



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

ANÁLISIS DE BARRERAS SONORAS BASADAS EN
CRISTALES DE SONIDO PARA LA MEJORA DE
PÉRDIDAS POR INSERCIÓN

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Iranzo Viana, David

Tutor/a: Bravo Plana-Sala, José María

Cotutor/a: Castiñeira Ibáñez, Sergio

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



Resumen

El problema del ruido se ha convertido en uno de los mayores problemas ambientales de la actualidad que cada vez afecta a mayor número de personas. En especial a aquellas que viven en núcleos urbanos debido a los ruidos procedentes de la creciente industria, así como el tráfico en las últimas décadas. Este tipo de ruidos presentan componentes de baja frecuencia que las pantallas acústicas tradicionales no pueden cubrir. Las pantallas acústicas de Cristales de Sonido permiten sintonizar la banda de frecuencia a atenuar, además su permeabilidad añade ventajas como la reducción del impacto paisajístico o la reducción de cimentación, lo que permite que sean modulables y portables. Este trabajo se centrará en tratar de potenciar la atenuación sonora de estas pantallas en bajas frecuencias, trabajando con dos mecanismos: la dispersión múltiple y la resonancia de los resonadores insertados en sus dispersores. El principal objetivo del proyecto es estudiar la interacción de estos dos mecanismos buscando ampliar el ancho de banda continuo de atenuación en baja frecuencia. El proyecto se basará en simulaciones 2D realizadas con el software COMSOL Multyphysics.

Resum

El problema del soroll s'ha convertit en un dels majors problemes ambientals de l'actualitat que cada vegada afecta a major nombre de persones. Especialment a aquelles que viuen en nuclis urbans a causa dels sorolls procedents de la creixent indústria, així com el trànsit en les últimes dècades. Aquest tipus de sorolls presenten components de baixa freqüència que les pantalles acústiques tradicionals no poden cobrir. Les pantalles acústiques de Cristalls de So permeten sintonitzar la banda de freqüència a atenuar, a més la seua permeabilitat afig avantatges com la reducció de l'impacte paisatgístic o la reducció de fonamentació, la qual cosa permet que siguem modulables i portables. Aquest treball se centrarà en tractar de potenciar l'atenuació sonora d'aquestes pantalles en baixes freqüències, treballant amb dos mecanismes: la dispersió múltiple i la ressonància dels ressonadors inserits en els seus dispersors. El principal objectiu del projecte és estudiar la interacció d'aquests dos mecanismes buscant ampliar l'amplada de banda contínua d'atenuació en baixa freqüència. El projecte es basarà en simulacions 2D realitzades amb el software COMSOL Multyphysics.

Abstract

The problem of noise has become one of today's major environmental problems affecting an increasing number of people. Particularly those living in urban areas due to noise from growing industry and traffic in recent decades. This type of noise has low frequency components that traditional acoustic screens cannot cover. Sound Crystal acoustic screens allow tuning the frequency band to be attenuated, and their permeability adds advantages such as the reduction of the landscape impact or the reduction of foundations, which allows them to be modular and portable. This work will focus on trying to enhance the sound attenuation of these screens at low frequencies, working with two mechanisms: multiple scattering and the resonance of the resonators inserted in their scatterers. The main objective of the project is to study the interaction of these two mechanisms in order to widen the continuous low-frequency attenuation bandwidth. The project will be based on 2D simulations performed with COMSOL Multyphysics software.



Capítulo 1.	Introducción	4
1.1	Contexto del problema y ámbito del trabajo	4
1.2	Relación del trabajo con los estudios de Grado	8
Capítulo 2.	Fundamentos teóricos.....	10
2.1	Conceptos básicos de Pantallas Acústicas.....	10
2.1.1	Experimento de Maekawa.....	10
2.1.2	Representación de Resultados.....	11
2.1.2.1	Insertion Loss (IL).....	11
2.1.2.2	Área de atenuación AA	12
2.2	Conceptos básicos de pantallas basadas en CS	13
2.2.1	Características geométricas	13
2.2.2	Fenómenos acústicos.....	14
2.2.2.1	Dispersión múltiple y Ley de Bragg.....	14
2.2.2.2	Resonancia acústica y Frecuencia de resonancia fh	15
2.3	Herramienta y metodología de simulación.....	17
2.3.1	Diseñar la geometría.....	18
2.3.2	Definir el dominio y los materiales	18
2.3.3	Condiciones de contorno y ecuaciones	18
2.3.3.1	Ecuación de ondas.....	18
2.3.3.2	Condición de contorno rígido.....	19
2.3.3.3	Módulo de presión acústica: condición de fuente de presión.....	19
2.3.3.4	Condición de radiación.....	19
2.3.3.5	Condición periódica	20
2.3.4	Discretizar el dominio mediante el mallado.....	20
2.4	Comparativa pantallas de sonido tradicionales y pantallas acústicas de CS	21
Capítulo 3.	Objetivos	24
3.1	Objetivos generales	24
3.2	Objetivos específicos.....	24
3.2.1	Cronograma temporal.....	25
Capítulo 4.	Metodología y Resultados	26
4.1	Parámetros iniciales de diseño y metodología	26
4.1.1	Modelo 2D de cámara anecoica	27
4.1.2	Modelo 2D de una pantalla de CS ideal.....	29
4.1.3	Introducción de resonadores a los CS y consideraciones iniciales.....	30
4.2	Exposición y Análisis de Resultados.....	31
4.2.1	Simulaciones a distintos ángulos de giro	32
4.2.2	Gráficas conjuntas y primeras conclusiones	39



4.2.3	Estudio del Ancho de Banda de las zonas de atenuación.....	44
4.2.3.1	Garantías de atenuación y parámetro ABSup10.....	47
4.2.4	Cálculo de ABSup10 y resultados.....	49
4.2.5	Resultados generales	56
Capítulo 5.	Conclusiones	59
5.1.1	Propuesta final de trabajo futuro	60
Capítulo 6.	Anexos.....	61
6.1	Programa para calcular el AA	61
6.2	Programa para calcular el valor del ABSup10	62
6.2.1	Programa para calcular ABSup10 a partir del vector de valores de IL	62
6.3	Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030 ...	64
Capítulo 7.	Abreviaturas	66
Capítulo 8.	Bibliografía.....	67

Capítulo 1. Introducción

1.1 Contexto del problema y ámbito del trabajo

Uno de los principales campos de la acústica es el control de ruido, es decir, el control de todo sonido no deseado. El ruido o en concreto el fenómeno llamado como contaminación acústica es una forma de contaminación atmosférica que ocasiona efectos adversos en la salud de las personas, así como en la biodiversidad de las especies animales [1].

La exposición prolongada al ruido ambiental constituye una de las principales causas de mala salud relacionadas con el medio ambiente en Europa [2]. El ruido del tráfico ya sea tráfico rodado, ferroviario o aéreo, se ha clasificado como la segunda amenaza medioambiental para la salud pública en Europa occidental, por detrás de las partículas finas según la Organización Mundial de la Salud (OMS). Y es que, a pesar de que el nivel generado por estas fuentes de transporte habitualmente es demasiado bajo como para causar daños en el oído, si la exposición es prolongada y supera ciertos niveles, sí que puede provocar efectos en la salud, alteración del sueño, efectos negativos en el sistema cardiovascular y metabólico, así como deterioro cognitivo en niños [26].

Según la Sociedad Española de Acústica (SEA), los datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente corroboran 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].

Las principales fuentes de ruido provienen del ruido de tráfico (terrestre, aéreo y marino) así como la maquinaria industrial y la construcción. Y a consecuencia del crecimiento de la población, la urbanización y la industria también han aumentado estas fuentes de ruido. En la Tabla 1 se muestran las recomendaciones sobre ruido ambiental de la OMS con respecto a los indicadores de ruido diurno L_d y nocturno L_n y para cada tipo de tráfico:

Indicador de ruido	Tráfico Aéreo	Tráfico Rodado	Tráfico Ferroviario
L_d	53dB	54dB	45dB
L_n	45dB	44dB	40dB

Tabla 1 – Recomendaciones de las directrices sobre ruido ambiental de la OMS para cada tipo de tráfico [2].

Y en las siguientes Figuras 1 y 2 se muestran los porcentajes estimados de personas que, según la OMS, estarían afectados en la región europea a los correspondientes niveles para cada indicador de ruido correspondiente:

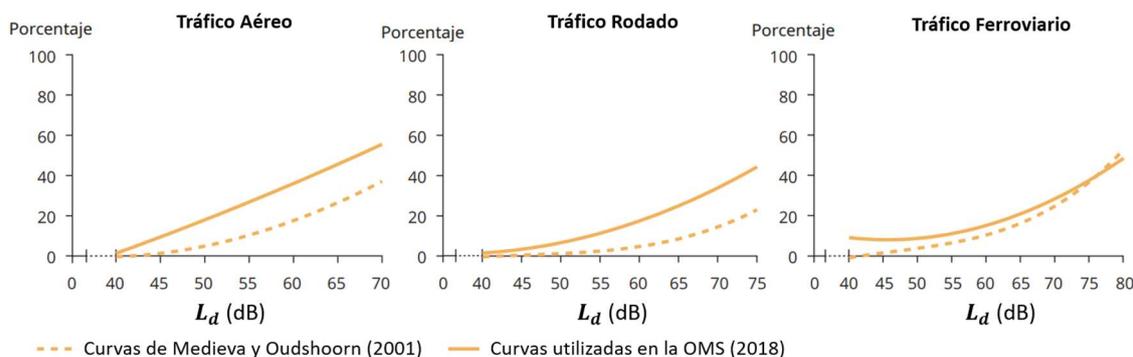


Figura 1 – Porcentaje estimado de personas afectadas a niveles de L_d [2].

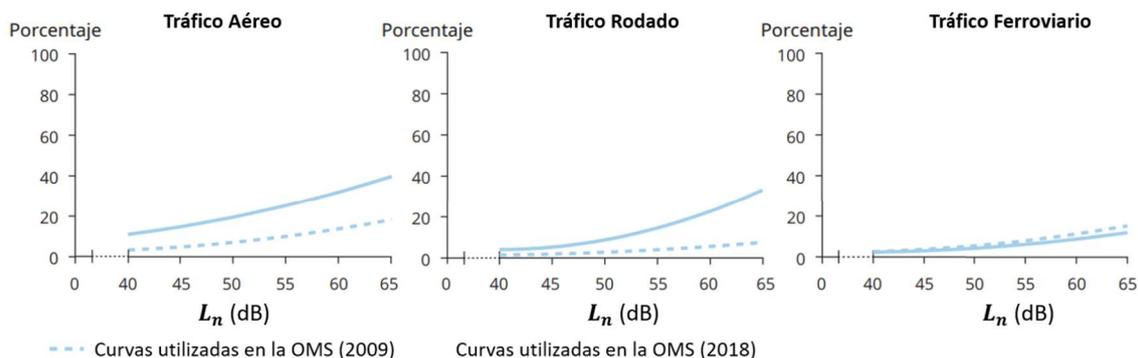


Figura 2 – Porcentaje estimado de personas afectadas a niveles de L_n [3].

Gráficas que corroboran la relevancia de este problema y con una clara tendencia al alza.

Centrándonos en el ruido de tráfico rodado, por ser uno de los más comunes y extendidos además de obtener fácilmente unos niveles de presión sonora considerables, a continuación se detalla el porcentaje estimado de habitantes dentro de áreas urbanas en la región europea que están expuestos a niveles de L_d mayores de 55 dB en 2017:

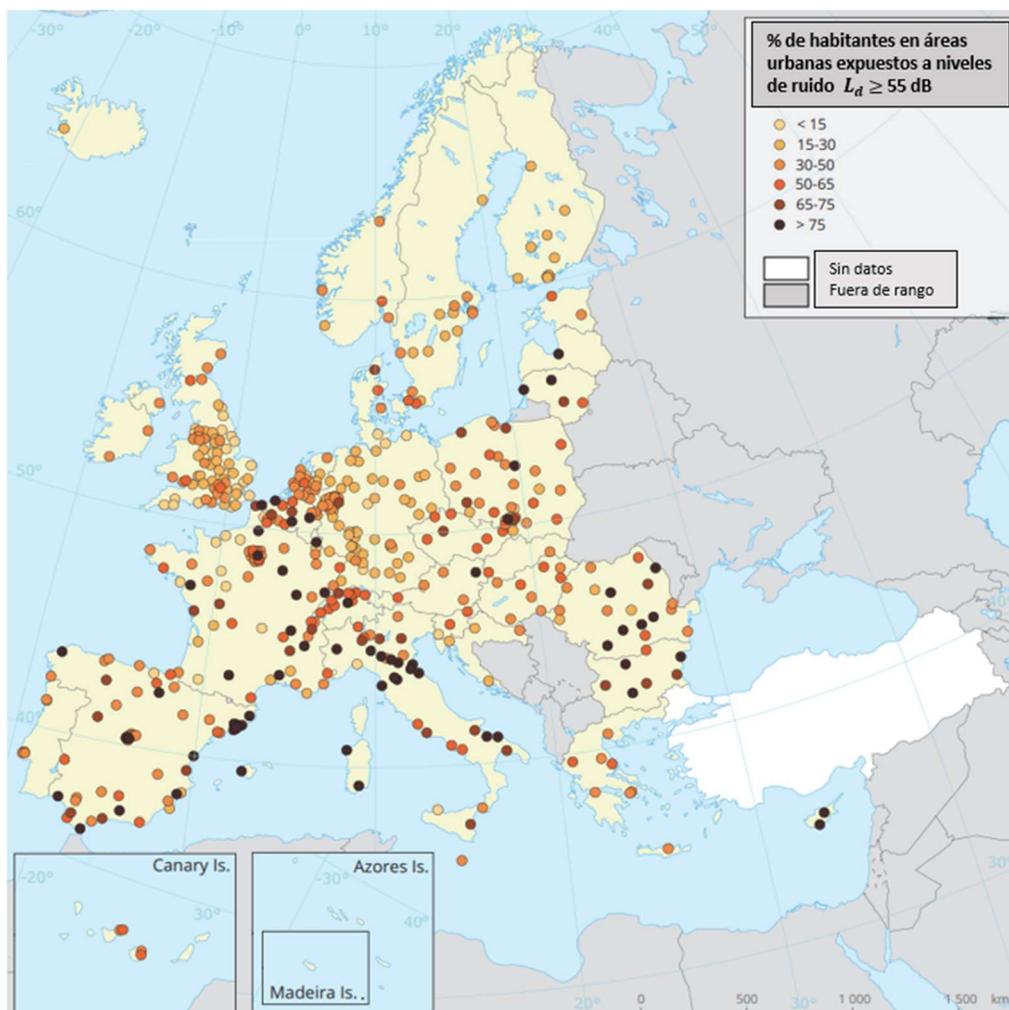


Figura 3 – Porcentaje estimado de habitantes dentro de áreas urbanas, expuestos a niveles de ruido de tráfico rodado $L_d \geq 55$ dB en 2017 [2].

Si atendemos a niveles de L_d mayores de 55 dB además de niveles de L_n mayores de 50 dB por ciudades capitales vemos como el problema persiste también durante la noche:

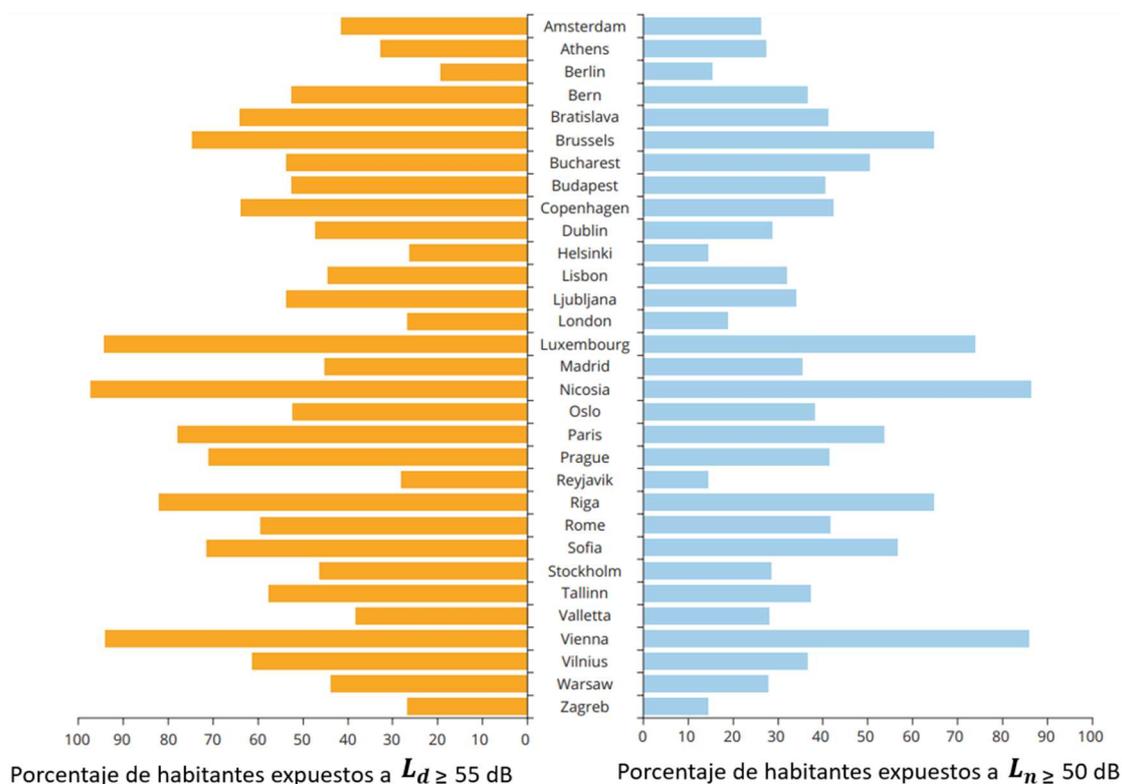


Figura 4 – Porcentaje estimado de habitantes en ciudades capitales de Europa expuestos a niveles de ruido de tráfico rodado $L_d \geq 55$ dB y $L_n \geq 50$ dB en 2017 [2].

De igual forma, se reflejan a modo orientativo los niveles medios de ruido emitidos más habituales que podemos encontrar en cualquier zona o población urbana:

Tipo de vehículo y Funcionamiento	Nivel de Presión Sonora L (dBA)
Ciclomotores	73,0
Motocicletas	78,0
Automóviles	
Motor Gasolina	71,0
Motor Diesel	72,0
Furgones	
Motor Gasolina	72,5
Motor Diesel	75,0
Autobuses	
Arranque	77,0
Acelerado	82,5
Velocidad constante (50km/h)	81,0
Velocidad de crucero (90km/h)	84,0
Camiones	
Potencia ≤ 105 kW	79,5
Potencia ≤ 150 kW	82,5
Potencia > 150 kW	85,0

Tabla 2 – Niveles medios del ruido emitidos por distintos tipos de vehículos en conducción urbana, a 7,5 m de distancia [4].

En cuanto a los espectros de frecuencia, los niveles de presión sonora emitidos de los vehículos pesados están por encima de los ligeros, pero son muy similares en su distribución, y predominando sobre todo las bajas frecuencias sobre las altas, tal y como se puede apreciar en la Figura 5:

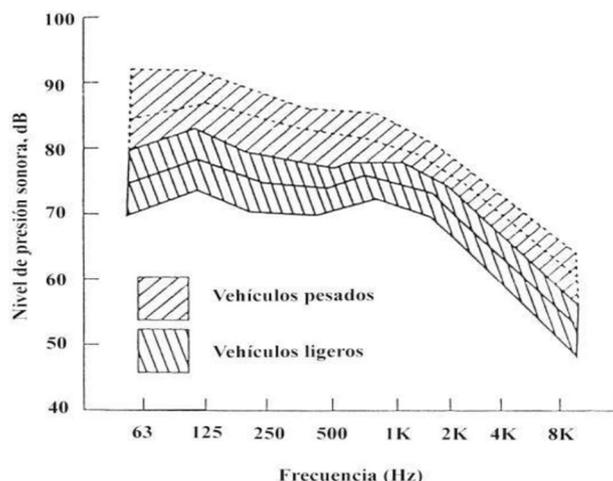


Figura 5 – Niveles de presión sonora del tráfico por tipo de vehículos [4].

Por todo lo comentado, se hace de vital importancia el adoptar diferentes medidas contra el ruido. Entre los elementos que actúan sobre el canal de transmisión, el uso de pantallas de sonido está ampliamente instaurado en la sociedad, y es sobre este elemento en lo que se centra este trabajo. En la Figura 6 se aprecia como las pantallas acústicas son el tipo de medida contra el ruido más usado dentro de las medidas que actúan sobre el canal de transmisión, las cuales conforman el 40,4% de las medidas:

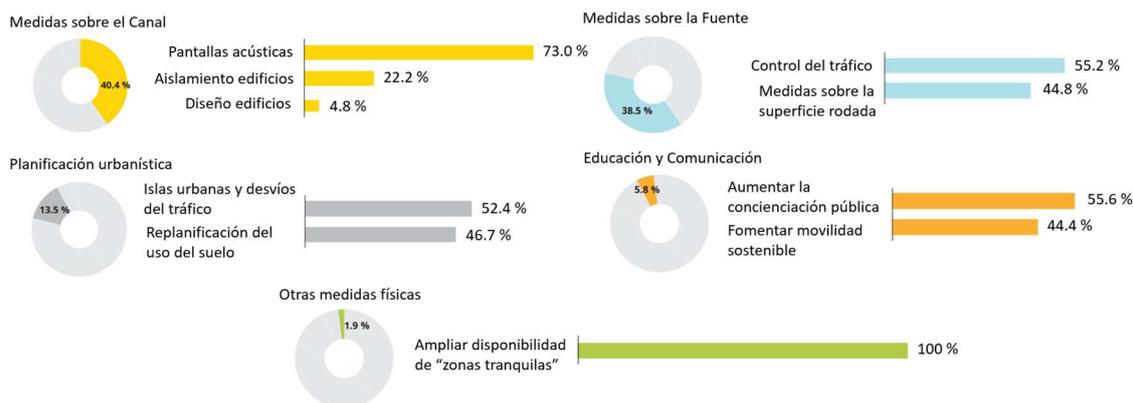


Figura 6 – Planes de acción contra el ruido para tráfico rodado en la región europea en 2017 [2].

Este trabajo se basa en el estudio de aquellas pantallas acústicas basadas en cristales de sonido (CS, a partir de ahora). Este tipo de pantalla, basada en una tecnología distinta a la de una pantalla acústica tradicional [5], funciona con estructuras de elementos dispersores rígidos o de alta densidad, colocados de forma periódica y de forma semejante a las estructuras cristalinas [6]. Estas pantallas (como se explicará más adelante) atenúan principalmente gracias al fenómeno de dispersión múltiple [5] a diferencia de las pantallas de sonido tradicionales que funcionan por

ocultación, siendo que además se les pueden añadir otros mecanismos de atenuación del ruido como por ejemplo el efecto de resonancia, entre otros, como veremos más adelante [7] [8].

Una de las cualidades más importantes de este tipo de pantallas en comparación con las pantallas de sonido tradicionales es que son permeables. Al permitir una línea visual semiabierta a su través hace que tengan menor impacto paisajístico, permitiendo a su vez el paso del viento y del agua y no generando oposición a estos como si ocurre con las pantallas tradicionales, donde se pueden ocasionar posibles rupturas en su estructura. Este problema les hace requerir una base sólida de cimentación en contraposición a las pantallas basadas en CS las cuales no requieren grandes cimentaciones para ser instaladas, lo cual repercute a su vez en cierto ahorro económico y facilidad de transporte e instalación. Las pantallas tradicionales, por todo ello, requieren cierto mantenimiento superior al de las pantallas basadas en CS para no acabar deteriorándose, siendo que además son víctimas potenciales de actos de vandalismo como pintadas etc.



Figura 7 – A la izquierda: barrera acústica tradicional de ocultación, a la derecha: pantalla acústica basada en CS [9][22]

Por otro lado, la característica más interesante de estas pantallas consiste en la capacidad sintonizable de la banda de frecuencia a atenuar, pudiéndose así adaptar al tipo necesidad de atenuación (como se explicará más adelante). Esto hace que estas pantallas acústicas basadas en CS representen una nueva tecnología que paulatinamente ha ido compitiendo con las pantallas tradicionales.

Diversas investigaciones [5] [7] [14] han tratado de mejorar su diseño e introducir nuevos mecanismos de atenuación a las mismas, así como potenciarlos, y este trabajo se suma a esos objetivos e intenta realizar un aporte de valor a todo ello.

1.2 Relación del trabajo con los estudios de Grado

A lo largo del Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación impartido por la Universidad Politécnica de Valencia, se han estudiado diferentes temas relacionados con el comportamiento de las ondas además de sus tipos y características. Se han estudiado los fenómenos físicos relacionados con la radiación de tipo electromagnético: como las ondas de radio, microondas, o la radiación óptica, así como sus distintos ámbitos de aplicación. Pero también (y es en lo que va relacionado este trabajo) se han tratado los fenómenos relacionados con las ondas sonoras, las cuales necesitan de un medio para poder transmitirse y que componen el campo de la acústica.

En esta línea se ha estudiado el comportamiento acústico de los distintos tipos de materiales, los cuales tienen especial implicación tanto en potenciar el comportamiento acústico de salas, como (en el caso opuesto) tratar de atenuar el sonido en determinados casos, dependiendo de lo que se requiera. En la dirección de preservar su calidad y su correcta transmisión se ha estudiado el diseño de la arquitectura de salas y edificios, de cara a controlar su comportamiento acústico en



aquellas condiciones donde se desee conseguir que el sonido llegue al máximo número de puntos de la sala, y en unas condiciones de calidad lo más óptimas posibles.

Se han tratado los distintos tipos de medición y parametrización del ruido ambiental, contextualizando y estudiando el importante problema medioambiental que supone. Por lo que se han tratado distintas maneras de control del ruido, las cuales se dividen entre aquellas que actúan bien sobre el elemento emisor del sonido, sobre el canal de transmisión, o bien sobre el receptor de este. En esta línea se ha estudiado el funcionamiento de distintos elementos dispersores de sonido, elementos atenuadores, etc., en el propósito de poder controlar los diferentes fenómenos acústicos (absorción, reflexión, dispersión, ...) según sea conveniente para conseguir niveles de atenuación del ruido lo más aceptables posible.

Y para tener la capacidad de abordar el estudio de estos fenómenos y poder realizar sus cálculos de medida, así como sacar distintas conclusiones, también se han estudiado diferentes tipos de herramientas de software para la medición y análisis de estos fenómenos (como el que se ha usado en este trabajo, COMSOL Multiphysics [20], y del que se profundizará más adelante), o así como Matlab [17], que junto con los conocimientos de programación adquiridos en el Grado, ha servido para realizar el tratado de los datos y su correcta representación.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

2.1 Conceptos básicos de Pantallas Acústicas

Una pantalla acústica tradicional representa cualquier obstáculo sólido entre una fuente emisora de ruido y un receptor, produciendo así una atenuación del ruido en el receptor debido a la Ley de masas.

Parte de la energía acústica que incide en la pantalla pasa a través de esta y alcanza al receptor (onda transmitida), otra parte es absorbida por el material (onda absorbida) y otra parte es reflejada según sea el ángulo de incidencia de la onda (onda reflejada). La parte de energía absorbida será mayor y la parte reflejada menor en cuanto mayor sea la capacidad de absorción acústica de los materiales empleados en la barrera. La contribución más importante de la energía acústica que alcanza al receptor proviene de la difracción de los rayos sonoros en los bordes de la pantalla, disminuyendo los niveles de ruido tras la pantalla en diferente medida según el punto considerado, creando lo que se conoce como zona de "sombra acústica" [10] [11] [21].

