



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Diseño e implementación de una caja y un crossover  
pasivo para un altavoz de dos vías

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e  
Imagen

AUTOR/A: Moreno Fita, Sara

Tutor/a: Canet Subiela, María José

Cotutor/a: Rodríguez Vercher, Juan Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## Resumen

En el siguiente trabajo de fin de grado se ha llevado a cabo el diseño y construcción de una caja acústica y un *crossover* pasivo, basados en el análisis de dos altavoces utilizados en proyectos anteriores. Para el diseño de la caja acústica se han tenido en cuenta los parámetros de Thiele-Small del altavoz de baja frecuencia y se ha determinado el tipo de caja, volumen y dimensiones necesarias. Una vez realizado el diseño, se ha construido la caja acústica.

El diseño del *crossover* se ha realizado a partir del análisis de la respuesta en frecuencia de los altavoces, estableciendo la frecuencia de corte. Se ha diseñado un *crossover* de dos vías pasivo de segundo orden y se ha comparado el coste de su implementación con el coste de un *crossover* comercial con una frecuencia de corte similar. Finalmente, se ha decidido utilizar una alternativa comercial para el *crossover* debido a su menor coste y tiempo de desarrollo.

Tras adquirir el *crossover*, se ha llevado a cabo un proceso de prueba para verificar su correcto funcionamiento. Posteriormente, se han colocado tanto el *crossover* como los altavoces dentro de la caja acústica para realizar una prueba final del conjunto y medir la directividad y la respuesta en frecuencia del conjunto.

**Palabras clave:** *Crossover*, Filtros pasivos, Caja acústica, *Woofers*, *Tweeters*

## Abstract

In the following final degree project, the design and construction of an acoustic box and a passive *crossover* have been carried out, based on the analysis of two speakers used in previous projects. For the design of the acoustic box, the Thiele-Small parameters of the low frequency loudspeaker have been considered and the type of box, volume and necessary dimensions have been determined. Once the design has been made, the acoustic box has been built.

The *crossover* design has been made from the analysis of the frequency response of the loudspeakers, establishing the cutoff frequency. A second order passive two-way *crossover* has been designed and the cost of its implementation has been compared with the cost of a commercial *crossover* with a similar *crossover* frequency. Finally, it has been decided to use a commercial alternative for the *crossover* due to its lower cost and development time.

After purchasing the *crossover*, a test process has been carried out to verify its correct operation. Subsequently, both the *crossover* and the speakers have been placed inside the loudspeaker to perform a final test of the set and measure the directivity and frequency response of the set.

**Key words:** *Crossover*, Passive filters, Acoustic enclosure, *Woofers*, *Tweeters*

## Contenido

1. Introducción .....	6
2. Relación del proyecto con los objetivos de desarrollo sostenible .....	7
3. Altavoces .....	8
3.1 Introducción .....	8
3.2 Caracterización del <i>woofer</i> .....	11
3.2.1 Obtención de las características del <i>woofer</i> .....	12
3.3 Caracterización del <i>tweeter</i> .....	18
3.3.1 Obtención de las características del <i>tweeter</i> .....	19
4. Elección del <i>crossover</i> .....	21
4.1 Introducción .....	21
4.2 Elección de la frecuencia de cruce .....	22
4.3 Diseño del <i>crossover</i> .....	23
4.3.1 Diseño del filtro paso bajo .....	23
4.3.2 Diseño del filtro paso alto .....	25
4.3.3 Diseño del <i>crossover</i> a partir de los dos filtros .....	26
4.4 Simulaciones del <i>crossover</i> .....	27
4.4.1 Simulación del <i>crossover</i> con los valores ideales .....	27
4.4.2 Simulación del <i>crossover</i> con los valores de la serie E24 .....	29
4.4.3 Simulación en MATLAB del resultado con <i>crossover</i> .....	31
4.5 Elección del <i>crossover</i> .....	31
4.6 Test del <i>crossover</i> .....	33
5. Diseño y construcción de la caja .....	35
5.1 Diseño de la caja .....	35
5.1.1 Elección del tipo de caja .....	35
5.1.2 Determinación del volumen de la caja .....	36
5.2.3 Volumen de aire que ocupan los transductores y el <i>crossover</i> dentro de la caja .....	37
5.2.4 Cálculo de las dimensiones de la caja .....	40
5.3 Construcción de la caja .....	41
5.3.1 Proceso de construcción de la caja .....	41
5.4 Elección del material absorbente .....	42
5.4.1 Medida de la respuesta en frecuencia para escoger absorbente .....	43
5.4.2 Medida de la curva de impedancia con cada absorbente .....	44
6. Test del sistema completo .....	45

6.2 Verificación del conjunto .....	45
6.2.1 Medida de la respuesta en frecuencia del sistema con diferentes resistencias.....	46
6.2.2 Medida de la respuesta en frecuencia del conjunto completo .....	47
6.2.2 Medida de la directividad del conjunto .....	48
7. Conclusiones.....	49
Bibliografía .....	50
Anexos.....	51
Anexo 1: Dimensiones de la caja.....	51
Anexo 2: Presupuesto .....	52
Anexo 3: Hoja técnica <i>woofer</i> .....	53
Anexo 4: Hoja técnica <i>tweeter</i> .....	55

## Listado de ilustraciones

Ilustración 1: Diagrama de bloques.....	6
Ilustración 2: Respuesta en frecuencia del monitor de estudio HS8/HS8I de Yamaha [3] .....	9
Ilustración 3: Directividad de un altavoz en diferentes frecuencias [4].....	10
Ilustración 4: Woofer MHB8 McGee .....	11
Ilustración 5: Conexión realizado para obtener la curva de impedancia.....	12
Ilustración 6: Conexión entre la interfaz de audio y el woofer .....	13
Ilustración 7: Curva de impedancia del woofer .....	13
Ilustración 8: Método de la masa añadida .....	14
Ilustración 9: Curvas de impedancia obtenidas .....	15
Ilustración 10: Respuesta en frecuencia del woofer a 1W a 1m de distancia .....	17
Ilustración 11: Tweeter 35109 ELECTRO DH .....	18
Ilustración 12: Curva de impedancia del tweeter .....	19
Ilustración 13: Respuesta en frecuencia del tweeter a 1W a 1m de distancia .....	20
Ilustración 14: Respuesta en frecuencia del tweeter y woofer .....	22
Ilustración 15: Circuito del prototipo del filtro paso bajo de Butterworth de orden 2 ...	23
Ilustración 16: Valores normalizados del prototipo del filtro paso bajo de Butterworth.....	23
Ilustración 17: Circuito del filtro paso bajo diseñado .....	24
Ilustración 18: Circuito del prototipo del filtro pasivo paso alto de Butterworth de orden 2....	25
Ilustración 19: Circuito del filtro paso alto diseñado .....	26
Ilustración 20: Circuito del <i>crossover</i> realizado con LTspice.....	26
Ilustración 21: Simulación del filtro paso bajo .....	27
Ilustración 22: Simulación del filtro paso alto.....	28
Ilustración 23: Simulación del <i>crossover</i> con los valores ideales.....	28
Ilustración 24: Simulación del filtro paso bajo con los valores de la serie E24.....	29
Ilustración 25: Simulación del filtro paso bajo con los valores de la serie E24 con dos bobinas en serie.....	29
Ilustración 26: Simulación del filtro paso bajo con los valores de la serie E24.....	30
Ilustración 27: Simulación del <i>crossover</i> con los valores de la serie E24.....	30
Ilustración 28: Estimación del resultado final simulando <i>crossover</i> .....	31
Ilustración 29: <i>Crossover</i> modelo 500007002 Neyoann.....	32
Ilustración 30: Conexión realizado para llevar a cabo la verificación del <i>crossover</i> .....	33
Ilustración 31: Respuesta en frecuencia medida del <i>crossover</i> .....	34
Ilustración 32: Respuesta en frecuencia medida del <i>crossover</i> con la resistencia de $8.2\Omega$ .....	34
Ilustración 33: Simulación de caja cerrada y bass reflex.....	35
Ilustración 34: Simulación de la respuesta en frecuencia de la caja cerrada con diferentes volúmenes .....	36
Ilustración 35: Dimensiones del woofer.....	38
Ilustración 36: Dimensiones del tweeter .....	38
Ilustración 37: Dimensiones del <i>crossover</i> .....	39
Ilustración 38: Caras del altavoz.....	41
Ilustración 39: Estructura de la caja .....	41
Ilustración 40: Prototipo final .....	42
Ilustración 41: Materiales absorbentes comparados.....	42
Ilustración 42: Resultados de las medidas de la respuesta en frecuencia con los absorbentes. 43	

Ilustración 43: Medida de la curva de impedancia para comprobar el efecto del material absorbente .....	44
Ilustración 44: Resultados de las medidas de la curva de impedancia con los absorbentes.....	44
Ilustración 45: Distribución del sonómetro y el altavoz dentro de la cámara anecoica .....	45
Ilustración 46: Respuesta en frecuencia con varias resistencias .....	46
Ilustración 47: Respuesta en frecuencia final del conjunto .....	47
Ilustración 48: Diagrama polar de directividad de 125Hz a 4kHz .....	48

## Listado de tablas

Tabla 1: Parametros de Thiele-Small obtenidos .....	15
Tabla 2: Valores del filtro prototipo paso bajo de orden 2.....	24
Tabla 3: Transformación filtro paso bajo-paso alto .....	25
Tabla 4: Valores de los componentes del filtro paso bajo .....	27
Tabla 5: Valores de los componentes del filtro paso alto .....	27
Tabla 6: Componentes pasivos disponibles en el mercado .....	31
Tabla 7: Características de los crossovers preseleccionados .....	32
Tabla 8: Frecuencias obtenidas de la simulación de la caja cerrada con diferentes volúmenes	36
Tabla 9: Volúmenes de los componentes .....	39

## Listado de acrónimos

LPF: Low Pass Filter – Filtro Paso Bajo

HPF: High Pass Filter – Filtro Paso Alto

SPL: Sound Pressure Level – Nivel de Presión Sonora

DM: Medium Density – Densidad Media

DC: Direct Current – Corriente Continua

PCB: Printed Circuit Board – Placa de Circuito Impreso

RMS: Root Mean Square – Media cuadrática

## 1. Introducción

Este trabajo se enfoca en el diseño e implementación de una caja y un *crossover* pasivo para un altavoz de dos vías, aprovechando la disponibilidad de un *woofer* y un *tweeter* tras la finalización de un proyecto previo. El objetivo principal del proyecto es diseñar un sistema, para lo cual es necesario estudiar el comportamiento de cada uno de sus componentes.

