de personas se consideran altamente afectadas por el ruido y 6,5 millones de personas sufren trastornos crónicos del sueño por esta causa [3].

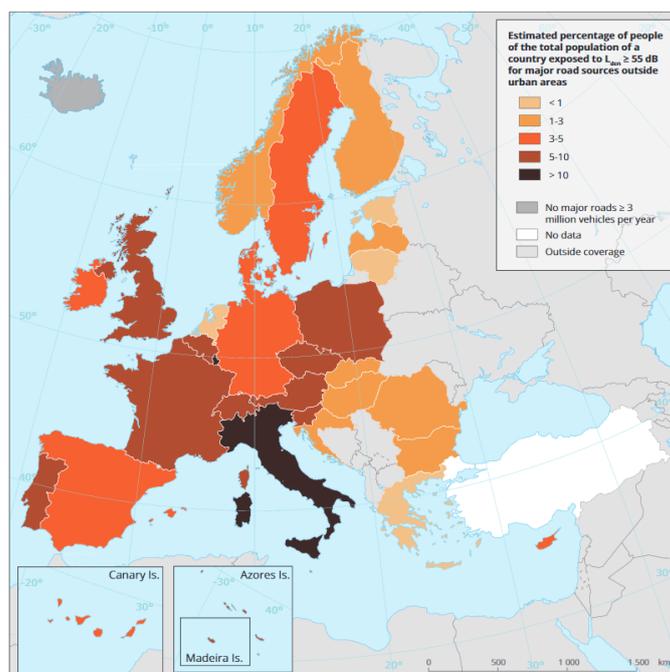


Figura 1. Mapa europeo que representa el porcentaje estimado de la población total de un país expuesta a  $L_{den} \geq 55\text{dB}$  para las principales fuentes de carreteras fuera de las zonas urbanas en 2017.  
Fuente: EEA (2019d) y ETC/ATNI (2019b).

El ruido también puede llegar a perturbar gravemente **otras especies del planeta e incluso ecosistemas** [4]. Por ejemplo, los murciélagos, que realizan sus principales actividades gracias a la ecolocalización que producen mediante ultrasonidos, se ven gravemente afectados si hay problemas de contaminación acústica en la zona donde habitan [5]; o también, muchos animales subacuáticos (ballenas, delfines, ...), pueden enfermar o morir debido al ruido de tráfico marino que les impiden llevar con normalidad su forma de vida [6].

Las principales **fuentes de ruido** se tratan del ruido de tráfico (terrestre, aéreo y marino), maquinarias destinadas a la construcción u otras industrias o la propia actividad humana. Debido, entre otros factores, al crecimiento de la población, la urbanización y la comercialización hay un **aumento del uso de fuentes de ruido**, las cuales además son cada vez más potentes y diversas, por lo que la contaminación acústica es ahora más grave y omnipresente que nunca, y se predice que va a empeorar [1]. Es por ello por lo que es muy importante seguir estudiando y mejorando diferentes **medidas contra el ruido** que se puedan aplicar para solucionar dicho problema.

A lo largo del Máster de Ingeniería Acústica impartido por la Universidad Politécnica de Valencia se han estudiado diferentes temas sobre este campo: se ha aprendido a realizar un control de ruido en edificios mediante el aislamiento acústico; se ha estudiado el comportamiento acústico de los distintos tipos de materiales para saber utilizarlos a la hora de diseñar el comportamiento acústico de salas, edificios, elementos difusores de sonido, elementos atenuadores, etc., y, así pues, poder controlar los diferentes fenómenos acústicos según sea conveniente (absorción, reflexión, difusión, ...); también se ha estudiado la propagación del sonido en asignaturas relacionadas con la acústica urbanística y medioambiental y, con ello, se han estudiado **elementos de medida contra el ruido en el medio transmisor**, como son las **barreras acústicas**. Es sobre este elemento en lo que se centra el presente proyecto.



Figura 2. Barreras acústicas. Fuente: Gramm Barriers.

Este Trabajo de Fin de Máster se centra en el estudio de **pantallas acústicas basadas en cristales de sonido**, un tipo de barrera basada en una tecnología alternativa a la de una barrera acústica tradicional [7]. La estructura de este tipo de pantallas se trata de una red periódica de dispersores rígidos y de alta densidad dispuestos de forma similar a una estructura cristalina y denominados cristales de sonido (CS) [8]. Las barreras de sonido basadas en CS atenúan principalmente gracias al fenómeno de **dispersión múltiple** [7], pero, tal y como se explica en la parte teórica del proyecto, a este tipo de estructuras pueden diseñarse de forma que también atenúen gracias a el efecto de **resonancia** y **absorción** acústica [9] [10]. Este tipo de pantallas presentan una cualidad muy importante: son **permeables**.

La **permeabilidad** que caracteriza este tipo de barreras da lugar a una serie de **ventajas** que no tienen otro tipo de pantallas acústicas: tienen un bajo **impacto paisajístico**, ya que el poder visualizar el otro lado de la barrera hace que no se genere una sensación de encierro; permite el **paso de las corrientes naturales de aire**, evitando así el efecto vela y posibles rupturas en la

estructura; por esta misma razón **no requiere grandes cimentaciones** a la hora de instalarla y, por ello, su instalación es mucho más económica e incluso puede trasladarse fácilmente y utilizarse solamente en ciertos periodos de tiempo; **no embalsa corrientes superficiales de agua**, lo cual también podría causar daños en la estructura o entorno; y es **sintonizable al ruido** del problema ya que según se diseñen o coloquen los dispersores, se puede realizar que atenúen más unas bandas de frecuencia u otras, pudiéndose así adaptar al tipo de ruido o situación. [10] [7]



*Figura 3. Módulo de pantalla basada en CS. Diseño realizado por la UPV y BECSA. Fuente: Anónimo.*

Las pantallas acústicas basadas en CS son una nueva tecnología que actualmente están comenzando a hacer competencia a las barreras tradicionales, sin embargo, gracias a **investigaciones** como las que lleva años desarrollando la Universidad Politécnica de Valencia se está tratando de **mejorar el diseño de este tipo de barreras estudiando a fondo su comportamiento y tratando de introducir nuevos mecanismos** [9] [10] [11]. Un ejemplo de ello es que ya se han hecho varios estudios tratando de introducir resonadores de Helmholtz en los dispersores que componen este tipo de estructuras para, así, aportar nuevas bandas de atenuación debidas al efecto de resonancia. Este proyecto se suma a dicha iniciativa tratando de analizar mejor este tipo de estructuras y así poder presentar nuevas soluciones que mejoren su comportamiento.

## Capítulo 1. Marco teórico

### 1.1 Conceptos básicos de las barreras basadas en CS

A la hora de estudiar o diseñar una estructura basada en CS hay que tener en cuenta muchos parámetros. En primer lugar, es importante saber que el fenómeno de dispersión múltiple que se produce en esta estructura se debe a la diferencia de impedancia del material que forma los dispersores y el material del medio (el cual es, generalmente, aire), por lo que es importante elegir un **material** adecuado.

También es muy importante tener en cuenta que hay distintos **tipos de distribución** periódica para los dispersores acústicos [12]. Los dos tipos más utilizados son la distribución de **red cuadrada** y la distribución de **red triangular** (véase Figura 4).

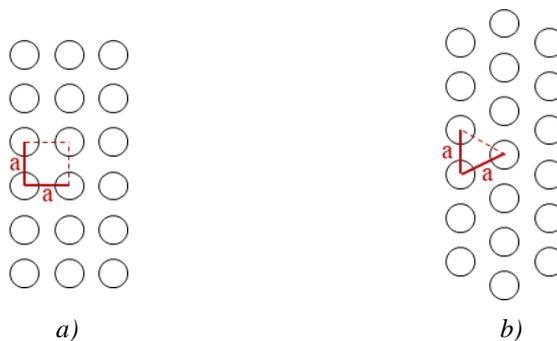


Figura 4. Ejemplos de distribución de red a) cuadrada y b) triangular.

Con ello, aparece uno de los parámetros más importantes en la teoría de este tipo de estructuras: el **parámetro de red (a)**, el cual corresponde a la distancia entre dispersores. Las frecuencias que se verán afectadas por el fenómeno de dispersión dependerán principalmente de dicho parámetro, aunque también hay otros factores que pueden contribuir. Todo ello se explica con más detalle en los siguientes apartados.

### 1.2 Fenómenos acústicos

Tal y como se ha mencionado, la **dispersión** es uno de los principales fenómenos por los que atenúan este tipo de pantallas de sonido. Sin embargo, se pueden añadir otros dos fenómenos: la **resonancia** (mediante la inserción de Resonadores de Helmholtz (HR) en los dispersores acústicos) y la **absorción** (utilizando material absorbente). Las pantallas acústicas que sólo hacen uso de la dispersión múltiple como fenómeno de atenuación son las denominadas **pantallas acústicas de primera generación**, mientras que las que añaden los otros dos fenómenos corresponden a **pantallas acústicas de segunda generación** [7] [9] [10]. Tal y como se verá más adelante, este proyecto trata de añadir el efecto de resonancia a la pantalla acústica para tratar de mejorar en el rango de frecuencias estudiado la atenuación de la barrera, es decir, trata de sumar de forma constructiva los efectos de dispersión y resonancia mediante el uso de HR.

### 1.2.1 Dispersión acústica

La dispersión acústica es uno de los principales fenómenos de atenuación acústica para las barreras basadas en CS. Se produce cuando una onda de sonido cambia de dirección al encontrarse con obstáculos, por ello, cuando una onda acústica incide sobre una pantalla de este tipo, se produce el efecto de **dispersión múltiple**, ya que dicha **onda es reflejada múltiples veces por los dispersores que se encuentran distribuidos de forma periódica**. Este fenómeno hace que las diferentes reflexiones generen interferencias constructivas y destructivas y, con ello, aparecen bandas de frecuencia en las que no existe propagación, dando lugar a la atenuación sonora [13]. Estas bandas son las denominadas **Band Gaps (BG)** y su frecuencia central es la frecuencia Bragg ( $f_{\text{Bragg}}$ ).

#### 1.2.1.1 Frecuencia Bragg, $f_{\text{Bragg}}$

Se pueden calcular la frecuencia en la que se centra el BG gracias a la ley de Bragg [14] [13]:

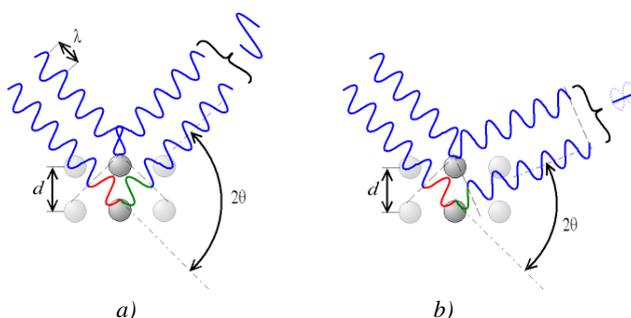


Figura 5. Esquema de dos ondas dispersadas, cuya interferencia es: a) constructiva b) destructiva.

En la Figura 5 vemos esquemáticamente el caso de dos ondas reflejadas por dispersores cuya interferencia es constructiva y destructiva, respectivamente. Se observa que **la diferencia es constructiva cuando la diferencia de fase entre ambas ondas es proporcional a  $2\pi$ , es decir, a una longitud de onda exacta ( $\lambda$ )**. Por lo tanto, siendo  $\theta$  el ángulo entre la dirección de la onda incidente y la dispersada,  $d$  la distancia entre los centros de las filas de los dispersores y  $n$  un número entero, se define la **ley de Bragg** como:

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}(\theta) \quad (1)$$

Ya que queremos encontrar la  $f_{\text{Bragg}}$ , teniendo en cuenta que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, se sustituye:

$$n \cdot \frac{c}{f} = 2d \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2)$$

Además, dado que la dirección de propagación de la onda incidente es perpendicular a la barrera acústica:  $\theta = 90^\circ$  (siendo  $\text{sen}(90^\circ) = 1$ ), la  $f_{\text{Bragg}}$  de primer orden ( $n=1$ ) se define mediante la ecuación:

$$f_{Bragg} = \frac{c}{2d} \quad (3)$$

Para los dos tipos de distribución típicos, la distancia entre dispersores corresponde a las mostradas en la Figura 6, por lo que la  $f_{Bragg}$  para cada tipo de distribución es:

- Red cuadrada:  $f_{Bragg} = \frac{c}{2a}$  (4)

- Red triangular:  $f_{Bragg} = \frac{c}{\sqrt{3} \cdot a}$  (5)

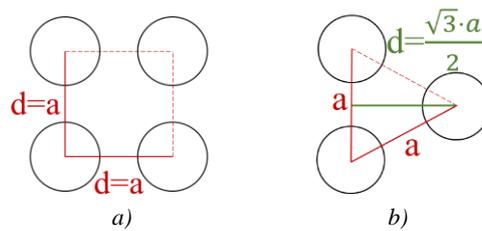


Figura 6. Esquema de distribución de red a) cuadrada y b) triangular, indicando sus parámetros (a y d).

### 1.2.2 Resonancia acústica

Los **resonadores de Helmholtz (HR)** son estructuras formadas por una cavidad hueca conectada al exterior por un orificio llamado cuello. Al insertar este tipo de estructuras en los dispersores que componen una barrera basada en CS se puede añadir el efecto de **resonancia** y, con ello, aumentar la atenuación acústica que aporta la pantalla [9] [10] [13]. Sin embargo, es importante tratar de añadir este efecto sin que la banda de atenuación debida al efecto de resonancia (denominada **Band Gap localmente resonante, LRG**) destruya el BG que aporta el efecto de dispersión [15]. Esto es uno de los principales estudios en los que se centra este proyecto.



Figura 7. Resonadores de Helmholtz. Fuente: Case Western Reserve University.

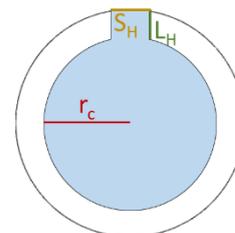


Figura 8. Estructura de un resonador de Helmholtz

#### 1.2.2.1 Frecuencia de resonancia, $f_h$

La frecuencia propia del resonador está definida por los tamaños de la estructura de éste: por su **longitud del cuello ( $L_H$ )**, **sección de apertura ( $S_H$ )** y **radio de la cavidad ( $r_c$ )** (véase Figura 8). El aire que entra en su interior a través del cuello actúa como una masa resonante que **absorbe** la energía cuando la frecuencia de la onda incidente coincide con la frecuencia propia del HR. Como

consecuencia, aparece una banda estrecha de atenuación, el LRG, alrededor de esta **frecuencia de resonancia**:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_H}{L_H \cdot V}} \quad (6)$$

Sin embargo, diversos estudios han demostrado que dicha ecuación necesita un factor de corrección [16]. Por lo que la ecuación de la  $f_h$  queda de la siguiente manera:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S_H}{(L + 1.8 \cdot \frac{S_H}{2}) \cdot \pi \cdot r_c^2}} \quad (7)$$

Por lo tanto, a la hora de insertar un HR en un dispersor acústico se deben estudiar los tamaños de su estructura para poder **colocar la  $f_h$  en las bandas de frecuencia adecuadas**. Tal y como se verá más adelante, este proyecto inserta dos tipos de HR distintos en un mismo dispersor para colocar un LRG por debajo del BG y otro por encima. De esta forma, el espectro de frecuencias estudiado será más completo en cuanto a la atenuación acústica que aporte la barrera.

### 1.3 Otros parámetros

#### 1.3.1 Factor de llenado, $ff$

Es importante mencionar el **factor de llenado ( $ff$ )** ya que este parámetro influye en el ancho del BG. El  $ff$  se define como la **cantidad ocupada por dispersores por unidad de superficie**, matemáticamente esto es el valor resultante de la división entre el volumen que corresponde al medio dispersor (Figura 9, verde) y el volumen total de la red (Figura 9, rojo) [13]. Su expresión para redes cuadradas y triangulares se encuentran en las siguientes ecuaciones y se pueden entender fácilmente observando las imágenes de la Figura 9:

- Red cuadrada: 
$$ff = \frac{\pi \cdot r^2}{a^2} \quad (8)$$

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

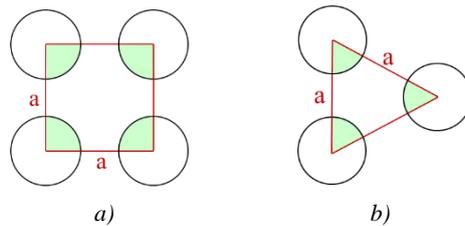


Figura 9. Esquema de distribución de red a) cuadrada y b) triangular, indicando las áreas relacionadas con el  $ff$ .

Así, se tiene que realizar el diseño de pantalla acústica basada en CS teniendo en cuenta de que **si hay demasiados dispersores por unidad de superficie** el espacio entre ellos es menor y, por tanto, a partir de cierto número de dispersores la barrera deja de tener su principal ventaja, **deja de ser permeable** y comienza a comportarse de forma similar a una barrera tradicional. Por otro lado, **si no se utiliza una cantidad suficiente de dispersores por unidad de superficie la barrera no atenúa suficiente** ya que no se produce de forma efectiva el efecto de dispersión acústica. Por tanto, esto se debe de tener en cuenta a la hora de diseñar la distancia entre dispersores y su tamaño de radio [11].

### 1.3.2 Área de atenuación, AA

Este parámetro **cuantifica numéricamente la atenuación producida por un elemento**. Se define como el **área encerrada entre la parte positiva del espectro de atenuación**, por lo que cuanto mayor valor tenga el área de atenuación (AA) equivaldrá a una mayor atenuación acústica [18] [19]. Dado que este parámetro representa un área, para su cálculo, hay que realizar una integral del área comprendida entre el espectro de atenuación y el eje de abscisas. Este cálculo se ha realizado en este trabajo mediante la herramienta MATLAB. La unidad del AA es dB·Hz. Gráficamente, este parámetro sería el representado en la siguiente figura (dónde el parámetro IL indica las pérdidas por inserción que aporta la barrera en función de la frecuencia, un parámetro que se explica más adelante (apartado 1.5)):

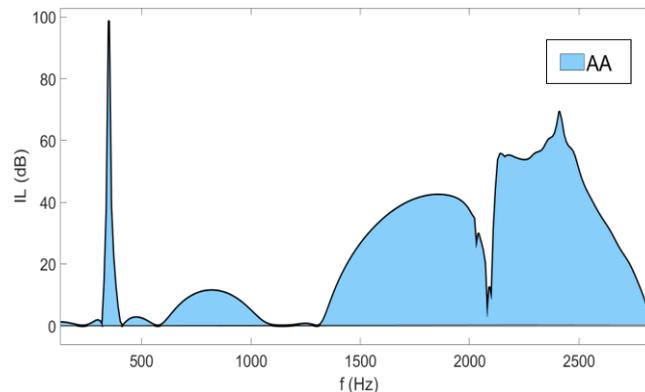


Figura 10. Representación gráfica del AA (azul) para un espectro de IL.

## 1.4 Método de simulación: método de elementos finitos (FEM)

Este proyecto se encarga de la simulación de pantallas acústicas basadas en CS mediante el **método de elementos finitos**. Este es uno de los métodos más utilizados para técnicas de simulación de fenómenos físicos y permite un análisis tanto en dominio temporal como en dominio frecuencial. El método parte de la **discretización del dominio** a estudiar en elementos formados por tres nodos, siendo el conjunto de dichos elementos el denominado **mallado**. El FEM resuelve el estudio mediante la **resolución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales** que caracterizan su comportamiento en cada elemento de la malla. Así, cuanto más fino sea el mallado, es decir, cuanto más pequeños sean los elementos que componen la malla, el estudio será más preciso, pues habrá un mayor número de cálculos, y los resultados serán más

fieles a la realidad. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cuanto más fino sea el mallado el diseño tendrá mayor coste computacional.

El software utilizado para ello es **COMSOL Multiphysics**, un software que se dedica al modelado y análisis para simulaciones virtuales de fenómenos físicos [20] y cuyo **módulo acústico** permite simulaciones en campos como la electroacústica o acústica ambiental. Además, permite realizar análisis de los modos propios de una estructura, simulaciones de la respuesta acústica de un sistema de excitación armónica o estudios de la respuesta temporal o frecuencial de un sistema con condiciones de condiciones iniciales impuestas. Con este software se pueden realizar estudios de diseños tanto en 2D como en 3D.

Los pasos para seguir para realizar una simulación mediante el método de elementos finitos son los mostrados en la siguiente figura y definidos en los siguientes subapartados.

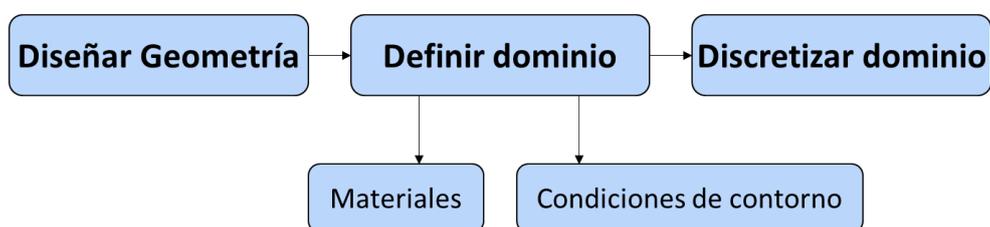


Figura 11. Pasos para la aplicación del FEM.