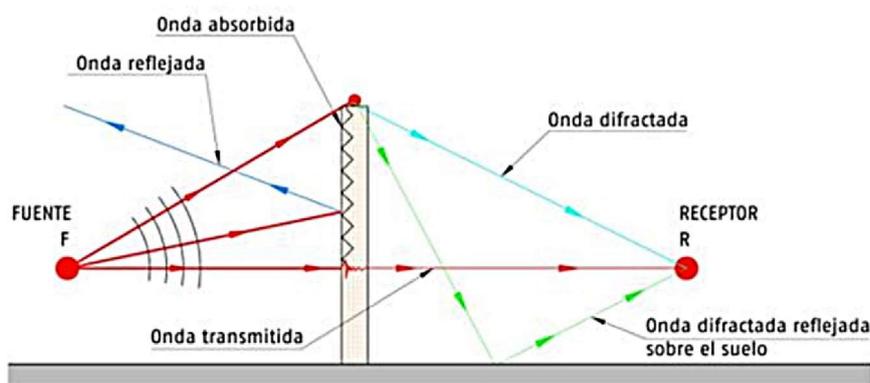


Figura 8 – Principio de funcionamiento de una pantalla acústica [9].

Así pues, la eficacia de estas pantallas depende sobre todo de dos factores [10]: de sus dimensiones y de su ubicación en relación con la fuente y la zona donde se desea conseguir la atenuación. Siendo sus materiales principalmente rígidos y con al menos una densidad superficial de 20 kg/m² [9] para que se garantice su efectividad.

2.1.1 Experimento de Maekawa

La aplicación de las teorías de la difracción de Fresnel, y los ábacos de Maekawa, permiten estimar la disminución del nivel de ruido en el punto receptor causada por la difracción. Maekawa propuso en el año 1965 un método de cálculo de la atenuación provocada por una barrera acústica tradicional, que se basaba en una aproximación de la difracción óptica. Siguiendo unos experimentos realizados con una pantalla semi-infinita en campo libre, calculó datos sobre la correspondiente difracción sonora. Se valió de un pulso tonal de una duración suficientemente corta para poder distinguir la señal reflejada y la retardada, pudiendo distinguir así las posibles interferencias creadas por otras superficies en los resultados.

Midiendo los niveles de presión sonora en varios puntos dentro de la zona protegida por el efecto de la barrera, consiguió plasmar los resultados de atenuación sonora en base al parámetro adimensional llamado Número de Fresnel N [11].

El Número de Fresnel se define como:

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

donde λ es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda estudiada y δ es la diferencia de camino entre la fuente y receptor con y sin la interposición de la pantalla acústica. Que según la Figura 9 de más abajo sería:

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

Este método es muy válido y ampliamente reconocido para calcular la difracción sonora con muy buena aproximación, y dependiendo de si n función de si $N > 0$ o $N < 0$ el receptor estará dentro de la zona con influencia de la atenuación provocada por la barrera o fuera de la misma.

En la siguiente figura se plasman estos resultados en lo que se conoce como *Ábaco de Maekawa*:

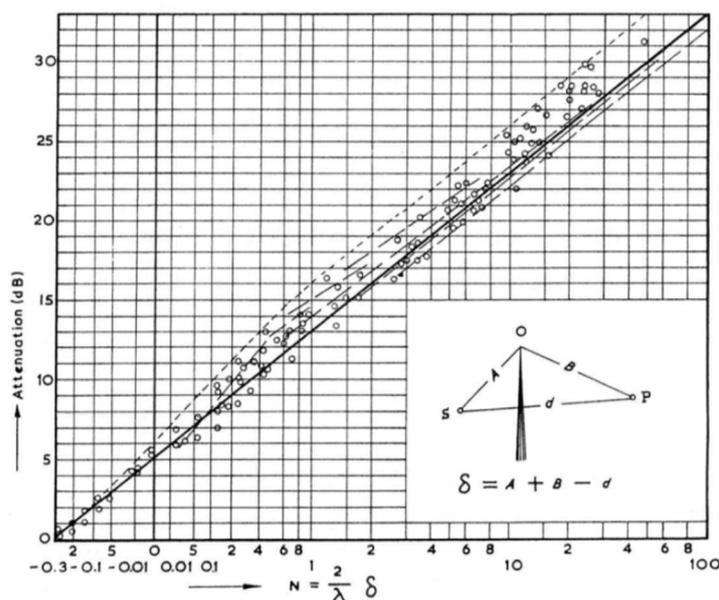


Figura 9 – *Ábaco de Maekawa* [11]

2.1.2 Representación de Resultados

2.1.2.1 Insertion Loss (IL)

La forma más común de caracterizar la atenuación producida por efecto de las pantallas acústicas se realiza a través del parámetro denominado como **pérdidas por inserción** o Insertion Loss en inglés (IL). El cual representa la disminución del nivel de presión sonora en un punto, en comparación al que tenía antes de estar bajo el efecto de la pantalla acústica.

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

$$IL = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_d}{P_i} \right| (\text{dB}) \quad (3)$$

donde P_d es el valor de la presión eficaz que llegaría directamente al receptor en ausencia de la pantalla, y P_i el valor de la presión eficaz que llega al receptor con el efecto de la pantalla.

Basándonos en este parámetro, uno de los tipos de representación de datos acústicos que se usarán en este trabajo son los **Espectros de frecuencia del IL**. En los que el eje de abscisas representa las frecuencias de estudio y el eje de ordenadas los distintos valores del IL obtenidos de las simulaciones [12].

Otro tipo de representación relacionado, que también se usará en este trabajo, es el denominado como **Mapa de presión**. En el cual, en base a una frecuencia concreta, se muestran en régimen estacionario los niveles de energía acústica en un determinado espacio. En ellos se puede observar cómo se distribuye la energía acústica en las distintas zonas del espacio de estudio, ya sea midiéndola en unidades de presión como Pascales (Pa) o en unidades de nivel de presión sonora en dB.

En la siguientes Figuras **10** y **11** (a modo orientativo y aunque se verán con más detenimiento más adelante) se observa un ejemplo de espectro de IL y de mapa de presión sonora respectivamente:

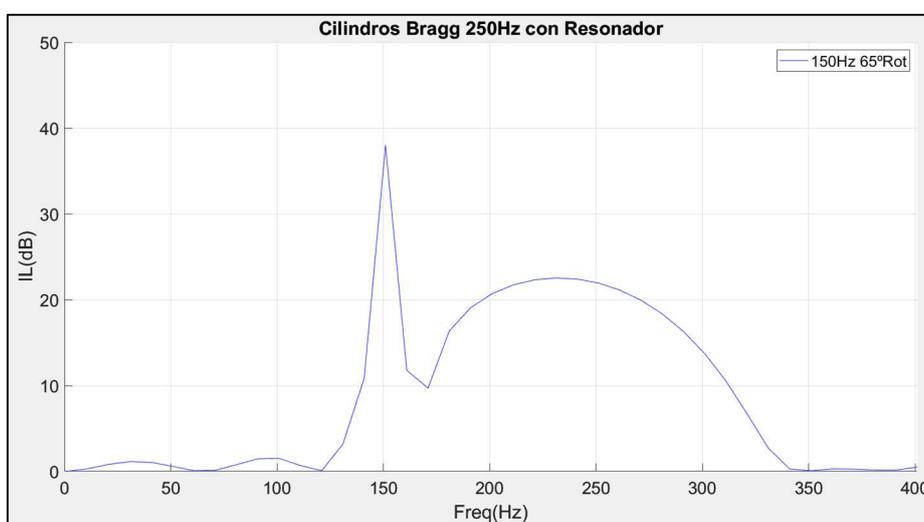


Figura 10 – Espectro de IL de 0 a 400 Hz

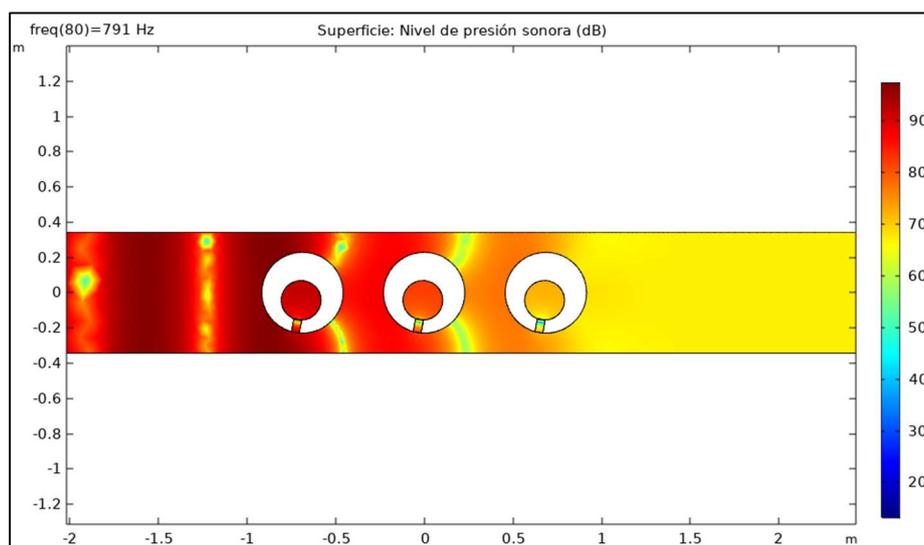


Figura 11 – Mapa de presión sonora en dB

2.1.2.2 Área de atenuación AA

El área de atenuación (AA) es un parámetro importante a la hora de cuantificar el potencial de atenuación de un elemento. En determinados casos, si los resultados del espectro del IL no ofrecen

una visión lo suficientemente clara, o necesitamos terminar de comparar con la mayor exactitud posible los resultados de algunas simulaciones, el valor de las correspondientes áreas de atenuación nos puede ser de utilidad.

Así pues, este parámetro se define como el área encerrada en la parte positiva del espectro de atenuación (IL) y el umbral de 0 dB en el intervalo de frecuencia contemplado. Se mide en dB·Hz y en la medida en que el valor del AA sea mayor, mayor será la potencial atenuación acústica del elemento simulado [19] [20].

Siendo que este parámetro representa el área encerrada bajo una curva, se hace necesario realizar una serie de cálculos para realizar la integral correspondiente con algún método numérico. En este trabajo se ha realizado mediante el programa Matlab estudiado durante el Grado, y su programación se encuentra adjunta en el correspondiente Anexo 6.1.

De forma gráfica, se adjunta la siguiente Figura 12 donde el área de atenuación correspondería a la zona rayada situada entre la línea del espectro de IL y su eje de abscisas:

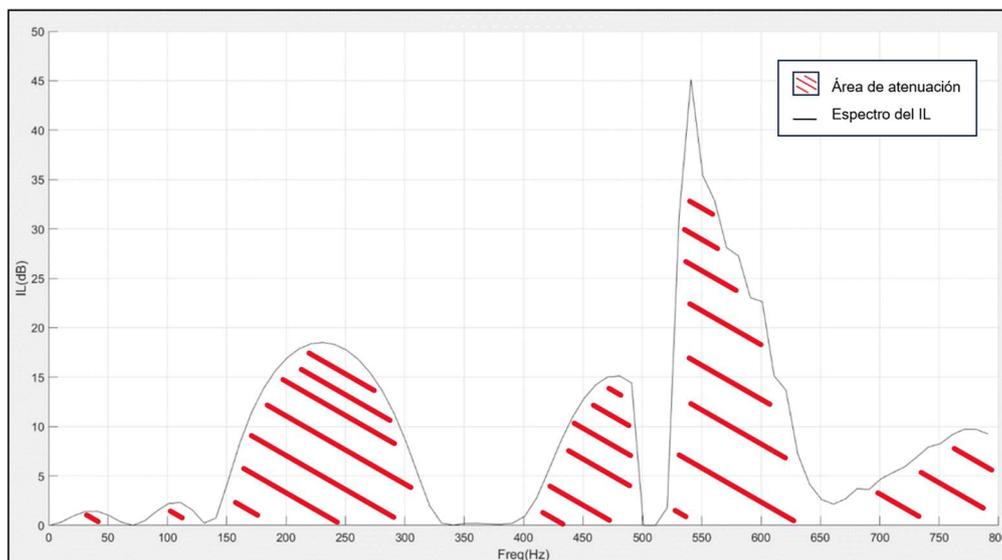


Figura 12 – Representación gráfica del AA en un espectro de IL

2.2 Conceptos básicos de pantallas basadas en CS

2.2.1 Características geométricas

Para poder estudiar el comportamiento de las pantallas acústicas basadas en CS hay que tener en cuenta algunos parámetros.

Los CS tienen una estructura propia de una red periódica, estando sus elementos distribuidos de forma regular y repetitiva en el espacio, los cuales son denominados dispersores acústicos. En base a esto, existen distintos tipos de distribución periódica para los dispersores acústicos [13]. El tipo de simetría utilizada para la colocación de los dispersores afectará en el modo en que las reflexiones se produzcan en su interior. En este trabajo nos valdremos de una simetría cuadrada, que es una de las más utilizadas para las pantallas acústicas junto con la triangular.

La unidad básica que, al repetirse periódicamente, conforma la red se llama celda unidad o celda, y se puede caracterizar por el **parámetro de red a**. En la Figura 13 se representa un esquema con dos tipos de simetría, reflejando lo que sería el correspondiente parámetro de red y en amarillo sus correspondientes celdas:

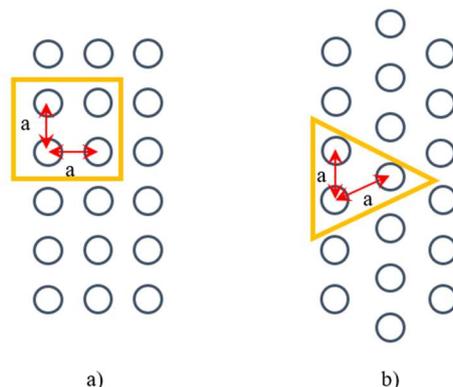


Figura 13 – Ejemplos de distribución de red a) cuadrada y b) triangular

Este parámetro indica la separación de los dispersores del CS y es determinante de cara a las frecuencias que se verán afectadas por el fenómeno de dispersión como veremos más adelante.

Otro parámetro geométrico determinante es el **factor de llenado** (filling factor, **ff**, en inglés), el cual es adimensional y hace referencia a la cantidad de espacio ocupada por dispersores (espacio azul en la Figura 14) en una celda con respecto al tamaño total de la misma:

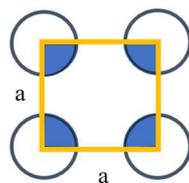


Figura 14 – Esquema de celda con las áreas de los dispersores relacionadas con el *ff*.

Para nuestro caso de modelo 2D de red cuadrada, su fórmula quedaría de la siguiente manera:

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

2.2.2 Fenómenos acústicos

2.2.2.1 Dispersión múltiple y Ley de Bragg

Uno de los principales fenómenos de atenuación que aparecen al utilizar pantallas acústicas basadas en CS es el de la dispersión múltiple. Este se produce cuando una onda incide sobre un CS y es dispersada por los elementos de la red que lo forman un número infinito de veces, por ello este fenómeno depende de la forma de la estructura del CS, así como de la longitud de la onda incidente.

La dispersión múltiple genera una nueva onda debido a las interferencias destructivas y constructivas que se producen en el interior del CS, la cual irá en sentido opuesto al de la onda incidente, y con ello aparecen bandas de frecuencia en las que se impide la propagación de la misma, provocando su atenuación [14]. Estas bandas de frecuencia son denominadas **Band Gaps (BG)** y su frecuencia central es la **frecuencia de Bragg**. Gracias a la Ley de Bragg se pueden

calcular las frecuencias en la que se centran los distintos BG. Tomando como ejemplo gráfico la siguiente Figura 15:

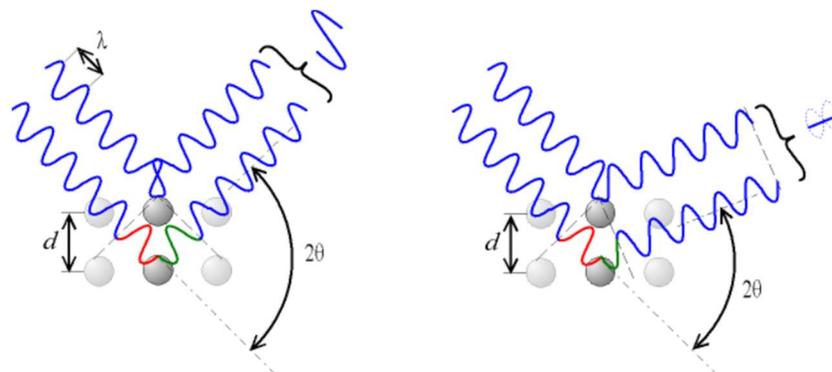


Figura 15 – Interferencia constructiva (izq.) y destructiva (dcha.) según fundamentos de la Ley de Bragg [Fuente: museovirtual.csic.es]

en la que vemos el caso de dos ondas reflejadas por dispersores cuya interferencia es constructiva y destructiva respectivamente. Para que la interferencia sea constructiva, la diferencia de fase entre la onda incidente y la reflejada tiene que ser proporcional a 2π , es decir, proporcional a un múltiplo entero n de longitudes de onda λ . De manera que, siendo θ el ángulo entre la onda incidente y la reflejada, d la distancia entre los centros de dos dispersores consecutivos y n un número entero, se define la ley de Bragg como:

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}(\theta) \quad (5)$$

y sustituyendo la longitud de onda a su expresión dependiente de la frecuencia:

$$n \frac{c}{f} = 2d \cdot \text{sen}(\theta) \quad (6)$$

siendo c la velocidad de propagación del sonido (343.2 m/s). Además, siendo que para el presente trabajo se diseñan modelos con simetría cuadrada e incidencia normal de onda ($\text{sen}(90^\circ) = 1$), se va a estudiar siempre el caso $n=1$, y que la distancia d entre dispersores corresponde al parámetro de red a , la ecuación anterior queda como:

$$f_{\text{Bragg}} = \frac{c}{2a} \quad (7)$$

2.2.2.2 Resonancia acústica y Frecuencia de resonancia f_h

Las pantallas acústicas basadas en CS cuyo mecanismo de atenuación es únicamente la dispersión acústica son llamadas de “primera generación. Mientras que aquellas que se apoyan en otros mecanismos adicionales además de la dispersión, tales como el fenómeno de resonancia acústica, son conocidas como de “segunda generación” [7].

Nos basaremos en la descripción de lo que se conoce como resonador de Helmholtz para fundamentar este fenómeno acústico, el cual será de especial importancia en el funcionamiento de los modelos de pantallas acústicas que simularemos más adelante. Así pues, los resonadores

de Helmholtz (HR) son estructuras formadas por una cavidad hueca conectada al exterior por un orificio o cuello.



Figura 16 – Colección de resonadores de Helmholtz de 1870. [Fuente: Wikimedia Commons]

Por lo tanto, podemos modelizar un resonador de Helmholtz ideal como una cavidad rígida representada por un volumen (V), unida al exterior por un conducto llamado cuello y de longitud L_c y sección de abertura A_p . Para comprender mejor su funcionamiento, podemos aproximarlos mediante el modelo de lo que sería un oscilador amortiguado, donde un elemento de masa m está unido a un resorte o muelle, el cual ejerce una resistencia al mover el elemento de masa una distancia x de su posición de reposo [15]:

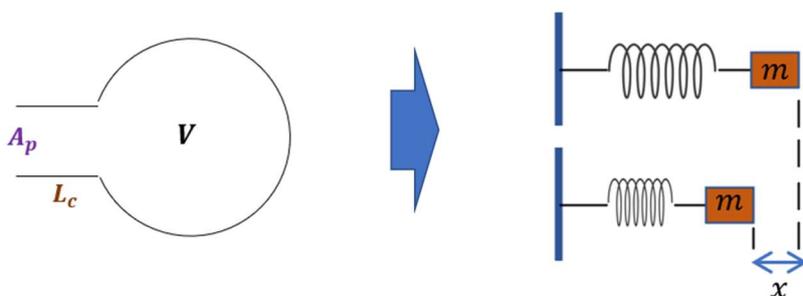


Figura 17 – Esquema de un resonador de Helmholtz (izq.) y aproximación a esquema de oscilador amortiguado (dcha.)

así pues, el fenómeno físico en el que se basa el resonador de Helmholtz es que cuando la longitud de onda λ de la onda incidente sobre su abertura, es mayor que las dimensiones de L_c , $\sqrt{S_L}$ (siendo S_L el área del cuello) ó $\sqrt[3]{V}$, el fluido que encierra el cuello se mueve como si se tratara de un bloque sólido, mientras que el volumen de fluido contenido dentro de la cavidad rígida ejerce resistencia a al movimiento de este bloque sólido haciendo las veces de muelle o resorte. Este efecto queda plasmado de forma gráfica en la siguiente Figura 18:

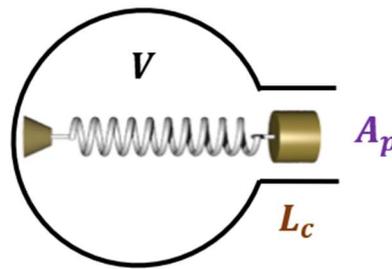


Figura 18 – Representación gráfica del efecto de resonancia dentro de un resonador de Helmholtz

La frecuencia sobre la que el resonador genera este efecto de resistencia o atenuación es la que se conoce como su **frecuencia de resonancia** f_h , la cual estará determinada por las dimensiones del resonador según la fórmula [16] [7]:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_p}{L_c + \alpha \frac{A_p}{2} S}} \quad (8)$$

siendo c la velocidad del sonido en el medio (343 m/s para el aire en este trabajo), S la superficie de la cavidad interior del resonador y α un factor de corrección (siendo 3.4 su valor adecuado en nuestro caso [18]).

Por lo tanto, en función de los parámetros anteriores podremos seleccionar las frecuencias de resonancia de los correspondientes resonadores que incorporaremos a los dispersores de nuestro modelo de pantalla. O más concretamente, y en nuestro caso, podremos determinar los radios internos de las cavidades resonantes circulares que incorporaremos a nuestro modelo de pantalla en función de las frecuencias de resonancia que nos interesará simular en cada caso, como se verá más adelante en el apartado correspondiente. Todo ello para conseguir los **picos de resonancia** deseados que nos generen esas zonas de atenuación adicionales en las frecuencias deseadas.

2.3 Herramienta y metodología de simulación

Existen diferentes métodos matemáticos para tratar problemas relacionados con los fenómenos físicos de la transmisión, propagación y reflexión de ondas, así como su interacción con dispersores y resonadores acústicos. Por ser una de las herramientas de software de simulación más implantadas y reconocidas a nivel internacional en este ámbito de estudios sobre fenómenos físicos y aplicaciones, en este trabajo usaremos el software comercial llamado COMSOL Multiphysics [20].

Este software es capaz de ofrecer potentes y fiables simulaciones de la respuesta acústica temporal, o frecuencial, de un sistema a partir de la realización de modelos de estructuras (como veremos más adelante en el correspondiente apartado), y tanto en 3D como en 2D.

El método matemático en el que nos basaremos con el mencionado software es el método de los elementos finitos (MEF), uno de los más utilizados dado que permite realizar análisis tanto en dominio temporal como frecuencial y a partir de unas condiciones iniciales impuestas.

A modo de pequeño esquema y para ilustrar su funcionamiento, el camino a seguir para realizar las simulaciones mediante el software y método matemático citado [20] [14] sería el siguiente:

2.3.1 Diseñar la geometría

COMSOL ofrece la posibilidad de definir el diseño de nuestro modelo a simular mediante distintas figuras geométricas, tanto en 2D como en 3D, e incluso realizar distintas operaciones entre ellas. Operaciones tales como uniones, intersecciones, realizar bloques de arrays a los que aplicar las mismas propiedades etc. Permitiendo así realizar diseños bastante aproximados como veremos más adelante en la realización de nuestros modelos.

2.3.2 Definir el dominio y los materiales

Se trata de definir los materiales de los cuales están compuestos los elementos de nuestro modelo y/o sus propiedades físicas. En nuestro caso el material del medio será el **aire**, al cual aplicaremos ciertas propiedades o condiciones de partida. Y a los dispersores de nuestros modelos de pantalla se les aplicará simplemente una condición de **contorno rígido** de forma que se producirá una reflexión de las ondas que incidan sobre ellos, dado que esta será la cualidad suficiente para llevar a cabo el objetivo de nuestras simulaciones.

2.3.3 Condiciones de contorno y ecuaciones

Mediante las ecuaciones y condiciones de contorno, COMSOL podrá aplicar el MEF para realizar las simulaciones, siendo la ecuación de ondas la ecuación principal en la que se basa todo el estudio.

2.3.3.1 Ecuación de ondas

Partiendo de la ecuación matemática siguiente:

$$\frac{1}{\rho_0 c_s^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) = \vec{Q} \quad (9)$$

donde ρ_0 es la densidad del medio (kg/m^3), c_s es la velocidad del sonido (m/s), \vec{q} es la fuente dipolar (N/m^3) y \vec{Q} es la fuente monopolar ($1/\text{s}^2$). Pero dado que vamos a realizar el análisis armónico-temporal para obtener los espectros en frecuencia y los mapas de presión, la ecuación queda de la siguiente manera:

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

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

$$p = p(\vec{x}, \omega) \quad (11)$$

donde ω es la frecuencia angular (rad/s) y f es la frecuencia lineal (Hz), cuya relación es:

$$\omega = 2\pi f \quad (12)$$

Siendo que en este trabajo se consideran modelos en 2D con la onda incidente plana, la ecuación se queda:

$$p(\vec{r}) = p(x, y)e^{-ik_z z} \quad (13)$$

siendo kz el número de onda fuera del plano que por defecto es cero. Y siendo que no existen monopolos ni dipolos, estos también son nulos, de forma que la ecuación de ondas para el análisis armónico-temporal queda reducida a la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p) \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c_s^2} p = 0 \quad (14)$$

Y a continuación se reflejan las condiciones de contorno que el software aplicara a esta ecuación de ondas para poder dar solución y arrojar los resultados.

2.3.3.2 Condición de contorno rígido

La condición de contorno para los contornos rígidos de nuestro modelo será la conocida como condición de Neumann. Esto viene a condicionar que la derivada parcial de la presión en la superficie rígida es nula, de forma que la amplitud de la presión en la misma será máxima o mínima, y por lo tanto el contorno rígido reflejará la onda:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (15)$$

2.3.3.3 Módulo de presión acústica: condición de fuente de presión

El módulo de presión acústica es el que el software utiliza para resolver la presión total a partir de la ecuación de ondas (14). Y la condición de presión acústica es la que especifica la presión acústica en el contorno, siendo:

$$p = \rho_0 \quad (16)$$

la presión de origen.

2.3.3.4 Condición de radiación

Mediante esta condición se consigue que en las simulaciones las ondas salgan del dominio acotado de simulación con reflejos **mínimos o nulos**, de forma que se produce un campo dispersado de ondas salientes a partir del mismo, evitando así reflexiones indeseadas que interfieran en los resultados. Esta condición es llamada como condición de *Sommerfeld*, la cual podemos aplicar a ondas planas, cilíndricas y esféricas.

En los modelos de este trabajo se emitirán ondas planas, y para aplicar dicha condición en el contorno hay dos posibilidades:

- 1) utilizar $\rho_0=0$, valor por defecto que podemos editar 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
- 2) utilizar $\rho_0 = \rho_i$, donde la presión en la superficie toma el valor que se haya definido en la opción *Physics/Scalars Variables* del menú de COMSOL.

La ecuación de esta condición de contorno es:

$$\vec{n} \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \vec{q}) \right) + \frac{ikp}{\rho_0} + \frac{i}{2k} \Delta_T p = \left(\frac{i}{2k} \Delta_T \rho_0 e^{-i(\vec{k}r)} + (ik - i(\vec{k}r)) \frac{\rho_0 e^{-i(\vec{k}r)}}{\rho_0} \right) \quad (17)$$

2.3.3.5 Condición periódica

Para poder analizar el comportamiento acústico de nuestro modelo 2D con ciertas ventajas a tener muy en cuenta, en el trabajo se han utilizado diseños de modelos ideales de pantallas acústicas de CS. La ventaja radica en obtener resultados igualmente válidos, y prácticamente equivalentes a los de un modelo en condiciones anecoicas, los cuales nos sirven para poder estudiar las numerosas simulaciones llevadas a cabo y esgrimir las correspondientes conclusiones, pero con un bajo coste computacional. Además, en estos modelos ideales no aparecen ciertos efectos indeseados (como los ocasionados por la difracción lateral de las ondas incidentes contra la pantalla) los cuales supondrían una interferencia a la hora de poder realizar las valoraciones. Valoraciones que no dejan de ser correctas, de cara a nuestros objetivos, por el hecho de librarnos de esos efectos indeseados.