La metodología utilizada en este proyecto se divide en siete etapas que abarcan desde la caracterización de los altavoces hasta el testeo del sistema completo en la cámara anecoica. En la primera fase, se utiliza el software LIMP para obtener los parámetros de Thiele-Small del *woofer* y las curvas de impedancia de ambos altavoces. Posteriormente, se obtiene la respuesta en frecuencia de los altavoces en la cámara anecoica, utilizando un sonómetro, una etapa de potencia y un generador de señal. Tras la caracterización de los altavoces, se diseñan los filtros pasivos que formarán el *crossover* y se realiza la simulación mediante PSPICE. El diseño de la caja acústica se hace utilizando el software WinISD, y se procede a construir la caja a partir de un tablón de madera DM. Finalmente, se implantan conectores banana hembra en la parte trasera de la caja para testear el sistema completo en la cámara anecoica.

En la Ilustración 1 se muestra el diagrama del sistema que se obtendrá tras el diseño e implementación del *crossover* y la caja acústica.

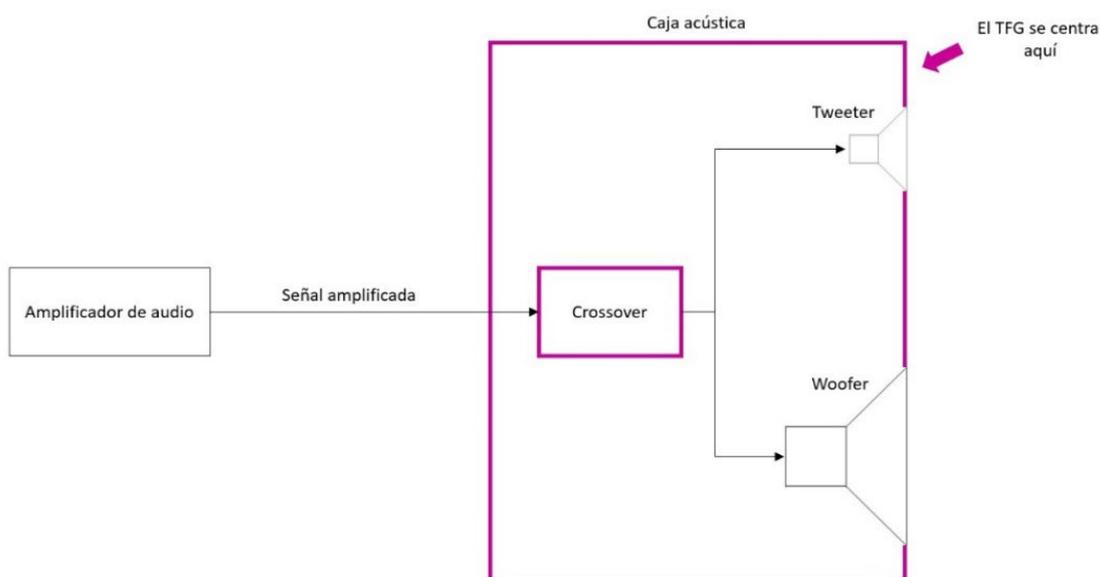


Ilustración 1: Diagrama de bloques

A continuación, se detalla cómo se ha estructurado el resto de la memoria. En el capítulo 2, se aborda la relación entre este Trabajo de Fin de Grado (TFG) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El capítulo 3 se dedica a describir y caracterizar los altavoces utilizados en el proyecto. El capítulo 4 se enfoca en el diseño, selección y pruebas del *crossover*. En el capítulo 5 se detalla el proceso de diseño y construcción de la caja acústica, así como el estudio del material absorbente empleado. El capítulo 6 se centra en las pruebas del sistema completo y las mediciones finales realizadas. Finalmente, las conclusiones del proyecto se presentan en el capítulo 7.

## 2. Relación del proyecto con los objetivos de desarrollo sostenible

El proyecto actual tiene como objetivo abordar varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Para ello, se presenta un análisis detallado de los ODS relacionados con el proyecto y su contribución a la sociedad.

Este trabajo establece una relación entre la música y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en concordancia con el estudio llevado a cabo por el ONG Center for Music Ecosystems en su publicación "*Your Guide to Music and the SDGs*" [1]. El altavoz diseñado en este TFG se va a usar para escuchar música, así que comparte algunas relaciones con los ODS:

El cuarto ODS está relacionado con la educación de calidad. La música puede fortalecer el cerebro y mejorar la memoria, fomentando el desarrollo del cerebro desde los seis meses de edad y ayudando a mejorar el lenguaje y el razonamiento [1].

El decimoquinto ODS pretende salvaguardar la vida en la tierra. La construcción de una caja para dos altavoces, utilizando un tablón de madera DM y la reutilización de componentes electrónicos como un *woofer* y un *tweeter*, no solo es una forma de darle una segunda vida útil a estos materiales, sino también una oportunidad para promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres. En este sentido, la construcción de altavoces utilizando materiales reutilizados y sostenibles es una forma concreta de contribuir a estos objetivos de protección y conservación del medio ambiente.

En conclusión, se puede observar la influencia directa o indirecta de la música en el desarrollo personal y en la mejora del nivel de vida de las personas. Debido a esto, el proyecto actual, que se enfoca en el desarrollo de un altavoz, está directamente relacionado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible mencionados anteriormente.

## 3. Altavoces

### 3.1 Introducción

Un altavoz es un transductor electromecánico-acústico que convierte señales eléctricas en movimientos mecánicos y acopla estas vibraciones al aire a través de un diafragma vibratorio, generando ondas acústicas que percibimos como sonido cuando son captadas por el oído [2].

A continuación, se enumeran algunas características que deben tenerse en cuenta durante el diseño de un altavoz:

- Sensibilidad
- Frecuencia de resonancia
- Respuesta en frecuencia
- Directividad

#### Sensibilidad

La sensibilidad de un altavoz se define como la capacidad que tiene para transformar la energía eléctrica en energía acústica, o sonido audible. Se expresa en decibelios (dB) y representa la relación entre la presión sonora generada por el altavoz y la potencia eléctrica suministrada a éste.

Este parámetro se mide en la cámara anecoica, emitiendo un tono de 1 kHz con una potencia de 1 vatio a través del altavoz, mediante una etapa de potencia, y midiendo la presión sonora a una distancia de un metro con un sonómetro. A partir de la medición del nivel de presión sonora a 1 kHz, se calcula la sensibilidad del altavoz.

#### Frecuencia de resonancia

La frecuencia de resonancia se define como aquella frecuencia en la cual el cono del altavoz vibra de forma natural, correspondiendo con el punto en que el altavoz alcanza su máxima amplitud de vibración y su máxima eficiencia. La frecuencia de resonancia del altavoz se ve influenciada directamente por factores como el tamaño, la suspensión y la masa de la membrana del altavoz.

La frecuencia de resonancia de un altavoz se mide en hercios (Hz), y se obtiene a partir de su curva de impedancia eléctrica. Para obtenerla, se conectan los terminales del altavoz a un analizador de impedancia, que aplica al altavoz una señal eléctrica sinusoidal de baja amplitud en un rango de frecuencias. En cada frecuencia, el analizador mide la impedancia del altavoz, lo que permite determinar la frecuencia en la que la impedancia del altavoz es máxima, siendo esta la frecuencia de resonancia del altavoz.

## Respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia de un altavoz determina su capacidad para reproducir las diferentes frecuencias en el espectro de audio.

La evaluación de la respuesta en frecuencia de un altavoz se realiza a través de una medición del nivel de presión sonora (SPL) en decibelios (dB) en función de la frecuencia (Hz) y su representación gráfica permite visualizar la forma en que el altavoz responde a diferentes frecuencias, permitiendo identificar y evaluar las desviaciones respecto a una respuesta ideal en distintos puntos del espectro de audio.

La medición de la respuesta en frecuencia de un altavoz se puede realizar colocando el altavoz en la cámara anecoica sobre un soporte y utilizando un sonómetro para realizar la medición.

Posteriormente, utilizando una etapa de potencia y un generador de señal, el altavoz emite ruido rosa. El ruido rosa es utilizado para esta medición ya que es una señal que contiene todas las frecuencias del espectro de audio por bandas de frecuencia, lo que permite evaluar la respuesta del altavoz en cada una de ellas.

En la Ilustración 2 se muestra el diagrama de la respuesta en frecuencia del monitor de estudio HS8/HS8I fabricado por Yamaha, que exhibe una respuesta equilibrada ( $\pm 3\text{dB}$ ) en el rango de 60 a 20.000 Hz.