#### 1.4.1 Diseñar geometría

En primer lugar, es importante **definir la geometría** del diseño a simular. Para ello, COMSOL ofrece una serie de **figuras** que se deben de crear con el tamaño y la posición deseada. Además, el software permite realizar distintas **operaciones** a partir de dichas figuras (aplicar operaciones de unión, intersección o similares entre ellas; duplicarlas mediante *arrays*; escalarlas; etc.). Con todo ello, se pueden realizar diseños bastante elaborados. Sin embargo, tal y como ha ocurrido y se explicará en el desarrollo de este proyecto, si un diseño es demasiado complejo puede ser mucho más sencillo utilizar un software especializado en el modelado de geometrías, como AutoCAD, ya que COMSOL permite la importación de geometrías creadas con otros programas.

#### 1.4.2 Definir dominio: materiales

Una vez se tiene creada la geometría, es importante **definir el dominio**. Así, se define el **material** del cual están compuestos los elementos diseñados. En el caso de los diseños creados para este proyecto, se define el **aire** como material del **medio**. El material por el cual están formados los dispersores no se va a tener en cuenta, ya que se va a definir condición de contorno rígido en las paredes que forman el dispersor, lo que equivale a una reflexión de la onda cuando se encuentra con la barrera (equivaldría a cualquier material que cumpliera con dichas características).

### 1.4.3 Definir dominio: ecuaciones y condiciones de contorno

También se deben de definir las **ecuaciones** y **condiciones de contorno** del modelo creado. Dichas ecuaciones son las que emplea COMSOL para aplicar el FEM a la hora de realizar las simulaciones. A continuación, se definen las utilizadas en este trabajo [13], comenzando por la definición de la **ecuación de ondas**, ya que es la **ecuación principal por la que se parte en los estudios acústicos**.

#### 1.4.3.1 Ecuación de ondas

La **ecuación de ondas** parte de la ecuación matemática siguiente (donde  $\rho_0$  es la densidad del medio ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_s$  es la velocidad del sonido ( $\text{m/s}$ ),  $\vec{q}$  es la fuente dipolar ( $\text{N/m}^3$ ) y  $\vec{Q}$  es la fuente monopolar ( $1/\text{s}^2$ ):

$$\frac{1}{\rho_0 c_s} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) = \vec{Q} \quad (10)$$

dado que en este proyecto el software va a realizar un análisis armónico temporal para poder obtener los espectros en frecuencia y los mapas de presión, la ecuación anterior queda:

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

dado que la presión depende de la posición y la frecuencia:

$$p = p(\vec{x}, \omega) \quad (12)$$

siendo  $\omega$  la frecuencia angular ( $\text{rad/s}$ ) y  $f$  la frecuencia lineal ( $\text{Hz}$ ), cuya relación es:

$$\omega = 2\pi f \quad (13)$$

para el caso 2D, con una onda incidente plana, la ecuación adopta la forma:

$$p(\vec{r}) = p(x, y) \cdot e^{-ik_z z} \quad (14)$$

siendo  $k_z$  el número de onda fuera del plano que por defecto es cero y, como no existen monopolos ni dipolos, estos también serán nulos. Así, la **ecuación de ondas para el análisis temporal se muestra en la siguiente ecuación en derivadas parciales (EDP)**:

$$\nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p) \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c_s^2} p = 0 \quad (15)$$

Una vez definida y expuesta la ecuación de ondas, se definen las **condiciones de contorno** que se va a utilizar en los estudios expuestos en este proyecto. Estas condiciones de contorno son las que el software aplica a la EDP expuesta en la expresión anterior ( 15 ).

#### 1.4.3.2 Módulo de presión acústica

Es el módulo donde la **ecuación de ondas (15) resuelve la presión total**  $\rightarrow p_t =$  presión total

#### 1.4.3.3 Condición de fuente de presión

Esta condición especifica la **presión acústica en el contorno**, siendo  $p_0$  la amplitud de la **presión de origen**:

$$p = p_0 \quad (16)$$

#### 1.4.3.4 Condición de contorno rígido

También conocida como **condición de Neumann**. Expone que el contorno del elemento es rígido, por lo que la derivada parcial de la presión en la superficie es nula y por ello la amplitud de la presión en la superficie será máxima o mínima:

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

Esto implica que el contorno que tenga dicha condición reflejará la onda.

#### 1.4.3.5 Condición de radiación

Esta condición permite que la **onda salga del dominio de modelado con reflejos mínimos o nulos**, es decir, el contorno exterior en el que se aplique consistirá en un campo dispersado de ondas salientes. También es conocida como condición de Sommerfeld y se puede aplicar a ondas planas, cilíndricas y esféricas, las ondas emitidas en los modelos del presente proyecto son ondas planas, por lo que para aplicar dicha condición en el contorno hay dos posibilidades:

- utilizar  $p_0=0$ , 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  $p_0= p_i$ , 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 la condición de contorno radiación viene dada por la expresión:

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

#### 1.4.3.6 Condición periódica

La **condición de contorno de periódica** se va a utilizar en este proyecto para realizar los denominados **modelos ideales** de barreras basadas en CS. Esto es que, aplicando una condición de contorno periódica en las dos paredes paralelas a una fila de dispersores, se **simula un modelo cuya longitud de pantalla es infinita** (véase Figura 12), por ello, de **condiciones ideales**. Debido a la simplificación que supone un modelo con estas características, el **coste computacional se ve**

**reducido** y los resultados son equivalentes a los de un modelo en condiciones anecoicas. Esto está estudiado y explicado en trabajos anteriores [11] y en la exposición de los resultados de este proyecto.

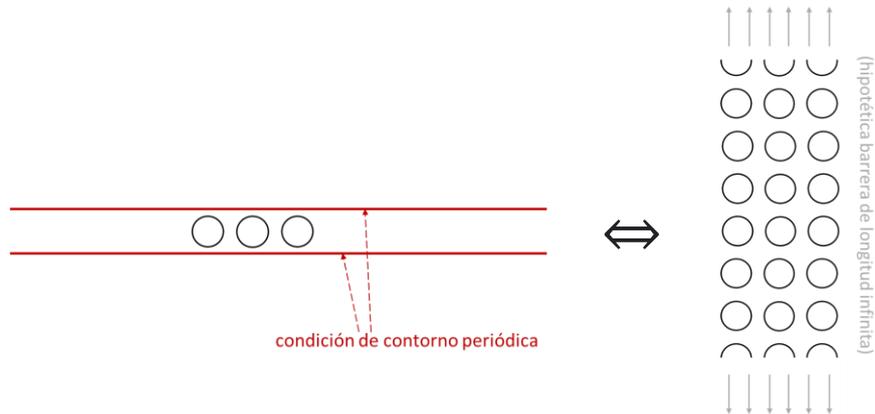


Figura 12. Modelo ideal de barrera basada en CS y su modelo equivalente de longitud infinita debido a condiciones de contorno periódicas del modelo.

#### 1.4.4 Discretizar dominio (crear el mallado)

Finalmente, el último paso previo a comenzar el estudio es **discretizar el dominio**, esto se realiza mediante la **creación de un mallado**. El software ofrece la opción de que el mallado sea **definido por el usuario** o esté **controlado por la física** (opción mediante la cual ofrece una serie de mallas con diferente precisión (*gruesa, fina, muy fina, ...*)). Tal y como ya se ha mencionado, es importante que el **mallado sea lo más fino posible para que la precisión del estudio sea adecuada**, sin embargo, esto se debe de **equilibrar** para no obtener un **coste computacional** demasiado alto. Para ello es importante también tener en cuenta el rango de frecuencias que se va a analizar, ya que, debido a que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de ondas, para frecuencias altas, el tamaño de los elementos que forman la malla deberá de ser suficientemente pequeños. Existe una ecuación que relaciona dichos parámetros para calcular el **tamaño mínimo del elemento** para obtener unos resultados muy precisos:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{8} = \frac{c}{8 \cdot f_{max}} \quad (19)$$

Esta ecuación se ha utilizado para crear la malla de los modelos 2D de este proyecto, sin embargo, dado que los modelos 3D son mucho más complejos, por cuestión de coste computacional se ha debido de utilizar una malla controlada por la física. Todo ello se explicará mejor cuando se expongan dichos modelos.

### 1.5 Resultados: pérdidas por inserción, IL

Los resultados de las simulaciones que se van a realizar a lo largo del trabajo se van a representar mediante el **espectro de pérdidas por inserción (IL)**. Las IL, en acústica, corresponden a la

**diferencia de nivel de presión sonora en la zona cuando no hay pantalla respecto a cuando sí la hay.** En la ecuación ( 20 ) se define matemáticamente este parámetro, donde  $P_d$  es la presión eficaz que llegaría directamente a la zona receptora si no hubiera barrera y  $P_i$  es la presión eficaz que llega a la zona receptora habiendo una barrera de sonido entre dicha zona y la fuente acústica [2] [10]:

$$IL = 20 \cdot \log \left| \frac{P_d}{P_i} \right| \quad (\text{dB}) \quad (20)$$

Este proyecto se centra en el estudio de las frecuencias desde 100Hz hasta 3000Hz, una zona del espectro acústico importante en cuanto al ruido, y el objetivo de este trabajo es mejorar el comportamiento de una barrera basada en CS en estas frecuencias, por lo que se va a representar el espectro de IL de varios modelos en dicho rango frecuencial.

## Capítulo 2. Trabajos previos

Este proyecto tiene como base estudios realizados con anterioridad, estudios en los que se explican y exponen qué son las barreras basadas en CS y explican la teoría base de este tipo de estructuras y los fenómenos en los que se basa. Muchos de estos estudios están realizados en la Universidad Politécnica de Valencia, que lleva años investigando sobre esta tecnología.

A raíz de dichos estudios y trabajos se desarrolló el **Trabajo de Fin de Grado** titulado “**Barreras sonoras basadas en cristales de sonido. Estrategia de uso de resonadores insertados en los dispersores para atenuar bandas de baja frecuencia.**” [6], el cual que forma parte de un proyecto previo a este Trabajo de Fin de Máster. Dicho proyecto se basó en el estudio de la influencia de la inserción de resonadores de Helmholtz (HR) en dispersores cilíndricos que componen una barrera basada en CS. Con ello, se estudió el espectro de IL (de 100Hz a 2000Hz) de los modelos diseñados para ver cómo afectaba la banda de atenuación debida al efecto de resonancia (LRG) al *band gap* que surge a raíz del efecto de dispersión.

Se estudiaron diferentes parámetros y se diseñaron distintos resonadores y, con ello, se diseñó un modelo de barrera basada en CS compuesto por doble cámara de resonancia, es decir, los dispersores que componían dicha barrera tenían dos tipos de HR, de tamaño distintos y, por tanto, distinta  $f_h$ . Con ello, se vio que **el espectro de IL resultante** de dicho modelo de pantalla correspondía a los **dos picos de resonancia fruto de ambos resonadores añadidos al BG producido por el efecto de dispersión sin alterarlo**. Este modelo es el **modelo inicial** con el que se va a iniciar en este proyecto.

## Capítulo 3. Objetivos

### 3.1 Objetivos generales

Este Trabajo de Fin de Máster trata de mostrar muchos de los conocimientos adquiridos a lo largo del **Máster de Ingeniería Acústica** impartido por la Universidad Politécnica de Valencia con el objetivo de **demostrar las capacidades obtenidas a lo largo del curso académico**. El proyecto se centra en barreras basadas en CS, por lo que expone muchos de los conocimientos aprendidos en el campo de la acústica ambiental, pero también tiene una base sólida de otros campos, como los fundamentos de acústica, pues el trabajo se centra en el estudio de diferentes fenómenos acústicos. También ha sido de gran importancia lo aprendido en asignaturas de simulación acústica ya que este proyecto requiere conocimientos de los softwares estudiados a lo largo del máster: COMSOL Multiphysics, AutoCAD y MATLAB; el conocimiento de dichas herramientas ha sido de gran importancia para poder desarrollar un proyecto de estas características.

### 3.2 Objetivos específicos

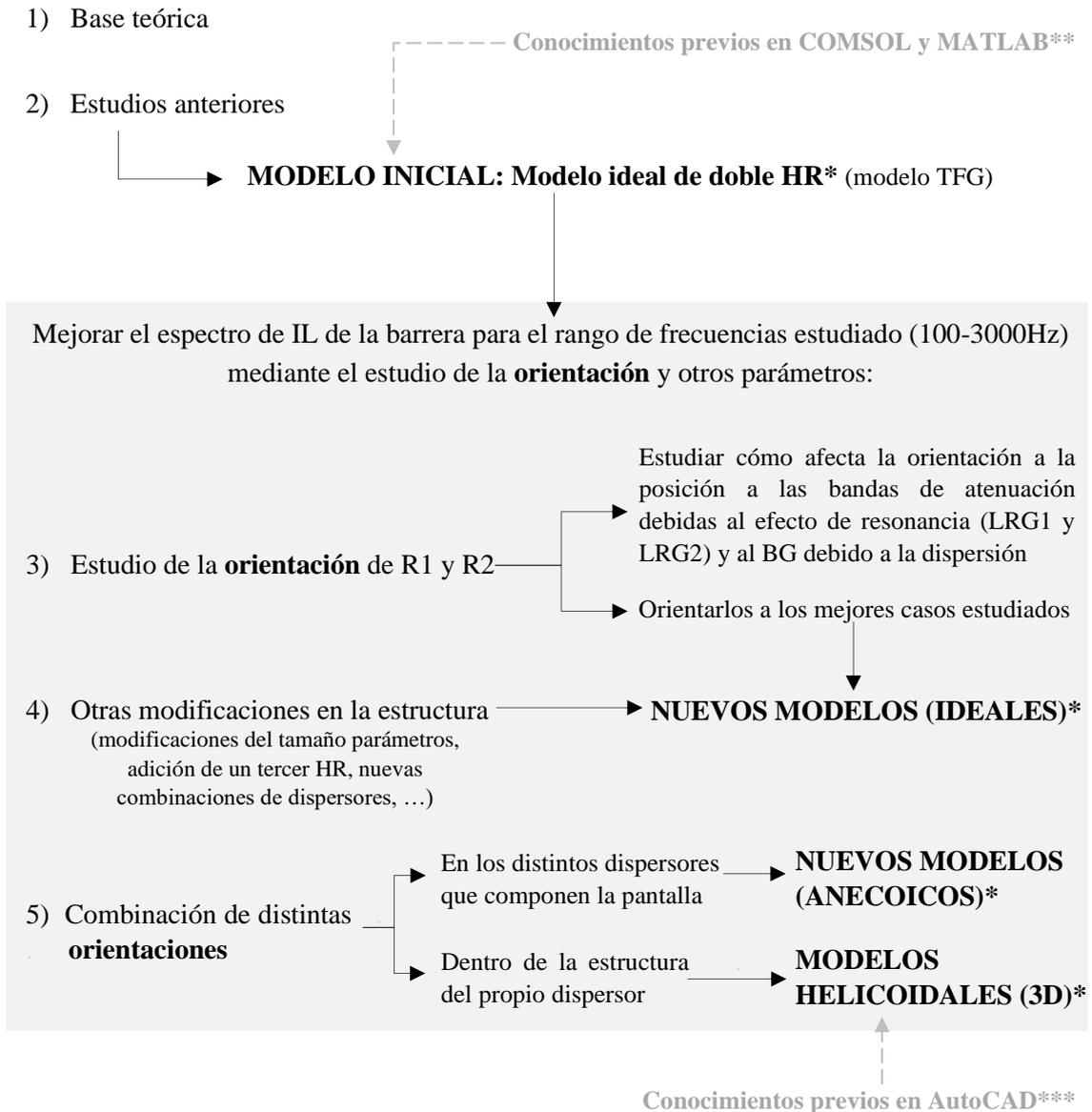
Tal y como se menciona en el capítulo anterior, **este trabajo parte del modelo de pantalla acústica compuesta por resonadores cilíndricos de doble cámara de resonancia**. Este modelo muestra un espectro de IL muy interesante hasta las frecuencias estudiadas en dicho trabajo (100Hz-2000Hz), ya que al BG debido al efecto de dispersión (centrado a la  $f_{\text{Bragg}}$ , 1000Hz) se le suman un LRG por encima y otro LRG por debajo, sin alterarlo, gracias a la presencia de ambos resonadores. A raíz de ello se marca **un objetivo claro** para este proyecto: **trabajar con dicho modelo y estudiar nuevas formas de mejorar las IL a lo largo de un espectro ampliado**, pues se va a estudiar hasta los **3000Hz** para tener también en cuenta cómo afectan los resonadores al segundo BG (centrado en 2000Hz).

Uno de los principales parámetros que se van a estudiar para entender su influencia al comportamiento de la barrera y, así, poder mejorarlo, es **la orientación**. A lo largo del trabajo se va a analizar el comportamiento de ambos resonadores para orientaciones distintas, incluso se va a plantear modelos cuyos dispersores rotan de manera **helicoidal**. Sin embargo, estas no son los únicos parámetros que se van a estudiar ni modificar. Todo ello se verá en el desarrollo del proyecto.

## Capítulo 4. Estructura y metodología del proyecto

### 4.1 Estructura

A continuación, se muestra un esquema de la estructura seguida para la realización de este Trabajo de Fin de Máster:



\* Todos los modelos se tratan de modelos de barreras basadas en CS compuestos por tres columnas de dispersores con un parámetro de red de  $a=0.17\text{m}$  ( $f_{\text{Bragg}} = 1000\text{Hz}$ ) y un radio del dispersor de  $r_{\text{ext}} = 0.06\text{m}$ . El ancho de los modelos es de  $L=0.46\text{m}$  (tamaño competitivo).

\*\* Todas las simulaciones de este proyecto se realizan con el software COMSOL Multiphysics (y la mayoría de los modelos se diseñan también con esta herramienta). Los datos son exportados y analizados mediante *scripts* programados mediante MATLAB.

\*\*\* Para el diseño de los modelos helicoidales ha sido necesario el uso del software AutoCAD, debido a la complejidad de este tipo de estructuras.

## 4.2 Metodología

La metodología que se ha seguido para el desarrollo del proyecto ha sido plantear los diferentes estudios mostrados en la estructura anterior como estudios individuales que se han ido exponiendo mediante una serie de **informes**. Cada informe ha expuesto sus propios **objetivos, desarrollo y conclusiones**, y se han realizado mediante el diseño y simulación de diferentes modelos con COMSOL Multiphysics (o AutoCAD en algunos casos) y mediante el análisis de los datos con MATLAB.

Pese a que cada informe corresponde a un estudio distinto, la conclusión de un informe llevaba al planteamiento del siguiente y, así, consecutivamente. Es decir, los diferentes estudios y modelos de barreras que componen este trabajo siguen una **estructura ordenada** y están todos ellos **enfocados a cumplir el objetivo planteado** para este proyecto.

## Capítulo 5. Exposición de los estudios y análisis de resultados

### 5.1 Parametrización de la rotación de los resonadores

Este proyecto parte del diseño de barrera formada por CS cuyos dispersores están formados por doble resonador de Helmholtz (HR), la barrera diseñada y estudiada en trabajos anteriores [6] (Figura 13). Tal y como se ha mencionado, este modelo de pantalla muestra un **band gap (BG)** debido al efecto de **dispersión** alrededor de la  $f_{\text{Bragg}}$ , y dos bandas de atenuación debidas al **efecto de resonancia** que producen ambas cámaras resonantes (denominadas dichas bandas: **band gap localmente resonante, LRG**).



Figura 13. Barrera basada en CS compuesta por dispersores formados por doble cámara de resonancia. Modelo ideal de 3 columnas de dispersores.

En este primer punto se estudia el efecto que se produce al **modificar la rotación de los dispersores**. Para ello, se va a variar la orientación mediante un barrido paramétrico con la ayuda del software COMSOL *Multiphysics*. Cada dispersor va a variar desde una orientación de  $0^\circ$  (Figura 14.a)) hasta una orientación de  $90^\circ$  (Figura 14. b)) en pasos de  $15^\circ$ , por lo que las orientaciones a analizar serán:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $90^\circ$ , y estando en todo momento los tres orientados hacia la misma dirección.

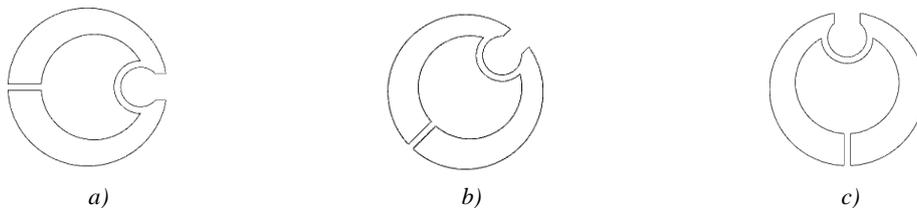


Figura 14. Dispersor formado por doble cámara de resonancia orientado a)  $0^\circ$ , b)  $45^\circ$  y c)  $90^\circ$ .