La condición de contorno aplicada a estos modelos ideales es la condición de contorno periódica. Esta condición es la que se aplica, considerando una sola fila de dispersores de la pantalla, a dos paredes paralelas a un lado y otro de esta fila para que simulen el comportamiento de lo que supondría una *pantalla infinita*. Gráficamente y a modo de ejemplo la Figura 19 muestra en que consiste el modelo ideal:

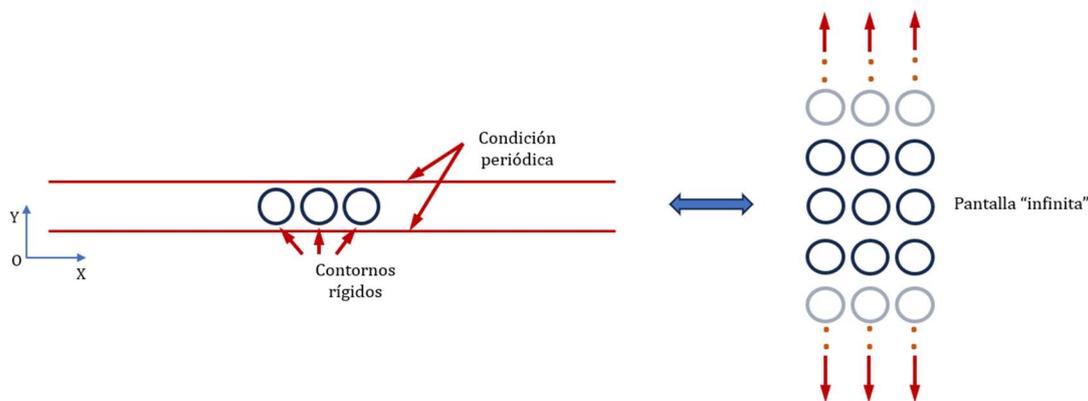


Figura 19 – Modelo ideal de pantalla basada en CS (izq.) y su modelo equivalente “infinito” (dcha.)

Las cuestiones relacionadas con el diseño de nuestros modelos 2D a los que se aplicará esta condición se contemplan más adelante en el apartado correspondiente.

2.3.4 Discretizar el dominio mediante el mallado

El método de los elementos finitos utilizado parte de la discretización del dominio a estudiar. En la práctica esto se basa en realizar un mallado de ese dominio formado por elementos geométricos más pequeños y formados por 3 nodos, de manera que COMSOL a partir del MEF realiza la resolución de las ecuaciones en derivadas parciales (14), para caracterizar el comportamiento de los correspondientes fenómenos físicos en cada uno de los elementos que conforman el mallado.

En la Figura 20 se adjunta como ejemplo el detalle del mallado realizado en uno de los modelos simulados de este trabajo, en concreto de una zona más próxima a uno de los dispersores y el ejemplo de uno de los elementos con sus nodos:

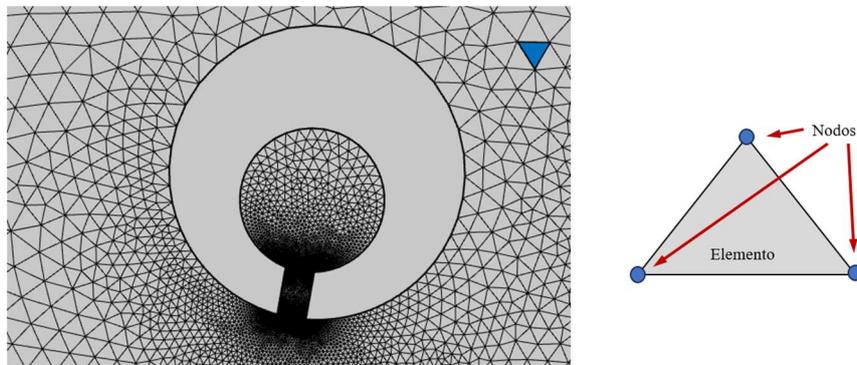


Figura 20 – Detalle de mallado (izq.) y detalle de elemento de malla con sus nodos (dcha.)

Así pues, cuanto más fino sea el mallado, el estudio será más preciso al realizarse unos cálculos más detallados del dominio de estudio, aunque como es lógico, a costa de un mayor coste computacional.

En este trabajo se ha usado la opción de que el mallado esté *controlado por la física*. Opción mediante la cual el software aplica distintos tipos de mallado priorizando mallados más finos en aquellas zonas que lo requieren y viceversa, y siempre llegando como máximo al nivel de mallado fino que le definamos (en nuestro caso la opción más precisa: *malla extremadamente fina*).

2.4 Comparativa entre pantallas acústicas tradicionales y pantallas de CS

Este apartado tiene como finalidad, una vez introducidos los fundamentos teóricos necesarios, terminar de centrar e introducir aspectos sobre el comportamiento de las pantallas acústicas tradicionales y las basadas en CS.

Las pantallas acústicas tradicionales, además de las características comentadas en la introducción, tienen su mayor potencial de atenuación en las **altas** frecuencias, y no tanto a bajas, como se puede apreciar en la siguiente Figura 21, donde se adjunta lo que sería una simulación típica del espectro del IL de una pantalla tradicional:

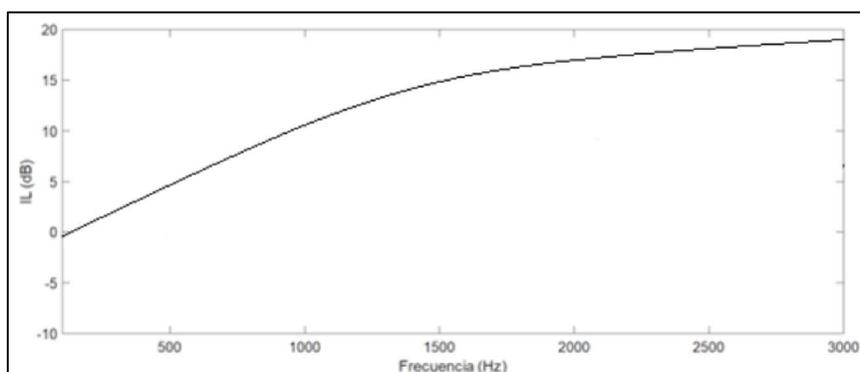


Figura 21 – Espectro de IL de una barrera acústica tradicional

Además, y en base a los efectos de la difracción sonora contemplados en los fundamentos teóricos (apartado 2.1.1), estas pantallas proporcionan diferentes zonas de *sombra acústica* en base a la frecuencia de las ondas incidentes, propiciando diferentes atenuaciones dependiendo de la posición del receptor con respecto a la misma:

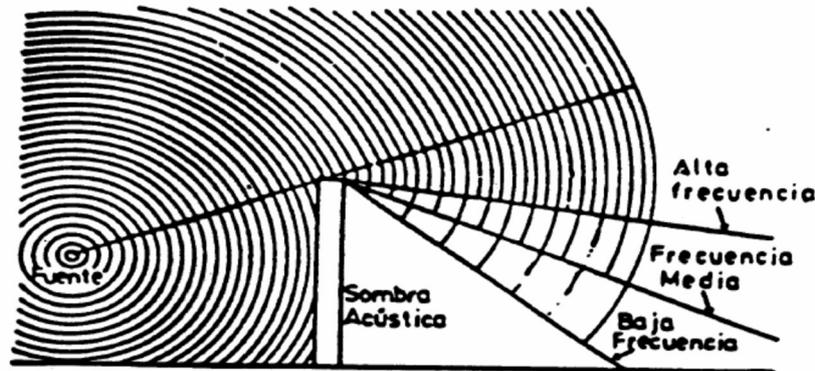


Figura 22 – Esquema de sombra acústica de una barrera en función de la frecuencia [21]

Como se ha podido comprobar en la Figura 22, la zona de *sombra acústica* para las bajas frecuencias es bastante menor que la de frecuencias más altas, quedando esta relegada prácticamente a los puntos más próximos a la barrera.

Sin embargo, las pantallas acústicas basadas en CS (aparte de las características comentadas en la introducción como la de su permeabilidad) tienen un comportamiento distinto que les hace ser más efectivas en esas bajas frecuencias. A modo gráfico y como ejemplo se adjunta la Figura 23 donde se aprecia el espectro del IL de hasta 1000 Hz de un modelo 2D de pantalla acústica basado en CS, en condiciones de cámara anecoica, cuyo mecanismo de atenuación es únicamente la dispersión múltiple (apartado 2.2.2.1), y cuya frecuencia de Bragg está centrada en 250 Hz:

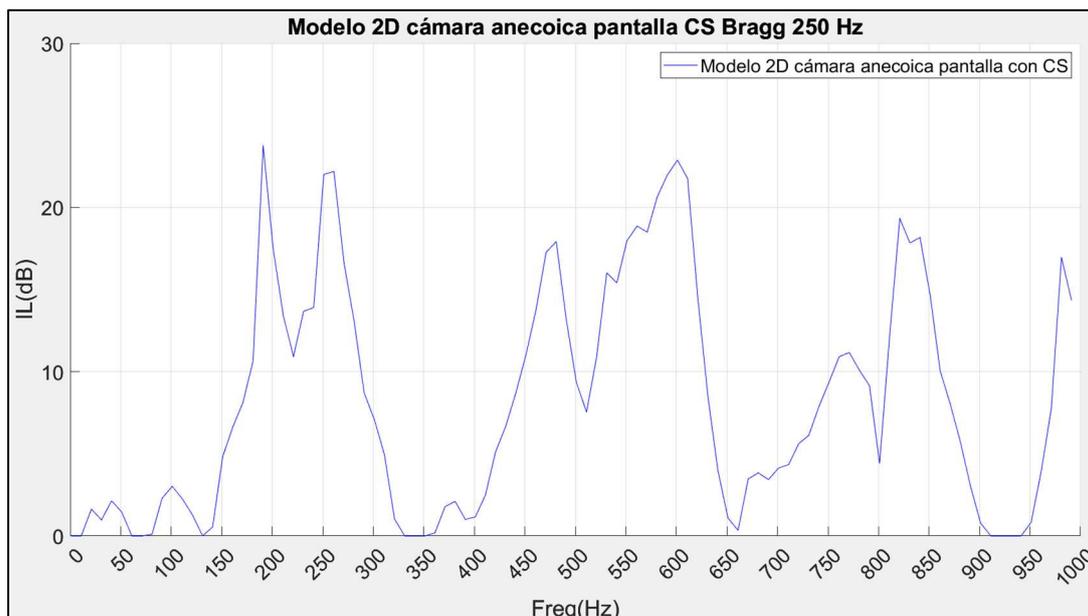


Figura 23 – Espectro de IL de una pantalla acústica basada en CS con frecuencia de Bragg de 250 Hz



Sin ahondar más al detalle en el análisis de la simulación de momento, en la Figura **23** se ha podido apreciar como el comportamiento de atenuación es distinto al de la barrera tradicional. En ella se aprecia el fenómeno de la dispersión múltiple observándose sus distintas zonas de atenuación en base a los distintos BG para $n=1$, $n=2$ etc. (según la ecuación **6**) hasta el límite simulado de 1000 Hz. Dejando patente también las capacidades de este tipo de pantallas para llegar a mayores niveles de atenuación en la parte de bajas frecuencias. Niveles mayores que los observados para las pantallas tradicionales en esta franja de frecuencias, y aunque esta superioridad de nivel se limite a las zonas de atenuación correspondientes para cada BG.

Capítulo 3. Objetivos

3.1 Objetivos generales

Este Trabajo trata de mostrar conocimientos adquiridos a lo largo del Grado en Ingeniería de Telecomunicación, sobre todo aquellos relacionados con la rama de la Ingeniería Acústica. Pretende usar esos conocimientos, así como las capacidades obtenidas, para intentar desarrollar un estudio en el ámbito de las pantallas acústicas, que arroje un cierto aporte de valor adicional a otros estudios anteriores o líneas de investigación relacionadas.

En este caso, se ha estudiado el funcionamiento de las pantallas acústicas de CS de segunda generación: sus principales características, fenómenos físicos en los que se basan y ámbitos de aplicación. Se ha pretendido focalizar el estudio en sus capacidades de atenuar el ruido de bajas frecuencias, las cuales son distintas a las de las pantallas acústicas tradicionales, y tratado de potenciar sus diferentes mecanismos de atenuación como la dispersión múltiple (apartado 2.2.2.1) y la resonancia (apartado 2.2.2.2). Intentando que las distintas zonas de atenuación que provocan esos mecanismos no se perjudiquen mutuamente, de forma que incluso que “cooperen” y formen zonas de atenuación *conjunta* del mayor ancho de banda y atenuación posible.

Así, el objetivo general del trabajo podría resumirse en que se trata de estudiar los mecanismos de control de ruido que aparecen en las pantallas de CS con resonadores, buscando sobre todo ampliar el ancho de banda continuo de atenuación en baja frecuencia.

3.2 Objetivos específicos

En primera instancia se ha realizado un estudio general del problema del ruido. Su contexto medioambiental de carácter internacional, así como las características principales de uno de los ruidos más problemáticos y extendidos, como es el ruido del tráfico. Se ha hecho una labor de estudio y documentación acerca de los efectos perjudiciales que este problema crea en personas y especies animales, así como de los diferentes mecanismos de control del ruido y sus diferentes niveles de implantación hoy en día en la sociedad. Llegados a este punto, se ha pasado a ahondar en el ámbito de las pantallas acústicas como uno de los principales mecanismos de control del ruido ambiental. Se ha hecho una labor de *puesta a punto* para conocer en mayor profundidad el estado actual de las diferentes líneas de investigación dentro de este campo, conociendo sus diferentes características y ahondando sobre todo en las líneas de investigación sobre las pantallas acústicas de CS. Acerca de este tipo de pantallas se han estudiado sus diferentes mecanismos de atenuación como la dispersión múltiple o la incorporación de resonadores.

En segunda instancia se ha profundizado en el manejo de herramientas de software como COMSOL Multiphysics. Se ha hecho una labor de aprendizaje de su manejo para poder realizar los diseños oportunos de pantallas, en las condiciones de contorno y de medio correspondientes, para poder realizar unas simulaciones lo suficientemente válidas. También se han reforzado otros conocimientos sobre herramientas tratadas en el Grado como Matlab, así como conocimientos de programación, para poder realizar el tratado de los datos de las simulaciones y reflejarlos.

También se ha aprendido a relacionar los resultados obtenidos, entender su causa, y en base a esto ir buscando interacciones modificando distintos parámetros como el radio interno de las cavidades resonantes de los dispersores. Siempre en base a nuestro objetivo general, se han ido realizando modificaciones a los diseños aprovechando el carácter sintonizable de este tipo de pantallas acústicas basadas en CS. Por lo que los diseños se han configurado para tener una zona de BG en bajas frecuencias, y a partir de ellos, ir introduciendo distintos tipos de resonadores para obtener distintos picos de atenuación en la parte baja de frecuencias del BG (intentando así también atenuar los ruidos más graves del tráfico o ruidos de carácter industrial).

Después, y en base a los resultados de las simulaciones, para evitar la disminución del nivel de atenuación del BG a causa de los picos de resonancia, e intentar el efecto contrario (logrando esa *zona de atenuación conjunta* entre la zona de atenuación del BG y el correspondiente pico de resonancia), se ha introducido un tercer mecanismo de atenuación como la **rotación** o giro de los dispersores de la pantalla sobre si mismos. A modo orientativo se adjunta la siguiente Figura 24:

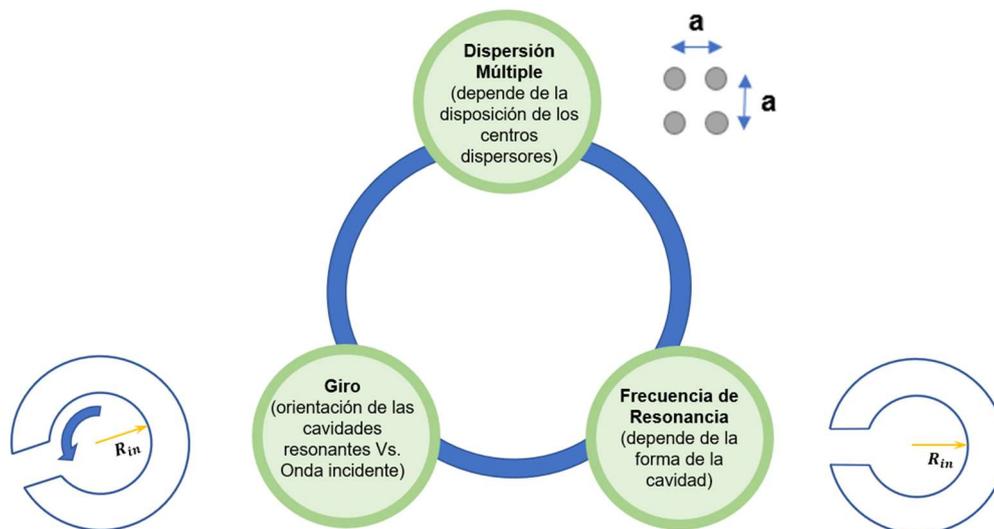


Figura 24 – Mecanismos de atenuación de nuestro modelo de pantalla acústica

donde se representan los mecanismos de atenuación que se han usado en nuestros modelos y los parámetros que los determinan.

Y por último, para poder cuantificar e interpretar mejor los resultados obtenidos, se ha desarrollado un parámetro nuevo (*ABS_{up10}*), del cual se profundizará más adelante. El cual, si bien no era un objetivo específico inicial, pasó a serlo una vez se hizo recomendable su introducción para valorar mejor el ancho de banda continuo de atenuación de las zonas de atenuación conjuntas que se fueron creando en las simulaciones.

3.2.1 Cronograma temporal

A modo de diagrama temporal de estas tareas contempladas en los objetivos, en la Tabla 3 se adjuntan las Semanas de cada Mes que se han dedicado a las mismas. Siendo que cada marca “s” corresponde a una de las Semanas empleadas de forma aproximada:

Tareas	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.
Documentación y búsqueda bibliográfica	SSSS	SSSS	S							
Aprendizaje herramientas simulación y tratado de datos		SSSS	S							
Realización de diseños y simulaciones		S	SSSS	SSSS	SSSS	SSSS	SSSS	SS		
Procesado de datos y análisis de resultados				SSS	SSSS	SSSS	SSSS	SSSS	S	
Extracción de conclusiones e introducción de nuevo parámetro					SSS	SSSS	SSSS	SSSS	SSSS	
Redacción de trabajo y de presentación de defensa							SS	SSSS	SSSS	SSSS

Tabla 3 – Distribución temporal de las tareas

Capítulo 4. Metodología y Resultados

4.1 Parámetros iniciales de diseño y metodología

Como el coste computacional de los modelos 2D respecto a los de 3D es mucho menos elevado, se realizarán simulaciones en el plano OXY, evitando calcular la altura del eje Z. Y como no existen variaciones del diseño de los dispersores en el eje OZ, la simulación 2D es lo suficientemente válida para la obtención de resultados de forma rápida.

A la hora de realizar los modelos de pantalla acústica con CS para el trabajo, se han seguido los siguientes parámetros geométricos y de materiales en su diseño, siempre en base a los objetivos anteriormente comentados:

- Debido a la facilidad de cálculo que tiene la simetría de la forma circular, los dispersores serán cilíndricos y su cavidad resonante será también circular, por lo que habrá que calcular el correspondiente radio externo (R_{ext}) y radio interno (R_{int}) de los dispersores. También por razones de simplicidad, la cavidad resonante estará conectada al exterior por un cuello rectangular.
- Las dimensiones físicas del modelo se diseñarán en función de nuestras bajas frecuencias de interés. El parámetro de red (apartado 2.2.1) del CS viene dado por la frecuencia Bragg que a partir de la ecuación (7) quedará como:

$$a = \frac{c}{2 * f_{Bragg}} \quad (18)$$

- El material usado para los CS será rígido (apartado 2.3.3.2) como se ha comentado, y al ser el aire el dominio escogido para que estén inmersos los dispersores, la velocidad del sonido y densidad en el mismo serán respectivamente, $c=343$ m/s y densidad $\rho=1,25$ kg/m³
- Por último, y como conclusión de las pautas geométricas de diseño de nuestro modelo de pantalla, su diseño será una **relación de compromiso** entre:
 - **Factor de llenado** apropiado (apartado 2.2.1), lo que a su vez condiciona el radio exterior de los dispersores
 - **Parámetro de red** correspondiente para atenuar nuestras frecuencias bajas de estudio
 - **Radio interno** de los dispersores válido para nuestras frecuencias de resonancia de estudio, que viene condicionado en parte por el radio exterior y a su vez, condiciona las dimensiones del **cuello** de la cavidad resonante como veremos más adelante

En cuanto a los parámetros de la fuente emisora, esta será una onda plana incidente (**OPI**) con $p = 1$ atm cuya dirección será de izquierda a derecha, de incidencia normal sobre la pantalla, y en el dominio escogido del aire. El aire que se encuentra dentro del dominio de simulación tendrá un valor inicial de $\rho_0 = 1$ atm.

Gracias al análisis armónico-temporal del software de simulación COMSOL (apartado 2.3), calcularemos los espectros en frecuencia del IL que después exportaremos. Se realizan barridos desde los **0 a los 400 Hz** con pasos de 10 Hz.

Después mediante el software Matlab [17] se analizarán con más detalle los espectros exportados, obteniéndose las gráficas que se muestran en el estudio.

4.1.1 Modelo 2D de cámara anecoica

En un primer estudio, el cual servirá como referencia a nuestros estudios posteriores, se va a simular un modelo 2D de campo libre de una pantalla de CS de primera generación (sin resonadores).

El modelo se compone de un array de **3 x 13** cilindros en condiciones de cámara anecoica, es decir, con paredes perfectamente adaptadas gracias a la condición de contorno de radiación de onda plana (ROP) (apartado 2.3.3.4) o condición de *Sommerfeld*, por la cual se impide que haya reflexiones indeseadas en los límites o paredes que delimitan el dominio del modelo.

Dado que como se ha comentado en apartados anteriores, el estudio se basará en el rango de las bajas frecuencias, seleccionamos como frecuencia central de Bragg los **250 Hz**. Por lo tanto, a partir de la ecuación 18 corresponde con un parámetro de red **a=0.686** metros.

El factor de llenado *ff* habitual para estas pantallas oscila entre el 40% y el 60%, pero en nuestro caso se elige un **ff=35%** para conseguir así una barrera más abierta, capaz de interferir menos en la línea de visión directa y generando con ello menor impacto paisajístico.

Por lo tanto, en base a la ecuación 4, y para poder cumplir con estas condiciones de parámetro de red y factor de llenado, nos queda que el **Radio exterior** de los cilindros dispersores de nuestra pantalla es:

$$R_{ext} = \sqrt{\frac{ff \cdot a^2}{\pi}} \quad (19)$$

que para un factor de llenado del 35% nos da un radio exterior para los cilindros de **$R_{ext}=0.22897$** metros.

Asimismo, situando el origen de coordenadas en el centro del cilindro situado en el centro de la barrera, se establece un punto de medida situado en ese origen de coordenadas, pero situado a **2 metros** en sentido positivo del eje X (lo que supondría tener un espectador a 2 metros del centro o del interior de la barrera de sonido). Representando el modelo de forma gráfica quedaría de la siguiente manera:

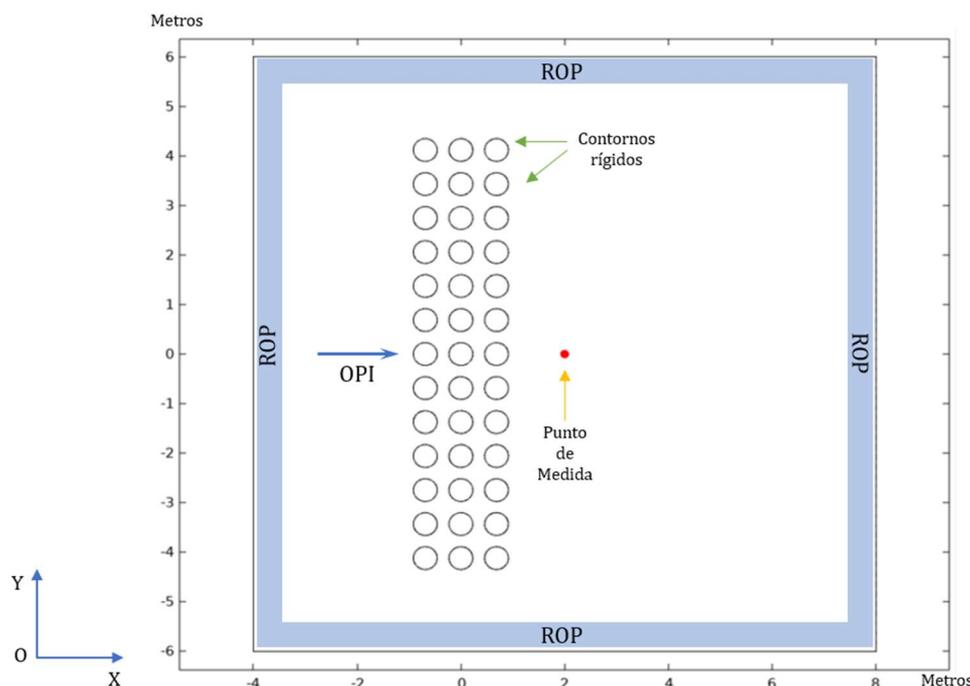


Figura 25 – Modelo de simulación en cámara anecoica

Así pues, el resultado en forma gráfica de una primera simulación en lo que respecta a la **presión sonora** (apartado 2.1.2) y a la frecuencia de 250 Hz, para así poder reflejar los efectos de atenuación debidos a nuestra frecuencia de Bragg de 250 Hz, sería el siguiente de la Figura 26:

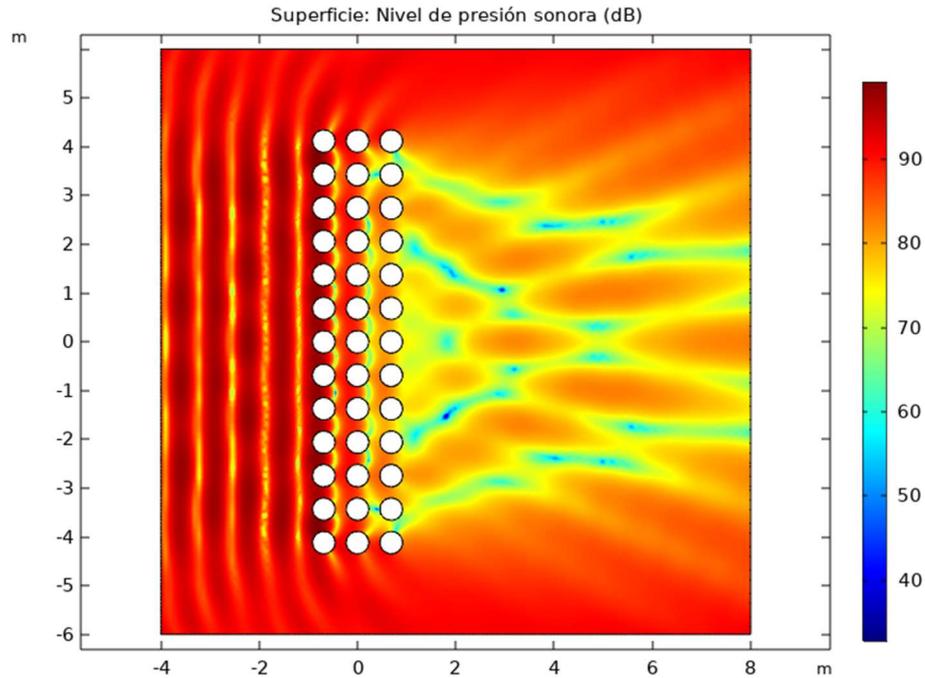


Figura 26 – Mapa de presión sonora a 250 Hz para el modelo de cámara anecoica

En la imagen se puede apreciar la reducción del nivel de presión sonora que había antes de la pantalla. Viendo cómo, a la derecha de esta, se crea un patrón de atenuación de nivel de presión simétrico con respecto del centro de la pantalla, y debido al efecto de *múltiple scattering* o dispersión múltiple (apartado 2.2.2.1) que es en el que se basa la pantalla.