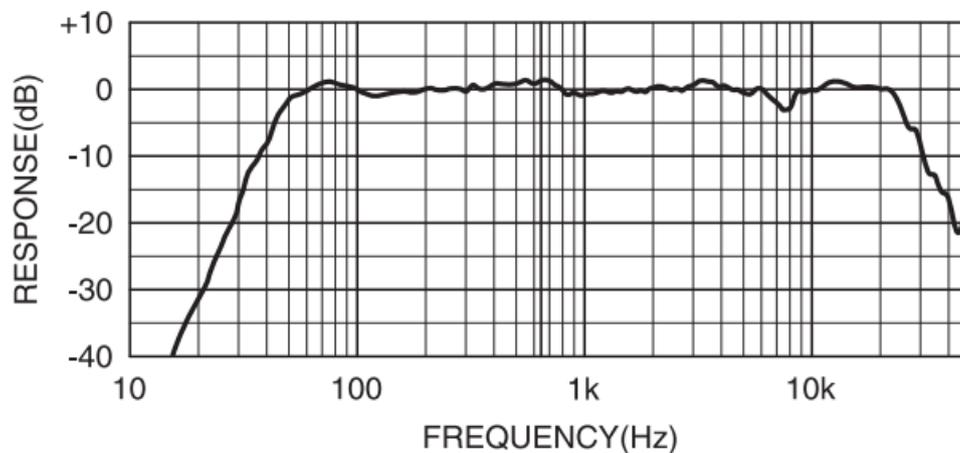


Ilustración 2: Respuesta en frecuencia del monitor de estudio HS8/HS8I de Yamaha [3]

## Directividad

La directividad de un altavoz indica la capacidad que tiene el altavoz para emitir el sonido en diferentes direcciones, en relación con su eje principal.

Los altavoces se pueden clasificar según su directividad en función de si emiten el sonido de manera uniforme "en todas las direcciones" (omnidireccionales), en un patrón estrecho y enfocado (direccionales) o en algún punto intermedio entre estos dos extremos.

El proceso que se sigue para medir la directividad de un altavoz comienza por colocarlo en la cámara anecoica y medir el nivel de presión sonora en diferentes ángulos alrededor del altavoz mediante un sonómetro. Posteriormente, los resultados obtenidos se plasman en un diagrama polar, que muestra las mediciones del nivel de presión sonora en cada frecuencia y en los diferentes ángulos.

La Ilustración 3 muestra la directividad de un altavoz, medida a diferentes frecuencias y expresada en un diagrama polar.

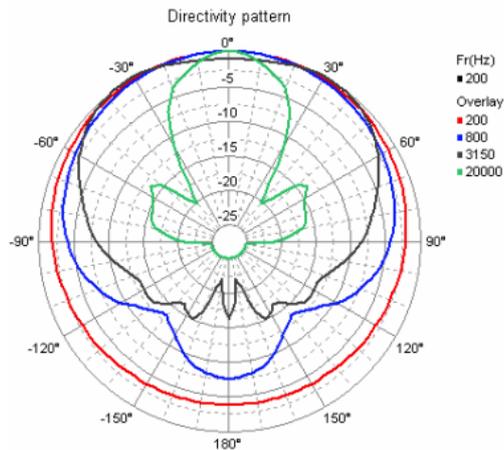


Ilustración 3: Directividad de un altavoz en diferentes frecuencias [4]

### 3.2 Caracterización del *woofer*

El término *woofer* se refiere comúnmente a los altavoces de graves diseñados con un cono grande, de entre 8 y 15 pulgadas de diámetro, capaces de reproducir bajas frecuencias. Estos altavoces se caracterizan por tener un diafragma rígido y grande que les permite mover grandes cantidades de aire.

En sistemas de 2 vías, los *woofer* se suelen utilizar en combinación con otros altavoces, como los *tweeter*, para proporcionar una respuesta en frecuencia equilibrada en todo el espectro audible. También pueden formar parte de un sistema de *subwoofer*, diseñado específicamente para reproducir con más precisión y potencia las frecuencias más bajas.

Para este proyecto se ha empleado el *woofer* MHB8 del fabricante McGee, ya que tanto este como el *tweeter* empleado, habían sido utilizados en un proyecto anterior.

A continuación, se exponen algunas de las características del *woofer* proporcionadas por el fabricante:

- Diámetro nominal: 8''
- Potencia: 200W / 100W RMS
- Impedancia: 8 $\Omega$
- Diámetro de la bobina: 25mm
- Rango de frecuencia: 45 – 9.000Hz

En la Ilustración 4 se muestra el *woofer* de este proyecto.



Ilustración 4: Woofer MHB8 McGee

### 3.2.1 Obtención de las características del *woofer*

La caracterización de un *woofer* es un proceso que involucra una serie de pruebas y mediciones con el objetivo de obtener información relevante sobre sus propiedades acústicas. Para llevar a cabo este proceso, se han realizado tres procedimientos estudiados en la asignatura de transductores e instrumentación acústica:

- Medida de la curva de impedancia
- Obtención de los parámetros de Thiele-Small
- Medida de la respuesta en frecuencia

#### 3.2.1.1 Medida de la curva de impedancia

La curva de impedancia eléctrica de un altavoz consiste en una representación gráfica de la variación de la impedancia del dispositivo con relación a la frecuencia. La medición de esta curva permite identificar la frecuencia de resonancia del altavoz, es decir, aquella en la que la impedancia del dispositivo alcanza su valor máximo y la fase se anula.

Para llevar a cabo la medida de la curva de impedancia, se ha utilizado el software LIMP, una resistencia de  $100 \Omega$  y la interfaz de audio M-AUDIO FAST TRACK PRO que desempeña las funciones de generador y osciloscopio.

Antes de llevar a cabo la medición de la impedancia del transductor, se han calibrado los dos canales de entrada de la interfaz de audio, con el objetivo de ajustar las ganancias del sistema de medida. Esta calibración ha sido realizada utilizando el software LIMP y estableciendo la conexión de ambos canales de entrada de la interfaz a su salida.

Una vez que se ha completado la calibración, se han llevado a cabo las conexiones correspondientes según se muestra en la Ilustración 5. Se ha tenido en consideración que la interfaz de audio desempeña el papel de generador (salida) y osciloscopio (entradas). Las entradas U1 y U2 de la interfaz corresponden a los puntos donde se han realizado las medidas, mientras que la salida de la interfaz se ha conectado a la resistencia R que, a su vez, se ha colocado en serie con el transductor. Es importante destacar que el valor de la resistencia del montaje debía ser mayor que la resistencia eléctrica del *woofer*, que en este caso era de  $7.2 \Omega$  (valor que se ha medido con un óhmetro).

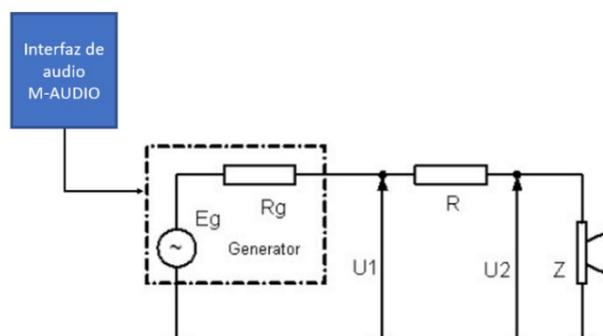


Ilustración 5: Conexión realizada para obtener la curva de impedancia

Tras haber realizado el conexionado de los equipos de la Ilustración 6, se ha realizado la medición utilizando el software LIMP, mediante el cual se obtiene la curva de impedancia del transductor. Esto ha permitido identificar la frecuencia de resonancia del altavoz.

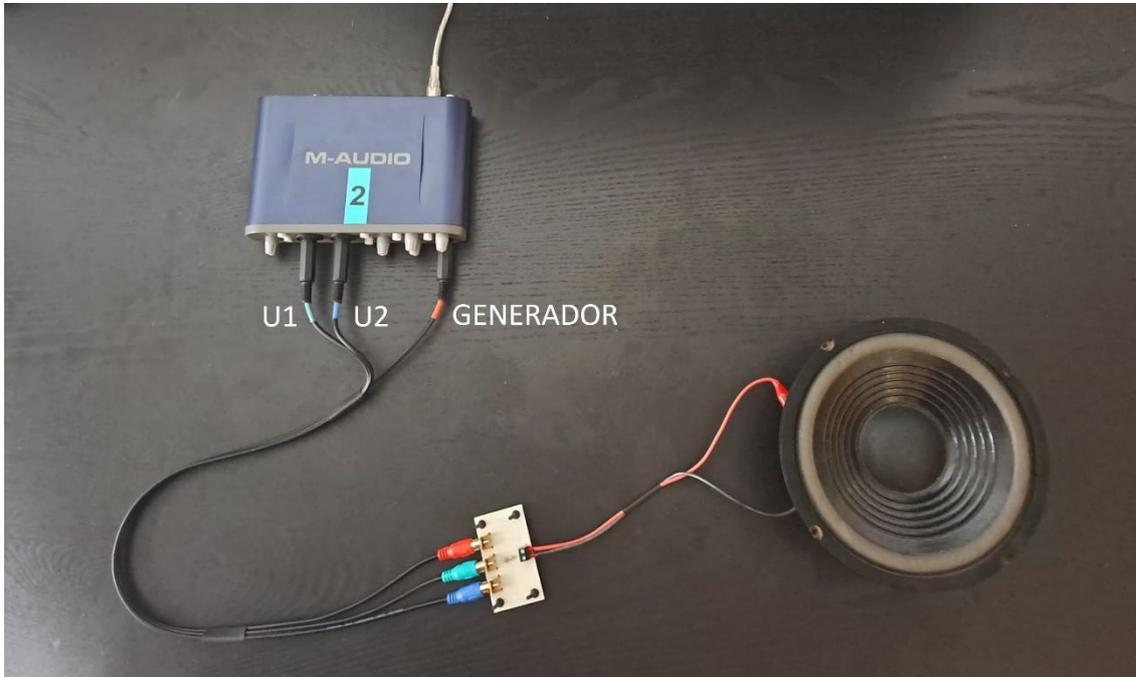


Ilustración 6: Conexión entre la interfaz de audio y el woofer

En la Ilustración 7 se presenta la curva de impedancia obtenida, en la cual se puede apreciar un pico de resonancia con un valor de 54.38Hz, el cual corresponde a la frecuencia de resonancia del transductor.