Observando la estructura del resonador se puede ver que están formados por doble resonador de Helmholtz (HR), cuyas dimensiones son las expuestas en la Figura 16. El HR cuya cavidad es mayor forma el denominado **Resonador 1 (R1)** y su banda de atenuación debida al efecto de resonancia (**LRG1**) **aparece por debajo del BG** ya que su frecuencia de resonancia ( $f_{h1}$ ), calculada de forma teórica y aproximada mediante la ecuación ( 7 ), es de unos 320Hz. Por otro lado, el HR cuya cavidad es menor, denominado **Resonador 2 (R2)**, tiene una  $f_{h2}$  teórica y aproximada de unos 1680Hz ( 7 ), por lo que su **LRG2 se encuentra por encima del BG**. Obsérvese dicha estructura en las siguientes imágenes:

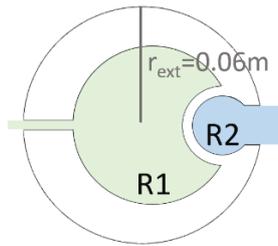


Figura 15. Estructura del dispersor formado por doble HR (R1 y R2)

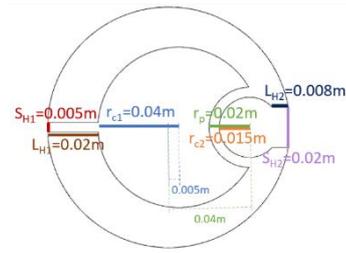


Figura 16. Medidas de los resonadores que forman el dispersor, R1 y R2

El estudio se va a realizar tanto para el caso de un **dispersor aislado** como para el **conjunto de la barrera** para poder estudiar detalladamente cómo afecta la rotación de los dispersores. Ambos estudios se realizan mediante la simulación de **la radiación de una onda plana en dirección positiva al eje x**. Inicialmente, el R1 está orientado a  $0^\circ$  respecto a la dirección de la onda y el R2 está orientado a  $180^\circ$  respecto a esta misma dirección (Figura 13, Figura 14.a)). Asimismo, se realizan ambos estudios con las siete orientaciones mencionadas anteriormente (de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  en pasos de  $15^\circ$ ).

### 5.1.1 Dispersor aislado

#### 5.1.1.1 Estudio de las IL, punto receptor a 1 m

En este primer estudio se observa cómo afecta a las pérdidas por inserción (IL) la rotación del dispersor aislado. Véase el resultado de las **IL medidas a 1m del dispersor** en las gráficas mostradas en la siguiente figura:

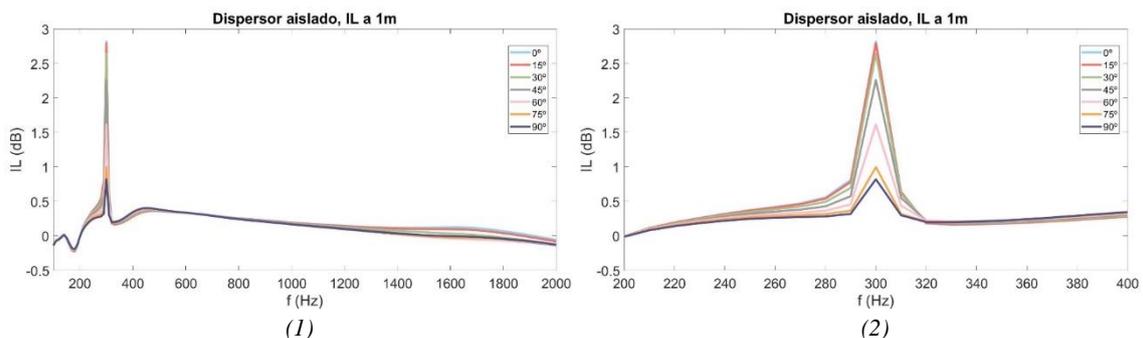


Figura 17. IL medido a 1m del dispersor de la Figura 14 mostrado para un rango de frecuencias de (1) 100 Hz a 2000 Hz y (2) 200 Hz a 400 Hz.

Se observa que con un dispersor aislado solamente aparece un LRG, el causado por R1, a 300 Hz, es decir, no aparece el LRG2. Esto se debe a que, al estar estudiando un solo dispersor, el punto de medida está situado demasiado lejos, de forma que la onda plana se recompone al pasar por el punto receptor. Por lo tanto, es necesario un estudio realizado en el interior de las cavidades resonantes, tal y como se muestra en los siguientes apartados.

### 5.1.1.2 Estudio de la presión acústica dentro de R1 y R2

Las siguientes figuras muestran la **presión acústica dentro del R1 y R2**, respectivamente. Para ello se ha colocado un punto receptor en el centro de cada cavidad para los siete casos diferentes de orientación estudiados.

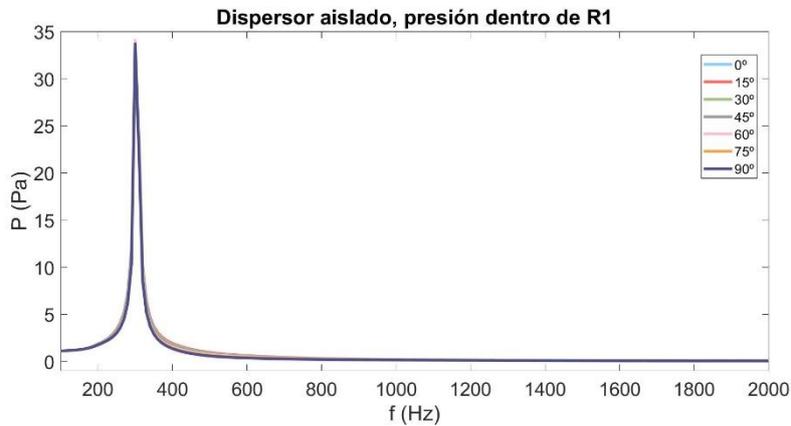


Figura 18. Presión dentro del primer resonador (R1) del dispersor aislado.

**Dentro de R1** se produce un **pico de presión acústica a 300 Hz** (véase Figura 18). Es por ello por lo que el LRG producido por este tipo de dispersor se produce a esta frecuencia, tal y como se ha visto en la Figura 17. Sin embargo, pese a que la presión producida dentro de R1 tiene, obviamente, el mismo valor de nivel de presión para todas las orientaciones, las IL medidas a 1m muestran que el valor de atenuación va disminuyendo conforme se va rotando el dispersor, por lo que se obtienen unos mejores resultados cuando el dispersor está orientado a 0°.

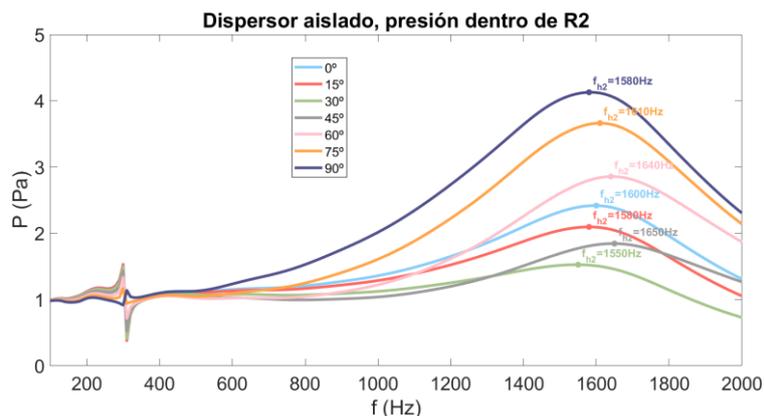


Figura 19. Presión dentro del segundo resonador (R2) del dispersor aislado.

En la figura anterior se observa la **presión acústica dentro de R2**. La  $f_{h2}$  se encuentra **alrededor de 1600 Hz, pero varía** dependiendo de la orientación del dispersor: el menor valor de  $f_{h2}$  aparece cuando la orientación es de 30° (1550 Hz) y el mayor en el caso de 60° (1640 Hz), sin embargo, esto se puede deber a que el punto receptor, situado en todo momento dentro de R2, varía de posición. Además, observando dichos espectros (Figura 19) también se puede ver que el LRG2 que va a producir esta segunda cavidad resonante es bastante ancho, lo cual podría afectar al

segundo BG si nos referimos a una barrera compuesta por este tipo de dispersores, ya que se encuentra en frecuencias próximas. Esto se podrá comprobar al estudiar el conjunto de la barrera.

### 5.1.2 Barrera basada en CS

Tal y como se ha expuesto, la barrera utilizada en este estudio (Figura 13, Figura 20) es un modelo ideal de barrera formada por tres dispersores. El **modelo ideal** se trata de un modelo cuyas paredes paralelas a la fila de los dispersores tienen condición de contorno periódica y, por ello, simula que se trata de una barrera de longitud infinita. Tal y como explican otros estudios [11] un modelo de barrera ideal simplifica notablemente el coste computacional y aporta unos resultados muy similares a los estudios con modelos anecoicos o a medidas de modelos reales.

En la **Figura 20** se observan gráficamente las **condiciones de contorno y radiación del modelo y la dirección de la onda plana incidente**. Todos los modelos de barreras ideales en 2D que se van a exponer a lo largo de este proyecto tienen estas mismas características y en todos los casos en los que se estudien las IL el receptor está situado a 1m del modelo estudiado.

Además, en todos los modelos estudiados en el presente trabajo los dispersores que forman dichas barreras están separados a una distancia de 0.17 m (es decir, **el parámetro de red es  $a = 0.17$  m**), por lo que la **frecuencia Bragg es de 1000Hz** (según la ecuación ( 4 )) y, por tanto, el **band gap (BG)** se sitúa alrededor de esta frecuencia. Con todo ello, la barrera tiene un ancho de longitud  $L=0.46$ m, es decir, son modelos cuyo ancho de la barrera es de tamaño competitivo, menor a medio metro.

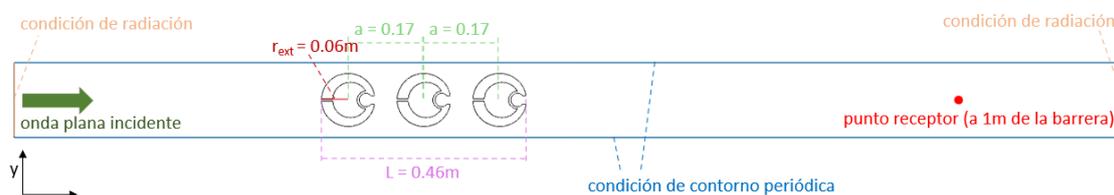


Figura 20. Estructura y condiciones de radiación y contorno del modelo de barrera ideal formado por 3 columnas de dispersores de doble cámara de resonancia.

#### 5.1.2.1 Estudio de las IL, punto receptor a 1 m

A continuación, se estudia la **rotación de los tres dispersores que forman la pantalla acústica** diseñada (Figura 13, Figura 20). Para ello, se **rotan simultáneamente** los dispersores para las orientaciones ya mencionadas. Las IL obtenidas a 1m de la barrera tras la simulación de dicho modelo son las mostradas en la gráfica de la siguiente figura (espectros de color). También se muestran las IL de este mismo modelo, pero compuesto por dispersores rígidos (cuyos dispersores no tienen ninguna cavidad de resonancia; línea negra '--') con el objetivo de comparar ambas pantallas y así **ver cómo afectan los LRG producidos por los resonadores al BG**, ya que el modelo de dispersores rígidos solo presenta atenuación debida al fenómeno de dispersión y las **interferencias** producidas por los **LRG** pueden ser **constructivas o destructivas** para dicho BG.

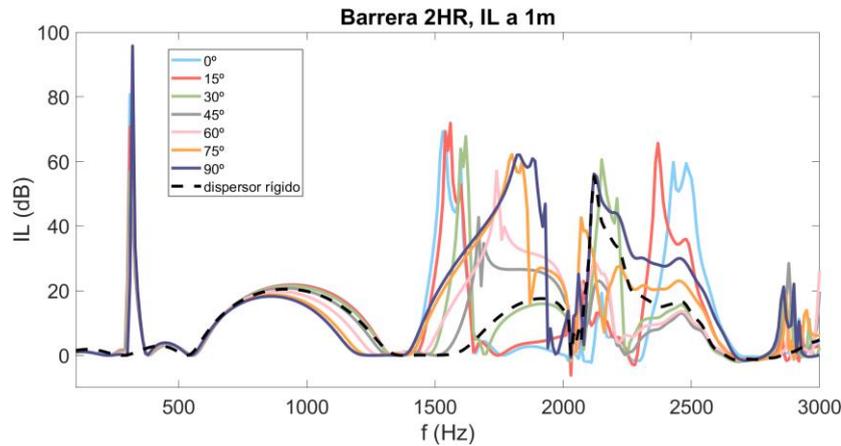


Figura 21. IL de la barrera de la Figura 13 mostrado para un rango de frecuencias de 100 Hz a 2000 Hz.

En la Figura 21 se puede observar el BG situado alrededor de 1000 Hz. Se observa que el BG es menor conforme se va rotando los dispersores de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , es decir, el BG es más ancho cuando los dispersores que forman la barrera están orientados a  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , en estos cuatro casos el BG es prácticamente igual al de la barrera formada por dispersores rígidos.

Se observa el LRG debido al R1 (LRG1) alrededor de la frecuencia de 320 Hz (un valor muy similar a los calculados de forma aproximada y teórica y un poco mayor que el que mostraba el dispersor aislado, 300Hz). La **posición de  $f_{h1}$  prácticamente no varía al rotar el dispersor**; sin embargo, el valor del LRG1 es un poco mayor cuando el dispersor está girado  $90^\circ$ , justo al contrario de lo que ocurriría al tratarse de un dispersor aislado.

El LRG producido por R2 (LRG2) sí que se ve altamente afectado al rotar los dispersores de la pantalla acústica ya que la  **$f_{h2}$  varía considerablemente**, de forma similar a lo que ocurriría midiendo dentro del R2 del dispersor aislado. Se observa que para las tres primeras orientaciones ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $30^\circ$ ) el valor de  $f_{h2}$  está alrededor de 1500-1600 Hz, pero en los otros casos llega a subir hasta 1800 Hz ( $90^\circ$ ).

Por tanto, los resultados de las IL a 1m de la barrera son confusos debido a lo mencionado anteriormente y, por ello, se va a realizar un estudio más detallado: en primer lugar, se va a colocar un receptor en ambas cavidades de los tres dispersores para medir la presión y, a partir de dichos resultados, se verá si es necesario hacer otro tipo de estudios. Además, dado que se ha visto que hay una **evolución con cierta continuidad al variar la orientación**, se reduce el número de casos para simplificar las gráficas y que así sean más claras. En los estudios que se realizan a continuación se va a variar la orientación de  **$0^\circ$  a  $90^\circ$  en saltos de  $30^\circ$** , es decir, se van a realizar un estudio de la rotación de los dispersores para  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ .

#### 5.1.2.2 Estudio de la presión acústica dentro de R1 y R2

Se pretende realizar un estudio de la presión acústica dentro de los dos resonadores de los dispersores que forman la barrera para las orientaciones  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . Sin embargo, primero se va a analizar **qué ocurre en los tres dispersores que forman la barrera para una misma orientación**:

a) En los tres dispersores, R1 y R2 orientados  $0^\circ$

Se han orientado los dispersores a  $0^\circ$  y se ha centrado cada receptor en el centro del R1 de los dispersores 1, 2 y 3 (D1, D2, D3) (Figura 22) y, análogamente, en el centro del R2 de los mismos (Figura 23).

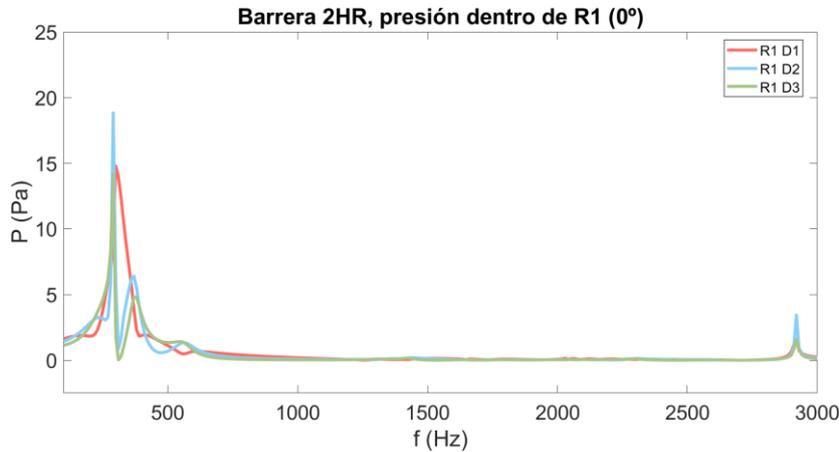


Figura 22. Presión dentro del primer resonador (R1) del dispersor 1 (D1; rojo), dispersor 2 (D2; azul) y dispersor 3 (D3; verde) de la barrera.

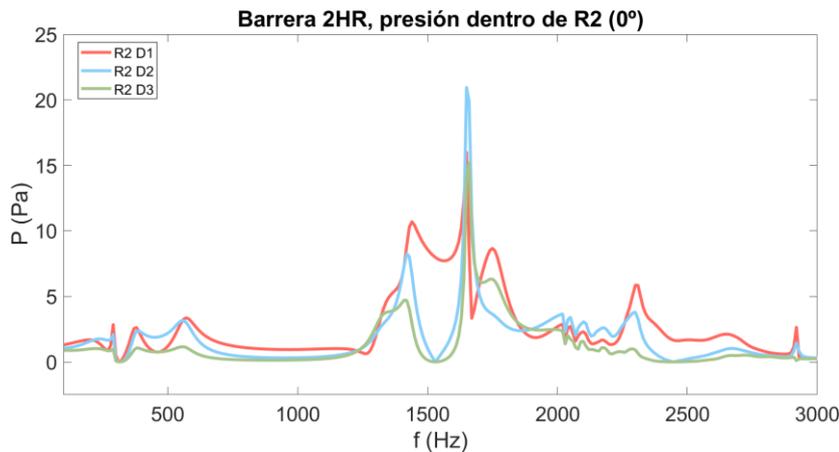


Figura 23. Presión dentro del segundo resonador (R2) del dispersor 1 (D1; rojo), dispersor 2 (D2; azul) y dispersor 3 (D3; verde) de la barrera.

En ambos casos los **resultados son muy similares**: las frecuencias de resonancia, tanto  $f_{h1}$  como  $f_{h2}$ , se encuentran en la misma posición en los tres dispersores y también hay mucha similitud en el comportamiento del resto del espectro. Así, **lo que varía entre la presión medida en los distintos dispersores es que la del primero (D1) es mayor** en la mayoría de las frecuencias (tal y como es esperado, pues el primer resonador es el que está más expuesto a la onda incidente), seguido del D2 y finalmente el D3.

Por ello, **el estudio de la presión sonora dentro de R1 y R2 variando las orientaciones se va a realizar para un solo dispersor, D1**, pues el comportamiento de los tres dispersores es prácticamente el mismo y así se simplifican las gráficas y se pueden comprender mejor los resultados.

b) En el primer dispersor, variando orientación de R1 y R2

En las siguientes figuras se muestra la presión en R1 (Figura 24) y R2 (Figura 25) en el primer dispersor:

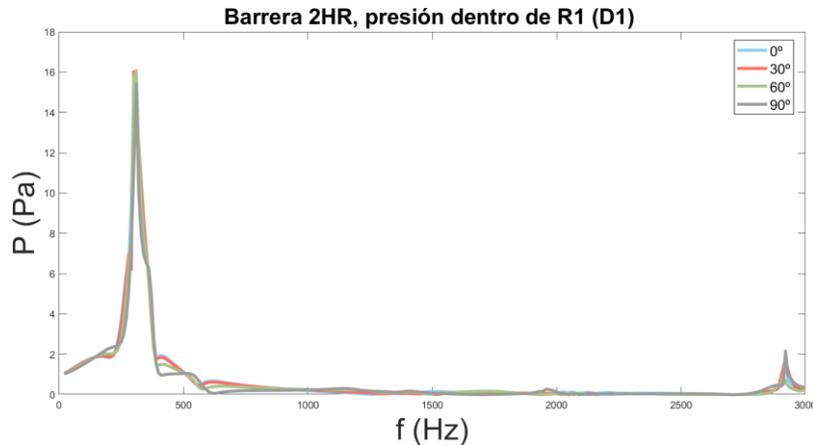


Figura 24. Presión dentro del primer resonador (R1) del dispersor 1 de la barrera para la orientación de 0° (azul), 30° (rojo), 60° (verde) y 90° (gris).

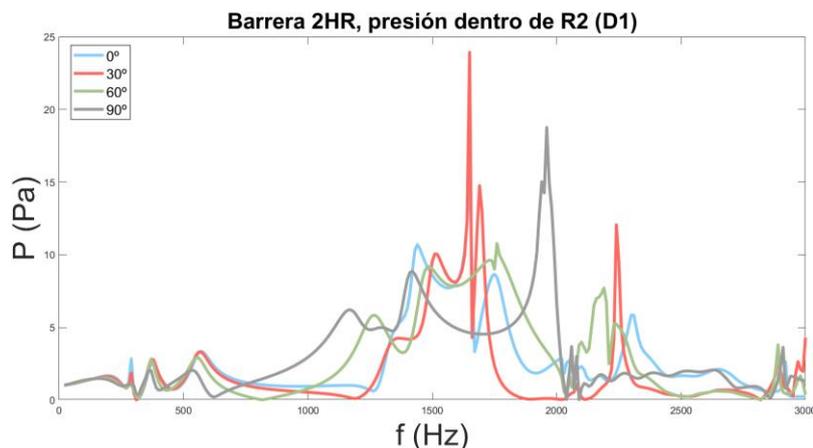


Figura 25. Presión dentro del segundo resonador (R2) del dispersor 1 de la barrera para la orientación de 0° (azul), 30° (rojo), 60° (verde) y 90° (gris).