Y el resultado del **espectro de IL** (apartado 2.1.2) en el punto de medida u observación es el siguiente:

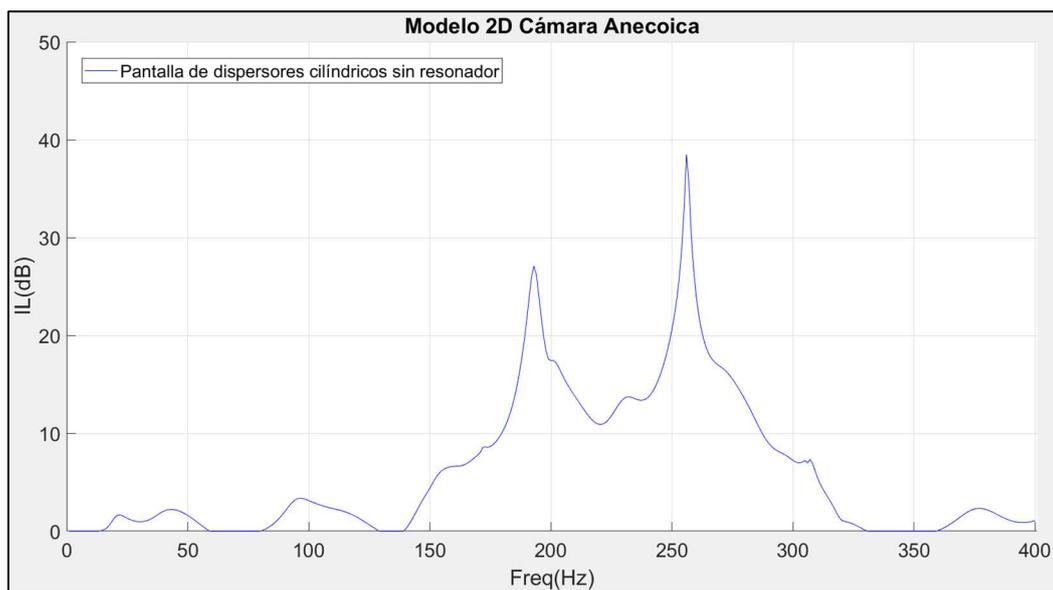


Figura 27 – Espectro de IL del modelo de cámara anecoica en el punto de observación

Que como ya se ha comentado, representa los valores de IL para un espectro de frecuencia en banda fina hasta 400 Hz, donde se aprecia un patrón típico de barrera basada en CS con la frecuencia Bragg a 250 Hz generando una zona de atenuación alrededor del BG, el cual se ve afectado por picos que pueden ser debidos a los efectos de difracción laterales de la pantalla.

4.1.2 Modelo 2D de una pantalla de CS ideal

Para seguir realizando el estudio y seguir ahondando en nuestras simulaciones de una forma más práctica y con resultados más *limpios* o *menos contaminados*, sin los efectos de la difracción lateral, se introdujo el papel del modelo 2D de una pantalla de CS ideal.

En este caso se ha adaptado el modelo aprovechando la simetría de la pantalla acústica. Para ello, como se puede apreciar en la Figura 28, el modelo ideal consta de una sola fila de dispersores donde a las paredes horizontales (inferior y superior) se les ha otorgado condición periódica (apartado 2.3.3.5). Esta condición nos aleja de una visión más realista, la cual estaría afectada por los límites finitos de la pantalla, pero permite una visión ampliada y clara del fenómeno de multi-interferencia y ahorra tiempo de cálculo computacional como se ha comentado anteriormente.

Las paredes verticales como en el modelo no ideal de cámara anecoica anterior tienen condición de contorno de radiación de onda plana (ROP), y el resto de parámetros como el punto de medida, el contorno rígido así como los valores de la OPI y su dirección, los valores iniciales del dominio de simulación...etc permanecen iguales. La geometría quedaría en este caso de la siguiente manera:

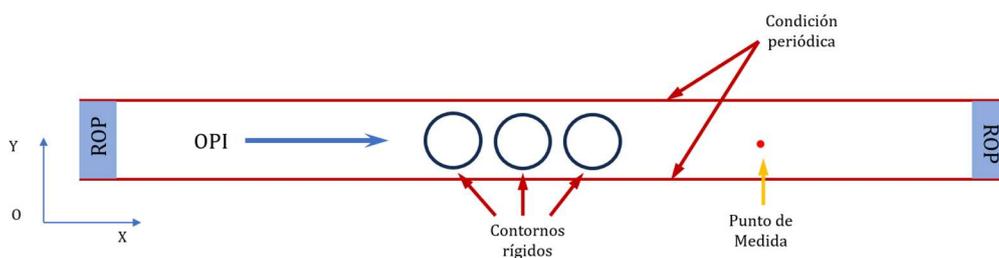


Figura 28 – Modelo 2D ideal de pantalla de CS con 3 filas de dispersores cilíndricos

Y el resultado del espectro de IL en el punto de medida u observación en este caso es el siguiente:

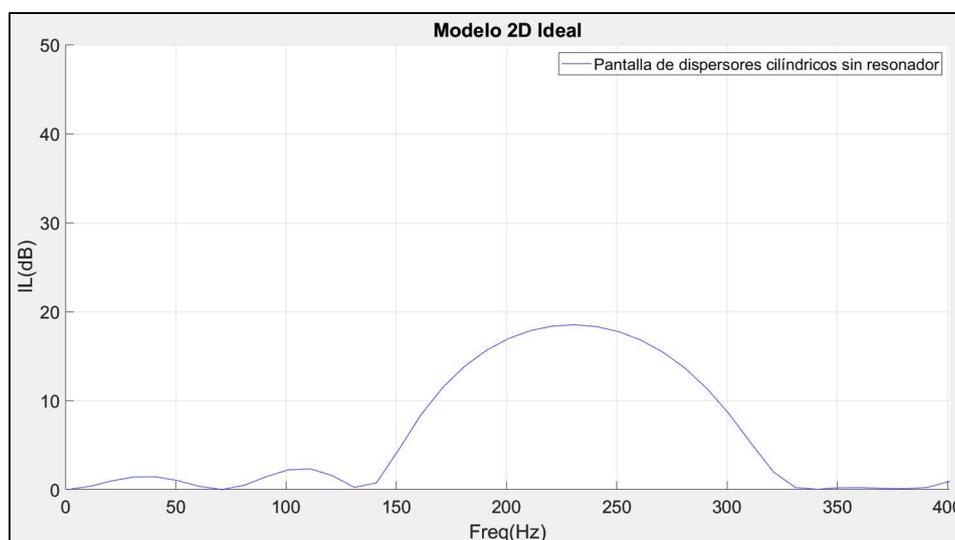


Figura 29 – Espectro de IL del modelo ideal sin resonadores en el punto de observación

Al ser un caso “ideal” los efectos de la difracción de los bordes desaparecen con respecto al modelo anterior de cámara anecoica, y lo que obtenemos es una zona de atenuación centrada a la frecuencia de Bragg que llega hasta los casi 20 dB de atenuación y está ubicada entre los **150 y 330 Hz** aproximada y respectivamente como se puede observar.

Además de la gráfica de valores del IL se ha calculado el valor del área de atenuación AA (apartado 2.1.2.2), el cual se refleja en la siguiente Tabla 4:

Modelo	AA (x10 ³)(dB·Hz)
Cilindros sin resonador	2.5020

Tabla 4 – Valor del AA del modelo ideal sin resonadores

Esta gráfica del espectro de IL, así como su correspondiente valor del AA, serán la base sobre la que contrastaremos los resultados de todas las simulaciones del trabajo. Teniendo esta referencia iremos valorando las modificaciones que vayamos introduciendo a los modelos, siempre en términos de atenuación y comportamiento de sus zonas de atenuación en el espectro.

4.1.3 Introducción de resonadores a los CS y consideraciones iniciales

Siguiendo los principios teóricos de un Resonador de Helmholtz (apartado 2.2.2.2), y partiendo de la ecuación (18) de la frecuencia de resonancia de un Resonador de Helmholtz, se calcula la superficie de la cavidad interior de los resonadores que incorporaremos a los dispersores de nuestros modelos. En nuestro caso al tratarse de una cavidad circular, su fórmula es:

$$S = \pi * R_{in}^2 \quad (20)$$

Siendo R_{in} el radio interno de los distintos resonadores a incluir y estudiar en nuestro modelo.

De forma que la ecuación (18) queda de la siguiente forma:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_p}{L_c + \alpha \frac{A_p}{2} * (\pi * R_{in}^2)}} \quad (21)$$

Ecuación a partir de la cual se irán calculando los diferentes radios internos de las cavidades resonantes, en base a las frecuencias de resonancia que deseemos simular como hemos comentado (apartado 2.2.2.2).

El diseño de las cavidades resonantes se complementa con las medidas del **cuello** de entrada a la cavidad resonante. Estas medidas quedarán **fijas** y serán iguales para todos los resonadores que se diseñarán y simularán de forma que los datos obtenidos sean contrastables con la mayor certeza posible.

En nuestro caso se define como longitud del cuello $L_c = 0.075$ m y como apertura del cuello $A_p = 0.045$ m, ya que son medidas que encajan dentro del diseño de los dispersores y del equilibrio necesario entre las medidas calculadas para el radio exterior R_{ext} y las medidas de los distintos radios internos R_{in} como veremos a continuación. A modo gráfico:

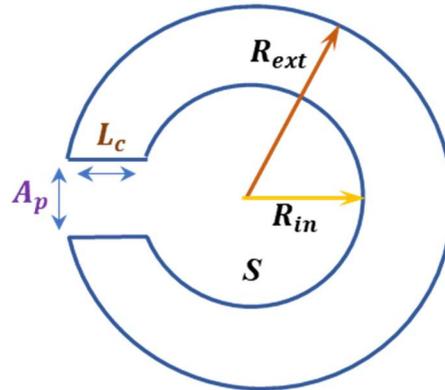


Figura 30 – Modelo 2D de dispersor cilíndrico con resonador

Quedando el modelo 2D ideal de la siguiente forma:

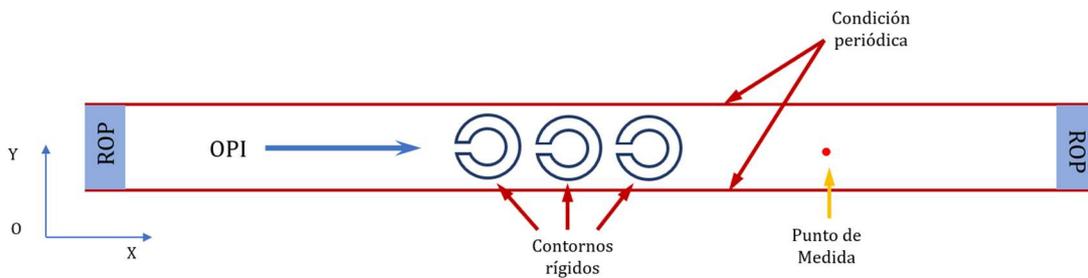


Figura 31 – Modelo 2D ideal de barrera con 3 filas de dispersores cilíndricos con resonador

4.2 Exposición y Análisis de Resultados

Así pues, calcularemos los radios internos para las frecuencias de resonancia de estudio, que en orden descendente de proximidad con respecto a la frecuencia de BG de 250 Hz y con una separación de 10 Hz entre ellas, serían las de: **180 Hz, 170 Hz, 160 Hz, 150 Hz, 140 Hz y 130 Hz**. Y como caso “extremo” por así decirlo, por calcular un punto más alejado con respecto a la frecuencia de BG, simularemos la frecuencia de resonancia de **110 Hz**.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los distintos radios internos para las distintas frecuencias de resonancia:

Frecuencia de resonancia	110 Hz	130 Hz	140 Hz	150 Hz	160 Hz	170 Hz	180 Hz
R_{in}	0.153 m	0.129 m	0.120 m	0.112 m	0.105 m	0.099 m	0.093 m

Tabla 5 – Medidas radios internos cavidades resonantes

Una vez realizados los distintos diseños correspondientes a cada frecuencia de resonancia, se realiza como punto de partida una primera simulación del espectro del IL. En la siguiente Figura 32 se muestran superpuestas las gráficas de los distintos espectros de IL para cada modelo de pantalla diseñada con los distintos resonadores de estudio, así como el caso sin resonador:

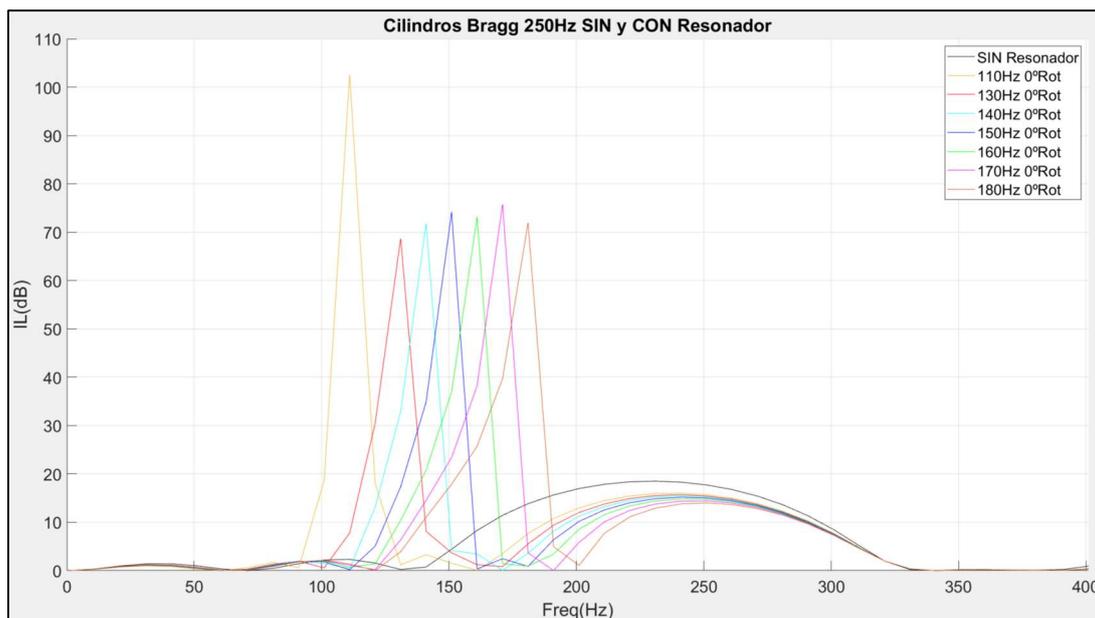


Figura 32 – Espectro del IL para los modelos de pantalla con dispersores cilíndricos, con y sin resonador, para 0° de giro

En la gráfica se puede observar como el correspondiente pico de atenuación aparece a distintas distancias del BG dependiendo de la frecuencia de resonancia a la que actúe.

Esto representa claramente un factor adicional de atenuación, pero no obstante también se aprecia un efecto indeseado. Y es que, cuanto más próximo está el correspondiente pico de resonancia de la zona de atenuación del BG, más le perjudica a su nivel de atenuación en comparación al que tenía inicialmente sin el resonador, generando además un “hueco” o “valle” entre el pico de resonancia y la cúspide del BG como se puede visualizar.

Con lo cual, y como se ha comentado en los objetivos, se va a buscar reducir ese efecto indeseado de empequeñecimiento de la zona de atenuación del BG por el efecto de la aproximación de la frecuencia de resonancia. Y en los siguientes pasos esa va a ser nuestra principal premisa, tomando como referencia este punto de partida.

4.2.1 Simulaciones a distintos ángulos de giro

A continuación, se van a realizar las simulaciones del espectro del IL de todos los modelos ideales con los distintos diseños contemplados de resonador.

Se van a considerar variaciones desde 0° a 90° en el sentido contrario a las agujas del reloj como se aprecia en la Figura 33, y desde la posición inicial. Siendo estas variaciones de giro en pasos de 10°, y de 5° a partir de los 40° de giro para poder estudiar más al detalle los efectos producidos en ese rango de ángulos de giro como se verá a continuación.

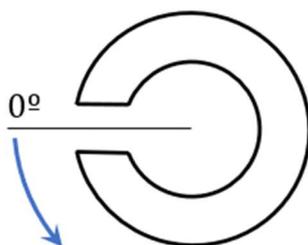


Figura 33 – Sentido de giro desde la posición inicial de 0°

A continuación se muestran todas las gráficas del espectro del IL para todos los ángulos de giro de estudio. Para cada ángulo de giro se muestran superpuestos en la misma gráfica, de igual modo que en la Figura 32, los espectros de IL para cada modelo de pantalla diseñada con los distintos resonadores de estudio, así como el caso sin resonador:

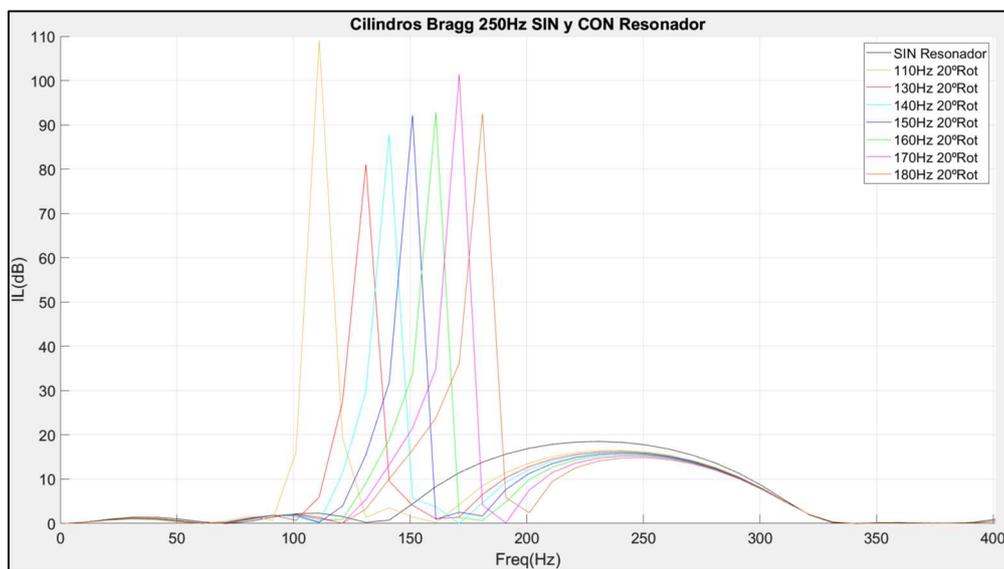


Figura 34 – Espectro de IL para 20° de giro

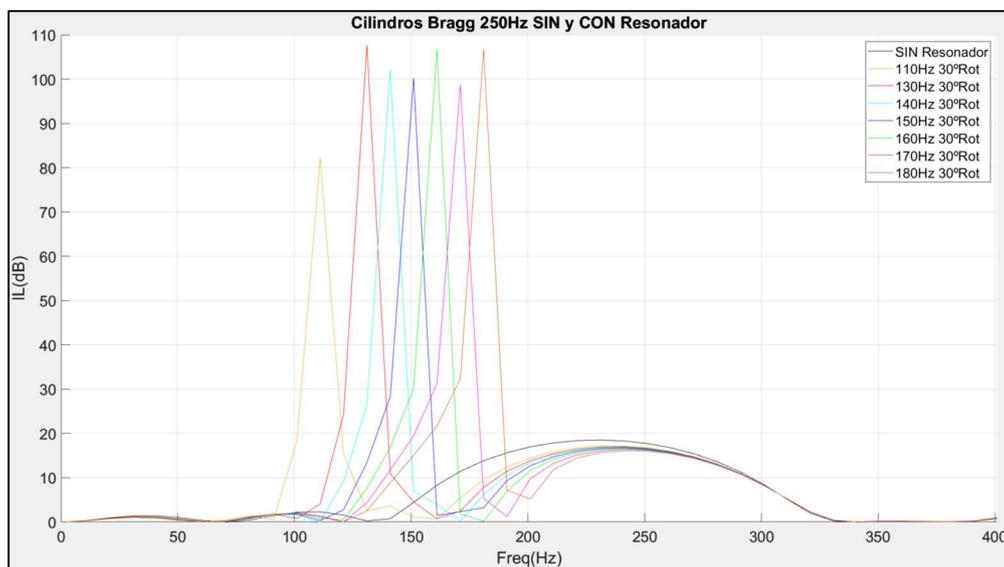


Figura 35 – Espectro de IL para 30° de giro

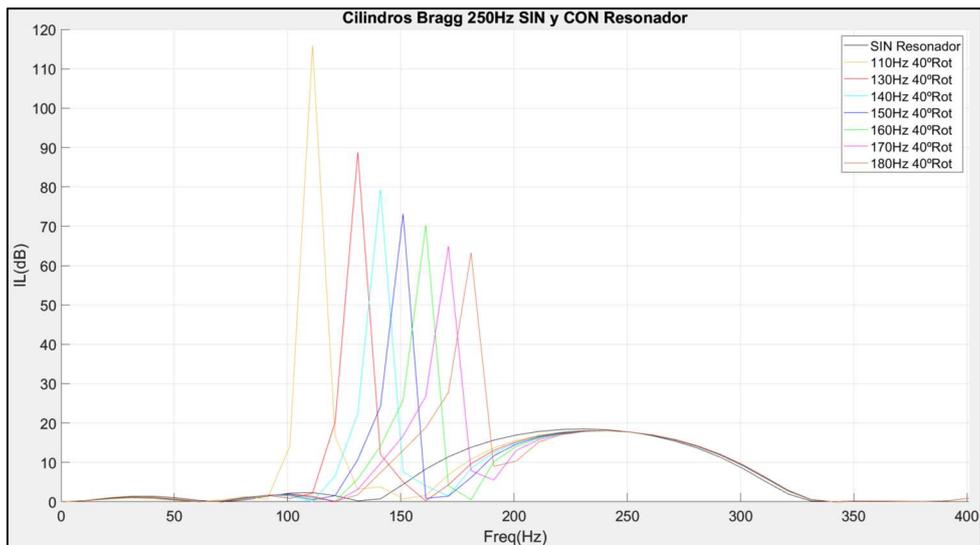


Figura 36 – Espectro de IL para 40° de giro

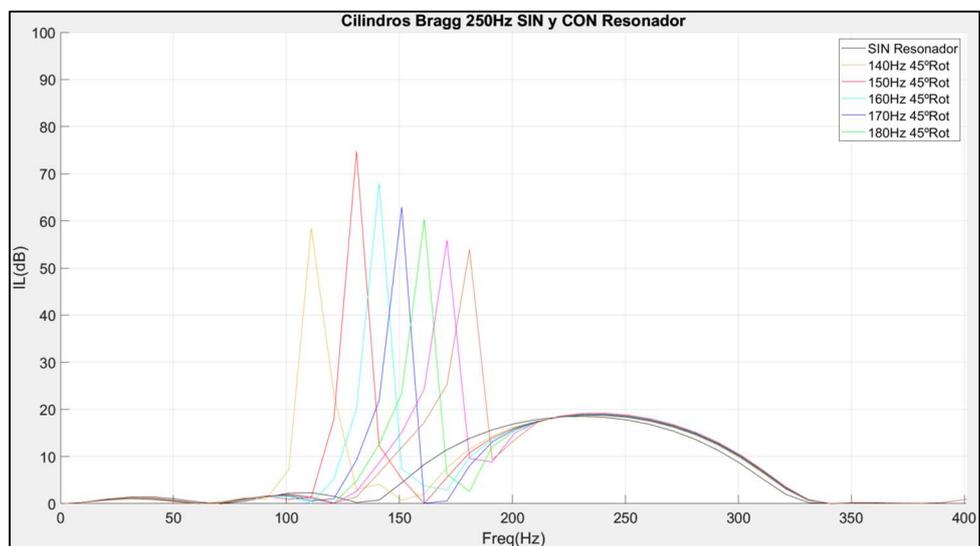


Figura 37 – Espectro de IL para 45° de giro

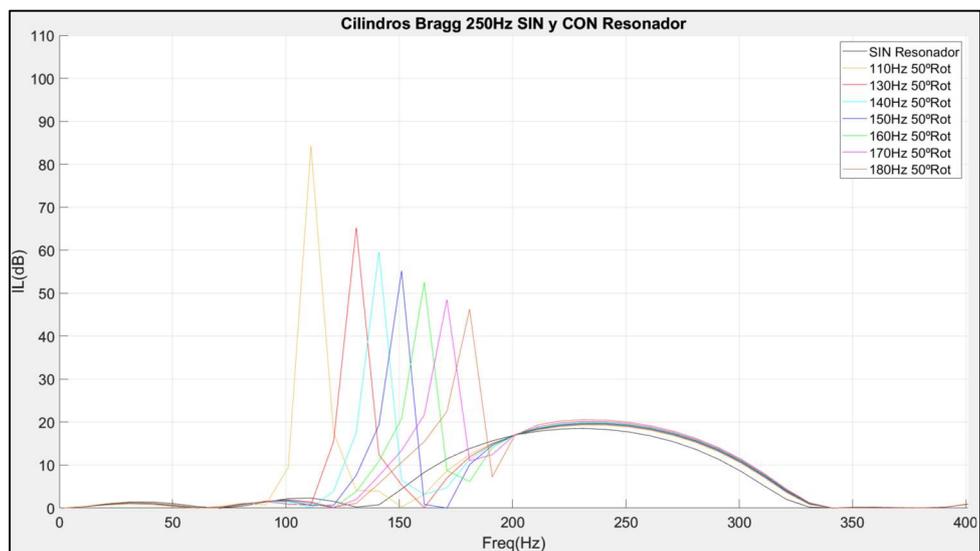


Figura 38 – Espectro de IL para 50° de giro

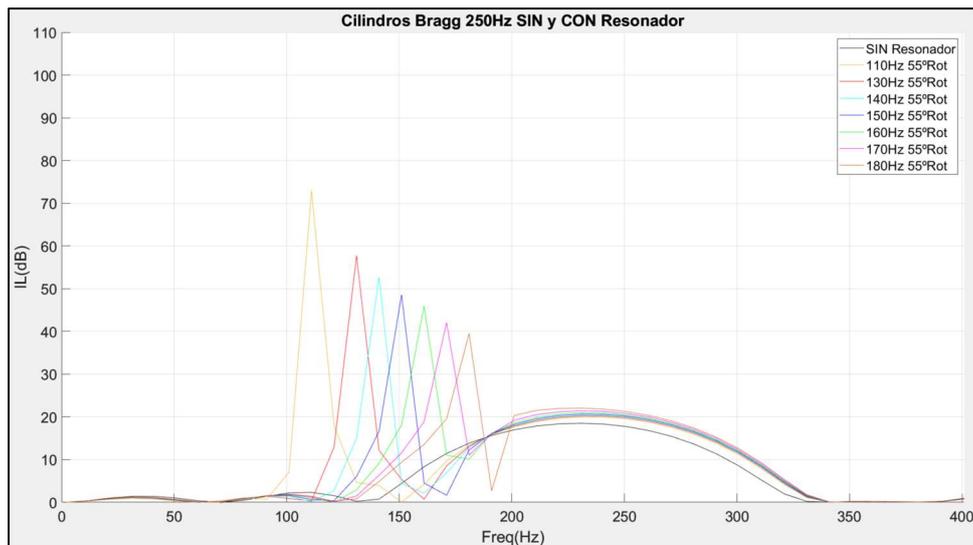


Figura 39 – Espectro de IL para 55° de giro

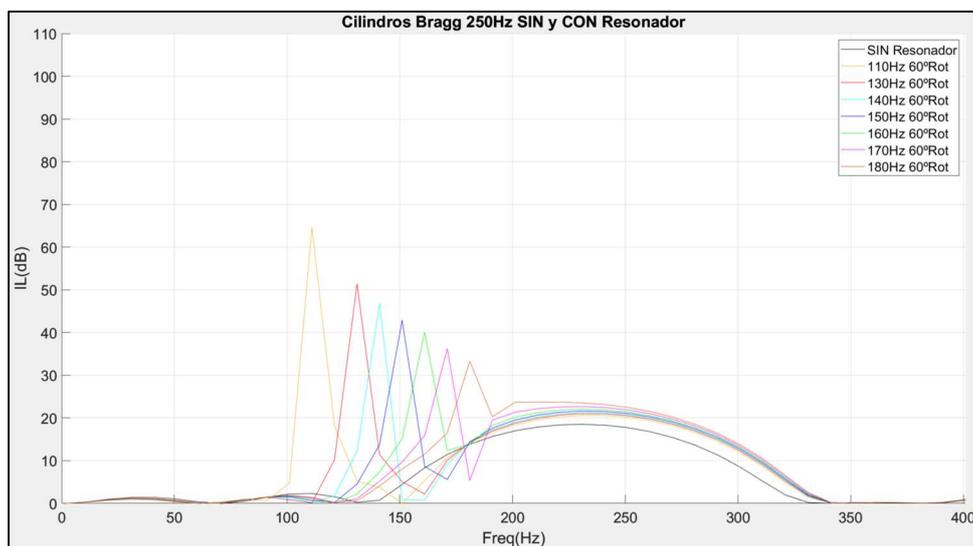


Figura 40 – Espectro de IL para 60° de giro

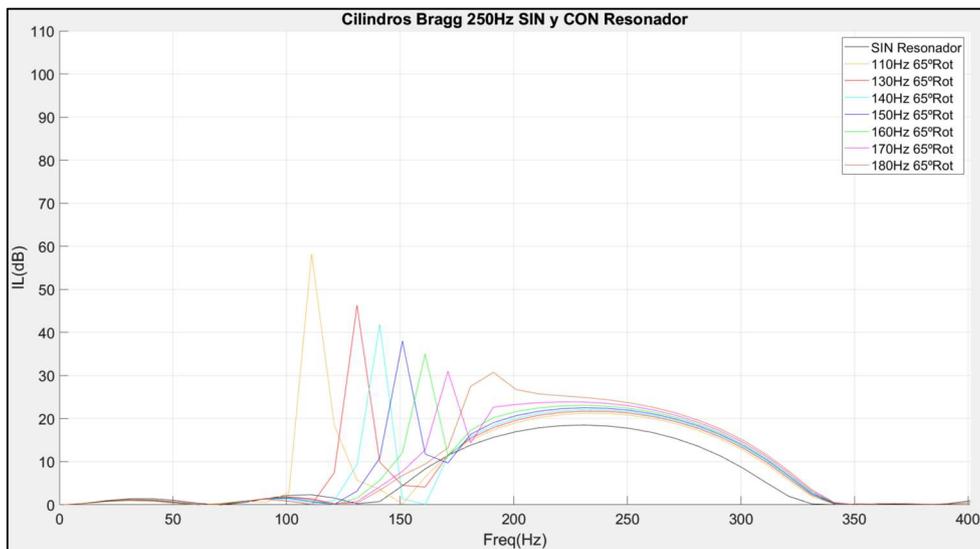


Figura 41 – Espectro de IL para 65° de giro

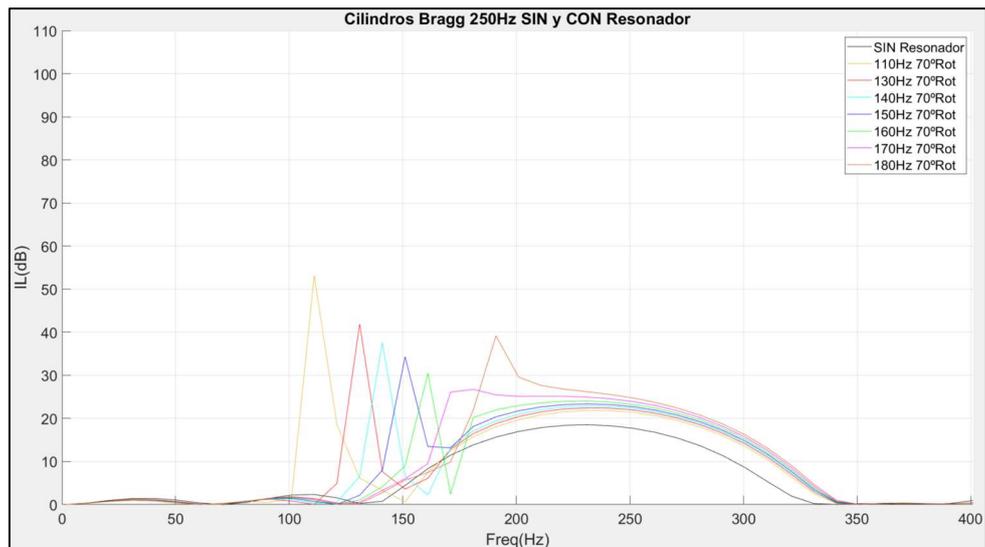


Figura 42 – Espectro de IL para 70° de giro

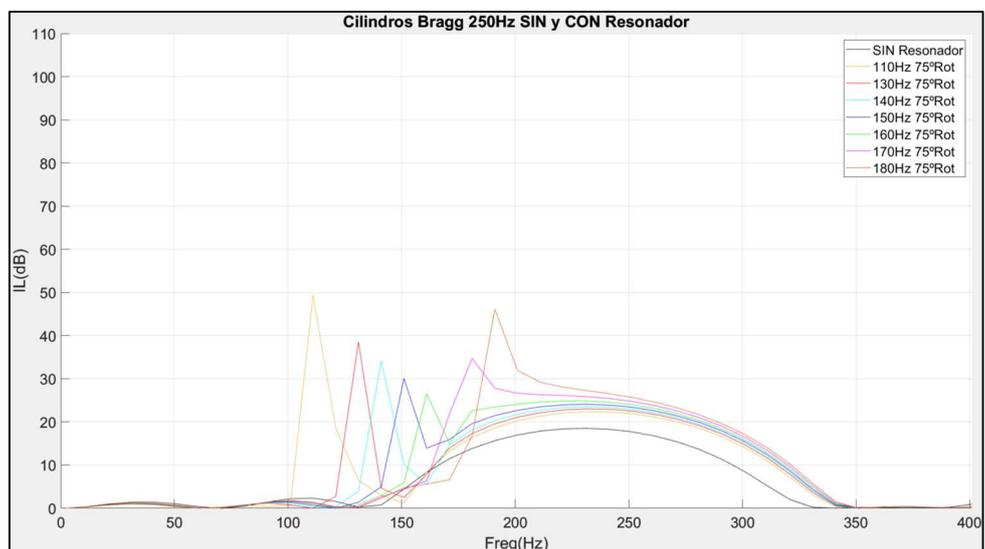


Figura 43 – Espectro de IL para 75° de giro

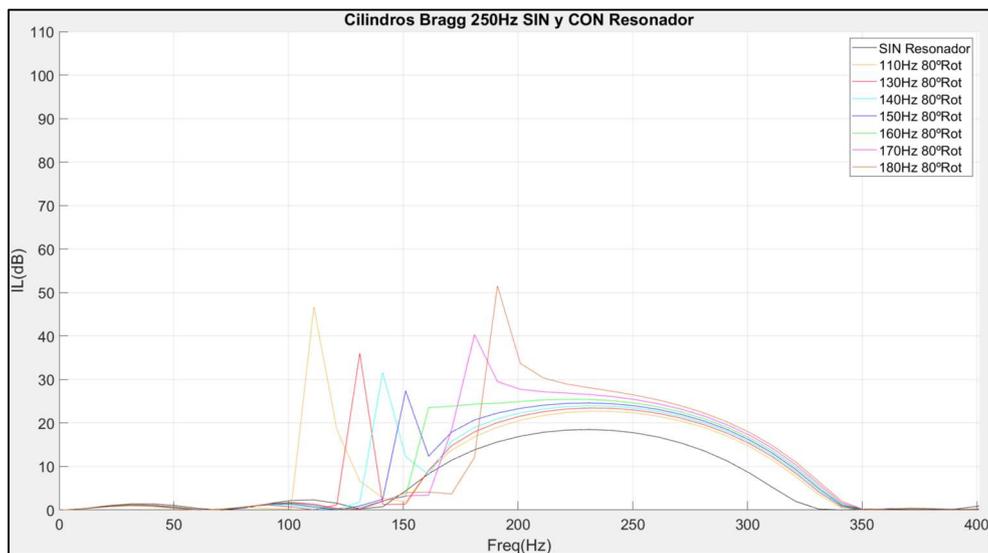


Figura 44 – Espectro de IL para 80° de giro

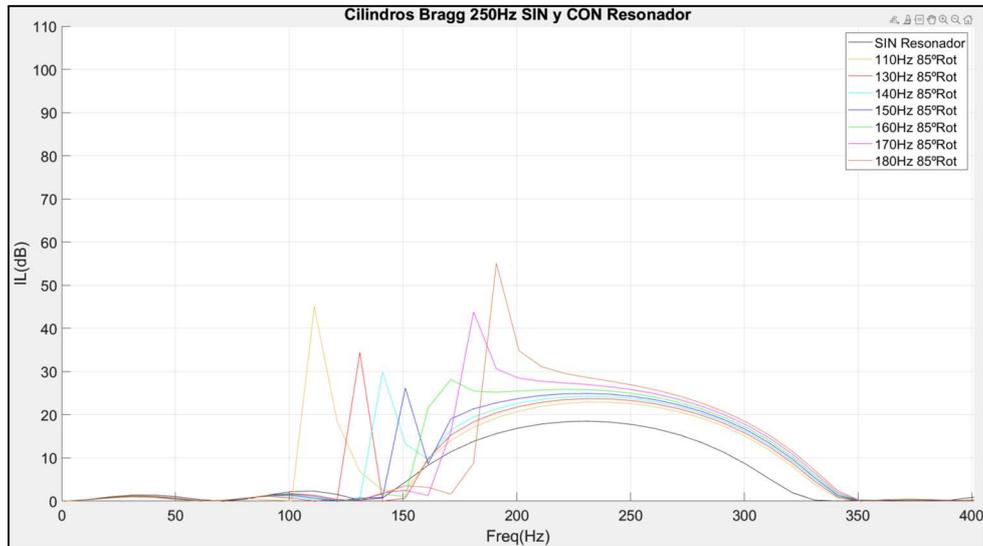


Figura 45 – Espectro de IL para 85° de giro

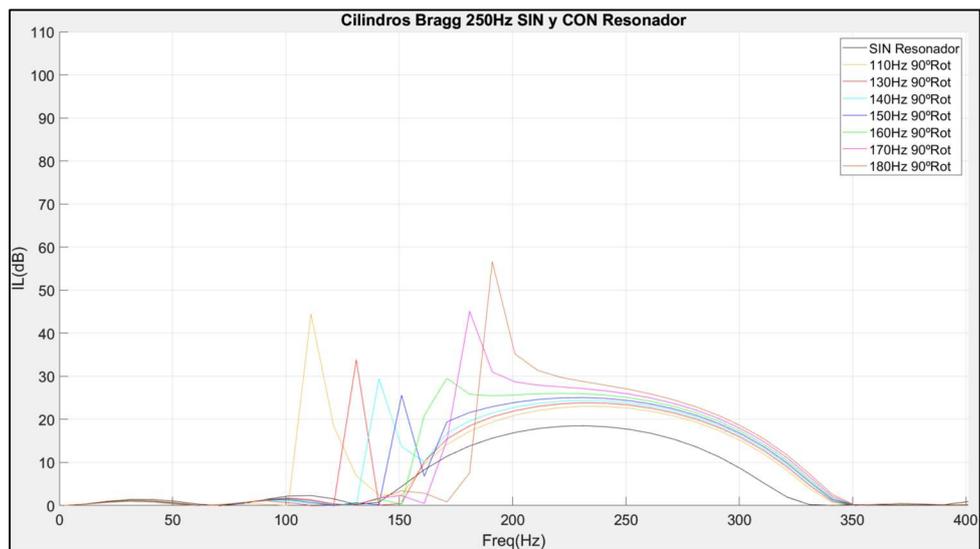


Figura 46 – Espectro de IL para 90° de giro

Observamos que los distintos espectros de IL van **evolucionando**, dependiendo de la proximidad de los correspondientes picos de resonancia al BG. En algunos casos si se aprecia que, al modificar la orientación del resonador, se perjudica menos al nivel del BG debido a su correspondiente pico de resonancia. Pero antes de profundizar más, se va a realizar un estudio de las correspondientes AA de cada caso, para tener una visión más ampliada de estos resultados. De esta forma, y mediante el correspondiente programa en Matlab (Anexo 6.1), se han calculado las AA correspondientes que se reflejan en la siguiente Tabla 6:

Rot.		Sin res.	Frecuencias de resonancia del resonador						
			110 Hz	130 Hz	140 Hz	150 Hz	160 Hz	170 Hz	180 Hz
0°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.3091	2.9703	2.9696	2.9749	3.001	3.0689	3.0895
	% pérdida Vs. sin res.		+32.263	+18.718	+18.688	+18.903	+19.943	+22.660	+23.481
20°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.4412	3.1484	3.1818	3.1956	3.2228	3.3518	3.3262
	% pérdida Vs. sin res.		+37.539	+25.836	+27.170	+27.723	+28.811	+33.964	+32.944
30°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.2704	3.4965	3.4080	3.3486	3.4248	3.3998	3.5488
	% pérdida Vs. sin res.		+30.713	+39.748	+36.214	+33.836	+36.885	+35.886	+41.840
40°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.7452	3.4429	3.3172	3.1941	3.2061	3.2374	3.2750
	% pérdida Vs. sin res.		+49.688	+37.607	+32.584	+27.665	+28.141	+29.393	+30.898
45°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.2704	3.3916	3.2923	3.1672	3.2329	3.2733	3.2846
	% pérdida Vs. sin res.		+30.714	+35.557	+31.588	+26.588	+29.214	+30.828	+31.281
50°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.6173	3.4006	3.3060	3.1981	3.3137	3.3397	3.3028
	% pérdida Vs. sin res.		+44.577	+35.918	+32.136	+27.823	+32.441	+33.481	+32.006
55°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.6134	3.4404	3.3315	3.3037	3.4185	3.4127	3.3153
	% pérdida Vs. sin res.		+44.423	+37.509	+33.154	+32.043	+36.633	+36.402	+32.506
60°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.6449	3.5004	3.3567	3.4516	3.5267	3.4393	3.5598
	% pérdida Vs. sin res.		+45.681	+39.904	+34.162	+37.954	+40.955	+37.465	+42.281
65°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.7002	3.5661	3.4383	3.5987	3.6146	3.6143	3.7349
	% pérdida Vs. sin res.		+47.891	+42.534	+37.423	+43.835	+44.471	+44.459	+49.278
70°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.7658	3.6215	3.5923	3.7296	3.6146	3.8161	3.8806
	% pérdida Vs. sin res.		+50.513	+44.744	+43.582	+49.067	+44.468	+52.525	+55.100
75°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.8333	3.6597	3.7331	3.8182	3.8169	3.9605	3.9975
	% pérdida Vs. sin res.		+53.211	+46.272	+49.207	+52.607	+52.556	+58.297	+59.775
80°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.8909	3.6805	3.8376	3.8717	3.9616	4.0617	4.0787
	% pérdida Vs. sin res.		+55.515	+47.104	+53.383	+54.747	+58.341	+62.339	+63.018
85°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.8909	3.6805	3.8376	3.8717	3.9616	4.0617	4.0787
	% pérdida Vs. sin res.		+55.515	+47.104	+53.383	+54.747	+58.341	+62.339	+63.018
90°	AA (x10 ³) (dB·Hz)	2.5020	3.9422	3.7165	3.9211	3.8754	4.0626	4.1421	4.1440
	% pérdida Vs. sin res.		+57.565	+48.544	+56.719	+54.894	+62.374	+65.552	+65.629
AA (x10 ³) (dB·Hz) TOTAL		35.028	50.935	48.716	48.523	48.599	46.676	50.179	50.616
% de pérdida Total Vs. sin resonador			+45.412	+39.077	+38.526	+38.743	+33.253	+43.254	+44.502

Tabla 6 – Resultados AA para todas las simulaciones del espectro de IL

Para entender bien los resultados, se deben de tener en cuenta unas consideraciones iniciales:

- I. Para cada ángulo de rotación, se muestra el valor de las AA de cada modelo con resonador y del caso sin resonador.
- II. Se muestran los correspondientes % de pérdida de AA proporcionales con respecto al AA del caso sin resonador. De color azul si el % es positivo (no hay pérdida, hay ganancia) y de color rojo si es negativo (hay pérdida).
- III. Se marcan con 3 tonos de color verde los 3 casos con más AA para cada ángulo de rotación (siendo el de color verde más intenso el caso de mayor AA).
- IV. Al pie de la tabla, y para cada resonador, se muestra la suma total del AA obtenido en cada uno de los ángulos de rotación, así como la suma de sus % de pérdida con respecto al caso sin resonador obtenidos para cada caso.

4.2.2 Gráficas conjuntas y primeras conclusiones

A modo gráfico y antes de desarrollar un poco las primeras conclusiones sobre los resultados obtenidos en la Tabla 6, se muestra un **diagrama de barras** con la suma de las AA de cada caso de resonador para cada ángulo de giro simulado. Estos valores totales de AA están comparados en cada caso con la suma del AA total del caso sin resonador (suma de su único valor, aplicado en todos los ángulos de giro), valor que aparece representado en la barra de azul más claro de dentro de cada una de las demás barras. Después de la Figura 47 se adjunta la Tabla 7 donde se especifican los valores numéricos y su % de pérdida con respecto al caso sin resonador:

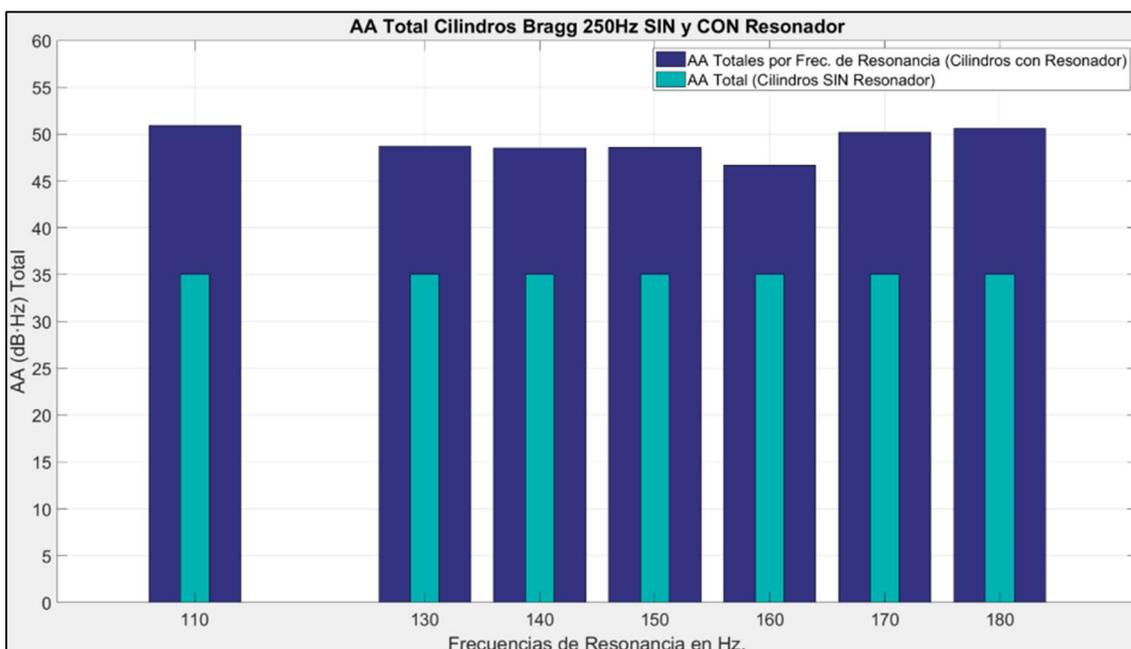


Figura 47 – Diagrama de barras con las AA totales para cada caso de resonador, comparado con el caso sin resonador

Modelo	Sin res.	110Hz	130Hz	140Hz	150Hz	160Hz	170Hz	180Hz
AA Total (x10 ³)(dB·Hz)	35.028	50.935	48.716	48.523	48.599	46.676	50.179	50.616
% de pérdida Total Vs. sin resonador		+45.412	+39.077	+38.526	+38.743	+33.253	+43.254	+44.502

Tabla 7 – AA totales para cada caso de resonador y % comparativo con respecto al caso sin resonador

Así pues, en un primer análisis vemos que:

- En todos los casos simulados se produce una **ganancia de atenuación** con respecto al caso sin resonador.
- Aunque hay diferencias (que ahora después analizaremos) en el diagrama de barras se observa que la suma total de las AA de cada caso son bastante parecidas, no hay ningún caso “malo” por así decirlo.

A continuación en la Figura 48 se muestran los datos de la Tabla 6 en una gráfica conjunta, donde se representa la evolución de los valores que ha ido tomando el AA para cada caso conforme se ha ido avanzando el ángulo de giro, además del caso sin resonador (el cual mantiene el mismo valor de AA para todos los ángulos de giro). Se muestra el eje de ordenadas desde 7200 dB·Hz y no desde cero para tener un mayor detalle del comportamiento de cada caso:

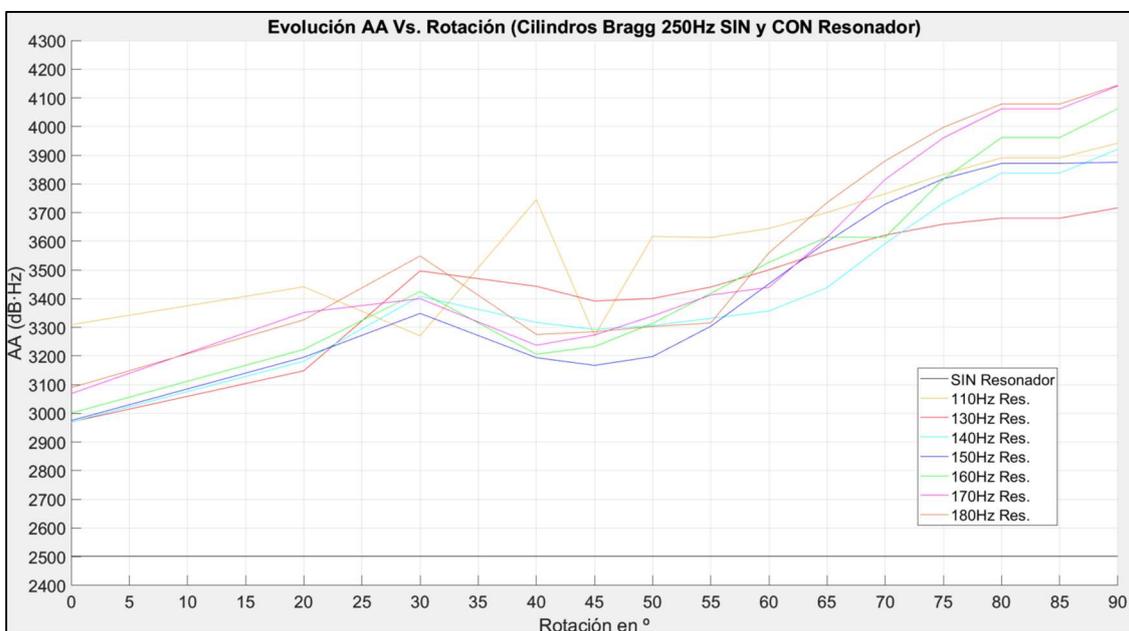


Figura 48 – Evolución AA Vs. giro para todos los casos y giros

En los resultados mostrados en la Figura 48, se aprecia una tendencia ascendente y bastante parecida (a excepción del caso de 110 Hz) : se aprecia un ligero repunte alrededor de los 30° de giro, seguido de un pequeño descenso al que prosigue un aumento prácticamente continuado a partir de los 50° aproximadamente.

En el caso del resonador con la frecuencia de resonancia más alejada, el de 110 Hz, la tendencia es algo distinta y con más fluctuaciones, aunque si ascendente en el plano general. Este hecho se aprecia más claramente en las Figuras 49 y 50 donde se muestra el caso de 110 Hz y el resto de casos por separado.

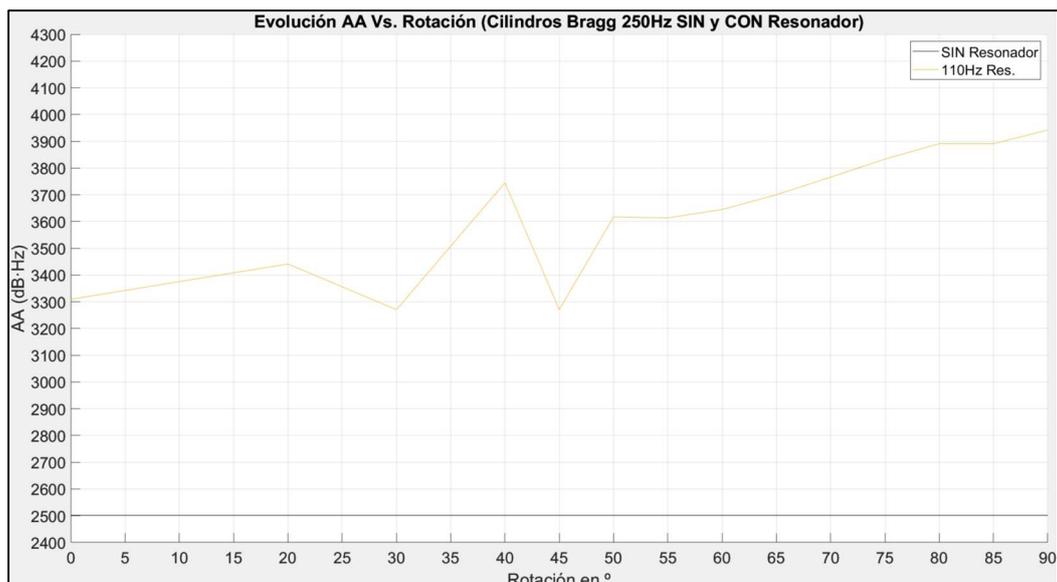


Figura 49 – Diferencia evolución AA Vs. rotación caso 110 Hz

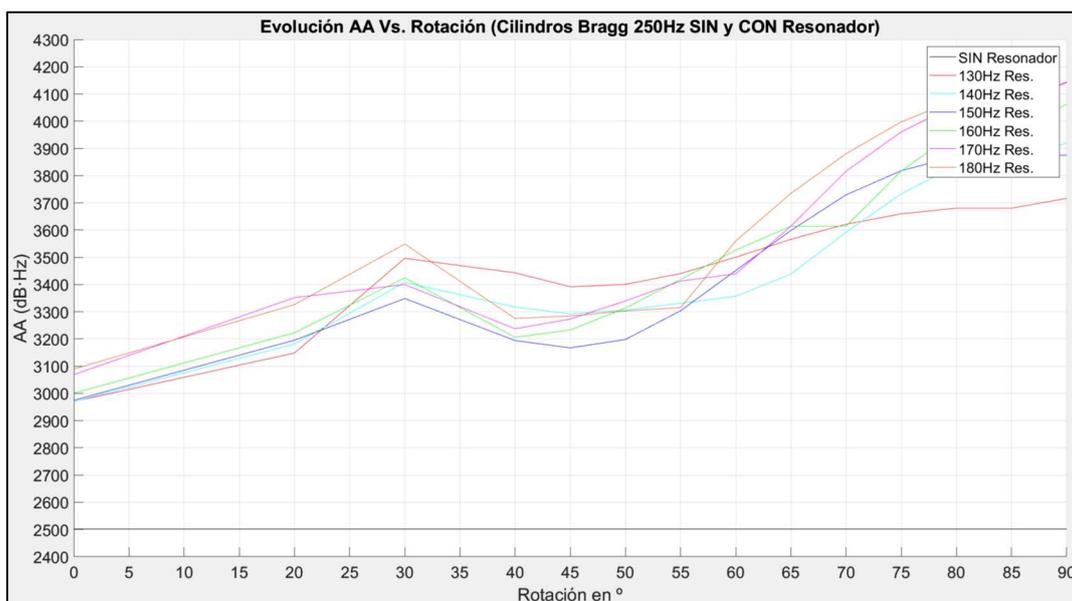


Figura 50 – Diferencia evolución AA Vs. rotación resto de casos excepto el de 110 Hz

Con todo ello podemos aproximar **4 zonas de atenuación** más o menos diferenciadas en base a sus valores de AA, las cuales se han querido representar en la Figura 51, donde las zonas aparecen representadas en 4 tonos de verde (más intenso para mayor nivel de AA) sobre el diagrama de barras que se vio en la Figura 47. Y después en la Figura 52 aparecen estas zonas marcadas sobre el espectro de IL del caso sin resonador:

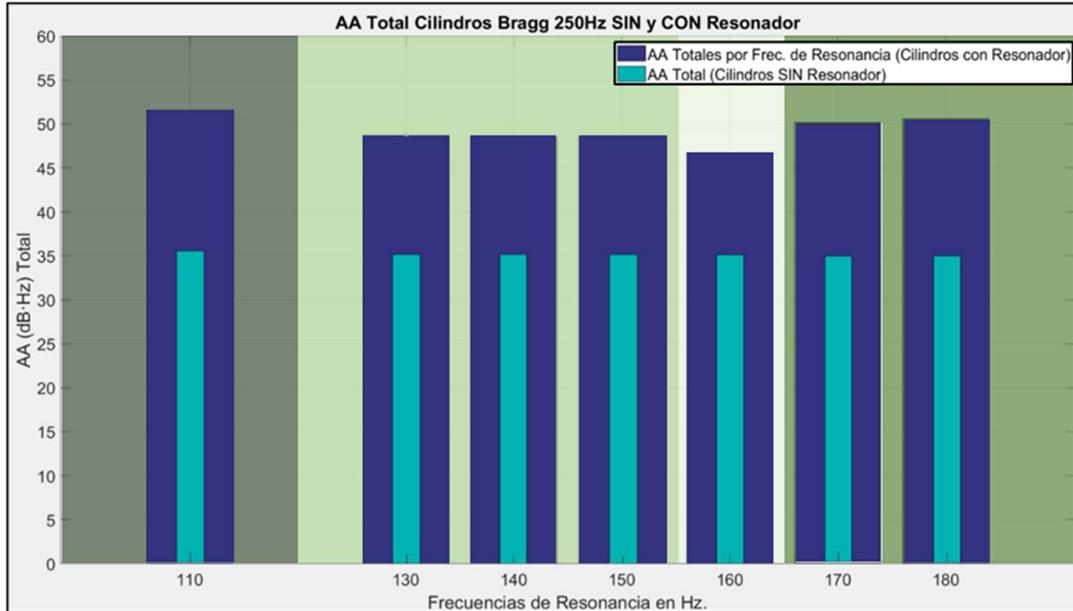


Figura 51 – Grupos de zonas de atenuación en tonalidades de color verde sobre diagrama de barras con las AA totales

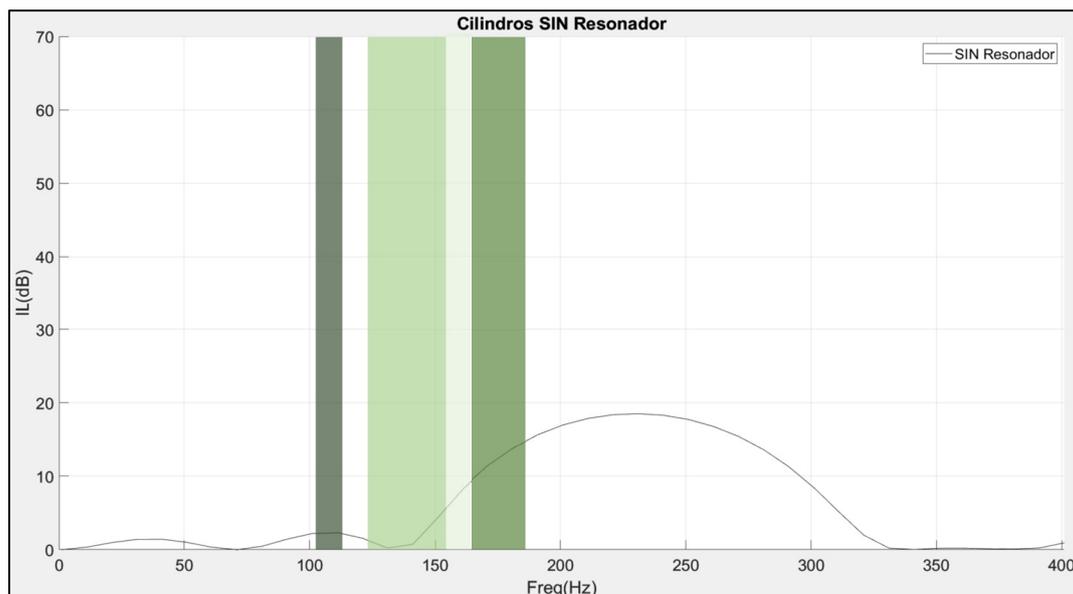


Figura 52 – Mismas zonas de atenuación por nivel de AA, en tonalidades de color verde, y su lugar en el espectro

Como se puede observar, las zonas serían (de mayor a menor atenuación):

1. Zona de frecuencias de resonancia alrededor de **110 Hz**: esta zona más alejada, que representaría a resonadores de este tipo y cuyas frecuencias de resonancia estuviesen aproximadamente alrededor del **44%** del valor la frecuencia de BG, sería la que obtiene **mayor** valor de AA total.
2. Zona correspondiente a frecuencias de resonancia alrededor de valores de entre **170 Hz** y **180 Hz**.: esta zona más próxima, que representaría a resonadores de este tipo y cuyas frecuencias de resonancia estuviesen centradas aproximadamente entre el **68%** y el **72%** del valor la frecuencia de BG, sería la que obtiene la **segunda mayor** atenuación.

3. Zona correspondiente a frecuencias de resonancia alrededor de valores de entre **130 Hz** y **150 Hz**: esta zona intermedia, que representaría a resonadores de este tipo y cuyas frecuencias de resonancia estuviesen centradas aproximadamente entre el **52%** y el **60%** del valor la frecuencia de BG, sería la que obtiene la **tercera mayor** atenuación.
4. Zona de frecuencias de resonancia alrededor de **160 Hz**: esta zona de transición entre la zona intermedia y la más próxima a la de la frecuencia de BG, y que representaría a resonadores de este tipo y cuyas frecuencias de resonancia estuviesen a aproximadamente alrededor del **64%** del valor la frecuencia de BG, sería la que obtiene **menor** valor de AA total.

Por último, en la Figura 53 se muestra una representación general de los resultados anteriormente expuestos:

- Arriba a la izquierda: la evolución vista de los valores de AA para cada caso con respecto al ángulo de giro
- Arriba a la derecha: las zonas de atenuación mencionadas
- Y a la vez, en la parte inferior, las subzonas de atenuación de cada caso simulado en función de sus respectivos **ángulos de giro**. Mostrando estas subzonas delimitadas de forma aproximada por los valores en grados de sus extremos, y en 3 tonos de verde (más intenso para mayor nivel de atenuación)

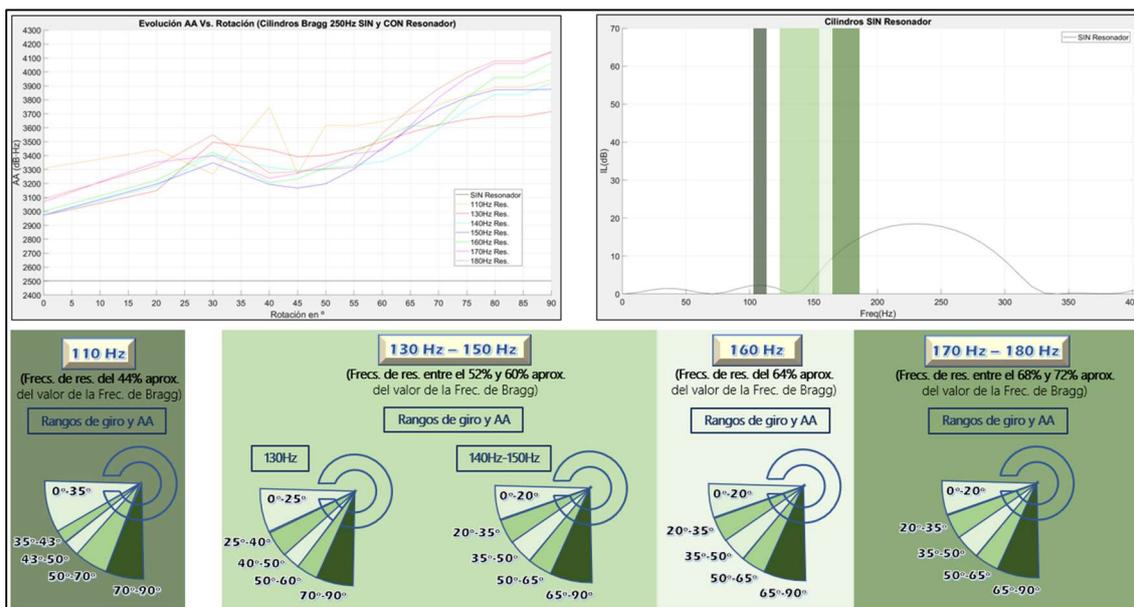


Figura 53 – Zonas de atenuación en el espectro, evolución AA Vs. rotación, y subzonas de atenuación por ángulo de rotación para cada resonador

Así pues, y como se ha comentado, podemos concluir que de forma general tenemos:

- Ganancia de atenuación **generalizada** y con valores bastante **parecidos** en todos los casos con respecto al caso sin resonador
- Tendencia **ascendente** con el ángulo de giro y **parecida** (único caso con tendencia más fluctuante y distinta el más alejado de 110 Hz.)

De forma que se hace necesario incluir algún **factor adicional de contrastación** para valorar en más detalle el aporte de valor que supone incluir el giro a los dispersores de la pantalla.

4.2.3 Estudio del Ancho de Banda de las zonas de atenuación

Para poner en contexto la motivación del siguiente estudio, se toman como ejemplo los modelos simulados de pantalla con resonadores de **110 Hz** y de **130Hz**, los cuales han representado el **primer** y **cuarto** caso respectivamente en lo que respecta a suma total de AA.

A pesar de sus, a priori, buenos resultados de atenuación, al observar todos sus espectros simulados del IL se aprecia que el “hueco” o “valle” entre las dos zonas de atenuación (zona de atenuación del BG y zona de atenuación del correspondiente pico de resonancia) no desaparece en ningún caso y además, nunca supera el valor de 10 dB de IL. Hecho que queda patente en las siguientes figuras, donde se superponen todos los espectros de IL para cada uno de los dos casos y para cada ángulo de rotación, de forma que se aprecia cual ha sido la evolución de la morfología de las dos zonas de atenuación conforme se ha ido realizando el giro:

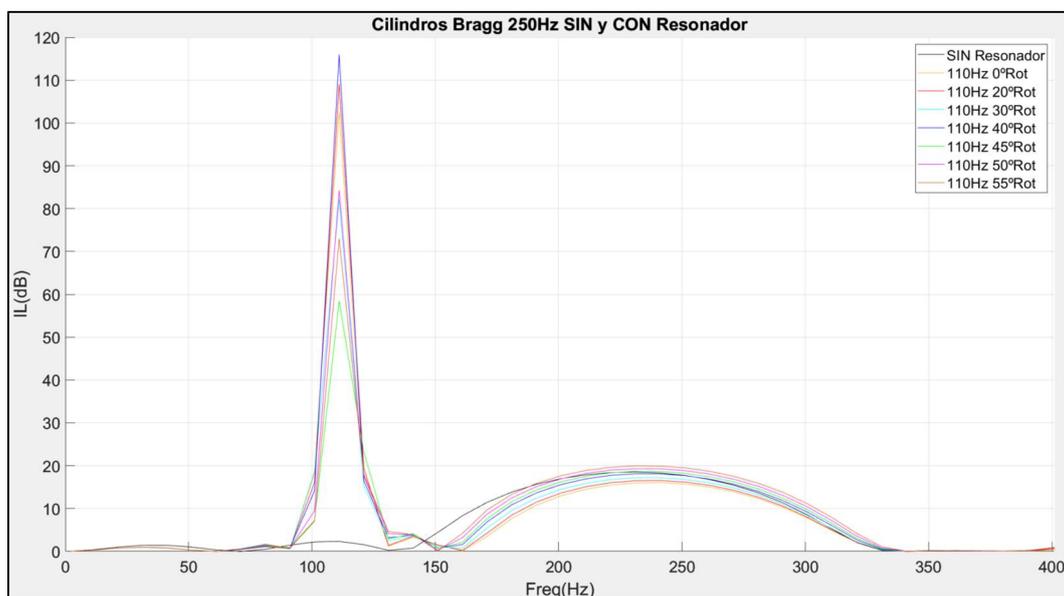


Figura 54 – Espectros de IL de 0° a 55° del caso con resonador de 110Hz.

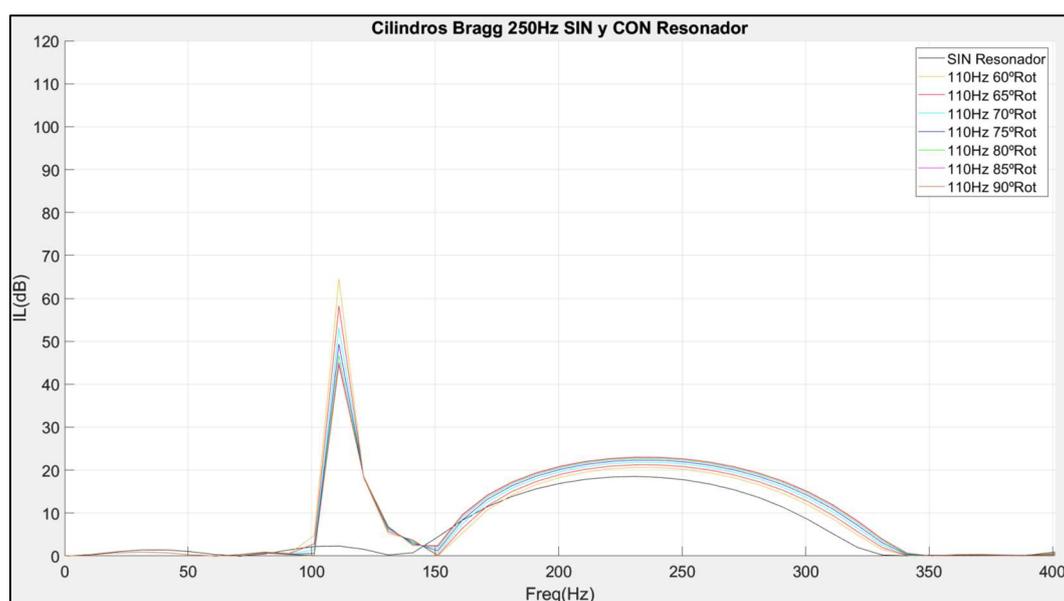


Figura 55 – Espectros de IL de 60° a 90° del caso con resonador de 110Hz.

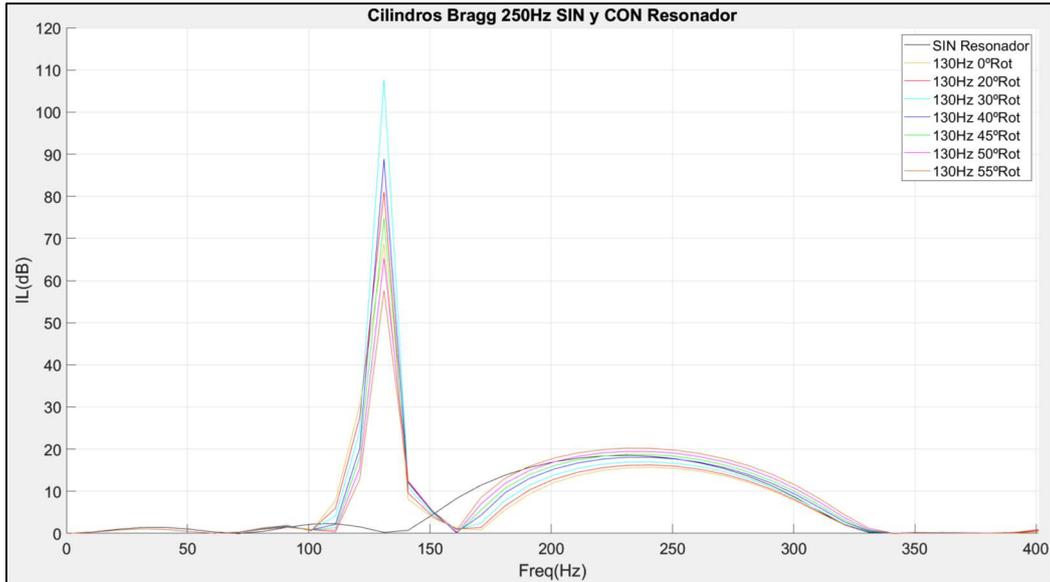


Figura 56 – Espectros de IL de 0° a 55° del caso con resonador de 130Hz.

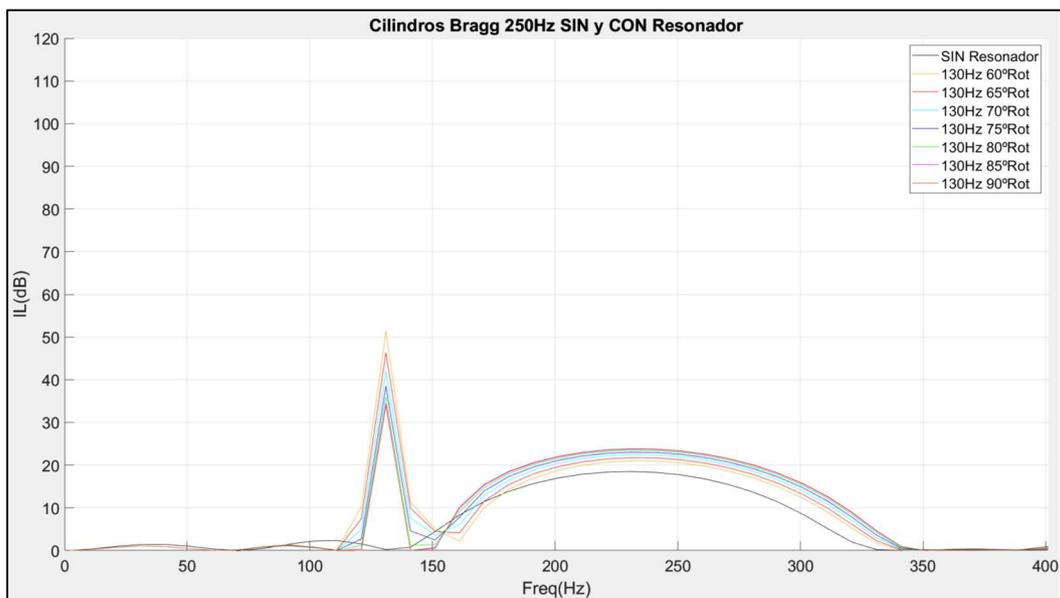


Figura 57 – Espectros de IL de 60° a 90° del caso con resonador de 130Hz.

Sin embargo (y como ha quedado respaldado por las simulaciones) en otros casos el hueco existente entre las dos zonas de atenuación se va elevando, va desapareciendo de forma que se va conformando una especie de **zona de atenuación conjunta** entre las dos.

De igual forma que antes y para respaldar de forma gráfica este hecho, a continuación se muestra la siguiente Figura 58, donde se superponen los espectros de IL para cada ángulo de rotación desde 60° a 90° (puesto que son donde mejor se aprecia) del modelo con resonador de **150 Hz** :

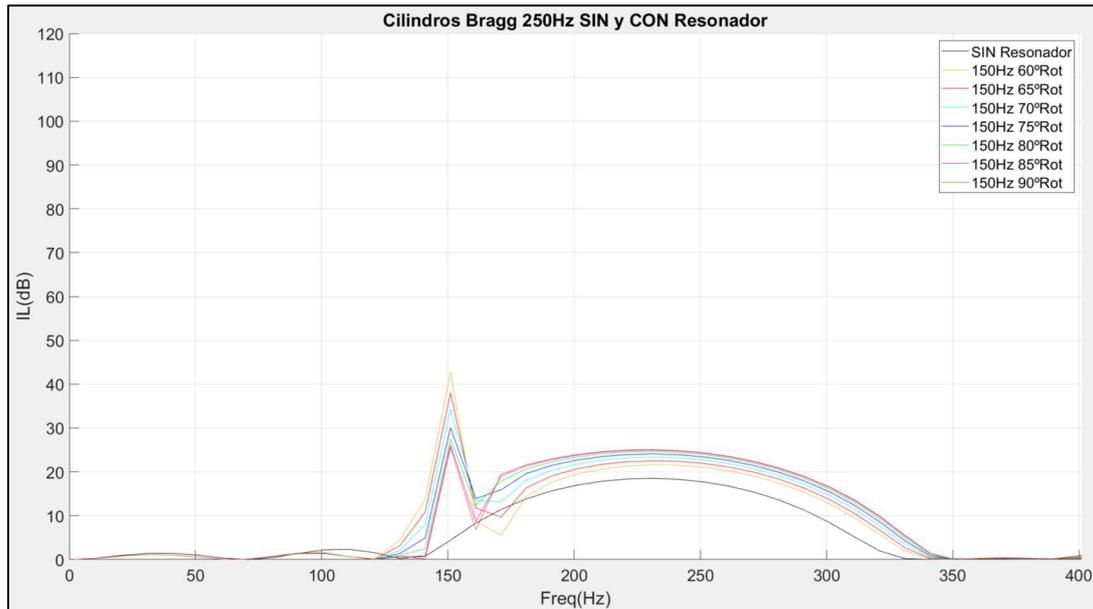


Figura 58 – Espectros de IL de 60° a 90° del caso con resonador de 150Hz.

Como se puede apreciar:

- Conforme avanza la rotación, también disminuye el nivel de los respectivos picos de resonancia
- A la vez, esta disminución del nivel de atenuación de los picos hace que se merme menos el nivel de IL de la zona de atenuación del BG, provocando que la zona del BG aumente de nivel

Esto puede deberse en cierta medida a que al realizar el giro, la **onda resonante** que resulta del resonador es **menos directa** con respecto a la onda plana incidente, como se muestra en la siguiente Figura 59:

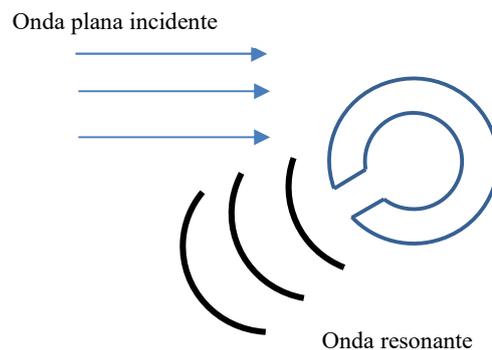


Figura 59 – Esquema de onda plana incidente vs. onda resonante.

Es también bastante probable que se deba a la diferencia de fase que se va produciendo entre la onda incidente y la reflejada conforme va avanzando el giro, provocándose interferencias constructivas y destructivas de distinto nivel entre ellas. Pero para asegurar esta hipótesis se debería de realizar otro tipo de estudio más focalizado, y este trabajo sobretodo es experimental,

realizando distinto tipo de simulaciones en base a las conclusiones a las que nos van encaminando los resultados obtenidos.

En cualquier caso, podemos realizar la hipótesis de que, para ciertas frecuencias de resonancia y ángulos de giro:

- Aumenta el nivel de la zona de atenuación del BG
- El hueco entre la zona de atenuación del pico de resonancia y la zona de BG va elevándose (va desapareciendo)

Y todo esto da como resultado que las dos zonas de atenuación de alguna forma **trabajan conjuntamente** conformando una única **zona de atenuación conjunta**.

4.2.3.1 Garantías de atenuación y parámetro ABS_{up10}

Partiendo de la idea de que no es lo mismo conseguir altos niveles de atenuación en zonas muy concretas y acotadas del espectro, que garantizar unos niveles “válidos” o de ciertas garantías de atenuación en el mayor rango de frecuencias del espectro de estudio. Y en base a ello, nace la idea de parametrizar o de alguna forma cuantificar el **aporte de valor** que representa el, no solo ofrecer altos niveles de atenuación en puntos muy concretos del espectro (como algunos de los picos de IL de gran nivel representados en las gráficas de las simulaciones anteriores), sino además garantizar unos niveles mínimamente aceptables de atenuación en el mayor rango de frecuencias contiguas o en el mayor ancho de banda del espectro de estudio.

Diversos estudios sobre la eficacia y el comportamiento de pantallas acústicas tradicionales como el de la Figura 60 y la Tabla 8, nos arrojan una idea de los niveles de atenuación que se pueden conseguir en la práctica con este tipo de pantalla. En la tabla de resultados se aprecia como todos los correspondientes indicadores de ruido diurno, de tarde y de noche se reducen en valores que oscilan alrededor de 6dB:



Figura 60 – Distribución de viviendas en un proyecto real de pantalla acústica para atenuar el ruido de la carretera colindante a ellas [24].

Vivienda	Sin pantalla			Con pantalla			Reducción sonora		
	Ldia	Ltarde	Lnoche	Ldia	Ltarde	Lnoche	Ldia	Ltarde	Lnoche
1	67,4	68	59,5	61,3	62	53,8	6,1	6	5,7
2	66,7	67,2	58,8	60,6	61,5	53,3	6,1	5,7	5,5
3	66,4	67	58,6	60,4	61,2	53,1	6	5,8	5,5
4	66,6	67,2	58,8	60,8	61,6	53,4	5,8	5,6	5,4
5	66,4	67	58,6	60,7	61,5	53,4	5,7	5,5	5,2
6	66,5	67,1	58,7	60,9	61,7	53,5	5,6	5,4	5,2
7	66,6	67,1	58,7	60,9	61,7	53,6	5,7	5,4	5,1
8	66,6	67,2	58,8	60,8	61,7	53,5	5,8	5,5	5,3
9	66,6	67,2	58,8	60,9	61,8	53,6	5,7	5,4	5,2
10	66,6	67,2	58,8	60,9	61,8	53,6	5,7	5,4	5,2
11	66,7	67,3	58,9	61	61,9	53,7	5,7	5,4	5,2
12	67,1	67,7	59,2	61,3	62,1	54	5,8	5,6	5,2
13	67,3	67,8	59,4	61,4	62,3	54,1	5,9	5,5	5,3
14	67,6	68,1	59,7	61,8	62,7	54,5	5,8	5,4	5,2
15	67,6	68,2	59,7	61,9	62,8	54,6	5,7	5,4	5,1
16	67,7	68,2	59,7	62	62,9	54,7	5,7	5,3	5
17	67,7	68,2	59,7	62,1	62,9	54,8	5,6	5,3	4,9
18	67,6	68,1	59,7	62,1	62,9	54,8	5,5	5,2	4,9
19	67,6	68,2	59,7	62,1	63	54,8	5,5	5,2	4,9
20	68	68,5	60	62,5	63,3	54,9	5,5	5,2	5,1
21	67,9	68,4	59,9	62,2	63	54,8	5,7	5,4	5,1
22	67,7	68,2	59,7	61,7	62,5	54,3	6	5,7	5,4
23	67,6	68	59,6	61,6	62,5	54,3	6	5,5	5,3
24	67,4	67,9	59,4	61,4	62,2	53,9	6	5,7	5,5
25	67,3	67,8	59,2	61,5	62,3	54,1	5,8	5,5	5,1
26	66,2	66,7	58,2	59,6	60,2	51,9	6,6	6,5	6,3
27	66,3	66,8	58,3	60,8	61,3	52,8	5,5	5,5	5,5

Tabla 8 – Resultados de atenuación sonora con la construcción de la pantalla acústica tradicional en el proyecto [24].

También otros estudios de carácter más científico ([21] [25] entre otros), afirman que con este tipo de pantallas se puede llegar a conseguir niveles de atenuación en el rango de 10 dB. De forma que se va a considerar la cifra de **10 dB** de atenuación como un nivel lo suficientemente aceptable o de garantías. Por ello se va a incluir como parámetro adicional de medida y de estudio, y en la línea del objetivo mencionado de conformar una zona de **atenuación conjunta** entre las dos zonas (zona de atenuación del BG y pico de resonancia), el valor en Hz del rango de frecuencias en las que los valores de IL son **mayores o iguales** a 10 dB.