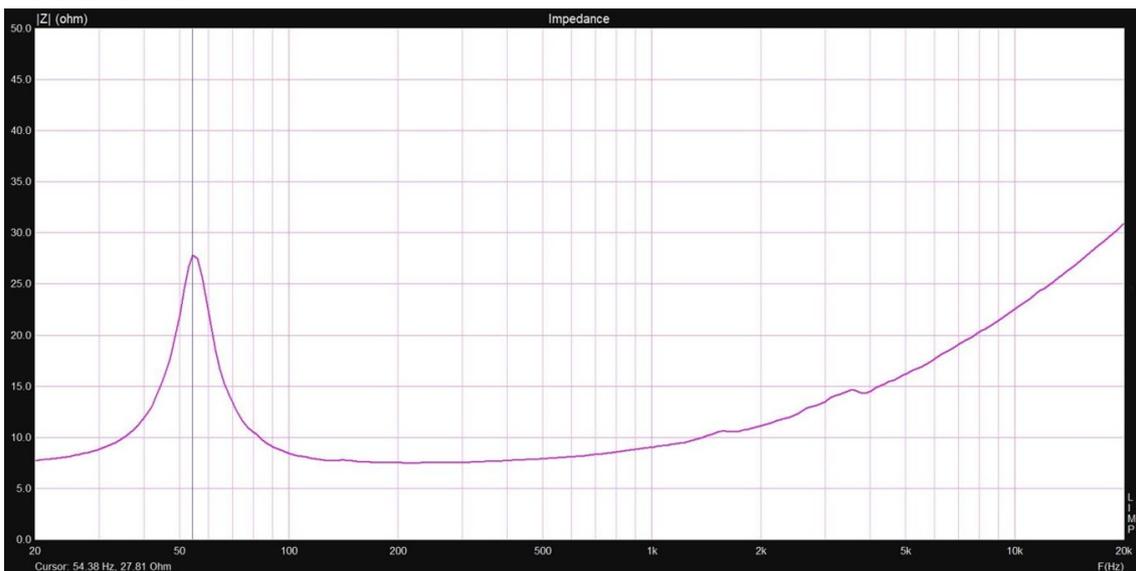


Ilustración 7: Curva de impedancia del woofer

### 3.2.1.2 Obtención de los parámetros Thiele-Small

Los parámetros de Thiele-Small son un conjunto de valores que describen las propiedades acústicas del *woofer*. Estos parámetros se emplean en el diseño de cajas acústicas para pronosticar la respuesta del altavoz en función del tipo de recinto y volumen utilizados [5].

Una vez se ha realizado la medición de la curva de impedancia, se ha mantenido la conexión de los equipos y se ha conservado la curva previamente obtenida con el fin de obtener los parámetros de Thiele-Small. Para ello, se ha llevado a cabo una nueva medición de la curva de impedancia al agregar una masa de tamaño conocido sobre la membrana del *woofer*. Este procedimiento es conocido como el método de la masa añadida [5].

En la Ilustración 8 se muestra la técnica utilizada de la masa añadida para medir los parámetros de Thiele-Small del *woofer*.

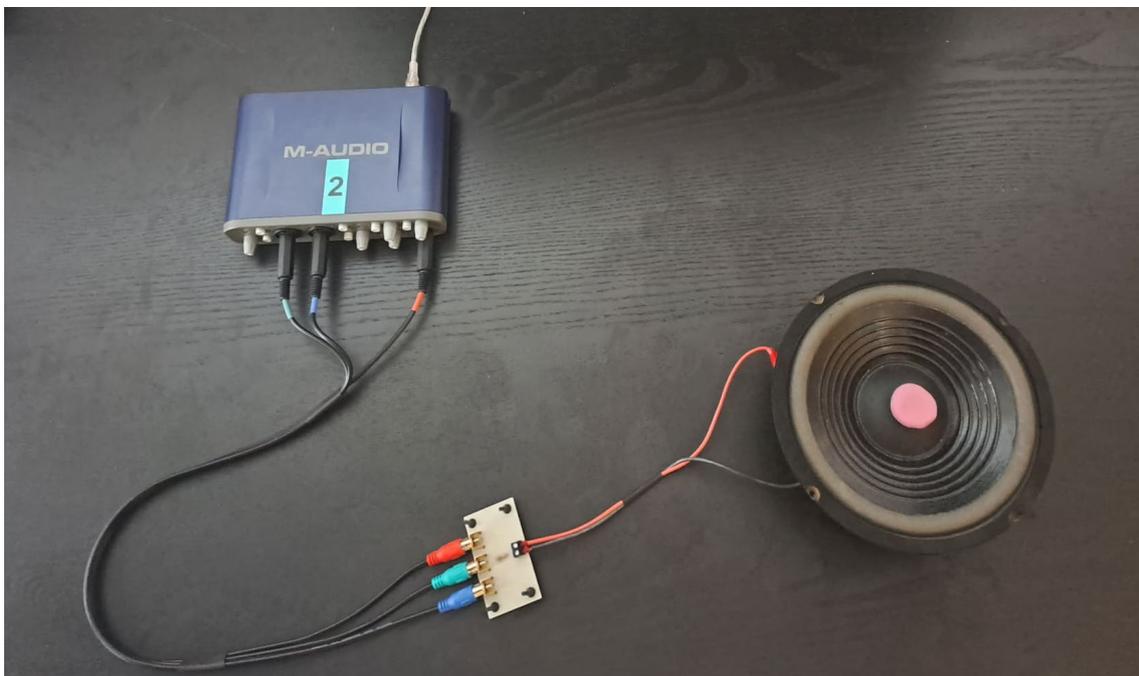


Ilustración 8: Método de la masa añadida

En la Ilustración 9 se presenta el resultado que se ha obtenido después de realizar la medida, en la cual se muestra en color azul la curva de impedancia obtenida previamente, y en color rosa la curva obtenida después de añadir la masa. Al analizar las dos curvas, se puede observar que, al añadir la masa, la frecuencia de resonancia ha disminuido.

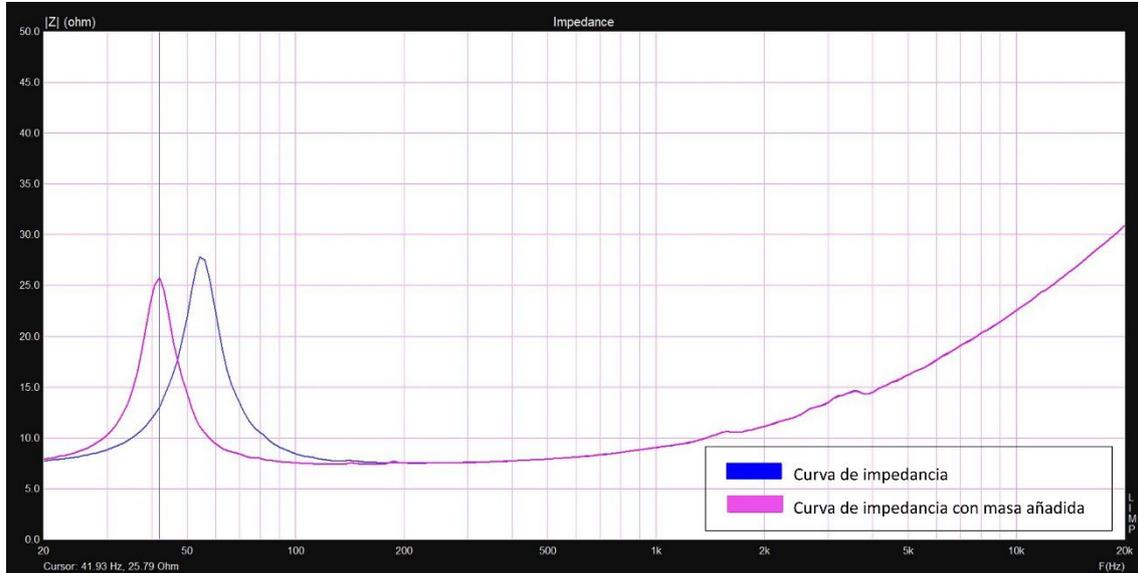


Ilustración 9: Curvas de impedancia obtenidas

A partir de las dos curvas obtenidas, el software LIMP ha calculado los parámetros de Thiele-Small del altavoz. Para obtener dichos parámetros, se han introducido en el software tres valores específicos: la resistencia eléctrica del *woofer*, que es de  $7.2\Omega$ , el diámetro de la membrana, que es de 16.5cm, y el peso de la masa añadida, que es de 14g.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros de Thiele-Small obtenidos.

Parámetros de Thiele-Small	
Frecuencia de resonancia, $F_S$	54.87 Hz
Resistencia eléctrica, $R_E$	$7.28 \Omega$
Inductancia de la bobina, $L_E$	$185.37 \mu\text{H}$
Factor de calidad total, $Q_{TS}$	1.13
Factor de calidad eléctrica, $Q_{ES}$	1.53
Factor de calidad mecánica, $Q_{MS}$	4.31
Resistencia mecánica, $R_{MS}$	$1.67 \text{ kg/s}$
Compliancia mecánica, $C_{MS}$	$0.40 \text{ mm/N}$
Volumen de aire equivalente, $V_{AS}$	25.90 litros
Rendimiento, $\eta$	0.27 %
Superficie efectiva, $S_d$	$213.82 \text{ cm}^2$

Tabla 1: Parametros de Thiele-Small obtenidos

Si se compara el valor de la frecuencia de resonancia obtenido en la Ilustración 7, de 54.38 Hz, con el valor obtenido en la Tabla 1, de 54.87 Hz, se observa que la diferencia entre ambas es mínima.