Podemos ver en ambas figuras que, tal y como ocurría con el dispersor aislado, la  $f_{h1}$  es constante en todas orientaciones y el valor de presión a esta frecuencia es igual en todas las orientaciones. También de forma análoga a lo que se ha visto en el estudio del dispersor aislado,  $f_{h2}$  varía notablemente según la orientación; además, la presión medida en R2 ocupa un gran ancho de banda por lo que el LRG2 que formará este tipo de barreras si se miden las IL será muy ancho y puede afectar al segundo BG.

Debido a lo expuesto anteriormente, sería conveniente realizar nuevos y más detallados estudios para terminar de entender cómo afecta el cambio de orientación en el segundo resonador. Para ello, en los siguientes estudios se diseñará una barrera que solo contenga el R2 y se irá modificando su estructura y orientación para poder comprenderlo en profundidad y poder aportar un diseño de dispersor que atenúe lo máximo y lo mejor posible en las frecuencias situadas por encima del BG.

## 5.2 Estudio del Resonador 2

En el punto anterior se ha estudiado el comportamiento de ambos resonadores (R1 y R2) de la barrera formada por dispersores con doble cámara de resonancia y se ha visto que el Resonador 1 tiene un comportamiento bastante claro: el **LRG1** (situado por debajo del BG) se encuentra muy próximo a la  $f_{h1}$  calculada de forma teórica y su posición y **ancho de banda no varía al rotar el dispersor**, aunque es de valores un poco mayores si se encuentra en dirección perpendicular a la onda incidente (dispersor orientado a  $90^\circ$ ).

Por otro lado, se concluyó que el **comportamiento del Resonador 2 es confuso** y, por ello, en este apartado se estudia dicha cámara de resonancia con el objetivo de **realizar un análisis en profundidad de dicho HR**. Para este estudio se realiza un diseño de una **barrera basada en CS formada por dispersores cuya estructura únicamente contiene el R2** (véase dicha barrera en la Figura 26 y la estructura de sus dispersores en las Figura 27 y 28).



Figura 26. Barrera basada en CS formada por 3 dispersores con una cavidad de resonancia, R2 (dispersores orientados  $0^\circ$ )

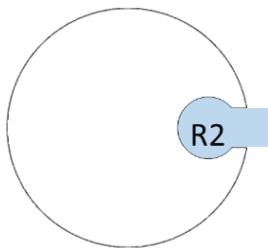


Figura 27. Estructura del dispersor formado por el resonador de Helmholtz R2

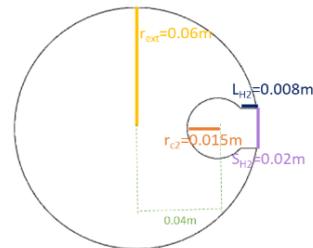


Figura 28. Medidas del resonador que forma el dispersor, R2

### 5.2.1 Estudio de las IL, punto receptor a 1m

Se representan las IL a 1m de la barrera de la Figura 26 para orientación de la onda incidente fija en la dirección positiva del eje x:

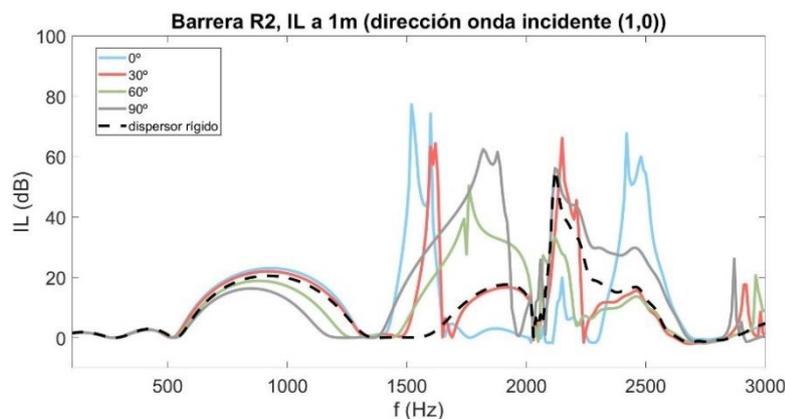


Figura 29. IL de la barrera de la Figura 26 siendo la dirección de la onda incidente fija (1,0).

Observando la gráfica anterior se puede ver que **conforme aumenta la orientación, disminuye el ancho del BG, sin embargo, el LRG2 aumenta considerablemente de tamaño ya que se añade de forma constructiva al segundo BG**. Sin embargo, esto hace que el primer BG se reduzca.

No obstante, el caso de los **dispersores orientados 90°** aportan una banda de atenuación muy ancha en las frecuencias que rodean el segundo BG (2000Hz), seguramente este caso de orientación sería el modelo que aporte mayores IL. Para comprobar esto de una forma más numérica se va a calcular el parámetro denominado **área de atenuación (AA)**, ya definido en la introducción del proyecto.

MODELO	ORIENTACIÓN (º)	AA (x10 <sup>4</sup> ) (dB·Hz)
3 dispersores rígidos	-	2,8823
3R2 (dir. Onda Inc. Fija)	0	3,4419
	30	3,2339
	60	3,2283
	90	4,4921

Tabla 1. AA de los espectros de la Figura 29.

En la Tabla 1 se indican los valores de AA. Se puede ver que, efectivamente, con la orientación del **R2 a 90° se obtienen mejores valores de IL en el conjunto del espectro**, pues el **AA es mayor**. Por ello, en el siguiente apartado se va a proponer un nuevo diseño de R2 que esté orientado a 90° y, además, se va a tratar de modificar el tamaño de su estructura de forma que el LRG2 se aproxime más al BG y así cubra un mayor rango de frecuencias y se compense el hecho de que con una orientación de 90° el ancho del BG disminuye. El objetivo de ello es, como siempre, cubrir en el espectro de IL el máximo rango posible de frecuencias estudiadas.

### 5.3 Estudio y mejora del diseño del Resonador 2

En el apartado anterior se ha podido explicar mejor el comportamiento del Resonador 2 del modelo de dispersor diseñado en los previos estudios. Por ello, en este informe se trata de ver si se puede mejorar el diseño de dicha cámara de resonancia midiendo las IL que aporta una barrera formada por dispersores compuestos por resonadores R2, pero modificando su estructura. Para ello, se partirá del diseño utilizado en los apartados anteriores de dispersor (Figura 27 y 28) y barrera (Figura 26), pero con los resonadores orientados a 90°, ya que en el estudio previo se concluyó que era la orientación que aportaba mejores resultados de IL para una barrera formada por este tipo de dispersores. Véase el diseño en la siguiente figura:



Figura 30. Barrera basada en CS formada por 3 dispersores con una cavidad de resonancia, R2, orientados 90° (punto receptor a 1m de la pantalla acústica)

Dado que se trata de intentar que el espectro de IL ocupe la mayor parte del espectro posible hasta los 3000Hz que se están estudiando, en primer lugar, se va a **variar el tamaño de R2 para modificar levemente  $f_{h2}$  y ver si se puede sumar de forma constructiva el LRG2 al primer BG**. A continuación, se utilizará el diseño que aporte los mejores resultados para hacer otra posible mejora jugando con la estructura del R2 en los dispersores que forman la barrera.

### 5.3.1 Modificar estructura del R2

#### 5.3.1.1 Variando $r_c$

Se va a **modificar el radio de la cavidad del R2** para tratar de mejorar el diseño de la barrera de la Figura 30, siendo su tamaño **original de 15mm** (Figura 16) y manteniendo igual el resto de los parámetros ( $L_H$ ,  $S_H$ ). Tal y como se ha mencionado, en todos los casos la orientación de los resonadores va a ser de  $90^\circ$  (Figura 30). Las IL a 1m de los diferentes diseños se representan en la siguiente gráfica:

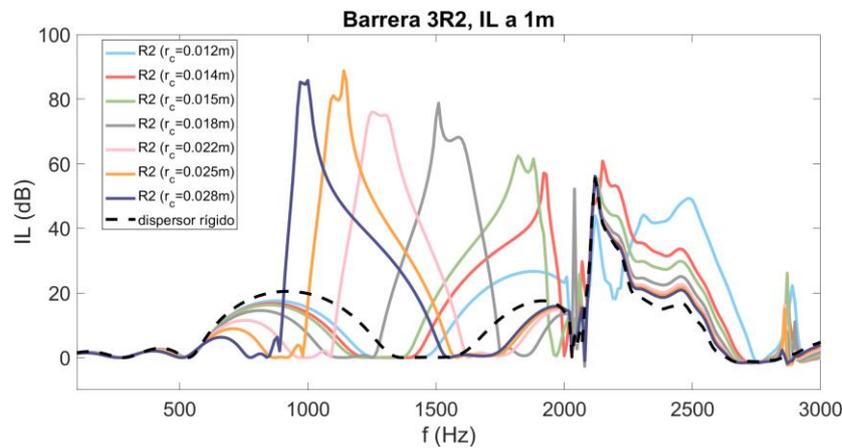


Figura 31. IL de la barrera de la Figura 30 modificando el diseño de R2 variando el tamaño de  $r_c$ .

En el punto anterior se ha mencionado que se va a intentar reducir la  $f_{h2}$  para que el LRG2 se sume al BG que se ve reducido debido a la presencia del R2. Sin embargo, gracias a la Figura 31, se puede ver que no es posible ya que, **cuanto más disminuye la  $f_{h2}$  (aumentando  $r_c$ ), más se aproxima el LRG2 al BG y, en vez de sumarse constructivamente ambas bandas de atenuación, el LRG2 destruye el BG**. Por tanto, diseñar un R2 con un radio mayor a 0.015m haría que el BG fuera más estrecho. Se va a calcular el AA para comprobar numéricamente este hecho:

MODELO	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
3 dispersores rígidos	2,8823
3R2 ( $r_c=0.012m$ )	4,2265
3R2 ( $r_c=0.014m$ )	4,4841
3R2 ( $r_c=0.015m$ )	4,4921
3R2 ( $r_c=0.018m$ )	4,3463
3R2 ( $r_c=0.022m$ )	4,2601
3R2 ( $r_c=0.025m$ )	4,3251
3R2 ( $r_c=0.028m$ )	4,3079

Tabla 2. AA de los espectros mostrados en la Figura 31.

Los valores mostrados en la tabla indican que sí que se obtiene un espectro de IL más completo para el caso de  $r_c=0.015m$ , por lo que se decide **no modificar el tamaño del R2** y se deja **orientado a 90°**, no obstante: ¿hay alguna forma de aumentar las IL producidas por R2 cambiando el diseño del dispersor? Se propone comprobar qué ocurre si añadimos al dispersor otro R2 orientado -90°, una tercera cámara de resonancia.

### 5.3.1.2 Añadiendo otro R2 a -90°

Se quiere comprobar qué ocurre si al añadir al R2 a 90° otro R2 orientado a -90°. El objetivo es ver si en este nuevo diseño el LRG2 producido por el segundo R2 se suma de forma constructiva al LRG2 producido por el primer R2 y, así, obtener una mejor respuesta de IL. Obsérvese en la siguiente imagen el diseño de la barrera compuesta por este tipo de resonadores:



Figura 32. Barrera basada en CS formada por 3 dispersores con dos cavidades de resonancia, R2 y R2, orientados 90° y -90° (punto receptor a 1m de la pantalla acústica).

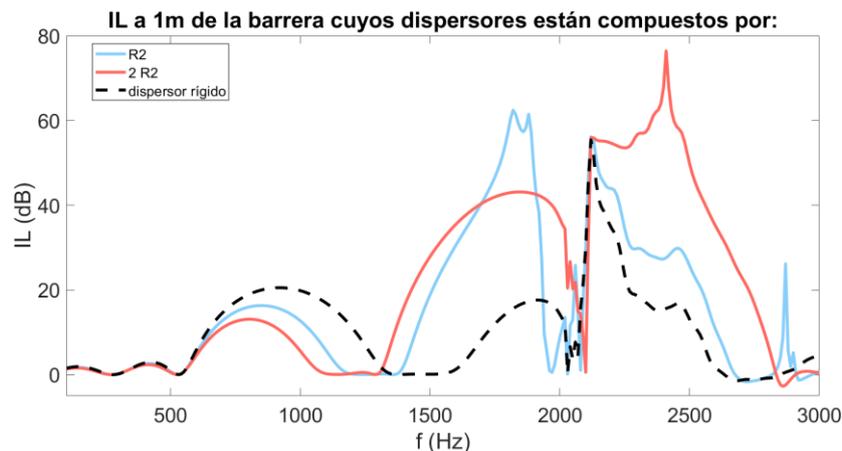


Figura 33. IL de la barrera de la Figura 32 (rojo) comparada con la barrera de la Figura 30 (azul) y la de dispersores rígidos (negro).

Se observa que al añadir un segundo R2 a -90° **el primer BG disminuye**, sin embargo, **el segundo BG se hace más ancho**, lo cual muestra unos resultados mucho mejores a estas frecuencias ya que, gracias a esta estructura, el segundo BG llega hasta casi 3000 Hz.

A continuación, se va a volver a **añadir a esta nueva estructura de dispersor el resonador R1** para observar si el LRG1 se añade sin alterar destructivamente el espectro y así aporta unas IL más completas a lo largo del espectro.

### 5.3.2 Añadiendo a esta nueva estructura el R1

A la nueva estructura de dispersor formada por un R2 orientado a 90° y otro R2 orientado a -90° se le añade el R1 orientado a 0° para ver si se suma el LRG1 por debajo del BG de forma

constructiva. En la Figura 34 se observa la barrera creada y en la Figura 35 se puede ver su espectro de IL a 1m (verde). Este nuevo diseño de dispersor se va a denominar dispersor formado por resonadores de tipo **R1+2R2** (R1 (0°)+R2 (90°)+R2 (-90°)).



Figura 34. Barrera basada en CS formada por 3 dispersores formado por resonadores de tipo R1+2R2, R1 (0°), R2 (90°) y R2 (-90°) (punto receptor a 1m de la pantalla acústica)

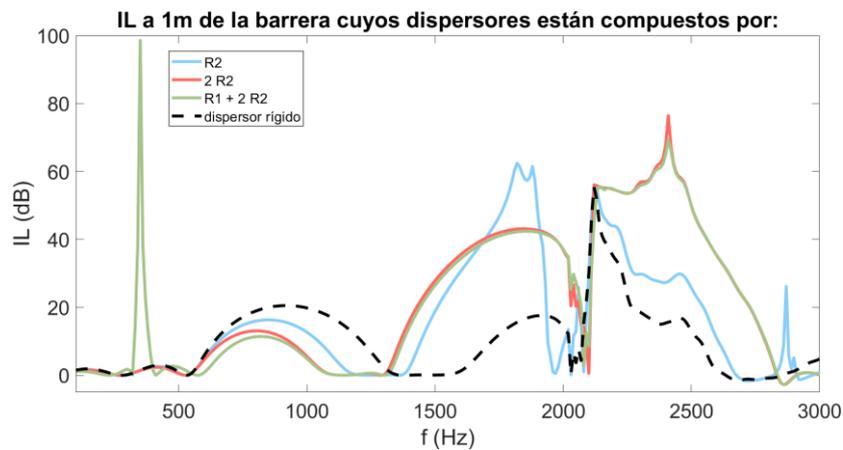


Figura 35. IL de la barrera de la Figura 34 (verde) comparada con la barrera de la Figura 32 (rojo), la de la Figura 30 (azul) y la de dispersores rígidos (negro).

En la imagen anterior se observa que en este nuevo modelo el **LRG1 se suma resto del espectro prácticamente sin alterarlo** (comparándolo con el modelo de barrera cuyos dispersores no tienen R1 (rojo)), lo cual hace que el espectro de IL sea más completo y haya atenuación a más bajas frecuencias (alrededor de 300 Hz). Viendo el AA de los modelos expuestos en este punto se observa que **el diseño que presenta mejores resultados es el compuesto por un R1 y dos R2**, tal y como se esperaba al ver la gráfica:

MODELO	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	2,8823
R2 (90°)	4,4921
R2 (90°) + R2 (-90°)	6,1323
R1 (0°) + R2 (90°) + R2 (-90°)	6,1772

Tabla 3. AA de los espectros mostrados en la Figura 35

#### 5.4 Estudio y mejora del diseño de la barrera

Hasta ahora se ha tratado de mejorar el comportamiento de la barrera mediante el estudio de la orientación de los resonadores R1 y R2 y modificando la estructura del dispersor a raíz de dichos

estudios. Este punto trata de ir más allá en el objetivo de mejorar el comportamiento de dicha pantalla acústica, jugando esta vez con la **combinación de distintos modelos de dispersores**.

El **diseño de dispersor que se ha realizado en el apartado anterior** (denominado dispersor con resonadores tipo R1+2R2, véase Figura 34) tiene como resultado un LRG2 unido al segundo BG que abarca un gran rango de frecuencias. Sin embargo, tal y como se ha descrito, el **primer BG se ve demasiado reducido** debido a la presencia de dichos R2.

Como ya se ha explicado de forma teórica y experimental a lo largo de este trabajo, el BG aparece debido al efecto de dispersión múltiple producida por los distintos dispersores cilíndricos que componen la barrera. En este proyecto, al haber un parámetro de red de 0.17m, la  $f_{\text{Bragg}}$  se sitúa en 1000 Hz (ecuación ( 4 )), por lo que el BG se presenta alrededor de dicha frecuencia. Esto se puede ver claramente en las IL del modelo de barrera formada por tres dispersores rígidos, cuyo espectro está mostrado en la mayoría de las gráficas de este trabajo (negro; '--'), ya que es el espectro que se toma como referencia para ir mejorando con la presencia de resonadores. No obstante, en el último diseño de barrera presentado el primer BG está demasiado rebajado debido a la presencia de resonadores y, por ello, para intentar mejorar esto se propone la idea de combinar dispersores rígidos (Figura 36) con dispersores formados por la estructura de resonadores diseñada (R1+2R2; Figura 37). El objetivo principal de ello es tratar de conservar las ventajas del último diseño propuesto, pero **mejorando dicha banda de atenuación debida al efecto de dispersión, el primer BG**.

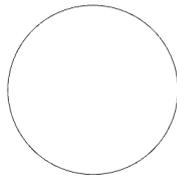


Figura 36. Dispersor rígido.

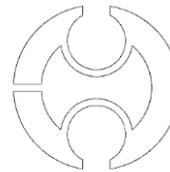


Figura 37. Dispersor formado por resonadores del tipo R1+2R2.

#### 5.4.1 Modificar la combinación de los dispersores

##### 5.4.1.1 1 dispersor formado por resonadores y 2 dispersores rígidos

En primer lugar, se va a **combinar dos dispersores rígidos con uno formado por resonadores** (estructura R1+2R2). Las tres combinaciones posibles se muestran en la Figura 38. En la Figura 39 se observan las IL a 1m de dichas barreras, comparadas con la barrera formada por 3 dispersores rígidos (negro) y la formada por tres dispersores formados por resonadores (azul).



a)



b)



c)

Figura 38. Barreras formadas por 2 dispersores rígidos y 1 dispersor compuesto por resonadores. a) R12R2 + rígido + rígido, b) rígido + R12R2 + rígido, c) rígido + rígido + R12R2

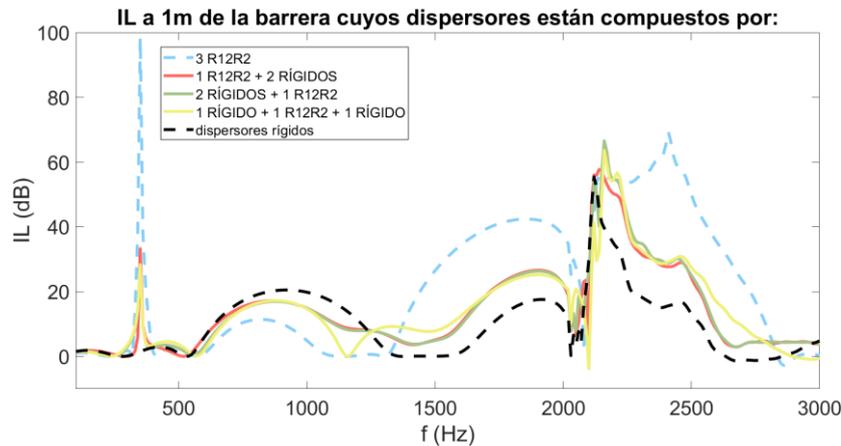


Figura 39. IL de las barreras de la Figura 38 (rojo, verde, amarillo) comparadas con la formada por 3 dispersores compuestos por resonadores R12R2 (azul) y la formada por 3 dispersores rígidos (negro).

Se puede observar en la figura anterior que, tal y como se pretendía, combinando ambos tipos de dispersor **se ha podido aumentar el BG** que se veía reducido por la presencia de los dos R2. Se observa que en los casos en los que los dos resonadores rígidos se encuentran al principio (verde) o al final de la barrera (rojo) son los mejores casos, ya que el BG es más ancho y, además, se une sutilmente al segundo BG.