Así pues, partiendo de las simulaciones realizadas, se medirá el ancho de banda en Hz de todas las zonas de frecuencias contiguas, dentro del espectro de estudio, donde su valor de IL sea mayor o igual a 10 dB. Después se escogerá la zona con mayor ancho de banda, y ese valor será el valor del parámetro que se ha introducido como hipotético **factor de calidad** adicional en este estudio, y que se ha llamado como **ABS_{up10}**. De forma orientativa y para terminar de entender su significado se adjunta la siguiente Figura 61, en la que se ha usado como ejemplo el espectro de IL del caso de pantalla con resonador de 150 Hz y 75° de rotación comparado con el caso sin resonador:

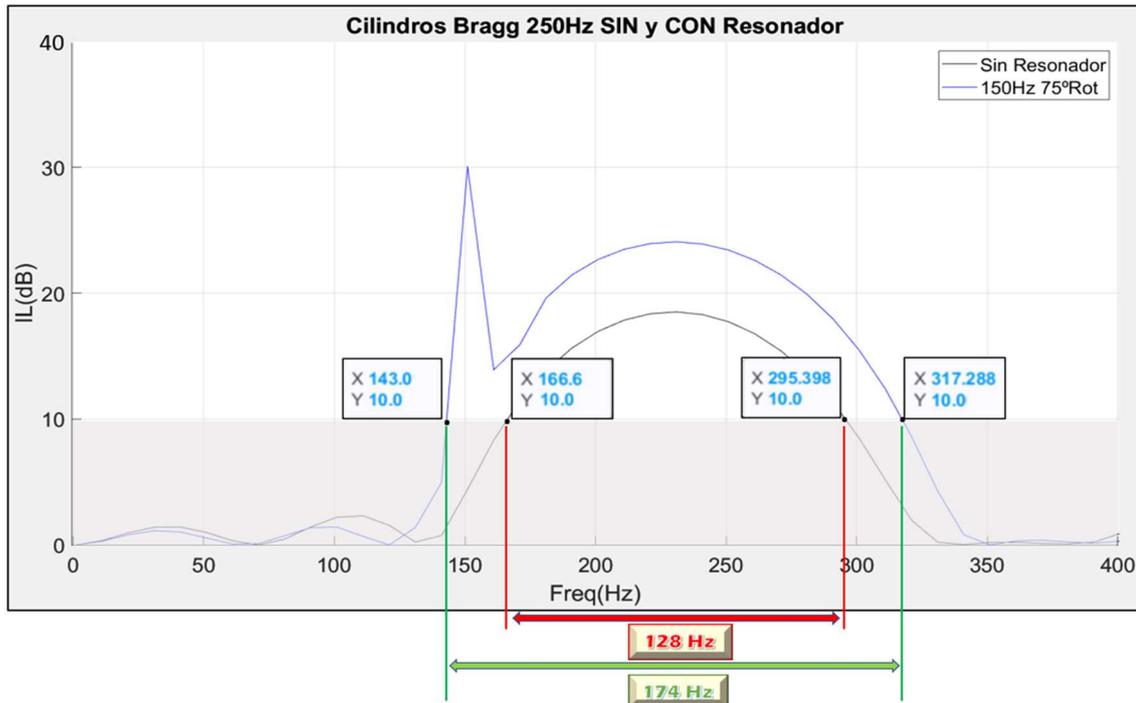


Figura 61 – Esquema que muestra, a partir de los dos espectros de IL, el cálculo del parámetro ABS_{up10}

En la Figura 61 se ha remarcado:

- La franja roja que va de extremo a extremo remarcando los límites de la zona de atenuación del caso sin resonador, en los cuales el nivel de IL permanece mayor o igual a 10 dB
- La franja verde remarca lo propio en el caso con resonador de 150 Hz.

Siendo que la diferencia en Hz de esos respectivos límites son **128 Hz** y **174 Hz**, estos serían sus respectivos valores de ABS_{up10} . De forma que podríamos valorar que el caso con resonador obtiene un porcentaje de **+35,9%** de ancho de banda mayor o igual a 10 dB que el caso sin resonador del que partimos.

4.2.4 Cálculo de ABS_{up10} y resultados

Antes de calcular los valores de ABS_{up10} tendremos en cuenta los siguientes aspectos:

- En las simulaciones de los modelos de pantalla con resonador de **110 Hz** y **130 Hz**, no se logra en ningún caso que el hueco entre las dos zonas de atenuación alcance los 10 dB de IL. Estos dos casos obtienen buenos resultados de atenuación, sobre todo el de 110 Hz, pero esto se debe en gran parte a los altos niveles de IL de sus picos de resonancia, aunque no se mantengan esos niveles en gran parte de su espectro de IL. Por lo tanto, al no conformarse en ningún caso esa zona de atenuación conjunta, **descartamos** estos dos casos para esta parte más en detalle del estudio, dado que el aporte de sus correspondientes valores de ABS_{up10} no sería relevante.
- Asimismo, en las simulaciones del resto de modelos, no aparece ningún caso por debajo de los 50° de rotación en el que el hueco entre las dos zonas de atenuación alcance los 10 dB de IL. Por lo que solo contemplaremos el estudio de los datos de ABS_{up10} para esos modelos y desde los 50° de rotación en adelante.

Por lo tanto, teniendo en cuenta estas premisas iniciales, se procedió a calcular los correspondientes valores de ABS_{up10} , tarea para la cual se implementó un programa en Matlab (Anexo 6.2) que ayudó a realizar la tarea de forma más práctica y, sobre todo, a que los cálculos

fuesen más exactos que midiendo simplemente sobre las gráficas. Los resultados se reflejan en la siguiente Tabla 9:

Rot.		Sin res.	Frecuencias de resonancia del resonador				
			140 Hz	150 Hz	160 Hz	170 Hz	180 Hz
50°	ABsup10 (Hz)	128	124	122	116	158	110
	% pérdida Vs. sin res.		-3.125	-4.688	-8.594	+23.437	-14.063
55°	ABsup10 (Hz)	128	131	129	165	159	112
	% pérdida Vs. sin res.		+2.344	+0.781	+28.906	+24.219	-12.5
60°	ABsup10 (Hz)	128	139	136	168	129	155
	% pérdida Vs. sin res.		+8.594	+6.250	+31.250	+0.781	+21.094
65°	ABsup10 (Hz)	128	144	173	165	158	150
	% pérdida Vs. sin res.		+12.5	+35.156	+28.906	+23.438	+17.188
70°	ABsup10 (Hz)	128	150	175	143	157	148
	% pérdida Vs. sin res.		+17.188	+36.719	+11.719	+22.656	+15.625
75°	ABsup10 (Hz)	128	153	176	166	156	144
	% pérdida Vs. sin res.		+19.531	+37.5	+29.688	+21.875	+12.5
80°	ABsup10 (Hz)	128	157	176	165	155	142
	% pérdida Vs. sin res.		+22.656	+37.5	+28.906	+21.094	+10.938
85°	ABsup10 (Hz)	128	188	178	167	154	141
	% pérdida Vs. sin res.		+46.875	+39.063	+30.469	+20.313	+10.156
90°	ABsup10 (Hz)	128	189	159	166	155	140
	% pérdida Vs. sin res.		+47.656	+24.219	+29.688	+21.094	+9.375
ABsup10 (Hz) TOTAL		1152	1375	1424	1421	1381	1242
% de pérdida Total Vs. sin resonador			+19.358	+23.61	+23.35	+19.878	+10.59

Tabla 9 – Resultados de ABSup10, de todos los espectros de IL de los casos de resonancia entre 140 Hz y 180 Hz, y entre 50° y 90° de giro

Consideraciones iniciales para entender mejor los resultados (así como se hizo en la Tabla 6 de valores de AA):

- I. Para cada ángulo de rotación a partir de 50° se muestra el valor del *ABSUp10* para cada caso de resonador y para el caso sin resonador.
- II. A su vez, se compara cada caso mostrando su correspondiente **% de pérdida de *ABSUp10*** proporcional con respecto al del caso sin resonador. De color azul si el % es positivo (no hay pérdida, hay ganancia) y de color rojo si es negativo (hay pérdida).
- III. Se marcan con 3 tonos de color amarillo los **3 casos con más AA** para cada ángulo de rotación (siendo el de color amarillo más oscuro el caso de mayor *ABSUp10*).
- IV. Al pie de la tabla, y para cada caso de resonador, se muestra la **suma total** del *ABSUp10* obtenido en cada uno de los ángulos de rotación, así como la suma de sus % de pérdida con respecto al caso sin resonador obtenidos para cada caso.

De igual forma que antes y antes de desarrollar más las conclusiones sobre los resultados obtenidos. A continuación, se muestra en la Figura 62 un **diagrama de barras** con los valores de *ABSUp10* totales comparados en cada caso con la suma del *ABSUp10* del caso sin resonador (suma de su único valor, aplicado en todos los ángulos de giro), valor que aparece representado en la

barra de azul más claro de dentro de cada una de las demás barras. Seguido del diagrama se adjunta la Tabla 10 con los correspondientes valores y su % comparativo con respecto al caso sin resonador:

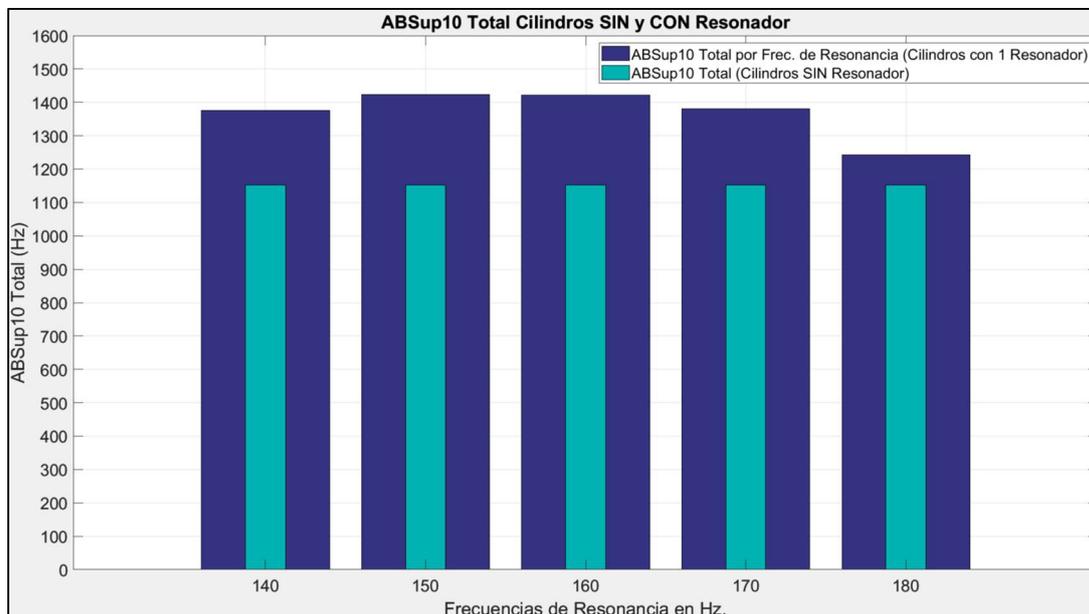


Figura 62 – Diagrama de barras de los valores de ABSUp10 totales para cada caso de resonador, comparado con el caso sin resonador

Modelo	Sin res.	140Hz	150Hz	160Hz	170Hz	180Hz
ABSUp10 (Hz) TOTAL	1152	1375	1424	1421	1381	1242
% de pérdida Total Vs. sin resonador		+19.358	+23.61	+23.35	+19.878	+10.59

Tabla 10 – Valores de ABSUp10 totales para cada caso de resonador y % comparativo

Por lo tanto, en un primer análisis podemos ver que:

- En todos los casos contemplados se produce una **ganancia de ABSUp10** total con respecto al caso sin resonador.
- Las diferencias de ABSUp10 total entre modelos con distinto resonador no varían mucho (a excepción del caso con resonador 180 Hz donde si se aprecia mayor disminución) pero si arrojan resultados **distintos** a los de las AA totales para cada caso. Por lo que a priori si parecen ser de ayuda para profundizar más en las conclusiones, de cara a valorar mejor el aporte de valor de la introducción del giro y los resonadores a nuestro modelo de pantalla.

De igual forma y a continuación, en la Figura 63 se muestran los datos de la Tabla 9 en una gráfica conjunta, donde se representa la evolución de los valores que ha ido tomando el ABSUp10 para cada caso conforme se ha ido avanzando el ángulo de giro, además del caso sin resonador (el cual mantiene el mismo valor de ABSUp10 para todos los ángulos de giro).

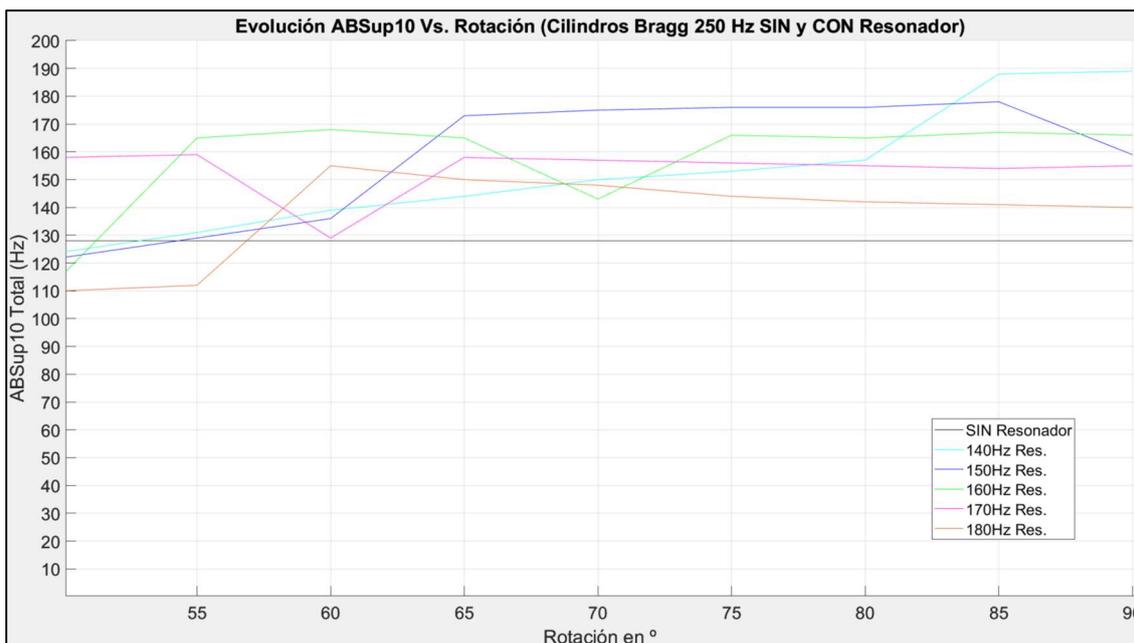


Figura 63 – Evolución *ABSUp10* Vs. giro para todos los casos y giros contemplados

En la Figura 63 se aprecia como existen unos casos cuya tendencia es más lineal y ascendente (aunque con alguna fluctuación), y otros dos con una evolución distinta y parecida:

- Por un lado están los casos de resonador de **140 Hz**, **150 Hz** y **160 Hz**, donde en concreto el caso de 140 Hz tiene una tendencia ascendente de valores de *ABSUp10* sin fluctuación alguna. No obstante, son los casos de 150 Hz y 160 Hz los que acaban teniendo el primer y segundo mayor valor total de *ABSUp10* respectivamente, y a pesar de tener alguna fluctuación durante su evolución de giro, ya que consiguen tener valores **máximos estables** durante mayor rango de rotación (sobre todo el caso de 150 Hz).
- Por otro lado, tenemos los dos casos más próximos a la frecuencia del BG: los de **170 Hz** y **180 Hz**. Donde aproximada y respectivamente a partir de 65° y 60° de rotación experimentan una tendencia descendente, sobre todo el caso de 180 Hz. El caso de 170 Hz, si bien es el tercer mejor caso en niveles totales de *ABSUp10* como ha quedado patente en la Tabla 8, este descenso paulatino le hace terminar el rango de rotaciones por debajo de los otros 3 casos restantes.

Cabe mencionar que, como ha quedado reflejado en las simulaciones del espectro de IL, el descenso de nivel en los casos de 170 Hz y 180 Hz es debido a un efecto de “estrechamiento”. El cual se va produciendo, en estos dos casos de resonador con la frecuencia de resonancia más próxima a la frecuencia de BG, a partir de ciertos ángulos de rotación. A modo ilustrativo se adjuntan las siguientes Figuras 64 y 65.

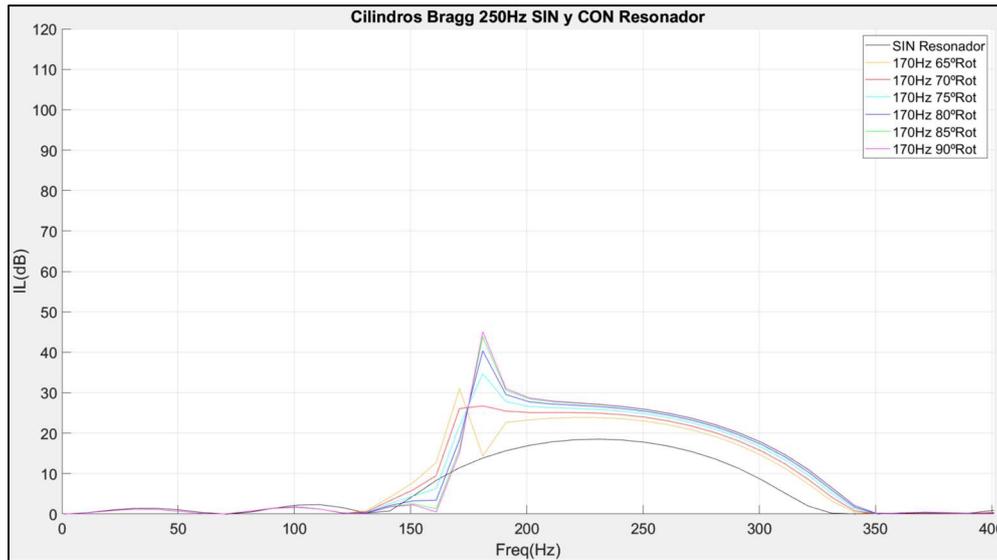


Figura 64 – Espectro de IL del caso de 170Hz en los ángulos de giro donde se produce estrechamiento

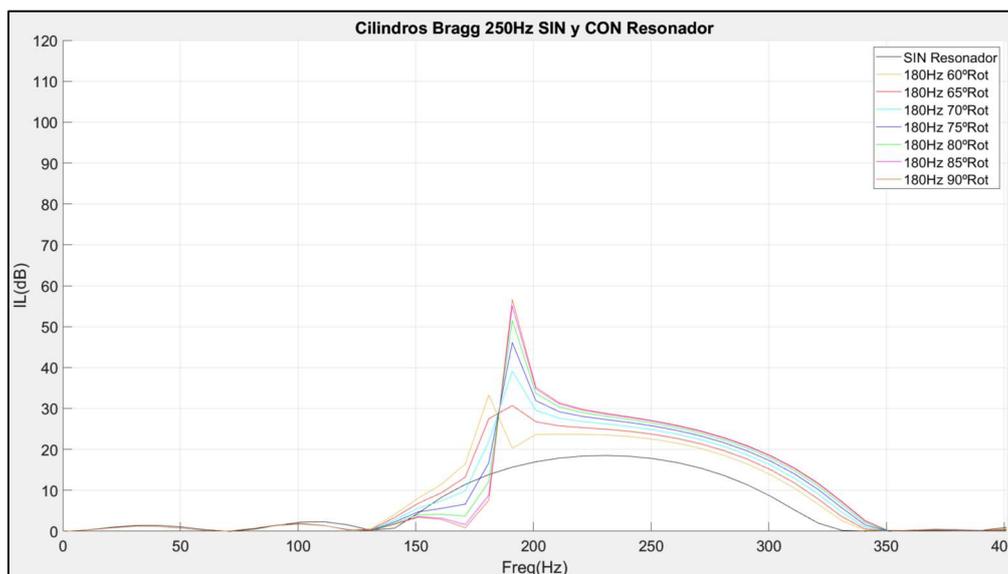


Figura 65 – Espectro de IL del caso de 180Hz en los ángulos de giro donde se produce estrechamiento

En ellas se observa como los respectivos picos de resonancia, llegado un determinado ángulo de rotación, vuelven a aumentar su nivel de IL. Pero esta vez, al aumentar los picos, perjudican a la zona de atenuación del BG por su correspondiente flanco izquierdo. Que es el flanco opuesto al que lo hicieron al comienzo de la rotación (cuando perjudicaron al BG por su correspondiente flanco derecho y más próximo a la frecuencia de BG), perjudicando así la zona de atenuación conjunta al propiciar el hueco entre ambas. Este hecho juega claramente en detrimento del equilibrio: “Ancho de banda zona de atenuación Vs. nivel de atenuación”, perjudicando el nivel de ABS_{Sup10} y a favor del nivel de atenuación máximo que alcanzan los picos.

Este efecto de estrechamiento es más acusado y ocurre en ángulos de rotación más tempranos en el caso de 180 Hz que en el de 170 Hz, como se ha podido observar en la Figura 63, y es el causante de esa disminución de valores de ABS_{Sup10} que se observa. Efecto que, en el resto de los modelos simulados, cuyas frecuencias de resonancia están más alejadas de la frecuencia de BG, no se llega a producir ni hasta llegado el ángulo final de 90° de rotación.

Con todo ello podemos aproximar **3 zonas** distintas más o menos diferenciadas en base a sus valores de *ABSup10*, las cuales se han querido representar en la siguiente Figura 66. En ella las zonas aparecen representadas en 3 tonos de amarillo (amarillo más intenso para mayor nivel de *ABSup10*) sobre el diagrama de barras mostrado anteriormente en la Figura 62. Inmediatamente después, en la Figura 67, aparece la gráfica del espectro de IL del caso sin resonador, con estas zonas marcadas en el lugar del espectro al que hacen referencia.

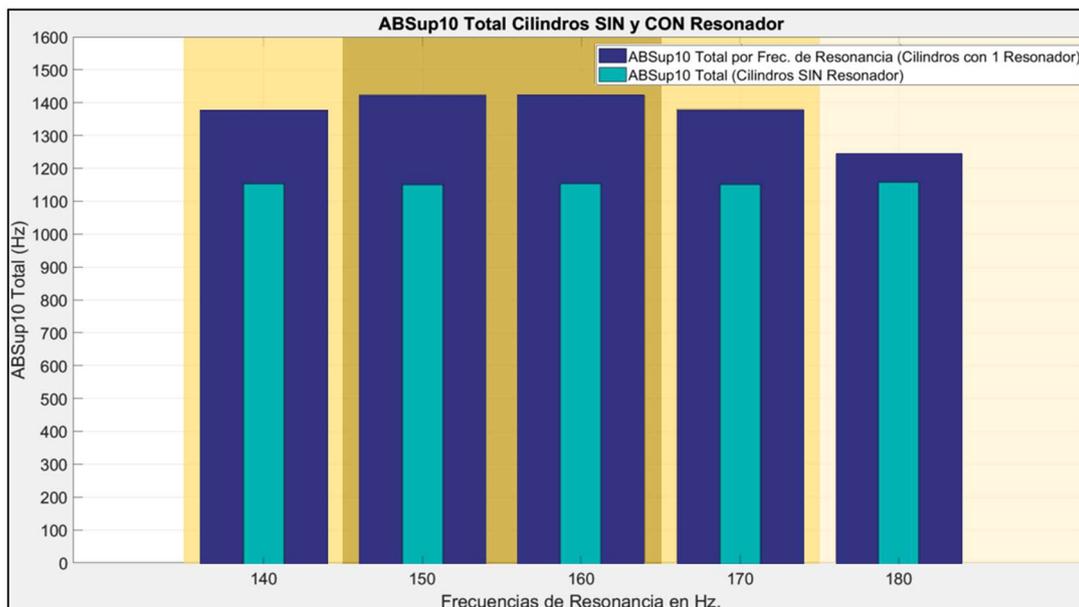


Figura 66 – Representación de zonas por nivel de *ABSup10* en tonos de color amarillo sobre diagrama de barras con los *ABSup10* totales

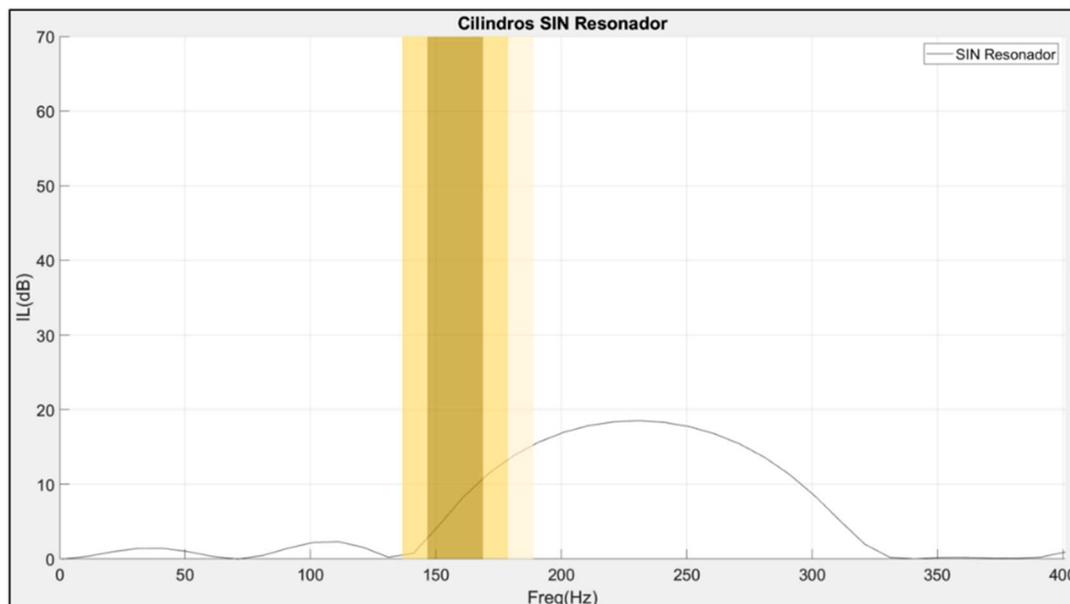


Figura 67 – Mismas zonas por nivel de *ABSup10* en tonos de color amarillo y su lugar en el espectro

Como se puede observar, las zonas serían (de mayor a menor valor):

1. Zona **intermedia** correspondiente a frecuencias de resonancia alrededor de valores de entre **150 Hz. y 160 Hz.**: esta zona intermedia, que representaría a resonadores de este tipo y cuyas frecuencias de resonancia estuviesen centradas aproximadamente entre el **60%** y el **64%** del valor la frecuencia de BG, sería la que obtiene el **mayor valor total de ABS_{up10}** .
2. Zonas **adyacentes** a la zona intermedia, correspondientes a frecuencias de resonancia alrededor de **140 Hz.** y alrededor de **170 Hz.**: estas dos zonas por separado, ubicadas inmediatamente a un lado y a otro de la zona intermedia, y que representarían a resonadores de este tipo y cuyas frecuencias de resonancia estuviesen aproximadamente alrededor del **56%** y del **68%** del valor la frecuencia de BG, serían las que obtienen el **segundo mayor valor total de ABS_{up10}** .
3. Zona **más próxima al BG** y de frecuencias de resonancia alrededor de **180 Hz.**: esta zona más próxima a la frecuencia de BG, y que representaría a resonadores de este tipo y cuyas frecuencias de resonancia estuviesen aproximadamente alrededor del **72%** del valor la frecuencia de BG, sería la que obtiene **menor valor total de ABS_{up10}** .