### 3.2.1.3 Medida de la respuesta en frecuencia del *woofer*

Se ha llevado a cabo la medición de la respuesta en frecuencia con el objetivo de analizar el comportamiento del altavoz frente a señales de distintas frecuencias, evaluando su nivel de presión sonora. La medida ha sido realizada utilizando una potencia de 1W, asegurando así un comportamiento lineal del altavoz y permitiendo la comparación de su desempeño con otros altavoces.

El método convencional para llevar a cabo esta medida consistiría en situar el *woofer* sobre una pantalla rígida de considerable tamaño, simulando así una caja de dimensiones infinitas. Esta técnica se utiliza con el fin de evitar las interferencias generadas por la cara posterior del diafragma, la cual emite la misma señal, pero en fase opuesta a la cara frontal. Dado que no se cuenta con la pantalla mencionada, se ha empleado una caja acústica, teniendo en consideración que esta modificará la respuesta en frecuencia del *woofer*.

Se han empleado una serie de materiales en la cámara anecoica, incluyendo un sonómetro Brüel & Kjaer, una etapa de potencia, una caja de prueba de 30 litros, un soporte para altavoz y el software B&K 2250.

Una vez se ha realizado el conexionado, se ha llevado a cabo la medida de la respuesta en frecuencia. En primer lugar, se ha calculado el valor de la tensión que se ha tenido que suministrar al altavoz para conseguir la potencia de 1W. Siendo el valor de la impedancia nominal del altavoz de  $8\Omega$ , se ha calculado el valor del voltaje a partir de la definición de potencia y ley de Ohm:

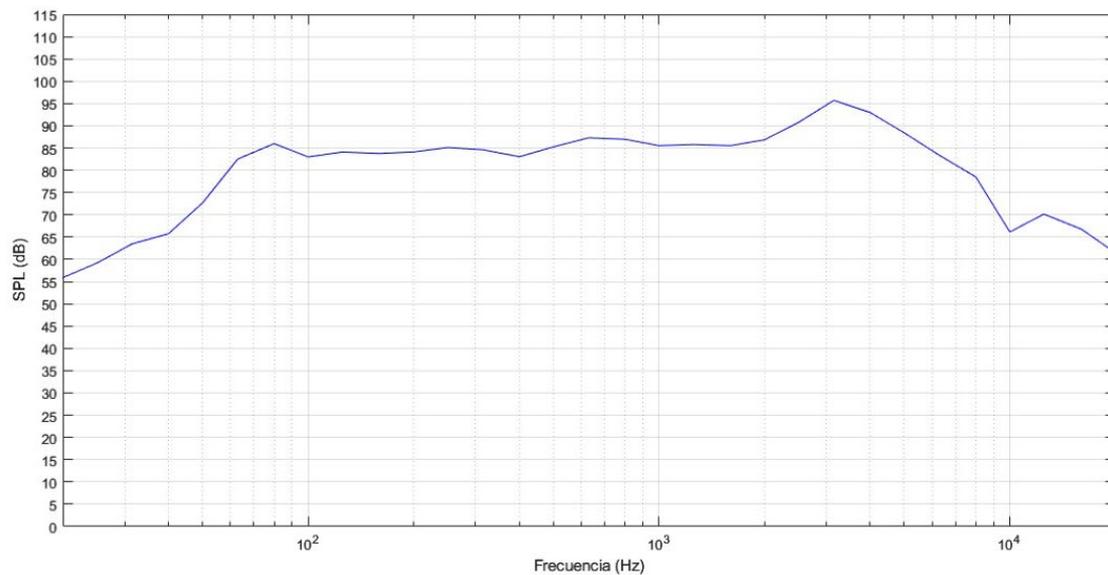
$$P = I \cdot V = \frac{V^2}{R} \rightarrow V = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{1W \cdot 8\Omega} = 2.83V$$

Una vez se ha calculado el valor de la tensión, se ha ajustado la etapa hasta que se ha leído dicho valor en el multímetro, conectado en bornes del *woofer*.

Con el fin de estandarizar la respuesta en frecuencia, en primer lugar, se ha medido la sensibilidad del *woofer* a 1kHz. Para llevar a cabo dicha medición, se ha emitido un tono senoidal puro de 1kHz a través del *woofer* en la cámara anecoica y se ha medido la sensibilidad situando un sonómetro frente a él, logrando obtener un valor de 85.53 dB.

A continuación, se ha procedido a emitir ruido rosa desde la etapa de potencia y se ha medido la respuesta del *woofer* con un sonómetro. Esta respuesta en frecuencia se ha normalizado con la medida de la sensibilidad.

El resultado obtenido se muestra en la Ilustración 10, en la cual se observa una sensibilidad de 85.53 dB a 1 kHz. Cabe destacar que la respuesta se estabiliza en el rango de 100 Hz a 2 kHz.



*Ilustración 10: Respuesta en frecuencia del woofer a 1W a 1m de distancia*

Se han incluido en el Anexo 3 dos hojas adicionales que contienen las características del *woofer*, obtenidas mediante los procedimientos descritos. Estas hojas fueron diseñadas por la autora del presente documento.

### 3.3 Caracterización del *tweeter*

El *tweeter* es un altavoz diseñado para reproducir frecuencias altas con dimensiones reducidas, que generalmente oscilan entre 1 y 3 pulgadas. En el mercado se pueden encontrar diversas variantes de *tweeter*, aunque los dos tipos más populares son los de cúpula, que ofrecen una reproducción de sonido natural, y los de cinta, que son más ligeros y tienen una respuesta en frecuencia más amplia.

En el presente proyecto se ha utilizado el *tweeter* 35109 fabricado por la marca ELECTRO DH. Dicho altavoz está diseñado con una cúpula metálica de aluminio y una bala de titanio.

A continuación, se exponen algunas de las características del *tweeter* proporcionadas por el fabricante:

- Bala de titanio: 1"
- Potencia: 380W/190W RMS
- Impedancia 4-8 $\Omega$
- Imán permanente de 264g.
- Rango de frecuencia: 2000-22000Hz

En la Ilustración 11 se muestra el *tweeter* utilizado en este proyecto.



Ilustración 11: *Tweeter* 35109 ELECTRO DH

### 3.3.1 Obtención de las características del *tweeter*

Del mismo modo que se ha hecho con el *woofer*, la caracterización de un *tweeter* es un procedimiento que implica una serie de pruebas y mediciones destinadas a obtener información significativa sobre sus propiedades acústicas. Para llevar a cabo este proceso, se han empleado dos procedimientos:

- Medida de la curva de impedancia
- Medida de la respuesta en frecuencia

La obtención de la curva de impedancia permite determinar la frecuencia de resonancia del *tweeter*, mientras que la medición de la respuesta en frecuencia proporciona información sobre su respuesta a diferentes frecuencias. Dado que el *tweeter* no está diseñado para reproducir frecuencias bajas, no se han obtenido los parámetros de Thiele-Small, los cuales se utilizan en el diseño de cajas.

#### 3.3.1.1 Medida de la curva de impedancia

De manera análoga a la medida realizada con el *woofer*, se ha obtenido la curva de impedancia del *tweeter* a partir de la calibración de la interfaz de audio y la conexión en serie del *tweeter* y la interfaz de audio con una resistencia de 100  $\Omega$  y el software LIMP. En la Ilustración 12 se muestra la curva de impedancia que se ha obtenido:

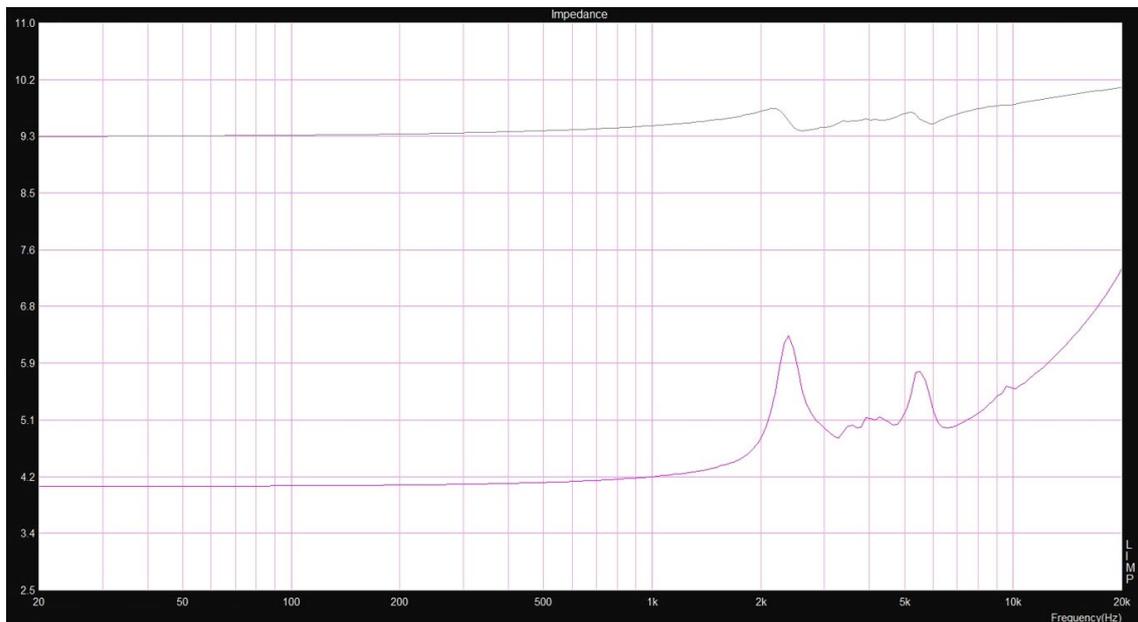


Ilustración 12: Curva de impedancia del *tweeter*

Tras haber realizado la medición, se han apreciado dos picos de resonancia con valores de 2392.64Hz y 5529.05Hz. La presencia de múltiples picos de resonancia puede estar relacionada con la construcción física y el diseño del *tweeter*. A partir de la medida, se determina que la frecuencia de resonancia del *tweeter* es 2392.64Hz.