El LRG2 sigue unido al segundo BG (tal y como ocurría con la barrera formada por tres resonadores del tipo R1+2R2 (azul)), pero esta banda de atenuación se ve reducida al combinar dispersores rígidos con resonadores. Sin embargo, pese a que esto ocurra, este segundo BG sigue siendo mayor y más ancho que en el caso de tres dispersores rígidos (negro), el LRG1 está ubicado perfectamente en la posición de la  $f_{h1}$  y el ancho del primer BG es muy similar al del caso de dispersores rígidos. Por lo tanto, en dicha figura se puede ver que, sobre todo los espectros rojo y verde, son **dos espectros de IL muy completos a lo largo del rango de frecuencias estudiado**.

No obstante, se quiere seguir intentando mejorarlo, por ello, en el siguiente punto se va a comprobar qué ocurre si en lugar de combinar una fila de dispersores formados por resonadores y dos dispersores rígidos se combinan dos dispersores formados por resonadores y un dispersor rígido.

#### 5.4.1.2 2 dispersores formados por resonadores y 1 dispersor rígido

En la siguiente figura se muestran las tres combinaciones de barrera posibles utilizando **dos dispersores formados por resonadores y un dispersor rígido**. A continuación, en la Figura 41 se muestran las IL a 1m de dichas barreras, comparadas con las de la barrera compuesta por tres dispersores formados por resonadores (azul) y tres dispersores rígidos (negro).

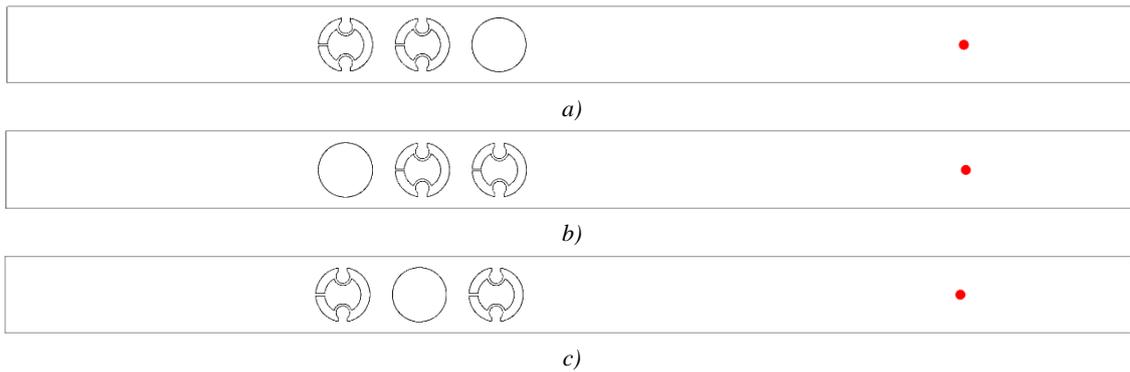


Figura 40. Barreras formadas por 2 dispersores rígidos y 1 dispersor compuesto por resonadores. a) R12R2 + R12R2 + rígido, b) rígido + R12R2 + R12R2, c) R12R2 + rígido + R12R2

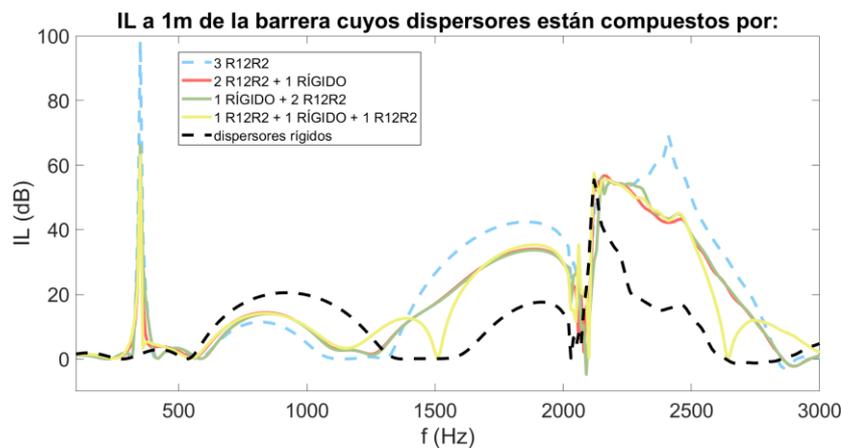


Figura 41. IL de las barreras de la Figura 40 (rojo, verde, amarillo) comparadas con la formadas por 3 dispersores compuestos por resonadores R12R2 (azul) y la formada por 3 dispersores rígidos (negro).

Los resultados obtenidos son interesantes para los casos en los que el dispersor rígido se encuentra en la primera o última posición: se observa que el BG crece un poco pero no tanto como en el caso del estudio anterior, pero el segundo BG (unido al LRG2) no se ve tan reducido como en el caso anterior.

Sin embargo, el principal objetivo que se está buscando con este estudio es aumentar el ancho del primer BG que ha sido reducido por la presencia de los dos R2 y, por ello, se deduce que **las combinaciones del estudio del punto anterior (2 dispersores rígidos y 1 dispersor formado por resonadores) son más útiles para ello.**

#### 5.4.2 Modificar la estructura una vez elegida la combinación de dispersores

Se decide partir de la combinación de **dos dispersores rígidos seguidos de un dispersor formado por resonadores (Figura 38.c)**; Figura 39, verde), ya que, tal y como se ha mencionado en el apartado 5.4.1, muestra un BG similar al de la barrera formada por tres dispersores rígidos. Sin embargo, el **problema de este modelo es que el LRG2** (que se encuentra sumado al segundo BG) es bastante **más estrecho** que el del modelo compuesto por tres dispersores formados por resonadores (Figura 39, azul), por lo que se va a tratar de mejorar esto.

Una forma con la que tal vez se podría solucionar sería **disminuyendo la posición del LRG2** (disminuyendo la  $f_{h2}$ ), pero para que esto sea útil, **deberá de afectar al primer BG lo menos posible**. Un estudio similar se hizo en el informe anterior, tratando de juntar el LRG2 al primer BG y se vio que conforme se disminuía  $f_{h2}$  el LRG2 destruía parte de dicho BG. Sin embargo, con esta nueva combinación de dispersores (combinando dos dispersores rígidos con un dispersor formado por resonadores) es posible que al disminuir la  $f_{h2}$  de ambos R2 no afecte tanto al primer BG. Para comprobarlo se va a realizar un **estudio paramétrico en el que se va a aumentar 2mm el  $r_c$  de los R2**, partiendo de los 0.015m que tienen inicialmente ambos R2. Se observan las IL a 1m de los cuatro casos estudiados (15mm, 17mm, 19mm, 21mm), comparado con el caso de dispersores rígidos (negro):

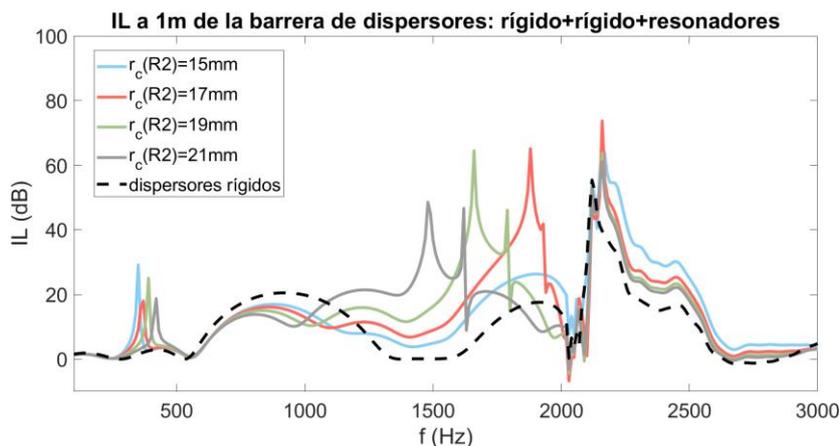


Figura 42 IL de la barrera compuesta por dispersores rígido + rígido + R12R2, variando el  $r_c$  de los dos R2: 15mm (azul), 17mm (rojo), 19mm (verde), 21mm (gris), comparadas con la formadas por 3 dispersores rígidos (negro).

Los resultados mostrados en la figura anterior son muy buenos: se observa que **el LRG2 (ya unido al segundo BG) se va sumando constructivamente al primer BG cuando el  $r_c$  aumenta un poco de 15mm**.

El LRG1 aparece en distintas posiciones dependiendo del tamaño de  $r_c$  (alrededor de 350-420Hz), ya que se va desplazando un poco hacia arriba conforme aumenta el tamaño de la cavidad de R2. Esto se debe a que, conforme la cavidad de los R2 es más grande, la de R1 disminuye (pues los otros dos resonadores ocupan más espacio en el dispersor) y, al disminuir el  $r_c$  de R1, aumenta la  $f_{h1}$  (ec. (7)).

Se puede ver gráficamente en la Figura 42 que **los casos en los que el  $r_c$  de los R2 es 17mm y 19mm son los cuales las IL son más completas a lo largo del espectro**, ya que el LRG2 está sumado constructivamente a los dos BG, sin embargo, se muestra el AA de todos los casos para confirmar esto de forma numérica:

MODELO	$r_c$ de R2 (mm)	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
3 dispersores rígidos	-	2,8823
2 RÍGIDOS + 1 R12R2	15	4,1065
	17	4,1140
	19	4,0878
	21	4,0430

Tabla 4. AA de los espectros de IL de la Figura 42.

### 5.4.3 Nueva modificación de la combinación de los dispersores

Tal y como se concluye en el apartado anterior, **las IL del modelo de barrera compuesta por dos dispersores rígidos y uno compuesto por resonadores de tipo R1+2R2 (con un  $r_c$  de los R2 de 17mm) aporta un espectro de IL muy completo a lo largo del rango de frecuencias estudiado** (véase espectro rojo de la Figura 42). Dicho modelo muestra un LRG2 sumado de forma constructiva tanto al primer BG como al segundo y el **LRG1 se encuentra en una posición similar a la que se partía, sin embargo, esta última banda de atenuación ha decrecido un poco en cuanto a su valor**. Por ello, se propone ver qué ocurre si **en lugar de que los dos primeros dispersores sean rígidos contengan un R1** (cuya  $r_c$  es 0.04m, tal y como se diseñó al principio del proyecto), tal y como muestra la Figura 43. El espectro de dicha barrera se muestra y se comenta en el siguiente punto (espectro verde de la Figura 44), dónde se compara con el resto de los diseños para ver cuál aporta unas IL más completas.



Figura 43. Barreras formadas por 2 dispersores compuestos por un R1 y 1 dispersor compuesto por resonadores R1+2R2 ( $r_c(R2) = 17mm$ ).

## 5.5 Comparación de los principales modelos diseñados

En este último apartado se van a **comparar los espectros de IL de los diseños principales de barrera mostrados hasta ahora**. El **propósito** de ello es exponer las **ventajas o desventajas** y la **mejoras** que tienen los diferentes **modelos que han surgido a raíz del estudio de la orientación de R1 y R2 y otros cambios** aplicados a la barrera de la que partía este estudio (modificación del tamaño del  $r_c$  del R2, combinaciones de distintos dispersores, ...).

El modelo para comparar es siempre el de la pantalla formada por **tres dispersores rígidos**. Este espectro (Figura 44, negro) sólo tiene las bandas de atenuación correspondiente a los BG que se producen por el efecto de dispersión múltiple entre los dispersores cilíndricos que presenta la barrera. El objetivo de estos estudios es **augmentar este espectro de IL mediante la presencia de HR**. Así es como se creó el modelo de barrera formada por **tres dispersores compuestos por un resonador R1 y un resonador R2**, modelo que, tal y como se explica al inicio de este TFM, fue el resultado de trabajos previos [11] y es el modelo del que se parte en este trabajo. El espectro de IL de este modelo se representa en gris en la Figura 44.

A lo largo de este proyecto se ha tratado de mejorar dicho diseño tratando de comprender mejor el comportamiento de R1 y R2 y estudiando su estructura y orientación, con ello, se creó **el modelo de dispersor formado por resonadores de tipo R1+2R2** (Figura 37). La barrera formada por este tipo de dispersores tiene como inconveniente que el BG está demasiado reducido. Por ello, este informe ha estudiado la **combinación de dispersores rígidos y dispersores formados por resonadores** y así ver si se puede mejorar el tamaño de este primer BG manteniendo las ventajas de este tipo de resonadores, y, con ello, obtener un espectro de IL más completo.

En la figura que se muestra a continuación se observan los espectros de los modelos mencionados:

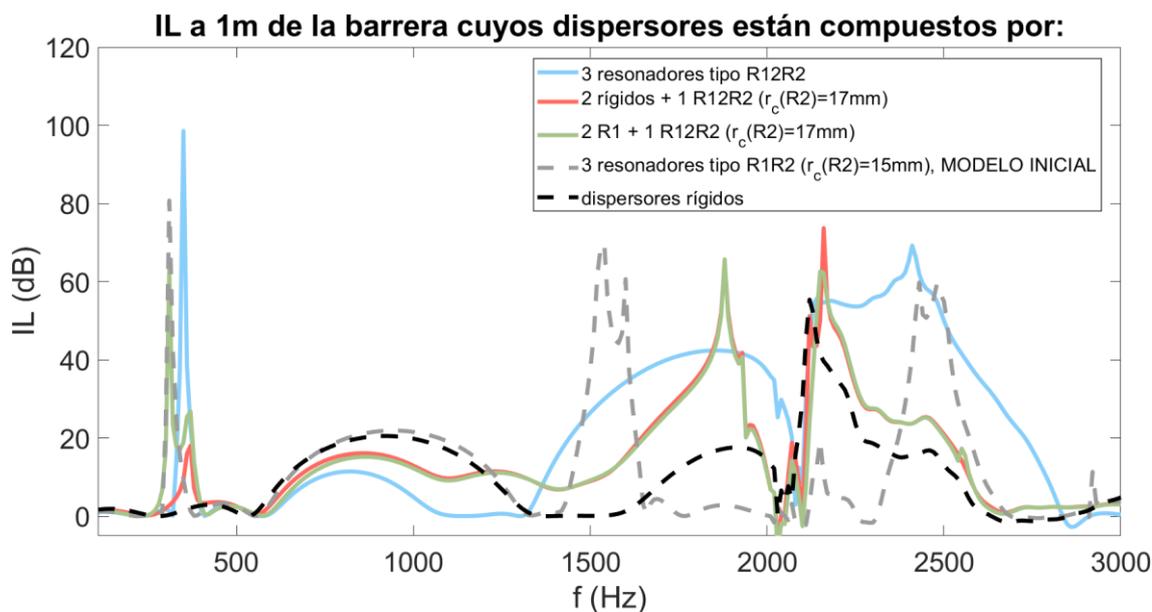


Figura 44. IL de la barrera compuesta por dispersores: rígido + rígido + R12R2; variando el  $r_c$  de los dos R2: 15mm (azul), 17mm (rojo), 19mm (verde), 21mm (gris), comparadas con la formadas por 3 dispersores rígidos (negro).

Pese a que el espectro compuesto por **tres dispersores formados por resonadores de tipo R1+2R2** (azul) es visiblemente mayor (muestra mayor atenuación en las frecuencias que componen el LRG2 y el segundo BG), se observa que la atenuación debida al primer **BG decrece demasiado**, lo cual podría no ser útil si se quiere atenuar un ruido en frecuencias inferiores a 1300Hz. Sin embargo, esta barrera atenúa mucho entre 1300Hz y 2800Hz, lo cual podría tenerse en cuenta si se busca atenuar un ruido a estas frecuencias medias.

Con intención de que el espectro de atenuación abarque la mayor parte de las frecuencias estudiadas se ha creado el modelo de barrera formada por **dos dispersores rígidos y un dispersor formado por resonadores tipo R1+2R2**. Tal y como se ha concluido en el su correspondiente estudio, su espectro (rojo) cumple este objetivo: **el LRG2 se suma de forma constructiva tanto al primer BG como al segundo**. Comparando con el diseño de dispersores rígidos (negro) se observa claramente las bandas de atenuación que aportan los resonadores utilizados y, comparando con el modelo que se partía al inicio de este trabajo (modelo compuesto por 3 dispersores formados por resonadores R1 y R2; gris) se observa que se ha mejorado muchísimo la atenuación en las frecuencias ubicadas alrededor del segundo BG y la atenuación alrededor del primer BG es muy similar. Sin embargo, **el LRG1 se ve demasiado reducido** y, por ello, en el último apartado se ha propuesto **cambiar los dos primeros dispersores rígidos por dispersores formados por R1**. Se puede ver que su espectro (verde) es prácticamente idéntico al del modelo anterior pero **el LRG1 se ve ampliado**. Por ello, se podría decir que hasta ahora es el modelo más completo de IL entre los 200Hz hasta 2600Hz.

## 5.6 Combinación de distintas orientaciones de dispersores (modelos 2D)

Uno de los principales estudios en este proyecto ha sido el de la **orientación de los resonadores que componen la barrera**. Se ha visto que el LRG1 no se ve demasiado alterado por un cambio de orientación del dispersor, pero el **LRG2 sí que se va moviendo dependiendo de las**

**orientaciones.** En los apartados anteriores se han ido mejorando los diseños en 2D expuestos utilizando las orientaciones que aportaban mejores resultados, así como realizando también otras modificaciones de la estructura, siempre con el objetivo de proponer un modelo de barrera basado en CS cuyas IL son lo más completas posibles a lo largo del rango de frecuencias estudiado. Sin embargo, hasta ahora no se ha probado a de **utilizar distintas orientaciones de los dispersores en un mismo modelo de barrera** para ver si las interferencias entre dichos dispersores son constructivas y, así, las **diferentes posiciones de LRG que aparecen al utilizar distintas orientaciones** se sumaran haciendo que aparezca un **LRG más ancho como resultado de la agrupación de ellos.**

Así, en este nuevo estudio se pretende realizar **modelos anecoicos que combinen diversas orientaciones de los dispersores que forman una misma columna.** Se entiende por modelo anecoico aquel situado en un medio cuyas condiciones simulan las de una sala anecoica, así, los contornos del dominio del medio de dicho modelo tienen condiciones de radiación (no periódicas), por lo que hay que crear diversos dispersores a lo largo de la longitud de la barrera. Se ha decidido diseñar un **modelo de barrera compuesto por 16x3 dispersores acústicos,** tal y como se observa en la Figura 45.

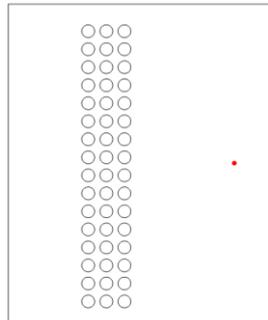


Figura 45. Modelo anecoico de barrera compuesta por 16x3 dispersores rígidos. Receptor a 1m.

En trabajos previos [6] se demuestra que **dos modelos equivalentes, uno de condiciones ideales y otro de condiciones anecoicas,** tienen resultados similares y comparables, ya que las bandas de atenuación se encuentran aproximadamente en las mismas frecuencias, es decir, la **forma de los espectros tienen un comportamiento muy similar,** pero hay siempre que tener en cuenta que los valores del espectro de IL de ambos modelos serán distintos debido las diferentes condiciones de los modelos. Además, tal y como se verá a continuación, los espectros de los modelos anecoicos no son tan claros y el estudio puede ser visiblemente un poco más complicado.

### 5.6.1 Modelos formados por 16x3 dispersores compuestos por R1

En primer lugar, se quiere saber qué ocurre con el **resonador R1** cuando **rotamos de forma distinta los dispersores que componen una barrera formada por dicha estructura.** La hipótesis de lo que va a ocurrir es que el LRG1 va a ser igual que en el caso de dispersores orientados todos hacia una misma dirección ya que, tal y como muestran los primeros apartados de este proyecto, rotando R1 apenas se mueve su banda de atenuación debida al efecto de resonancia (LRG1). Para para comprobarlo, se diseña una **barrera de 16x3 dispersores compuestos por R1.** A continuación, se va a **variar la orientación de dispersores que forman una misma columna** de la barrera. La orientación va a variar **de 30° en 30°**, comenzando con el

dispersores número 16° orientado a 0°, el 15° a 30°, el 14° a 60°, ... (véase Figura 46). Se va a realizar **distintos modelos** de barrera con este método de variación de la orientación: uno variando la orientación de los dispersores de las **tres columnas** (Figura 46), otro variando los de **las dos últimas columnas** y otro los de **la última**. También se realiza un modelo cuyas **tres columnas tienen orientación fija a 0°**. Las IL medidas a 1m de dichos modelos y el compuesto por 16x3 dispersores rígidos se encuentran en la Figura 47.

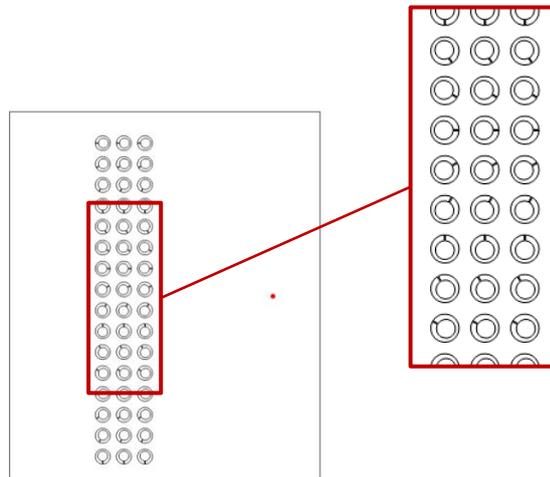


Figura 46. Modelo anecoico de barrera compuesta por 16x3 dispersores compuestos por R1. 3 columnas rotadas. Receptor a 1m.