Por último, en la Figura 68 (de igual forma que antes con los valores del AA) se muestra una representación general de los resultados anteriormente expuestos:

- Arriba a la izquierda: la evolución vista de los valores de ABS_{up10} para cada caso con respecto al ángulo de giro
- Arriba a la derecha: las zonas por nivel de ABS_{up10} mencionadas
- Y a la vez, en la parte inferior, las subzonas por nivel de ABS_{up10} de cada caso simulado en función de sus respectivos **ángulos de giro**. Mostrando estas subzonas delimitadas de forma aproximada por los valores en grados de sus extremos, y esta vez en 3 tonos de amarillo (más intenso para mayor nivel de ABS_{up10})

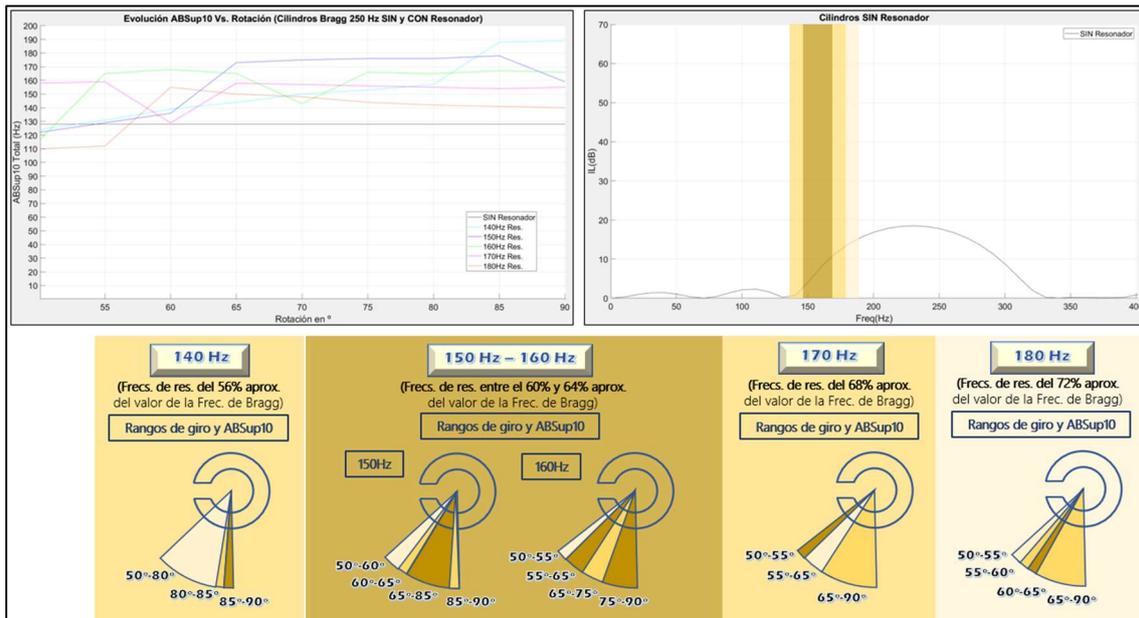


Figura 68 – Zonas de ABS_{up10} en el espectro, evolución ABS_{up10} Vs. rotación, y subzonas de ABS_{up10} por ángulo de rotación para cada resonador

Por lo tanto, y en base a los resultados, podemos concluir que:

- Existe una zona intermedia **muy interesante** de cara a los valores de $ABSup10$, donde existe la posibilidad de conformar una zona de atenuación conjunta que abarque **más rango de espectro** que con las dos zonas de atenuación (pico de resonancia y zona de BG) por separado. Y donde se ofrecen unos valores de atenuación de **cierta calidad**, de como mínimo 10 dB. Los dos modelos de resonador de esta zona (150 Hz y 160 Hz) ofrecen además sus valores más elevados de $ABSup10$ durante la mayor parte de sus respectivos rango de giro.
- Tenemos además las dos zonas adyacentes a esa zona intermedia, donde se ofrecen valores totales de $ABSup10$ muy próximos a los de la zona intermedia. Aunque sus valores máximos solo se ofrezcan en la parte final del rango de rotación (en el caso del modelo con resonador de 140 Hz), o se produzca un efecto de “estrechamiento” que le hace ir perdiendo nivel de $ABSup10$ conforme avanza el giro (como en el caso del modelo con resonador de 170 Hz).
- Y por último tenemos la zona con los peores valores, la más próxima a la zona de BG, aunque si bien es cierto que es capaz de ofrecer niveles superiores de $ABSup10$ que el caso sin resonador y a partir de los 57° de rotación aproximadamente.

4.2.5 Resultados generales

A modo general, podemos estimar que la introducción del resonador y la rotación a nuestro modelo de pantalla de CS nos permite tener una **atenuación mayor** además de una zona de atenuación más “**modulable**” (y no fija), que además de atenuar a ciertas frecuencias prefijadas en su diseño, es capaz de ofrecer zonas de atenuación de calidad y de mayor ancho de banda.

En un intento de aunar todos los resultados y conclusiones obtenidas, y a modo de apoyo visual, en la Figura 69 se muestran a la vez 4 de las figuras más interesantes mostradas: **zonas de atenuación** por nivel de AA en diagrama de barras y en el espectro de IL del caso sin resonador, y **zonas por nivel de $ABSup10$** también en su diagrama de barras y en el mismo espectro de IL:

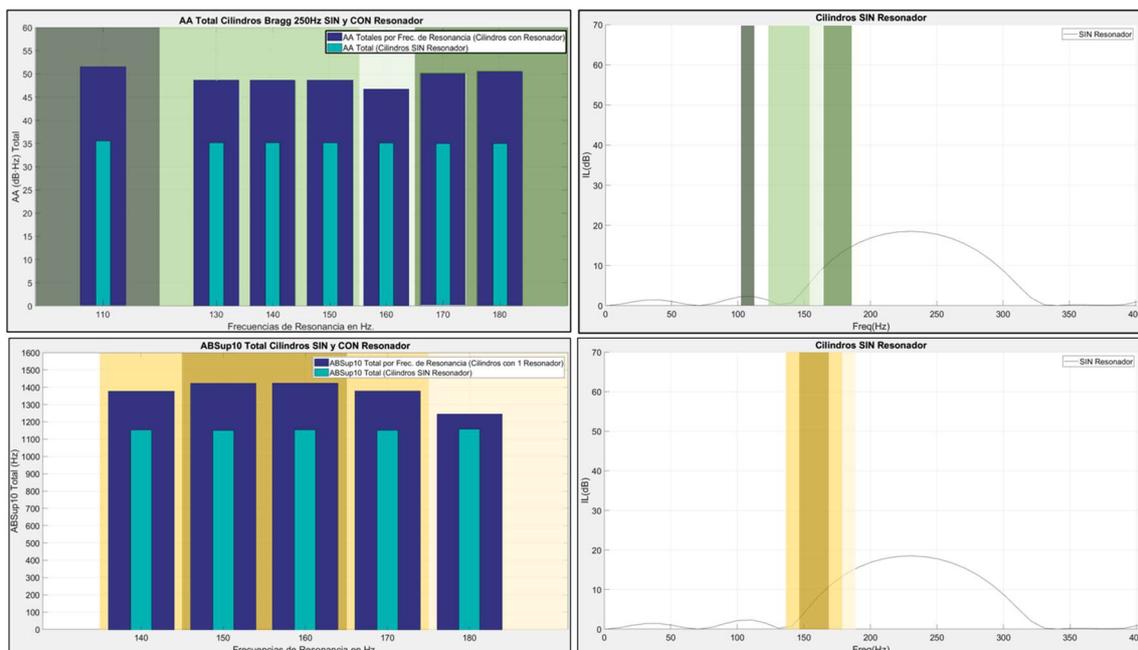


Figura 69 – Valores totales de AA y de $ABSup10$ por tipo de resonador y Zonas de atenuación y $ABSup10$ en el espectro

De forma que, en base a los resultados y haciendo hincapié en la relación AA-*ABS_{Sup10}*, podemos concluir que:

1. El modelo de pantalla de CS con resonador de **150 Hz** es el que ofrece **mejor** relación y equilibrio en cuanto a valores de atenuación y *ABS_{Sup10}*. Los modelos de este tipo de barrera, cuyo resonador tuviese una frecuencia de resonancia de alrededor del **60%** del valor de la frecuencia de BG, obtendrían una zona conjunta de atenuación del mayor ancho de banda posible y durante el mayor rango de grados de rotación (desde 65° a 85°). Rango que **coincide** además con sus mejores niveles de atenuación o IL (Figura 53). Y todo ello acompañado de unos buenos niveles de atenuación totales (pertenece al tercer mejor grupo de AA total). Nos ofrecería por lo tanto la **mejor** solución en términos generales.
2. El modelo de pantalla de CS con resonador de **170 Hz** ofrecería valores algo menores de *ABS_{Sup10}*, pero mayores en cuestión de AA total. Los modelos de este tipo de barrera, cuyo resonador tuviese una frecuencia de resonancia de alrededor del **68%** del valor de la frecuencia de BG, obtendrían unos valores considerables de atenuación (pertenece al segundo mejor grupo de AA total), y ofreciendo unos valores de *ABS_{Sup10}* superiores a los del caso sin resonador en **todo** el rango de giro desde 50° a 90° (como se aprecia en la Figura 68), siendo el único caso que lo consigue para todo el rango de giro contemplado. Y a pesar de que el estrechamiento le va haciendo disminuir esos valores de *ABS_{Sup10}* (aunque sea de forma ligera) y solo a partir de 65° de rotación, nos seguiría ofreciendo la **segunda mejor** solución en términos generales.
3. En este tercer puesto podríamos incluir a los casos de **140 HZ** y **160 Hz**, los cuales representarían a modelos cuyo resonador tuviese una frecuencia de resonancia de alrededor del **56%** o del **64%** respectivamente del valor de la frecuencia de BG:
 - a. El caso de 140 Hz pertenece al tercer mejor grupo de AA total y al segundo mejor de valores totales de *ABS_{Sup10}*, aunque no ofrece sus mejores valores de *ABS_{Sup10}* hasta el último rango de rotación (Figura 68), muy próximo al extremo de 90°.
 - b. Sin embargo, el caso de 160 Hz es el único que pertenece al peor grupo de valores de AA total, pero compensa este hecho ofreciendo casi los mejores niveles totales de *ABS_{Sup10}*, además de ofrecer unos niveles máximos y estables de *ABS_{Sup10}* en gran parte de su rango de grados de rotación (Figura 68). Pero siendo que además, y como se ha comentado, los valores totales de AA de todos los casos son bastante similares y siempre superiores al caso sin resonador, ser el “peor” caso en valores de AA total no sería tampoco algo determinante. Y menos si además en contraposición se ofrece una buena zona de atenuación conjunta y con buen ancho de banda como es su caso.
4. El modelo de pantalla de CS con resonador de frecuencia más próximo a la frecuencia de BG, el de **180 Hz**, es el caso que peores valores de *ABS_{Sup10}* ofrece (el peor de entre los casos analizados, aquellos que consiguen al menos en una ocasión conformar la zona de atenuación conjunta como se especificó). No obstante, los modelos de este tipo de barrera cuyo resonador tuviese una frecuencia de resonancia de alrededor del **72%** del valor de la frecuencia de BG, obtendrían unos valores muy destacables en atenuación total (pertenece al segundo mejor grupo de AA total). Pero es el caso que sufre el estrechamiento más acusado, de ahí sus flojos valores totales de *ABS_{Sup10}*, aunque si bien es cierto, supera al caso sin resonador desde aproximadamente los 57° de rotación. Recaltar asimismo que se ha desechado la opción de experimentar con frecuencias de resonancia más cercanas (190Hz o más), dado que se ha considerado que ha quedado demostrada la tendencia que se sigue al acercarnos demasiado a la frecuencia de BG.
5. En el último lugar damos cabida a las conclusiones extraídas con los casos más alejados de la frecuencia de BG, los de **130 Hz** y **110 Hz** de resonancia. Los cuales representarían a modelos cuyo resonador tuviese una frecuencia de resonancia de alrededor del **52%** o del **44%** (o menos) respectivamente del valor de la frecuencia de BG.



Estos modelos de resonador no han conseguido en ningún caso llegar a conformar esa zona de atenuación conjunta (por lo que han quedado fuera del estudio más en detalle de los valores de ABS_{up10}), además de las fluctuaciones en sus valores de atenuación con la evolución de la rotación, sobre todo el caso de 110 Hz (Figura 53). Aunque el hecho de ofrecer buenos niveles de atenuación total (sobre todo el caso de 110 Hz que ofrece el valor total más alto de AA), hace que puedan igualmente ser tenidos en cuenta para si, por ejemplo, deseáramos atenuar a la vez en dos zonas del espectro claramente diferenciadas.

Capítulo 5. Conclusiones

Como se ha comentado en los objetivos, este trabajo se ha servido de conceptos relacionados con la Acústica Aplicada y Ambiental, impartidos en la titulación del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, además de los relacionados con pantallas acústicas de CS de segunda generación.

Partiendo de la comparativa con las pantallas acústicas tradicionales, se ha profundizado en las capacidades distintas que ofrecen estas pantallas de CS para atenuar sobre todo el ruido de bajas frecuencias. Valiéndose de un software de uso extendido entre la comunidad científica internacional como “COMSOL Multiphysics” y la utilización del Método de Elementos Finitos, se han simulado una serie de modelos de barrera acústica con CS y dispersores con distintos tipos de resonadores, cada uno con una frecuencia de resonancia distinta.

Se han analizado sus efectos de atenuación mediante los espectros de IL que se han obtenido, y se han tratado los datos gracias a conocimientos de programación y funciones de la herramienta Matlab, obteniendo distintos valores de AA.

Con todo ello, se ha podido profundizar más, incorporando también el mecanismo del giro de los dispersores. Y en base a los resultados que se obtenían (y siempre teniendo como premisa los objetivos expuestos), se han ido realizando las modificaciones oportunas en los diseños obteniendo así múltiples simulaciones adicionales de espectros de IL y sus correspondientes valores de AA. Se han representado estos valores de forma ordenada en tablas acompañados de su correspondiente % proporcional de ganancia con respecto a los mismos modelos de pantalla de CS sin resonadores, exponiendo claramente su aumento de atenuación generalizado para cada caso. Se han representado gráficas conjuntas con los valores totales de las AA de cada caso, así como comparativas de la evolución de los valores de AA con respecto al giro para todos los casos de resonador, pudiendo así comparar más en detalle el comportamiento de cada uno y aclarando un poco más cuales son los casos con mayor potencial de atenuación (en niveles de AA) y en que rangos de giro. Pudiendo a la vez distinguir distintas zonas de atenuación en el espectro en base a las frecuencias de resonancia de sus resonadores.

Y ya en la parte final, se ha intentado profundizar más en los resultados, cuantificando el ancho de banda continuo de las **áreas de atenuación conjuntas** que tienen capacidad para ofrecer una buena atenuación en términos generales (igual o mayor a 10 dB). Capacidad que se ha parametrizado con la introducción del parámetro llamado **ABS_{Sup10}**.

En resumen, se han presentado modelos 2D para el diseño parametrizable de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación, en el objetivo de estudiar y potenciar el efecto del primer Band Gap para atenuar el espectro de bajas frecuencias. Se han presentado resultados que pueden orientar a la hora de seleccionar un **tipo de resonador u otro**, así como **unos rangos de giro u otros** en base a **nuestras necesidades de atenuación**. Y se ha introducido un nuevo parámetro de medición del ancho de banda continuo que ofrece buenos niveles de atenuación (**ABS_{Sup10}**), mediante el cual se pretende dar una Herramienta adicional de contrastación del comportamiento de estas pantallas. Parámetro que puede ser de utilidad a la hora de aprovechar el carácter sintonizable de este tipo de barreras, ya que podría resultar orientativo a la hora de seleccionar y cuantificar unas soluciones de diseño u otras, siempre en base a nuestros requerimientos de atenuación. El resultado de este trabajo y en concreto, este parámetro será presentado como ponencia en la próxima edición del congreso TECNIACUSTICA 2024.

Y para finalizar mencionar que se han ofrecido modelos 2D de alternativas de diseños que, en la franja de espectro estudiado, **superan** el nivel de atenuación de las pantallas tradicionales y de las pantallas de CS de primera generación (sin resonadores), así como también el ancho de banda de sus zonas de atenuación. Y todo ello teniendo que diseñar una sola cavidad resonante por dispersor, añadiendo únicamente el mecanismo del giro, y focalizando la atenuación en aquella



franja del espectro donde las pantallas acústicas tradicionales son menos efectivas como es la franja de las bajas frecuencias.

5.1.1 Propuesta final de trabajo futuro

Como propuesta de trabajo futuro se propone ir profundizando con más detalle en los parámetros de diseño de estas pantallas, para satisfacer de forma más precisa las necesidades de atenuación de cada caso. Por ejemplo: seguir profundizando más al detalle en el aspecto del giro, variando la morfología de los dispersores de forma que sea más fácil añadir un segundo resonador de mayor tamaño (para que actúe también en bajas frecuencias), y así, intentar conformar “zonas de atenuación conjuntas” también desde el otro flanco del primer BG (en su zona más alta de frecuencias). Y también a la vez (haciendo uso de un mayor coste computacional) extrapolar todo ello al análisis 3D de los diseños.

Capítulo 6. Anexos

6.1 Programa para calcular el AA

Una vez tenemos los vectores con los valores de los espectros de IL importados de COMSOL, debemos de realizar un arreglo a los mismos antes de calcular su correspondiente valor de AA. Este arreglo consiste en dejar los posibles valores negativos a cero, dejando igual los positivos. De forma que podamos calcular mediante la función *trapz* de Matlab, el valor del área encerrada por la gráfica que representarían estos valores positivos y el eje de abscisas. A continuación, un ejemplo de cómo se ha procedido en Matlab para ello:

```
%Creamos el vector "A" a partir del vector de frecuencias F1 importado de
%COMSOL
A=F1;

%Creamos el resto de vectores a partir de los demás vectores que contienen
%los valores de los espectros de IL que hemos importado de COMSOL (de los
%que deseamos calcular el AA)
B=CilindrosSINresonador;
C=CilindrosBragg250CONresonador15060Grados;

%Creamos la variable "n" de igual tamaño que el vector de frecuencias A, el
%cual nos servirá de límite para el contador del bucle
n=max(size(A));

%Creamos vectores auxiliares con ceros con el mismo número de elementos que
%"n"
F=zeros(1,n);
PB=zeros(1,n);
PC=zeros(1,n);

%Comenzamos el bucle, el cual rellenará de ceros todos aquellos niveles
%negativos que puedan tener los vectores que contienen los valores de IL.
%Sin variar los valores positivos, y dejando el vector F con los valores del
%vector de frecuencias A
for i=1:n

    if B(i)>=0
        PB(i)=B(i);
        F(i)=A(i);
    else
        PB(i)=0;
        F(i)=A(i);
    end
end

for i=1:n

    if C(i)>=0
        PC(i)=C(i);
    else
        PC(i)=0;
    end
end
```

```
%Por último, y mediante la función “trapz” de Matlab, que calcula la
%integración numérica trapezoidal de una función (y por lo tanto el valor de
%su área encerrada), calculamos el valor de las correspondientes AA de las
%funciones que representan los respectivos vectores con valores positivos de
%IL para cada valor de frecuencia. En nuestro caso PB y PC con respecto a F
AREAB=trapz(F,PB)
AREAC=trapz(F,PC)
```

6.2 Programa para calcular el valor del ABSup10

Antes de nada, si deseáramos ampliar precisión, podemos crear un vector con los valores necesarios e interpolar el vector de IL en esos valores:

```
% Creamos vector con los valores necesarios, en este caso de 0 a 400
xi = 1:0.1:41;

%Interpolamos el vector de valores v, el cual contiene los valores de IL,
para todos los valores de xi
vi = interp1(v,xi);

%Si lo deseamos, representamos el resultado en una gráfica, comparando el
valor inicial y los interpolados
plot((1:41),v,'o',xi,vi,'*');
legend('Valores iniciales','Valores interpolados');
```

6.2.1 Programa para calcular ABSup10 a partir del vector de valores de IL

Recorremos el vector de valores de IL buscando aquellas **zonas** de elementos contiguos donde $IL \geq 10$.

Vamos contabilizando el número de aquellos elementos contiguos donde $IL \geq 10$ y quedándonos con el mayor de todos los valores contabilizados. Ese valor **mayor** de elementos contiguos donde $IL \geq 10$, que en realidad son las **zonas** de atenuación que queremos medir, será el valor en Hz del *ABSup10* del correspondiente espectro de IL.

```
%Creamos la variable “ni” de igual tamaño que el vector “v”, el cual contiene
%los valores del IL, y que nos servirá de límite para el contador del bucle
ni=max(size(v));
```

```
%Creamos dos variables auxiliares A y B inicializadas a cero
```

```
A=0;
B=0;
```

```
%Si el primer valor de v es mayor o igual que 10 aumentamos en 1 el valor de
%B, y si no lo es, continuamos el bucle sin variar el valor de B
```

```
for i=1:ni
```

```
    if ((i==1) && (v(i)>=10))
        B=B+1;
```

```
    elseif ((i==1) && (v(i)<10))
        B=B;
```

```
%Seguimos recorriendo el vector v:
```

```
%para elementos de v donde  $IL \geq 10$  y que no representan el fin de una zona de
%elementos contiguos donde  $IL \geq 10$ , aumentamos en 1 el valor de B
```



```
elseif ((i<ni) && (((v(i-1)<10) && (v(i)>=10)) | (((v(i-1)>=10) &&
(v(i)>=10))))))
    B=B+1;

%Para elementos de v donde IL<10, y que representan el fin de una zona de
%elementos contiguos donde IL>=10, volcamos el valor de B en A (siempre que
%A sea menor que B) e inicializamos el valor de B a cero
elseif ((i<ni) && ((v(i-1)>=10) && (v(i)<10)))
    if (B>A)
        A=B
        B=0;
    else
        B=0;
    end
end
%Para el elemento final de v:
%realizamos la misma comprobación que antes a no ser que no se haya comenzado
%una nueva zona de atenuación desde la última. O lo que es lo mismo, a no ser
%que los dos últimos elementos como mínimo, tengan un valor de IL<10
elseif ((i==ni) && (((v(i-1)<10) && (v(i)>=10)) | ((v(i-1)>=10) &&
(v(i)>=10)) | ((v(i-1)>=10) && (v(i)<10))))))
    if (B>A)
        A=B;
    end
end

%Salida del bucle, sin variar ningún valor de B ni de A
else B=B;

end

end
```

Al final **A** contendrá el mayor valor calculado de elementos contiguos de **v** con **IL**>=10, o lo que es lo mismo, el valor del *ABS_{sup10}*

6.3 Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030

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

Uno de los principales aportes de las pantallas basadas en CS es claramente la mejora de la **salud y bienestar** de las personas, las cuales ven mejorada su calidad de vida al no estar expuestas al problema del ruido, muchas veces de forma constante durante su vida cotidiana al vivir cerca de la fuente sonora (carretera, polígono industrial...), y por lo tanto disminuir los efectos adversos para su salud mencionados en este trabajo. Este efecto se ve también extrapolado a la **vida de ecosistemas terrestres** pues también supone un gran problema para diversas especies como por ejemplo las aves.

Estas pantallas suponen un avance en lo que respecta a **Industria, innovación e infraestructuras** al tratarse de una industria más moderna que el resto de las pantallas acústicas, donde se sigue trabajando en medidas innovadoras, las cuales dan ese impulso a la Industria que lleva a cabo todas estas infraestructuras.

Su característica de conllevar menos necesidades de cimentación y anclaje, unido a su permeabilidad, repercute en que por norma general sea necesario utilizar menos recursos materiales para construirlas, así como menores labores de trabajo de obra. Esto unido a su carácter más “portable”, que hace que sean potencialmente más reutilizables que el resto de las pantallas acústicas tradicionales, las hace ayudar en cierta medida a crear **ciudades y comunidades sostenibles**, impactando por lo tanto también en cierta medida en reducir la contaminación, por



ejemplo, en forma de gases, que se genera al realizar un proyecto de obra de una barrera con respecto a la que se crea en un proyecto de obra de una pantalla de sonido de CS.

Y por último y en menor medida, pero no por ello deja de ser cierto, está el factor de **reducción de las desigualdades** ya que generalmente la gente con menos capacidad económica no puede acceder a, por ejemplo, viviendas residenciales donde habitualmente existen menores problemas de ruido, y los lugares en los núcleos urbanos donde pueden vivir carecen muchas veces de ciertas medidas en la línea medioambiental, como si ocurre con la mayoría de las viviendas de nueva promoción. Hablamos de barrios y/o edificios aglutinados cerca de carreteras y/o vías rápidas en la periferia de grandes ciudades, por ejemplo, o con pocas medidas de aislamiento, como por ejemplo en cristales de calidad y grosor etc. En esa línea sí que estas pantallas, por la acción que ejercen, colaboran en cierta medida a mejorar la vida de esta gente más desfavorecida.



Capítulo 7. Abreviaturas

- a – Parámetro de red
- AA - Área de atenuación
- BG - Banda prohibida de transmisión (Band Gap, en inglés)
- CS – Cristal de sonido
- dB - Decibelios
- ff – Factor de llenado
- HR – Resonador de Helmholtz
- IL – Pérdidas por Inserción (Insertion Loss, en inglés)
- MEF – Método de los Elementos Finitos
- N – Número de Fresnel
- ODS – Objetivos de Desarrollo Sostenible
- OMS – Organización Mundial de la Salud
- OPI – Onda plana incidente
- Pa – Pascales
- ROP – Radiación de Onda Plana
- SEA – Sociedad Española de Acústica
- 2D – Dos dimensiones
- 3D – Tres dimensiones

Capítulo 8. Bibliografía

- [1] H. J. Jariwala, «Noise pollution & human health: a review,» Indoor Built Environ, pp. 1-4, 2017.
- [2] European Environment Agency Report N° 22/2019, «Environmental noise in Europe - 2020».
- [3] Pedrero González, A. (presidente de la SEA), «Día Internacional sin Ruido 2021,» de Sociedad Española de Acústica.
- [4] D. García Boscá, J.A Martínez Mora, «Estudio acústico generado por el tráfico de la población de L'Olleria,» Universidad Politécnica de Gandía 2010.
- [5] 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).
- [6] 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.
- [7] S. Castiñeira-Ibáñez, J. V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, L. M. García-Raffi y V. RomeroGarcía, «Pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de segunda generación,» Tecnicacústica Cáceres (2011).
- [8] S. Castiñeira-Ibáñez, C. Rubio, J. V. Sánchez-Pérez, V. Romero-García y L. M. GarcíaRaffi, «Design, Manufacture and Characterization of an Acoustic Barrier Made of MultiPhenomena Cylindrical Scatterers Arranged in a Fractal-Based Geometry,» Archives of Acoustics Vol. 37, No. 4, pp. 455–462 (2012).
- [9] Grupo de trabajo GT – 116 del Comité de Normativa de ADIF, «ET 03.305.010.5 - Especificaciones de Pantallas Acústicas», Julio 2020.
- [10] Bravo Plano-Sala, J. M. “Apuntes de Acústica Ambiental”, 2018.
- [11] Maekawa, Z., “Noise reduction by screens”. Applied Acoustics. N° 1, pp. 157-173. 1968.
- [12] Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J.V. and Garcia-Raffi L. M., Periodic systems as road traffic noise reducing devices: prototype and standardization, Environmental Engineering and Management Journal, 14 (12) 2759-2769, Rumanía, 2015.
- [13] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez, V. Gómez, J. Llinares y F. Meseguer, «Sound Attenuation by Sculpture» Nature, n° 378, 241, 1995.
- [14] 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).
- [15] Kinsler L.E.; Frey A. R., Coppens A. B.; and Sanders J.V., «Fundamentals of acoustics» 3rd Edn. Ed. Wiley, Nueva York, 1982.
- [16] Hu X. and Chan C., «Two-dimensional sonic crystals with Helmholtz resonators», Physical Review E, 71, 055601R, 2005.
- [17] Houcque, D., “Introduction to MATLAB for engineering students”, 2005.
- [18] Calton M. F.; Sommerfeldt S. D., «Modeling acoustic resonators: From theory to application», Inter.noise, San Francisco, 2015.



- [19] 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.
- [20] COMSOL Multiphysics 5.5, «Acoustics Module User's Guide,» 2019.
- [21] P. Kogan y J. Arenas, «Medición de la atenuación producida por una barrera acústica mediante un modelo a escala», Seminario Panamericano Vial Ambiental, U. Austral de Chile 2003.
- [22] C. Hinojosa, «Modelos de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido, empresa BECSA», Blog www.tecnocarreteras.es.
- [23] INECO - «Estudio Informativo. Variante de la Autovía A-1, Tramo: Enlace Autopista Eje Aeropuerto (M-12) y Autopista R-2 – Variante de El Molar».
- [24] J. González Arias, «Proyecto de Construcción de Pantalla Acústica, carretera CL-510 – Santa Marta de Tormes (Salamanca)», Junio 2017.
- [25] C. García Quintero, «Estudio de pantallas acústicas in situ», Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Gandía, Septiembre 2003.
- [26] Münzel, T., Gori, T., Babisch, W., & Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European heart journal*, 35(13), 829-836.