### 3.3.1.2 Medida de la respuesta en frecuencia del *tweeter*

Para obtener la respuesta en frecuencia del *tweeter*, se ha seguido un procedimiento similar al utilizado previamente para medir la respuesta en frecuencia del *woofer*. Se ha colocado el *tweeter* en una caja y se ha emitido ruido rosa para realizar la medición utilizando un sonómetro en la cámara anecoica.

Tras realizar la medida, se han normalizado los resultados. Para ello, se ha procedido a medir con un sonómetro en la cámara anecoica un tono senoidal puro de 5KHz con una tensión de 2.83V, obteniendo un valor de 98.35 dB como referencia. Utilizando dicho valor, se han normalizado los resultados obtenidos. En la Ilustración 13 se muestra la gráfica resultante, en la que se puede apreciar el valor de 98.35 dB a la frecuencia de 5 kHz, y también se puede observar que, en la parte de las frecuencias bajas, el nivel de presión sonora es generalmente bajo, ya que el *tweeter* no está diseñado para reproducir frecuencias graves.

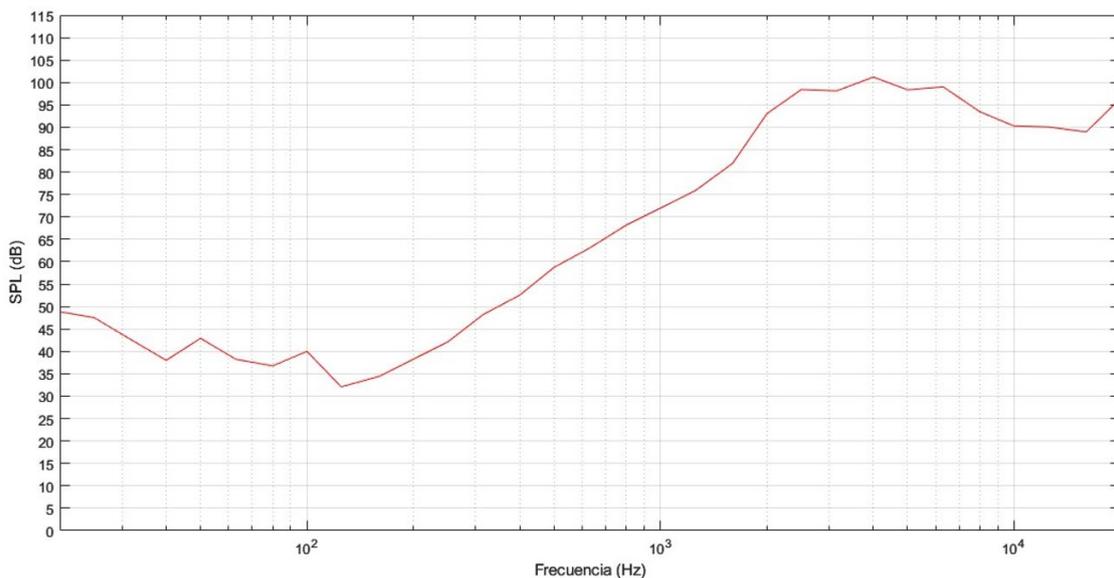


Ilustración 13: Respuesta en frecuencia del *tweeter* a 1W a 1m de distancia

Se han incluido en el Anexo 4 dos hojas adicionales que contienen las características del *tweeter*, obtenidas mediante los procedimientos descritos. Estas hojas fueron diseñadas por la autora del presente documento.

## 4. Elección del *crossover*

### 4.1 Introducción

Un *crossover* de audio es un dispositivo electrónico que se utiliza para separar una señal de audio en dos o más bandas de frecuencia, con el propósito de direccionar adecuadamente cada una de ellas a los altavoces correspondientes. De esta manera, se logra que cada altavoz reproduzca solamente las frecuencias para las que está diseñado, minimizando cualquier tipo de distorsión o sobrecarga en la señal de audio.

En sistemas de audio se utilizan tanto *crossovers* activos como *crossovers* pasivos:

Los *crossovers* activos utilizan amplificadores operacionales para separar la señal de audio, así que necesitan una fuente de alimentación. Además, han de situarse antes del amplificador de potencia, con lo que nuestro altavoz necesitaría dos amplificadores.

Los *crossovers* pasivos emplean componentes pasivos, como condensadores, bobinas y resistencias, para dividir la señal de audio y son más comunes en sistemas de altavoces sencillos y económicos. Asimismo, se sitúan después del amplificador (Ilustración 1).

El *crossover* diseñado es un *crossover* pasivo de dos vías, implementado a partir de dos filtros pasivos de orden 2, que presentan una pendiente en la banda eliminada de 12dB/octava. La elección de filtros de este orden se basa en su uso común en los *crossovers* de altavoces comerciales [2]. Se han seleccionado filtros del tipo *Butterworth*, ya que este tipo de filtro produce una respuesta en frecuencia plana en la banda de paso.

Para diseñar el *crossover*, en primer lugar, considerando la frecuencia de resonancia y la respuesta en frecuencia de los altavoces, se ha determinado la frecuencia de cruce del *crossover*. En segundo lugar, se ha realizado el diseño de los filtros pasivos con una frecuencia de corte igual a la frecuencia de cruce del *crossover*, calculando los valores de los componentes necesarios para implementarlos. Una vez obtenidos estos valores, se ha realizado una simulación de cada filtro para verificar su comportamiento. Posteriormente, se ha llevado a cabo la simulación del *crossover* formado por ambos filtros juntos.

## 4.2 Elección de la frecuencia de cruce

La frecuencia de cruce del *crossover* es la frecuencia a la cual se divide la señal de audio en dos o más bandas. Un *crossover* de dos vías está formado por un filtro paso bajo que se conecta al *woofer* y un filtro paso alto que se conecta al *tweeter*, dividiendo así la señal de audio en dos bandas de frecuencia.

La frecuencia de cruce del *crossover* se ha establecido a partir de la respuesta en frecuencia de los altavoces que se van a utilizar y de la frecuencia de resonancia del *tweeter*. Para determinarla, se han superpuesto en una misma gráfica las respuestas de ambos altavoces (Ilustración 10 y 13) y se ha atenuado la gráfica del *tweeter* para conseguir que la respuesta en frecuencia del conjunto sea lo más plana posible, obteniendo como resultado la Ilustración 14.

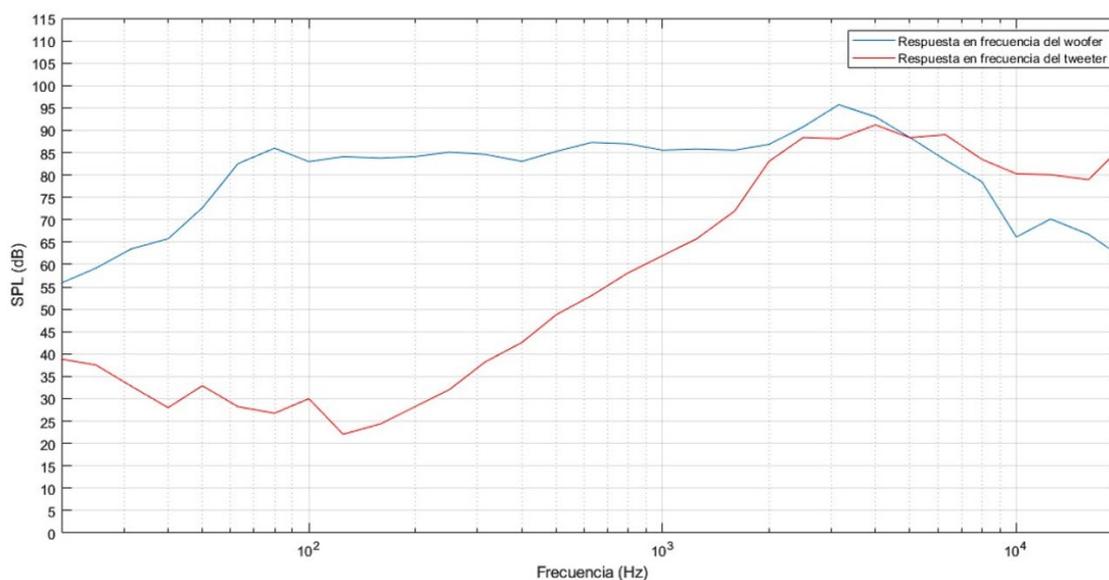


Ilustración 14: Respuesta en frecuencia del tweeter y woofer

A partir de las respuestas en frecuencia de la Ilustración 14, se ha decidido establecer la frecuencia de cruce del *crossover* en 2.8kHz. Con esta elección, se pretende reducir el pico que presenta el *woofer* en esa frecuencia e intentar conseguir que la respuesta en frecuencia del conjunto sea más plana.

Una vez establecida la frecuencia de cruce, se han realizado los cálculos necesarios para determinar los valores de los componentes pasivos que conformarán los filtros del *crossover*.

### 4.3 Diseño del *crossover*

#### 4.3.1 Diseño del filtro paso bajo

Para realizar el diseño del filtro, se ha partido de un prototipo de filtro paso bajo de orden 2 de *Butterworth*. La elección de filtros de este orden se ha basado en su uso común en los *crossovers* de altavoces comerciales [2]. Este filtro está formado por una resistencia de generador  $R_s$ , que modeliza la impedancia de salida del amplificador de audio, una resistencia de carga  $R_L$ , que modeliza la impedancia del *woofer*, una bobina  $L_1$  y un condensador  $C_2$ , distribuidos tal y como se muestra en la Ilustración 15.