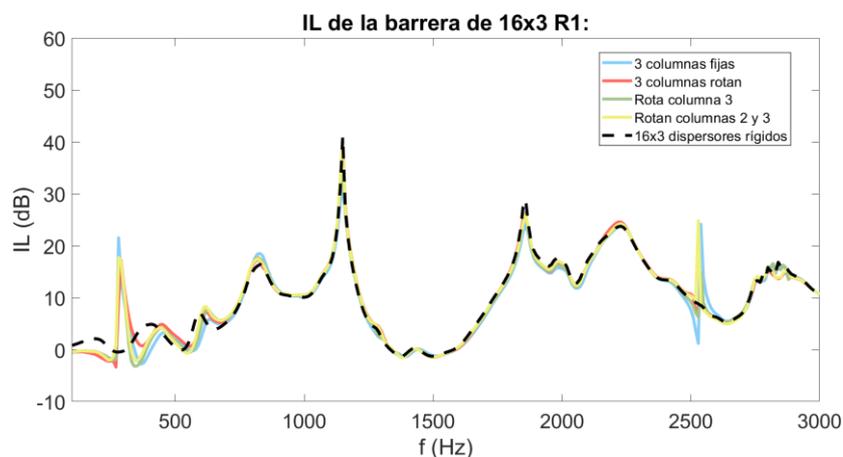


Figura 47. IL de la barrera compuesta por dispersores formados por R1, cuya orientación de los dispersores es: fija (azul), las 3 columnas rotan como en la Figura 46 (rojo), la última columna rota (verde), las dos últimas columnas rotan (amarillo).

Se observa que, tal y como se esperaba, al rotar los dispersores que forman una barrera compuesta por resonadores tipo R1 prácticamente **no aparecen interacciones con los LRG1** que produce cada dispersor porque, como se ha expuesto en los primeros estudios, aunque se rote dicho dispersor, el **LRG1 apenas cambia**. Sin embargo, en esos mismos estudios se demuestra que al rotar los dispersores de una barrera compuesta por resonadores R2 el LRG2 que producen dichos resonadores sí que se mueven de posición. Por ello, se plantea hacer el mismo estudio que se acaba de realizar, pero con la barrera compuesta por resonadores R2 en vez de R1 y, así, ver si

las interferencias entre los dispersores orientados de forma distinta a lo largo de la barrera son interferencias constructivas que permitan obtener un LRG2 más completo.

### 5.6.2 Modelos formados por 16x3 dispersores compuestos por R2

A continuación, se sigue el mismo procedimiento que se acaba de realizar pero con una **barrera formada por 16x3 dispersores compuestos por resonadores R2**, y se orientan de la misma forma que se ha hecho en el subapartado anterior (de 30° en 30°, los dispersores que componen una misma columna), dando lugar de nuevo a **cuatro modelos**: el de **todas las columnas fijas** (es decir, rotadas a la misma dirección, 0°), el de **todas las columnas rotadas** (Figura 48), de las **dos últimas columnas rotadas** y el de sólo la **última columna rotada**. Se comparan las IL de dichos modelos entre ellos y con el modelo de 16x3 dispersores rígidos, véase la Figura 49.

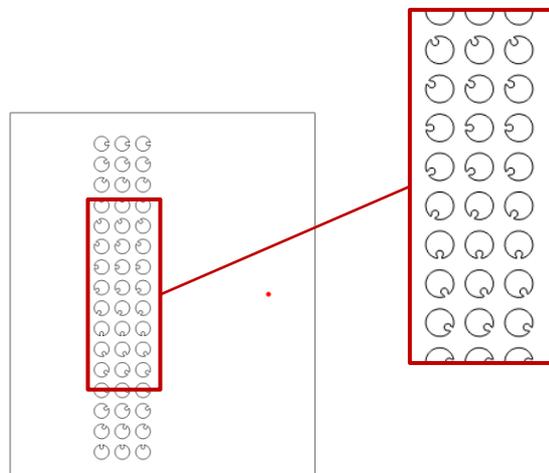


Figura 48. Modelo anecoico de barrera compuesta por 16x3 dispersores compuestos por R2. 3 columnas rotadas. Receptor a 1m.

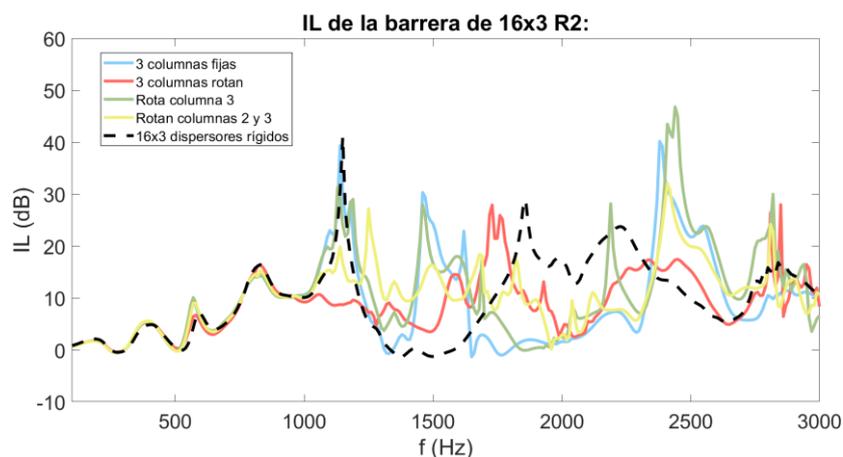


Figura 49. IL de la barrera compuesta por dispersores formados por R2, cuya orientación de los dispersores es: fija (azul), las 3 columnas rotan como en la Figura 48 (rojo), las últimas columnas rotan (verde), las dos últimas columnas rotan (amarillo).

El **LRG2** que aportan los resonadores de los modelos creados (espectros de colores) **no se pueden distinguir claramente en algunos casos**, es decir, con excepción del caso de todos los dispersores orientados en la misma dirección (azul), en los otros espectros no se identifica un pico en concreto que pertenezca a esta banda. Esto **puede ser porque sí que ha ocurrido lo que se planteaba** al inicio de este apartado: debido a que los dispersores están rotados de forma distinta entre ellos, las **interferencias entre sus LRG2 hacen que se sumen dichas bandas**.

Observando lo que ocupan dichos espectros en la gráfica, parece que el **modelo con unas IL más completas es el que tiene las dos últimas columnas con orientación variable** porque se puede ver que su espectro (amarillo) **no destruye el primer BG**, parece que lo amplía. Este modelo muestra unas IL bastante completas a lo largo de las frecuencias estudiadas: el modelo cuyas tres columnas tienen cambios de orientación (rojo) destruye más el primer BG y el otro modelo (sólo última columna rotada, verde) destruye más el segundo BG. Se comprueba observando el AA:

MODELO	COLUMNAS CON ORIENTACIÓN VARIABLE	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	- (ninguna)	2,8513
16x3 R2	- (ninguna)	2,6694
	1, 2 y 3 (todas)	2,6361
	3	2,8113
	2 y 3	2,9658

Tabla 5. AA de los espectros mostrados en la Figura 49.

Efectivamente en la tabla anterior se muestra que el **modelo cuyas dos últimas columnas se orientan de forma distinta sus dispersores aporta unas IL mejores** que un modelo cuyas tres columnas están todas orientadas hacia la misma dirección. A continuación, se va a **comprobar si ocurre lo planteado** al inicio del apartado, es decir, si el modelo formado por dispersores con orientación variable tiene un espectro más completo porque el LRG2 que provoca este modelo es una suma de las diferentes interacciones de cada dispersor. Esto se va a realizar comparando el espectro del mejor caso anterior (el de las dos últimas columnas con orientación variable, amarillo) con una **barrera cuya orientación en todos sus dispersores es fija**, es decir, una barrera de 16x3 dispersores formados por R2 cuyos resonadores están **orientados a la misma dirección**, para **tres direcciones: 0°, 45°, 90°**. Obsérvese la siguiente gráfica:

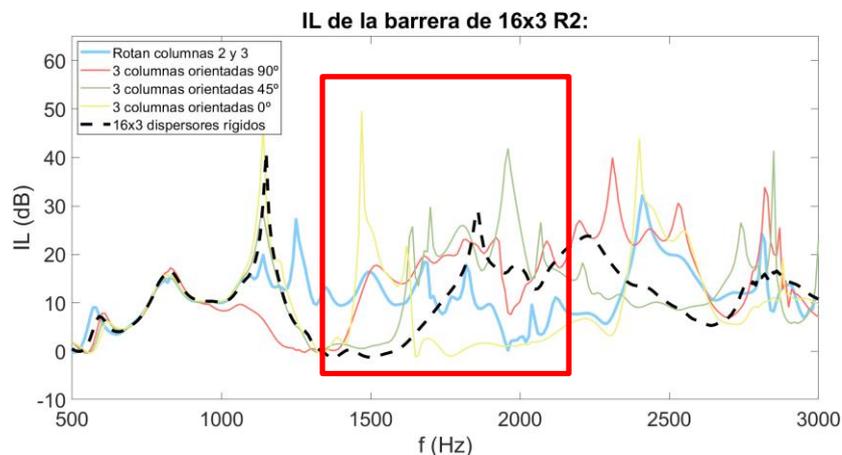


Figura 50. IL de la barrera compuesta por dispersores formados por R2, cuya orientación de los dispersores es: las dos últimas columnas rotan (azul), fija a 90° (rojo), fija a 45° (verde), fija a 0° (amarillo). Marcado en rojo la zona donde se encuentran los LRG2.

Véase en la figura anterior la zona en el recuadro rojo, zona donde predomina la atenuación por resonancia unida de forma constructiva o destructiva (dependiendo del modelo) al segundo BG. En dicho rango de frecuencias el **espectro de la barrera cuyos dispersores de las dos últimas columnas están rotados de forma distinta entre ellos (azul)** puede ser **aproximadamente una suma de los diferentes casos de orientación por separado** ya que, comparando dicho espectro con el de los modelos que tienen misma orientación en todos los dispersores (para 0°, 45° y 90; amarillo, verde y rojo) se puede ver que este primer modelo muestra unas **IL que completan partes del espectro en el que algunas orientaciones de dispersor no muestran atenuación** (y otras orientaciones sí). Sin embargo, **también ocurre lo contrario**, en algunas bandas de frecuencia **las IL del modelo rotado disminuyen respecto a otros casos cuando otras orientaciones muestran IL nulas** en dicho rango. Es decir, pese a que el modelo de orientaciones variables sale de la suma de los diferentes casos de orientación individuales, la **interacción de dichos casos no es completamente constructiva**, hay bandas de atenuación que se destruyen y, por ello, puede haber casos de modelos cuyos dispersores están todos orientados a una misma dirección con unas IL más completas. Esto se puede comprobar observando el AA de los espectros anteriores:

MODELO	COLUMNAS CON ORIENTACIÓN	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	- (ninguna)	2,8513
16x3 R2	variable en las col. 2 y 3	2,9806
	fija (90°)	3,5456
	fija (45°)	3,1833
	fija (0°)	2,6118

Tabla 6. AA de los espectros mostrados en la Figura 50.

Por tanto, aunque el **espectro resultante del modelo propuesto** surja de **una suma de los diferentes casos individuales de la posición de LRG2 según la orientación del dispersor**, esto tiene sus **ventajas y sus desventajas a lo largo del espectro**, pues hay zonas en las que las interacciones de los dispersores orientados en distinta dirección hacen que se anulen las IL y otras zonas en las que se completan.

A continuación, se realiza un estudio similar, pero con la doble cámara de resonancia. Se espera que los resultados sean prácticamente iguales a los de este apartado, pero con la adición del LRG1 al espectro debido a la presencia de los resonadores R1.

### 5.6.3 Modelos formados por 16x3 dispersores compuestos por doble cámara de resonancia (R1+R2)

Se diseña un modelo de condiciones anecoicas de 16x3 dispersores compuestos por doble cámara de resonancia. Como en los dos anteriores puntos, se rotan de forma distinta los dispersores de cada columna que componen la barrera y se estudia para cuatro casos distintos: rotando las tres columnas de dispersores (véase la Figura 51), sin rotar ninguna columna, rotando la última y rotando las dos últimas. Se exponen las IL de dichos modelos en la siguiente gráfica de la Figura 52.

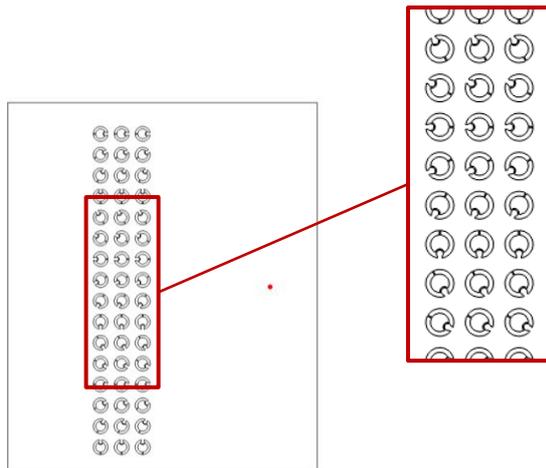


Figura 51. Modelo anecoico de barrera compuesta por 16x3 dispersores compuestos por doble cámara de resonancia (R1+R2). 3 columnas rotadas. Receptor a 1m.

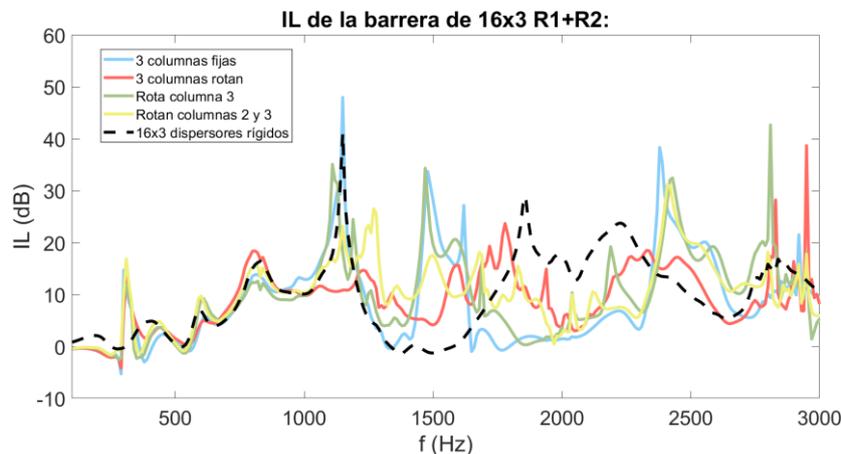


Figura 52. IL de la barrera compuesta por dispersores formados por doble cámara (R1+R2), cuya orientación de los dispersores es: fija (azul), las 3 columnas rotan como en la Figura 51 (rojo), la última columna rota (verde), las dos últimas columnas rotan (amarillo).

Se observa que lo que ocurre sí que es **similar a lo que ocurría** en el subapartado anterior (**con las barreras formadas por R2**) pero se ha añadido el **LRG1** producido por el R1, el cual es **prácticamente invariable** independientemente del modelo. Por tanto, se calcula el AA para comprobar que **el modelo cuyas IL son más completas** es el modelo cuyas **dos últimas columnas sus dispersores tienen orientación variable**:

MODELO	COLUMNAS CON ORIENTACIÓN VARIABLE	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	- (ninguna)	2,8513
16x3 R1+R2	- (ninguna)	2,5484
	1, 2 y 3 (todas)	2,7188
	3	2,8979
	2 y 3	2,9813

Tabla 7. AA de los espectros de la Figura 52.

A continuación, de forma análoga al estudio anterior, se compara el espectro de dicho modelo (el **modelo cuyos dispersores de las dos últimas columnas están orientados** de forma diferente entre ellos) con el de las **barreras formadas por 16x3 dispersores con doble cámara de resonancia y todos sus dispersores orientados en la misma dirección** (para los casos 90°, 45° y 0°). Obsérvese la Figura 53. En la Tabla 8 se observan las AA de dichos espectros.

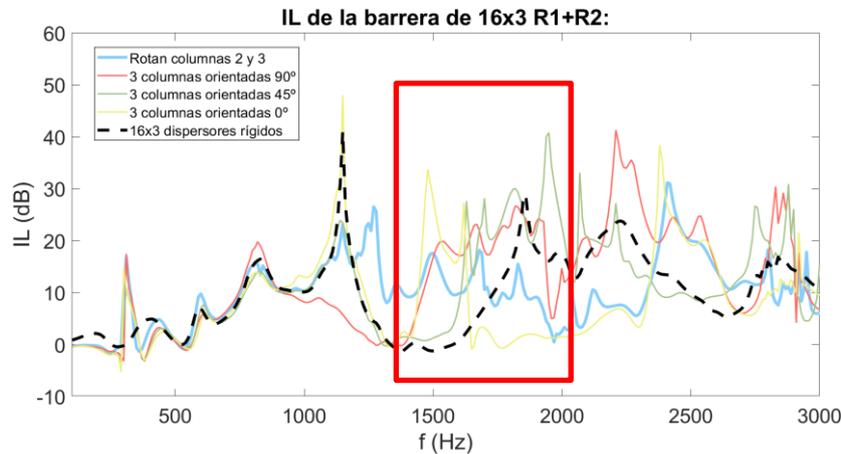


Figura 53. IL de la barrera compuesta por dispersores formados por R1+R2, cuya orientación de los dispersores es: las dos últimas columnas rotan (azul), fija a 90° (rojo), fija a 45° (verde), fija a 0° (amarillo). Marcado en rojo la zona donde se encuentran los LRG2.

MODELO	COLUMNAS CON ORIENTACIÓN	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	- (ninguna)	2,8513
16x3 R2	variable en las col. 2 y 3	2,9813
	fija (90°)	3,6337
	fija (45°)	3,3113
	fija (0°)	2,7484

Tabla 8. AA de los espectros de la Figura 53.

Las conclusiones vuelven a ser las mismas, pese que **el espectro del modelo cuyas dos últimas columnas los dispersores tiene orientaciones distintas** (azul) surja de la interacción entre las diferentes posiciones de LRG2 de dichos dispersores, dichas **interacciones no son completamente constructivas**, pues se puede ver que hay casos de modelos donde todos los dispersores están orientados hacia la misma dirección donde sus IL son más completas, el modelo orientado a 90°. Sin embargo, este último modelo destruye gran parte del primer BG, lo cual es una gran desventaja para una barrera de este tipo y, además, se observa que el espectro de la barrera con dos columnas de dispersores con orientación variable tiene unas **IL bastante constantes a lo largo del rango de frecuencias estudiado**. Por ello, estudiar modelos en los que se juegue con distintas rotaciones de dispersor dentro una misma barrera puede dar lugar a estudios interesantes y modelos de barreras cuyas IL sean bastante completas. Por ello, a continuación, se van a seguir desarrollando modelos tratando de estudiar este fenómeno de una forma distinta.

## 5.7 Combinación de distintas orientaciones en un mismo dispersor mediante modelos helicoidales en 3D

En el punto anterior se ha realizado un estudio variando de forma distinta las orientaciones de los dispersores que componen una misma columna de la barrera. Se ha visto que con esta combinación el espectro resultante es interesante, pues es la suma de los distintos casos de orientación presentes (ya que variando a la orientación del R2 se desplaza su banda de atenuación por el efecto de resonancia, el LRG2). Sin embargo, se ha visto que esta suma no es completamente constructiva, pues hay interacciones entre los distintos dispersores que hacen que se anulen algunos rangos de atenuación.

En este apartado se propone seguir con este tipo de estudio y seguir con el **objetivo de utilizar el hecho de que el LRG2 se desplaza dependiendo de la orientación del R2 como ventaja para intentar cubrir la mayor parte posible del espectro mediante una suma constructiva de los distintos LRG2 que aportan distintas orientaciones**. Para ello, se propone un **nuevo diseño**: un modelo de barrera cuyos dispersores estén formados por una **estructura helicoidal**, es decir, dispersores en los cuales la orientación va variando a lo largo de su propia estructura.

Para un modelo de este tipo es necesario realizar una **estructura en 3D**: se crearán una serie de **modelos ideales** de pantalla acústica similares a los estudiados en los primeros apartados del proyecto y se les asignará una altura (en dirección al eje z) para, así, hacer que los **resonadores que componen la estructura giren de forma helicoidal a lo largo del dispersor**.

Debido a la **complejidad del diseño de las estructuras helicoidales** se ha debido de modelar dichas pantallas acústicas mediante el **software AutoCAD**, por lo que ha sido necesario tener un conocimiento previo del programa. Esta herramienta permite la creación de geometrías en 2D y 3D de forma mucho más sencilla que otros softwares (como COMSOL Multiphysics) ya que esta es su función principal. Además, COMSOL Multiphysics está adaptado para importar diseños de AutoCAD, por lo cual ha sido posible transferir la geometría de un programa a otro de forma sencilla.

### 5.7.1 Modelos en 3D (base teórica)

En trabajos anteriores ya se realizaron simulaciones en 3D de este tipo de barreras [6], y se expuso que las simulaciones de este tipo son muy importantes porque **se asemejan más a estudiar una barrera de sonido real**. Además, realizar diseños virtuales para estudiar bien su comportamiento y estructura es hoy en día el paso previo para construir realmente la pantalla, ya que mediante estudios de este tipo se puede variar fácilmente el tamaño, la forma y la orientación de los parámetros que forman el modelo para estudiar su comportamiento antes de llevarla a la realidad. También en dicho proyecto se demostró que **los resultados que aportan los modelos en 3D son similares a sus modelos equivalentes en 2D**, teniendo estos últimos mucho menos coste computacional y así siendo un buen paso previo para las simulaciones en 3D. Esta es la razón por la que lo que los primeros estudios de este trabajo se centran en simulaciones en 2D.

Asimismo, debido a que los **modelos en 3D tienen mucho más coste computacional** habrá que **adaptar el tamaño de la malla** para que sea **suficientemente fino como para obtener resultados precisos**, pero no demasiado para que el **coste computacional sea razonable**. Este estudio sobre el tamaño de la malla y la precisión del mallado en modelos 3D ya se realizó en el proyecto previo [6], donde se demostró que con el mallado controlado por la física que ofrece COMSOL denominado *más fino* los resultados eran suficientemente precisos. Sin embargo, dicho

estudio estaba adaptado a un modelo de barrera estudiado hasta una frecuencia de 2000Hz, por lo que para este trabajo (que estudia hasta los 3000Hz) puede que dicho mallado no sea suficiente. Esto ocurre porque, tal y como se ha explicado en la parte teórica de este proyecto, la precisión del mallado está relacionada con el tamaño de los elementos que forman dicha malla y, dado que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, estudiando hasta una frecuencia más alta se requerirá un tamaño de elemento más pequeño para unos resultados suficientemente precisos.

Por todo ello, en primer lugar, se va a **comparar la barrera en 2D con su equivalente en 3D**, pero, en este último caso, con **varios mallados**. Con ello se verá el tamaño mínimo de malla a utilizar para tener un coste computacional razonable y unos buenos resultados.

En la Figura 54 se muestra el diseño ideal de barrera compuesta por tres columnas de resonadores rígidos. La **altura de todos los dispersores** que se van a diseñar será es de **1m**. Asimismo, **en todos los modelos en 3D el receptor de medida se va a colocar a 20cm de las pantallas acústicas mencionadas y centrado en la altura** para obtener unos resultados que no se vean afectados por los efectos de borde de la barrera.

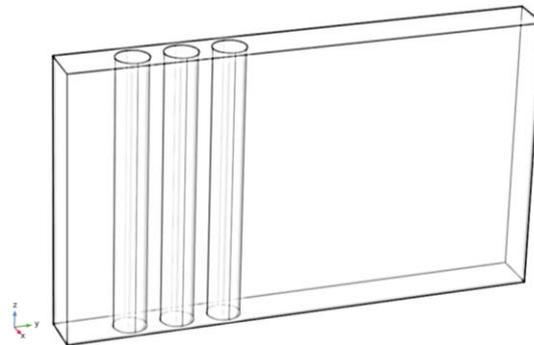


Figura 54. Barrera formada por 3 dispersores rígidos. Modelo 3D.

A continuación, se expone en las IL del modelo de la figura anterior para los mallados que el software denomina malla *más fina*, *extra fina* y *extremadamente fina*. Dichos modelos se comparan con su modelo equivalente en 2D:

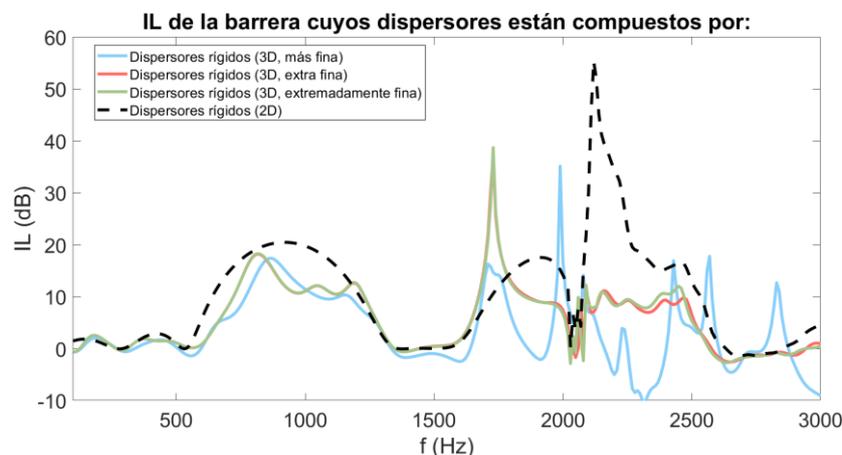


Figura 55. IL de las barreras formadas por 3 dispersores rígidos: modelo 3D malla "más fina" (azul), modelo 3D malla "extra fina" (rojo), modelo 3D malla "extremadamente fina" (verde), modelo 2D (negro).

Comparando ambos modelos, **2D y 3D** (observando el mallado con más precisión (*extremadamente fina*, verde)), se observa que los resultados son similares pues, aunque obviamente los valores son distintos, las **bandas de atenuación se encuentran en frecuencias muy próximas** y los espectros tienen un **comportamiento similar**, tal y como se predecía y se demostraba en trabajos anteriores [6].

Por otra parte, observando los tres espectros en 3D se puede ver que el caso de mallado *más fino* no tiene suficiente precisión para las frecuencias más altas y con los otros dos mallados (*extra fina* y *extremadamente fina*) los resultados son muy similares, por lo que **el tamaño que se va a utilizar en el resto de modelos 3D del proyecto es *extra fina***, ya que es el mallado **cuyos resultados son más precisos que tiene un coste computacional menor**.

### 5.7.2 Modelos helicoidales: 3 columnas de dispersores compuestos por R1

El estudio bidimensional de modelos de barrera con distintas orientaciones para los dispersores que forman una misma columna (apartado 5.6) comenzó viendo como afectaban dichos cambios de orientación en barreras compuestas por resonadores R1. De mismo modo, este primer estudio donde se estudian **distintas orientaciones del resonador en un mismo dispersor** (mediante modelos helicoidales) comienza con un **modelo ideal de barrera compuesta por tres dispersores formados por resonadores R1**.

Para dar forma helicoidal al R1 a lo largo del propio dispersor, la forma de la hélice puede tener distintas formas dependiendo del paso de hélice con el que se diseñe, es decir, si se le aplica una rotación de **1 paso de hélice al R1, el resonador dará una vuelta de 360°** desde el inicio del dispersor hasta el final, si se aplica una rotación de **1/2 paso dará una vuelta de 180°**, si se aplica una rotación de **1/4 de paso dará una vuelta de 90°**, ... Para estudiar lo que se pretende observar es suficiente con dar 1/2 paso, por lo que se van a realizar tres modelos aplicando en uno de ellos 1/2 paso de hélice, en otro 1/4 paso y en otro 1/8 y, así, comparar sus resultados. Dichos modelos se encuentran en la siguiente figura:

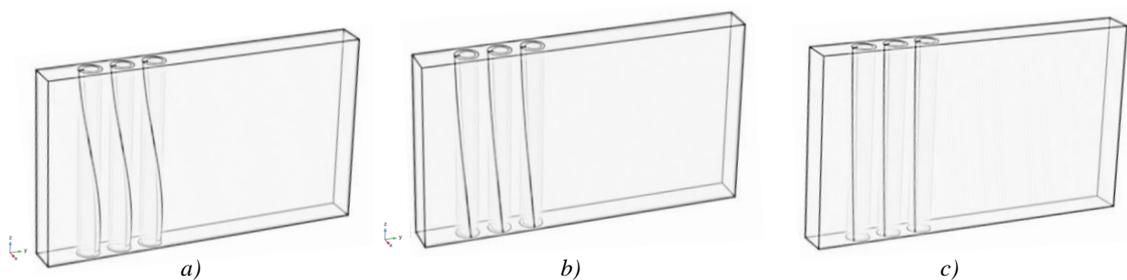


Figura 56. Barrera formada por 3 dispersores compuestos por R1. Modelos 3D helicoidales de: a) 1/2 paso, b) 1/4 paso y c) 1/8 paso.

En la Figura 57 se muestran las IL de los modelos de pantalla acústica mostrados en la figura anterior (en línea continua ‘—’), así como el modelo de dispersores rígidos (negro; ‘-’), y modelos ideales en 3D compuestos por R1 de orientación fija (estructura no helicoidal) orientados a 180°, 45° y 90° (líneas de color; ‘--’), con objetivo de observar dónde se encuentran los LRG1 en dichas orientaciones fijas y poder comparar con los modelos helicoidales:

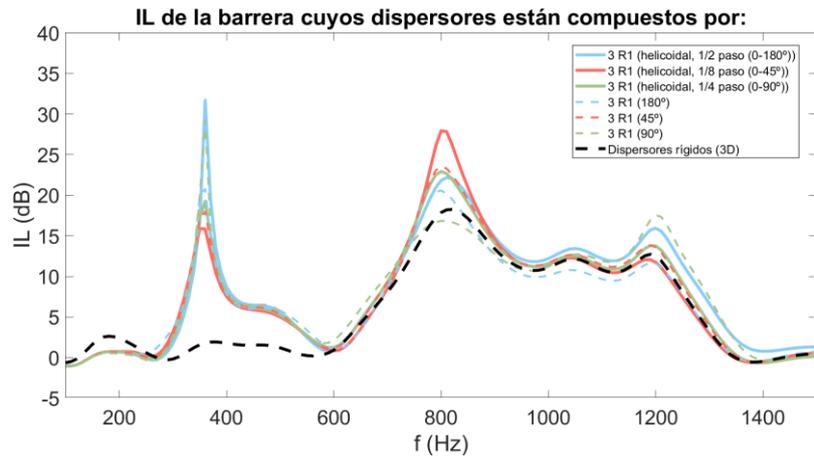


Figura 57. IL de las barreras compuestas por 3 dispersores formados por: R1 orientados de forma helicoidal (modelos de la Figura 56) (colores: '—'); R1 de orientación fija (no helicoidal) orientados a 180° (azul; '- -'), a 45°(rojo; '- -') y a 90° (verde; '- -'); y dispersores rígidos (negro).

Se observa que la diferencia entre los modelos compuestos por R1 y el modelo compuesto por dispersores rígidos es el LRG1 que aparece alrededor de 360Hz. Respecto a los modelos formados por resonadores, todos los **espectros son muy similares**, pues su comportamiento es similar y las bandas de atenuación se encuentran en las mismas frecuencias. Este es el **resultado esperado** porque, tal y como ha ocurrido a lo largo del proyecto, se ha visto que **cambiar la orientación del dispersor no afecta a la posición de LRG1** (apartado 5.1.2.1). Por ello, no es necesario comprobar el valor de AA de dichos espectros.

Por tanto, cambiar la orientación de R1 de forma helicoidal no es una modificación que aporte mejoras al espectro de IL. Sin embargo, se espera que tal y como ha ocurrido en el apartado anterior con los modelos anecoicos, cambiar la orientación del resonador R2 sí que aporte cambios interesantes de estudiar, pues al variar su orientación se desplaza el LRG2.

### 5.7.3 Modelos helicoidales: 3 columnas de dispersores compuestos por R2

En este apartado se crean **modelos iguales a los del apartado anterior pero compuestos por R2** en lugar de R1. También se realiza la forma helicoidal de  $\frac{1}{2}$  paso,  $\frac{1}{4}$  paso y  $\frac{1}{8}$  paso, véase la siguiente figura:

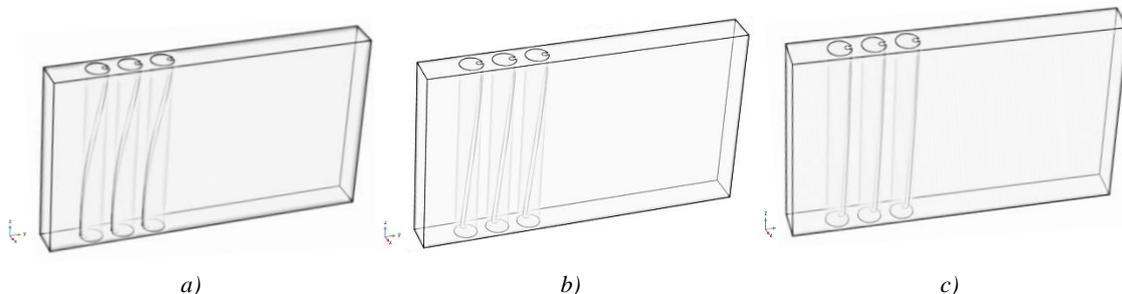


Figura 58. Barrera formada por 3 dispersores compuestos por R2. Modelos 3D helicoidales de: a)  $\frac{1}{2}$  paso, b)  $\frac{1}{4}$  paso y c)  $\frac{1}{8}$  paso.

A continuación, tal y como se realizó en el apartado anterior, en la Figura 59 se muestran las IL de dichos modelos y de tres modelos ideales en 3D compuestos por R2, pero de estructura de orientación fija, orientados 180°, 45° y 90°; además se muestra el modelo compuesto por dispersores rígidos para comparar. En la Tabla 9 se calcula numéricamente el valor de las AA de dichos espectros.

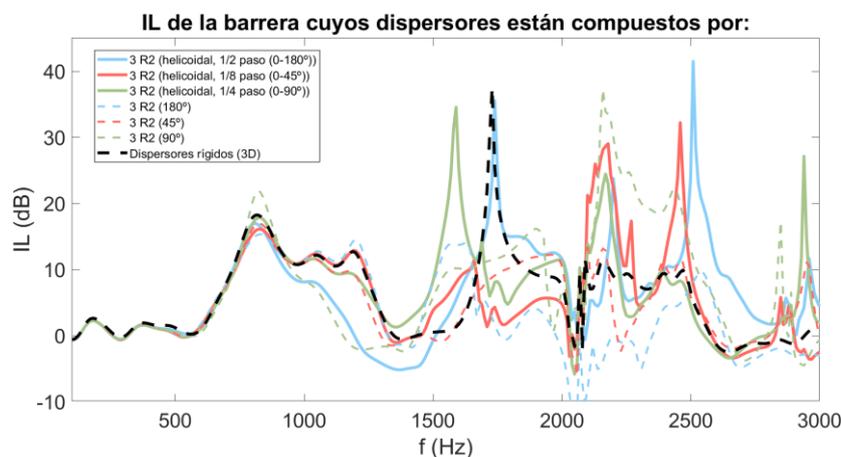


Figura 59. IL de las barreras compuestas por 3 dispersores formados por: R2 orientados de forma helicoidal (modelos de la Figura 58) (colores; '—'); R2 de orientación fija (no helicoidal) orientados a 180° (azul; '-.-'), a 45° (rojo; '-.-') y a 90° (verde; '-.-'); y dispersores rígidos (negro).

MODELO (3D)	ORIENTACIÓN	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	-	1,7348
3R2	3 cols. helicoidal (1/2 paso)	1,9907
	3 cols. helicoidal (1/8 paso)	1,7902
	3 cols. helicoidal (1/4 paso)	1,9748
	3 cols. fija 45°	1,5373
	3 cols. fija 90°	2,2081
	3 cols. Fija 180°	1,2596

Tabla 9. AA de los espectros de la Figura 59.

Tanto en la gráfica anterior como en los valores de AA que muestra la tabla se pueden extraer conclusiones interesantes. Se observa que los **tres modelos de estructura helicoidal aportan mayor atenuación que los dos modelos en los que la orientación es fija a 45° y 180°**, sin embargo, **el modelo en el que la orientación de los dispersores es fija a 90° es el que aporta mayor valor de AA**. No obstante, es muy importante observar la gráfica y ver que tanto el **modelo helicoidal de 1/2 paso** (azul; '—') como el **modelo de orientaciones fijas a 90°** (verde; '-.-') **destruyen gran parte del primer BG**, una de las bandas de atenuación más importantes para este tipo de barreras. Por tanto, estos dos modelos, pese a tener muy buenos valores de AA, su atenuación no está repartida a lo largo del espectro y atenúan poco en las frecuencias medias-bajas, lo cual es una gran **desventaja**. Los otros modelos sí que mantienen prácticamente igual el ancho del primer BG

Por lo tanto, **un buen modelo a proponer en 3D compuesto por resonadores R2 sería el modelo helicoidal cuya rotación es de 1/4 de paso de hélice** (verde; '—'), ya que es un modelo que aporta unas IL muy completas en el espectro y mantiene el ancho del primer BG. Además,

dicho modelo presenta una atenuación bastante mejor que otros modelos cuyos dispersores tienen orientaciones fijas, por lo que este tipo de diseños helicoidales pueden ser muy interesantes para obtener un **espectro de IL completo** gracias a la **suma de las bandas de atenuación que aportan individualmente el conjunto de orientaciones por las que está compuesta** la estructura.

Por otro lado, se va a tratar de ver si se puede mejorar el modelo mediante la **combinación de dispersores de distintos tipos**, en este caso, dispersores formados por los **mismos resonadores (R2)**, pero **unos con estructura helicoidal y otros no**. En el apartado anterior (5.6) se ha estudiado combinar distintas orientaciones en una misma columna de dispersores, y se ha visto que orientar la primera columna de forma fija (es decir, todos los dispersores colocados con la misma orientación) y las otras dos con orientación variable es una combinación que aporta mejores resultados que rotando los dispersores de las tres columnas. Se va a comprobar si ocurre algo similar con los modelos helicoidales o si sus mejores resultados se obtienen cuando las tres columnas de dispersores tienen la misma estructura. Para ello, se expone modelos formados por tres columnas de **dispersores compuestos por R2** en las cuales en un modelo el **primer dispersor tiene orientación fija** y las **dos últimas columnas tienen una estructura helicoidal de 1/4 de paso de hélice** (ya que se acaba de comprobar que es el caso que aporta unas IL más completas) y en **otro modelo solo tiene estructura helicoidal la última columna**.

En la Figura 60 se observan las IL de estos modelos comparadas con las IL del modelo anterior de estructura helicoidal en los tres dispersores de 1/4 de paso (Figura 58.b)) y con las IL de un modelo en el que los tres dispersores están compuestos por R2 con orientación fija. Además, se exponen los valores de AA para comparar de forma numérica la atenuación de dichos modelos.

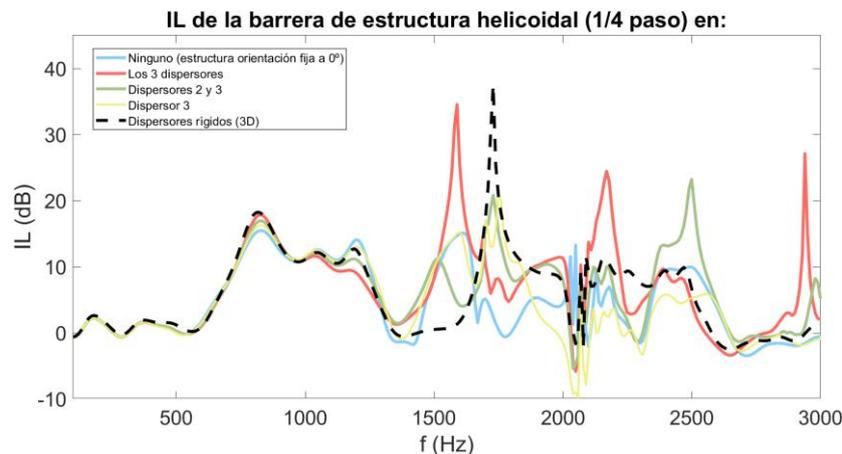


Figura 60. IL de las barreras compuestas por 3 dispersores formados por R2 con estructura helicoidal de 1/4 de paso en: ninguno (estructura de orientación fija; azul), los 3 dispersores (rojo), los dos últimos dispersores (verde) y el último dispersor (amarillo)

MODELO	COLUMNAS CON ORIENTACIÓN HELICOIDAL 1/4	AA (x10 <sup>4</sup> ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	- (ninguna)	1,7348
R2	- (ninguna, orientaciones fijas)	1,4746
	1, 2 y 3 (todas)	1,9748
	3	1,5178
	2 y 3	1,8638

Tabla 10. AA de los espectros de la Figura 60.

Se observa que en todos los modelos el ancho del BG se mantiene prácticamente igual que en el caso de dispersores rígidos. Viendo los valores de AA se puede afirmar que **combinar unos dispersores con estructura helicoidal y otros con estructura de orientación fija no mejora el diseño**. Por tanto, el mejor modelo helicoidal propuesto sigue siendo el modelo formado por tres columnas de dispersores con rotación en el propio dispersor de  $\frac{1}{4}$  de hélice.

#### 5.7.4 Modelos helicoidales: 3 columnas de dispersores compuestos por doble cámara de resonancia (R1+R2)

Para finalizar con los estudios de este tipo de modelos se va a realizar el **diseño helicoidal de un modelo de barrera ideal en 3D compuesto por doble cámara de resonancia** (Figura 61). En este caso sólo se va a utilizar un modelo cuyos tres dispersores rotan  $\frac{1}{4}$  de hélice, ya que se ha visto que es la estructura helicoidal que aporta **mejores resultados**. Teniendo en cuenta todos los estudios realizados hasta ahora **se espera que los resultados sean muy similares al modelo compuesto por tres dispersores formados por R2** con estructura helicoidal de  $\frac{1}{4}$  de hélice, pero con la **adición del LRG1** que aporta el resonador R1.