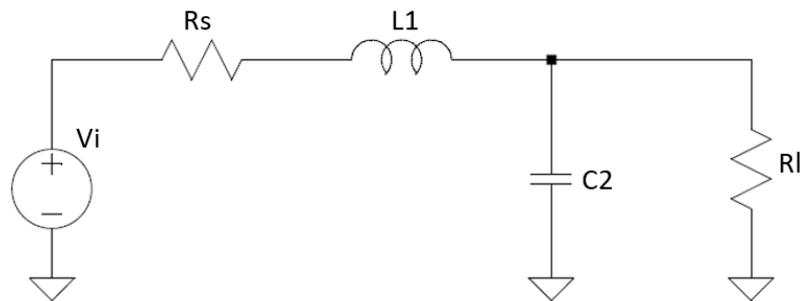


Ilustración 15: Circuito del prototipo del filtro pasivo paso bajo de Butterworth de orden 2

Para obtener el valor de los componentes, se ha utilizado la tabla de la Ilustración 16, que contiene los coeficientes normalizados del prototipo de filtro paso bajo para diferentes valores de  $n$ , siendo  $n$  el orden del filtro [6].

$n$	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	1.111	1.035	1.835		
	1.250	0.849	2.121		
	1.429	0.697	2.439		
	1.667	0.566	2.828		
	2.000	0.448	3.346		
	2.500	0.342	4.095		
	3.333	0.245	5.313		
	5.000	0.156	7.707		
	10.000	0.074	14.814		
$\infty$		1.414	0.707		
3	0.900	0.808	1.633	1.599	
	0.800	0.844	1.384	1.926	
	0.700	0.915	1.165	2.277	
	0.600	1.023	0.965	2.702	
	0.500	1.181	0.779	3.261	
	0.400	1.425	0.604	4.064	
	0.300	1.838	0.440	5.363	
	0.200	2.669	0.284	7.910	
	0.100	5.167	0.138	15.455	
$\infty$		1.500	1.333	0.500	
4	1.111	0.466	1.592	1.744	1.469
	1.250	0.388	1.695	1.511	1.811
	1.429	0.325	1.862	1.291	2.175
	1.667	0.269	2.103	1.082	2.613
	2.000	0.218	2.452	0.883	3.187
	2.500	0.169	2.986	0.691	4.009
	3.333	0.124	3.883	0.507	5.338
	5.000	0.080	5.684	0.331	7.940
	10.000	0.039	11.094	0.162	15.642
$\infty$		1.531	1.577	1.082	0.383
$n$	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$

Ilustración 16: Valores normalizados del prototipo del filtro paso bajo de Butterworth

Considerando que se quiere diseñar un filtro de segundo orden y que el resultado de la división entre la impedancia del generador y la impedancia de carga ( $R_l/R_s$ ) es infinito debido a que la impedancia de salida del amplificador de audio se ha considerado nula, se ha seleccionado de la tabla que se muestra en la Ilustración 16 la fila correspondiente a estos datos. En dicha fila se encuentran los valores normalizados del filtro prototipo que se presentan en la Tabla 2.

n	$R_l/R_s$	$L_1$	$C_2$
2	$\infty$	1.414	0.707

Tabla 2: Valores del filtro prototipo paso bajo de orden 2

Una vez obtenidos los valores del filtro prototipo, se ha calculado el valor de la bobina y el condensador del filtro paso bajo, desnormalizando el filtro prototipo a la frecuencia de corte deseada  $f_c = 2.8\text{kHz}$  y escalándolo a la impedancia de carga del *woofer*  $Z_l = 8\Omega$ .

$$L_1 = \frac{1.414 \cdot Z_L}{2\pi \cdot f_c} = \frac{1.414 \cdot 8}{2\pi \cdot 2800} = 642.99\mu\text{H}$$

$$C_2 = \frac{0.707}{2\pi \cdot f_c \cdot Z_L} = \frac{0.707}{2\pi \cdot 2800 \cdot 8} = 5.02\mu\text{F}$$

El filtro paso bajo que se ha obtenido, se muestra en la Ilustración 17. Se ha eliminado  $R_s$  del circuito porque la impedancia de salida del amplificador de audio era muy pequeña, aproximadamente 0.

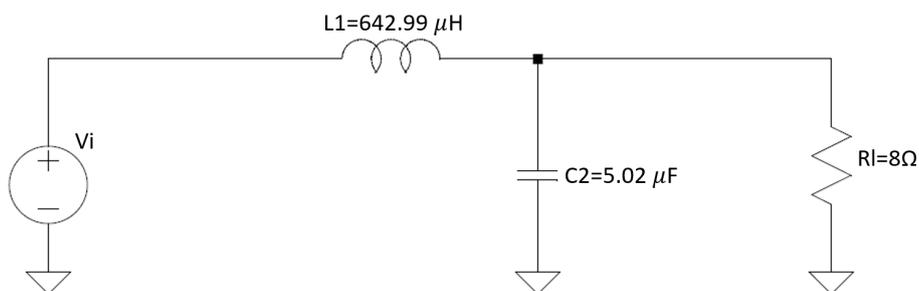


Ilustración 17: Circuito del filtro paso bajo diseñado

### 4.3.2 Diseño del filtro paso alto

El filtro paso alto se ha diseñado siguiendo una metodología similar al filtro paso bajo, se ha utilizado el prototipo de filtro paso bajo de orden 2 de *Butterworth* como base de diseño. Para convertirlo en un filtro paso alto, se ha aplicado la transformación  $s \leftrightarrow 1/s$  al filtro paso bajo. Los valores de los componentes se obtienen a partir de esta transformación. A continuación, se presenta la Tabla 3 que ilustra dicha transformación.

Componente	Símbolo	Procedimiento	Transformación $s \leftrightarrow 1/s$
Bobina	 $L_s$	$Z_L = L_s \leftrightarrow \frac{L}{s} = \frac{1}{\left(\frac{s}{L}\right)}$	 $1/L$
Condensador	 $C_s$	$Z_C = \frac{1}{C_s} \leftrightarrow \frac{s}{C}$	 $1/C$

Tabla 3: Transformación filtro paso bajo-paso alto

Tras realizar la transformación, se ha obtenido el filtro paso alto formado por un condensador  $C_1$  y una bobina  $L_2$  tal y como se muestra en la Ilustración 18:

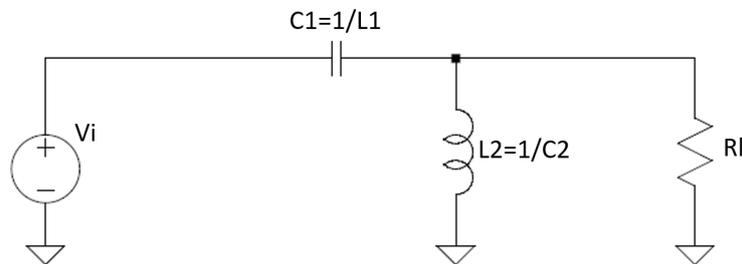


Ilustración 18: Circuito del prototipo del filtro pasivo paso alto de Butterworth de orden 2

Una se ha obtenido el filtro prototipo, se han calculado los valores de los componentes desnormalizando el filtro a la frecuencia de corte  $f_c = 2.8$  kHz y escalándolo a la impedancia del *tweeter*  $Z_l = 4 \Omega$ .

$$C_1 = \frac{1}{1.414 \cdot 2\pi \cdot f_c \cdot Z_L} = \frac{1}{1.414 \cdot 2\pi \cdot 2800 \cdot 4} = 10.05 \mu F$$

$$L_2 = \frac{Z_L}{0.707 \cdot 2\pi \cdot f_c} = \frac{4}{0.707 \cdot 2\pi \cdot 2800} = 351.59 \mu H$$

El filtro paso alto obtenido es el que se muestra en la Ilustración 19. Del mismo modo que en la Ilustración 17, se ha eliminado  $R_s$  del circuito dado que la impedancia de salida del amplificador de audio es muy pequeña, aproximadamente 0.

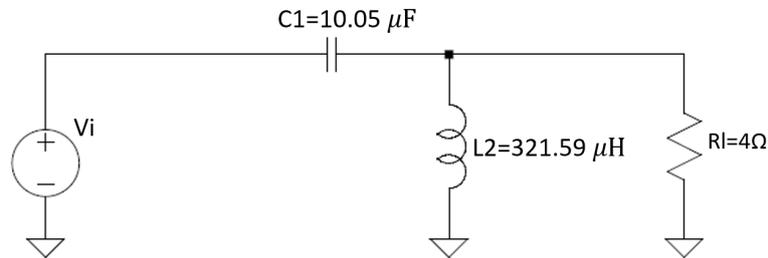


Ilustración 19: Circuito del filtro paso alto diseñado

#### 4.3.3 Diseño del *crossover* a partir de los dos filtros

Tras obtener los valores de los componentes de ambos filtros, se han combinado para crear el *crossover* diseñado a partir de ellos. En la Ilustración 20 se muestra el circuito del *crossover* resultante, junto con los valores calculados de los componentes y la conexión establecida con el *woofer* ( $R_w$ ) y el *tweeter* ( $R_t$ ) respectivamente.