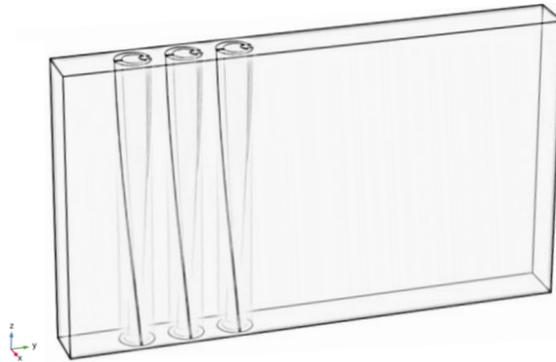


Figura 61. Barrera formada por 3 dispersores compuestos por doble cámara de resonancia (R1+R2). Modelos 3D helicoidales de  $\frac{1}{4}$  paso.

A continuación, se observa en el espectro de IL del modelo creado (verde), junto al modelo helicoidal de tres dispersores compuestos por R1 (azul) y el modelo helicoidal de tres dispersores compuestos por R2 (rojo):

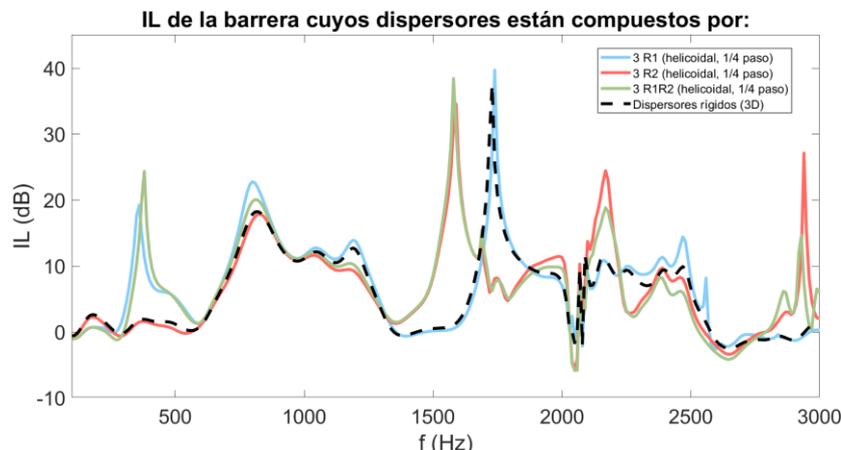


Figura 62. IL de las barreras helicoidales compuestas por 3 dispersores formados por: 3 R1 (azul), 3 R2 (rojo), 3 dispersores de doble cámara (R1+R2) (verde) y dispersores rígidos (negro).

Se puede ver que, efectivamente, **los resultados son los esperados**: el espectro de IL del modelo formado por tres dispersores helicoidales de doble cámara de resonancia tiene el mismo comportamiento que el del modelo formado por tres dispersores compuestos por R2, pero con la adición al espectro del LRG1 que aportan los resonadores R1.

### 5.7.5 Análisis de un modelo más realista

Se han estudiado modelos helicoidales en 3D, los cuales aportan unos resultados muy próximos a la realidad. Sin embargo, en un **modelo real** habría dos factores que afectarían al espectro de resultados: la **difracción por borde de la barrera** y las **reflexiones del suelo**, por ello, en la siguiente gráfica se compara el modelo de barrera en condiciones ideales con un modelo en el que sí se tienen en cuenta las **reflexiones del suelo**, ambos, del modelo helicoidal ( $\frac{1}{4}$  paso) de doble cámara:

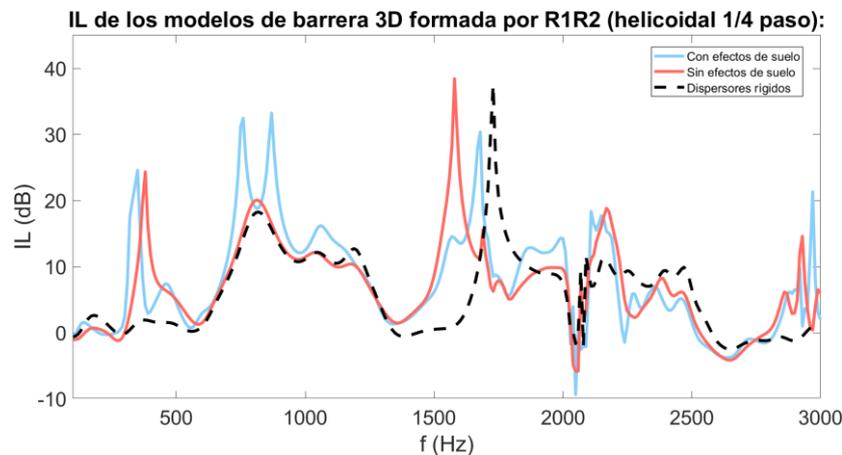


Figura 63. IL del modelo 3D de barrera formada por doble cámara helicoidal de  $\frac{1}{4}$  paso: sin efecto de suelo (rojo), con efecto de suelo (azul).

Se observa que el espectro en el que sí que se le añaden las interferencias por reflexiones del suelo, pese a ser un modelo más realista, el **comportamiento es muy similar al del modelo ideal**. El dato más importante para destacar es que las bandas de atenuación son las mismas, es decir, el comportamiento del espectro de ambos modelos es el mismo, por lo que estudiar **modelos ideales** de barreras **ayuda a ver los resultados de forma más clara** ya que no aparecen este tipo de interferencias y, por, tanto, son modelos mucho más útiles para realizar estudios teóricos.

## Capítulo 6. Conclusiones

Como bien se marca al inicio del proyecto, este trabajo se ha centrado en estudiar diferentes parámetros que forma una barrera basada en CS con resonadores insertados. Se ha estudiado, sobre todo, la orientación, pero también se han aplicado otros cambios (inserción de una tercera cámara de resonancia, combinación de dispersores de distintos tipos, ...). **Todo ello se ha hecho enfocado siempre a tratar de conseguir el objetivo planteado al inicio del proyecto:** tratar de mejorar las IL de una barrera basada en CS compuesta por resonadores de Helmholtz. Por ello, una buena conclusión sería exponer los modelos de barrera principales planteados a lo largo del proyecto y observar dichas mejoras.

### 6.1 Comparación de los principales modelos diseñados (3D)

Se decide finalizar este proyecto exponiendo los modelos planteados en tres dimensiones para, así, aportar unos datos más próximos a la realidad:

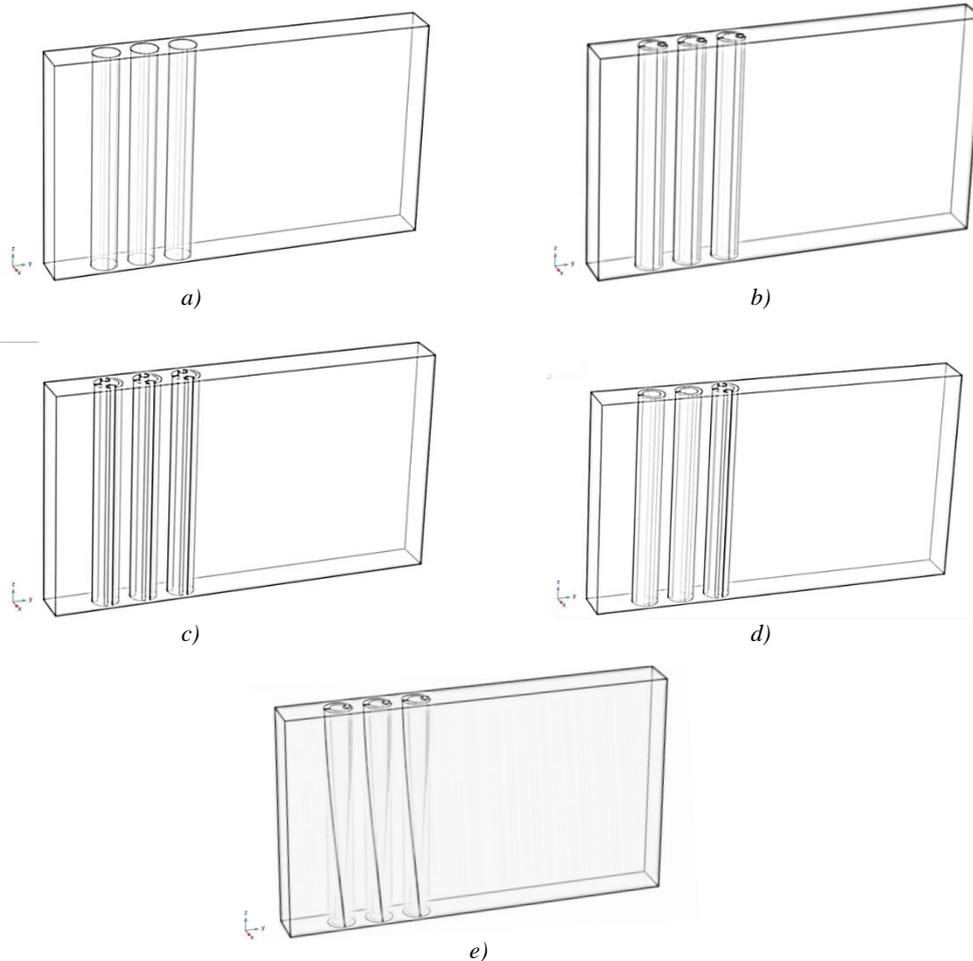


Figura 64. Barrera formada por: a) 3 dispersores rígidos, b) 3 dispersores doble cámara ( $R1+R2$ ), c) 3 dispersores triple cámara (tipo  $R1+2R2$ ), d) dispersores:  $R1$ ,  $R1$ ,  $R1+2R2$ , e) 3 dispersores doble cámara ( $R1+R2$ ) de estructura helicoidal ( $1/4$ ) paso. Modelos 3D.

Obsérvese la figura anterior. En primer lugar, se muestra en 3D el modelo ideal de **pantalla acústica compuesta por tres columnas de dispersores rígidos** (Figura 64.a)). A continuación, se muestra el modelo de barrera del que parte este trabajo, el **modelo de pantalla acústica formado por doble cámara de resonancia** que se ha utilizado como base para ir mejorando su estructura a lo largo de los anteriores estudios (Figura 64.b)). También se expone los dos modelos mejorado de éste: el compuesto por **tres columnas de dispersores con estructura tipo R1+2R2** (Figura 64.c)) y el modelo compuesto por **dos columnas de dispersores formados por un resonador R1 y una columna de dispersores de estructura tipo R1+2R2** (Figura 64.d)). Por último, el **modelo helicoidal** que ha mostrado mejores resultados, el **modelo helicoidal de 1/4 paso de doble cámara de resonancia** (Figura 64.e)).

A continuación, se exponen las IL (medidas a 20cm y centrado en altura) de dichos modelos, así como sus valores de AA:

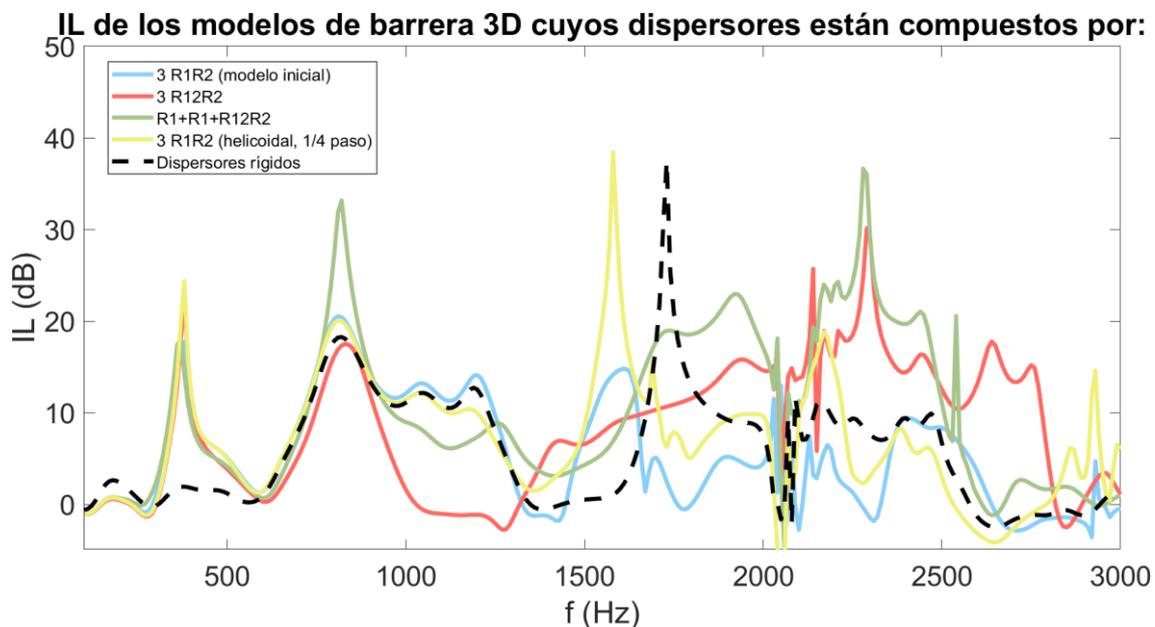


Figura 65. IL de los modelos en 3D de la barrera compuesta por: tres dispersores de doble cámara (R1R2, modelo inicial; azul), tres dispersores de triple cámara (R12R2; rojo), dispersores R1+R1+R12R2 (verde), tres dispersores de doble cámara helicoidal (1/4 paso; amarillo) y tres dispersores rígidos (negro).

MODELO (3D)	AA ( $\times 10^4$ ) (dB·Hz)
dispersores rígidos	1,7348
3 R1+R2 (inicial)	1,6815
3 R1+2R2	2,4417
R1+R1+R12R2	2,8921
3 R1+R2 (helicoidal)	2,1156

Tabla 11. AA de los espectros de la Figura 65.

Tanto observando los espectros como los valores de AA se puede ver que mediante distintos modelos **se ha cumplido el objetivo: mejorar las IL del modelo inicial**, el modelo de **doble cámara de resonancia** (azul). Dicho modelo presenta unas IL en las cuales el **segundo BG** se encuentra **destruido por el LRG2**, por lo que los nuevos diseños iniciaron con el objetivo de

mejorarlo. Así, con el diseño de **tres dispersores formados por triple cámara de resonancia mediante resonadores de tipo R1+2R2 (rojo)** se soluciona muy bien dicho problema, ya que el **LRG2 se suma de forma constructiva al segundo BG**, abarcando estos un gran rango de frecuencias (desde alrededor de 1270Hz hasta 2840Hz). Sin embargo, con este modelo se **destruye gran parte del primer BG**. Por ello, se decide **combinar distintos tipos de dispersores** en una misma barrera y surge el modelo formado por **dos columnas de dispersores compuestos por R1 y una columna formada por dispersores compuestos por resonadores tipo R1+2R2**. El espectro de IL de dicho modelo (verde) es **muy completo** en el rango de frecuencias estudiado: el LRG1 está prácticamente igual que en los modelos anteriores, el **primer BG no está destruido** como en el modelo anterior (aunque sí que es de valores un poco menores que el modelo de dispersores rígidos en algunas frecuencias) y el **LRG2 está sumado de forma constructiva al segundo BG** e, incluso, al primero. Observando los valores de AA se puede ver que dicho modelo es el que muestra mejores resultados, sin embargo, se compara también con el nuevo modelo creado, el **modelo helicoidal de doble cámara de resonancia**. Este último modelo tiene valores de atenuación un poco menores que los de barreras compuestas por triple cámara de resonancia, pero su **espectro (amarillo) es muy completo en el rango de frecuencias estudiado**: se puede ver que **el tamaño del primer BG es el mismo que en dispersores rígidos** y el **ancho de banda del segundo BG se ha ampliado** debido a la suma de los diferentes casos de orientación que lo componen y los respectivos LRG2 que tiene cada orientación. Sin embargo, el **segundo BG** (unido al LRG2 resultante del modelo) **decrece un poco en valor**, ya que como se ha explicado en el estudio helicoidal, la interacción de las diferentes orientaciones de dicho dispersor no es completamente constructiva.

Además, en estos últimos resultados de modelos 3D expuestos se puede observar que, tal y como se exponía de forma teórica, los resultados obtenidos con los modelos 3D son muy similares sus equivalentes en 2D (estudiados en el apartado 5.5).

Finalmente, cabe destacar que las IL que aporta el **modelo helicoidal** son interesantes, pues son mejores que las de su modelo equivalente de orientaciones fijas y, además, aporta un espectro **muy completo a lo largo del rango estudiado**. Sin embargo, hay otros modelos cuyas IL aportan mejores resultados y, por ello, en estos momentos y pensando en la fabricación, sería mejor utilizar resonadores rectos. Aun así, **este TFM ha iniciado aquí el estudio de dispersores cilíndricos donde los resonadores se han incorporado con paso de hélice** y estudios futuros podrán centrarse de forma más detallada en el estudio de este tipo de estructuras y sacar nuevas conclusiones.

## Capítulo 7. Futuros trabajos

A continuación, se exponen una serie de trabajos futuros que podrían surgir a raíz de lo estudiado en el presente proyecto:

- Realizar estudios más a fondo de **modelos helicoidales**: observar cómo cambia el espectro de IL al cambiar de altura el receptor (ya que una estructura helicoidal cambia de orientación en función de la altura del dispersor), aplicar la estructura helicoidal en modelos distintos, ...
- Estudio **más detallado** de los **efectos de borde y reflexiones del suelo** para unas medidas más realistas.
- Estudio más a fondo del modelo planteado en este proyecto cuyas IL son las más completas: modelos con **triple cámara de resonancia**, ya que son modelos que aportan resultados muy buenos en las frecuencias medias-altas pero se destruye el primer BG.

## Capítulo 8. Bibliografía

- [1] H. J. Jariwala, «Noise pollution & human health: a review,» *Indoor Built Environ*, pp. 1-4, 2017.
- [2] C. M. Harris, «Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control,» Third Edition, 1991.
- [3] Pedrero González, A. (presidente de la SEA), «Día Internacional sin Ruido 2021,» de *Sociedad Española de Acústica*.
- [4] H. P. Kunc, K. E. Mclaughlin y R. Schmidt, «Aquatic noise pollution: implications for individual, populations, and ecosystems,» *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 283, n° 1836, p. 20160839, 2016.
- [5] G. Jones, «Sensory ecology: noise annoys foraging bats,» *Current biology*, vol. 18, n° 23, pp. R1098-R1100, 2008.
- [6] L. S. Weilgart, «The impact of ocean noise pollution on marine biodiversity,» 2008.
- [7] J. V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia y V. Gómez, «Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers,» *Appl. Phys. Lett.* 81, 5240 (2002).
- [8] J. Sánchez-Pérez, D. Caballero, R. Martínez-Sala, C. Rubio, J. Sánchez-Dehesa, F. Meseguer, J. Llinares y F. Gálvez, «Sound Attenuation by a Two-Dimensional Array of Rigid Cylinders,» 1998.
- [9] S. Castiñeira-Ibáñez, J. V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, L. M. García-Raffi y V. Romero-García, «Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación,» *Tecniacústica Cáceres* (2011).
- [10] S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio, J. V. Sánchez-Pérez, V. Romero-García y L. M. García-Raffi, «Design, Manufacture and Characterization of an Acoustic Barrier Made of Multi-Phenomena Cylindrical Scatterers Arranged in a Fractal-Based Geometry,» *Archives of Acoustics* Vol. 37, No. 4, pp. 455–462 (2012).
- [11] I. Martínez Muñoz, «Barreras sonoras basadas en cristales de sonido. Estrategia de uso de resonadores insertados en los dispersores para atenuar bandas de baja frecuencia.,» *Universitat Politècnica de València, Trabajo Final de Grado*, 2021.
- [12] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares y F. Meseguer, «Sound Attenuation by Sculpture,» *Nature*, n° 378, 241, 1995.
- [13] S. Castiñeira-Ibáñez, «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).
- [14] C. Chilet Murgui, «Análisis de la variabilidad de la capacidad de atenuación de redes de dispersores bidimensionales en función de factores geométricos. Aplicación al diseño de pantallas acústicas,» *Tesis de Máster* (2012).
- [15] M. Peiró-Torres, J. Redondo, S. Castiñeira-Ibáñez, V. Romero-García y J. V. Sánchez-Pérez, «Interferences in locally resonant Sonic metamaterials formed from Helmholtz resonators (2019)».

- [16] F. Alton Everest y K. Pohlmann, «Master Handbook of Acoustics,» 5th edition, 2009.
- [17] S. Castiñeira-Ibáñez, V. Romero-García, J. Sánchez Pérez y L. García-Raffi, «Overlapping of acoustic bandgaps using fractal geometries,» EPL, 92, 2010.
- [18] V. Romero-García, E. Fuster, L. García-Raffi, M. Sopena, J. Llinares y J. Sánchez-Pérez, «Band gap creation using quasiordered structures based on sonic crystals,» Applied Physics Letters, 2006.
- [19] COMSOL Multiphysics 5.5, «Acoustics Module User's Guide,» 2019.
- [20] D. Ramírez Solana, «Utilización del método de los elementos finitos para el diseño teórico de una pantalla acústica basada en cristales de sonido».