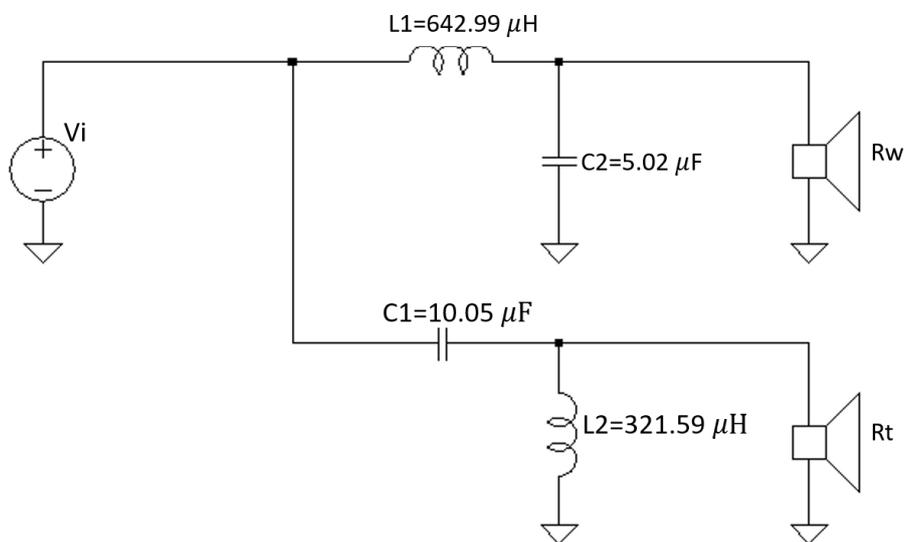


Ilustración 20: Circuito del *crossover* realizado con LTspice

Una vez se han realizado los cálculos de los componentes que formarán parte de los filtros, se han normalizado los valores según la serie E24 de componentes electrónicos, para facilitar la implementación física del *crossover*.

Se presentan los valores calculados y normalizados de los componentes del filtro paso bajo y paso alto en la Tabla 4 y 5, respectivamente.

FILTRO PASO BAJO		
COMPONENTE	VALOR CALCULADO	SERIE E24
BOBINA (L1)	642.99 $\mu H$	680 $\mu H$
CONDENSADOR (C2)	5.02 $\mu F$	5.1 $\mu F$

Tabla 4: Valores de los componentes del filtro paso bajo

FILTRO PASO ALTO		
COMPONENTE	VALOR CALCULADO	SERIE E24
CONDENSADOR (C1)	10.05 $\mu F$	10 $\mu F$
BOBINA (L2)	321.59 $\mu H$	330 $\mu H$

Tabla 5: Valores de los componentes del filtro paso alto

## 4.4 Simulaciones del *crossover*

### 4.4.1 Simulación del *crossover* con los valores ideales

Tras obtener los valores, se ha realizado la simulación individual de ambos filtros en PSPICE. Posteriormente, se ha llevado a cabo una simulación conjunta, en la cual se ha obtenido la respuesta del *crossover* diseñado.

En la Ilustración 21 se presenta la respuesta del filtro paso bajo diseñado. En la gráfica, se observa una frecuencia de corte de 2.81 kHz. La respuesta del filtro es plana, lo cual es característico de los filtros *Butterworth*. Además, se puede apreciar una pendiente de 40 dB/década en la banda eliminada, lo que equivale a 12 dB/octava. Con esta respuesta, se confirma que el resultado obtenido coincide con lo esperado, validando así la elección de los componentes utilizados.

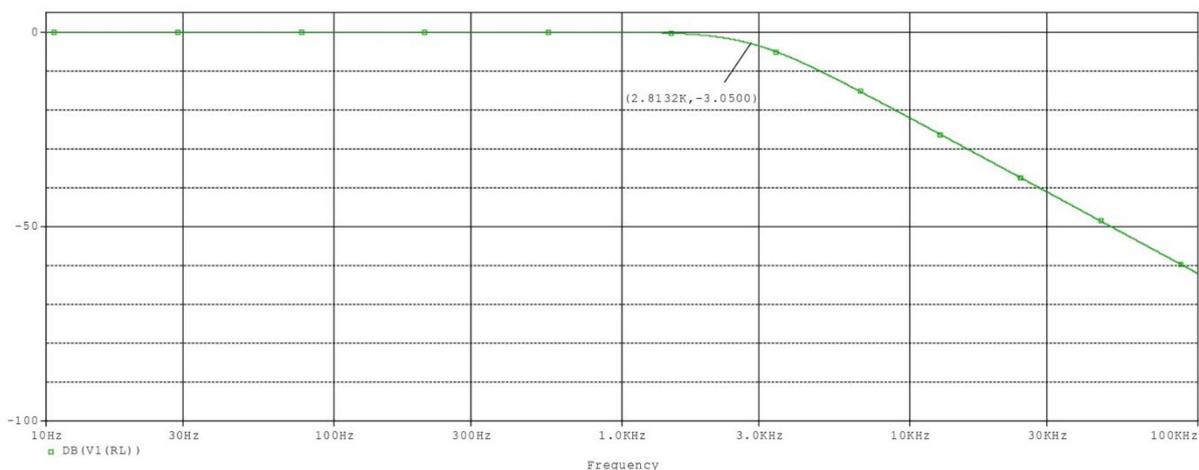


Ilustración 21: Simulación del filtro paso bajo

En la Ilustración 22 se muestra la respuesta del filtro paso alto. Al igual que el filtro paso bajo, este filtro presenta una frecuencia de corte de 2.79 kHz. Asimismo, se observa una pendiente de 40 dB/década en la banda eliminada, que corresponde a un filtro de segundo orden. A través de esta simulación, se confirma que el filtro cumple con su objetivo previsto.

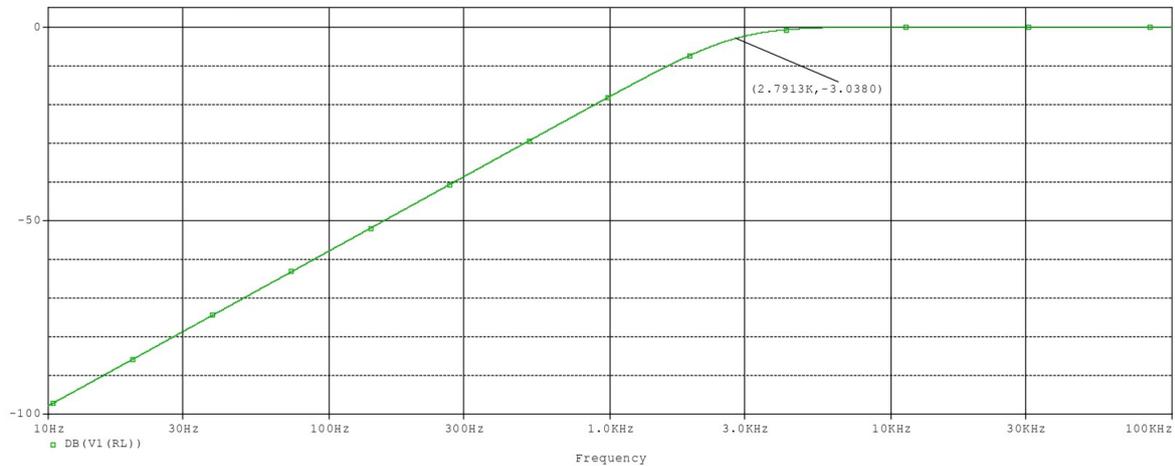


Ilustración 22: Simulación del filtro paso alto

Una vez completadas las simulaciones de ambos filtros y verificados los diseños, se ha realizado la simulación del *crossover* de la Ilustración 20. Mediante PSPICE, se ha obtenido la respuesta representada en la gráfica de la Ilustración 23. En dicha gráfica, se ha representado en color verde la respuesta del filtro paso bajo, mientras que en color rojo se muestra la respuesta del filtro paso alto. Es posible apreciar que el punto de cruce entre ambos filtros se encuentra cerca de los 2.8 kHz a -3 dB, tal y como había sido previsto en los cálculos realizados anteriormente.

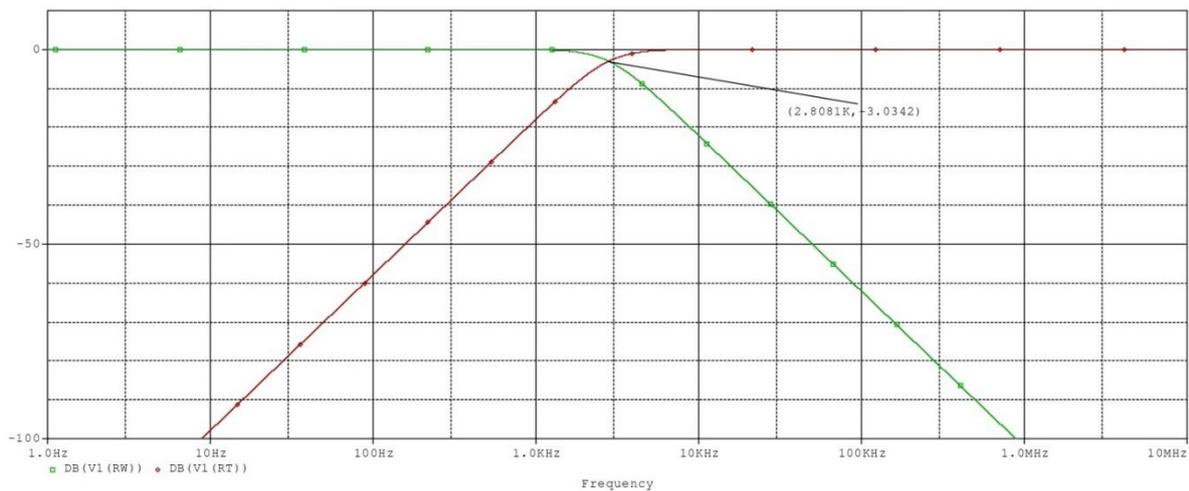


Ilustración 23: Simulación del crossover con los valores ideales

#### 4.4.2 Simulación del *crossover* con los valores de la serie E24

Tras haber completado las simulaciones utilizando los valores ideales, se han realizado las simulaciones empleando los valores de los componentes físicos de la serie E24 que se utilizarán para implementar el *crossover*.

La Ilustración 24 representa la simulación de la respuesta en frecuencia del filtro paso bajo con los componentes de la serie E24. Este filtro exhibe una pendiente de 40 dB/década en la banda eliminada. Al compararlo con la Ilustración 21, se observa que, debido a las modificaciones en los valores de los componentes, la frecuencia de corte esperada de 2.8 kHz ya no se obtiene, en su lugar se obtiene una frecuencia de 2.91 kHz.

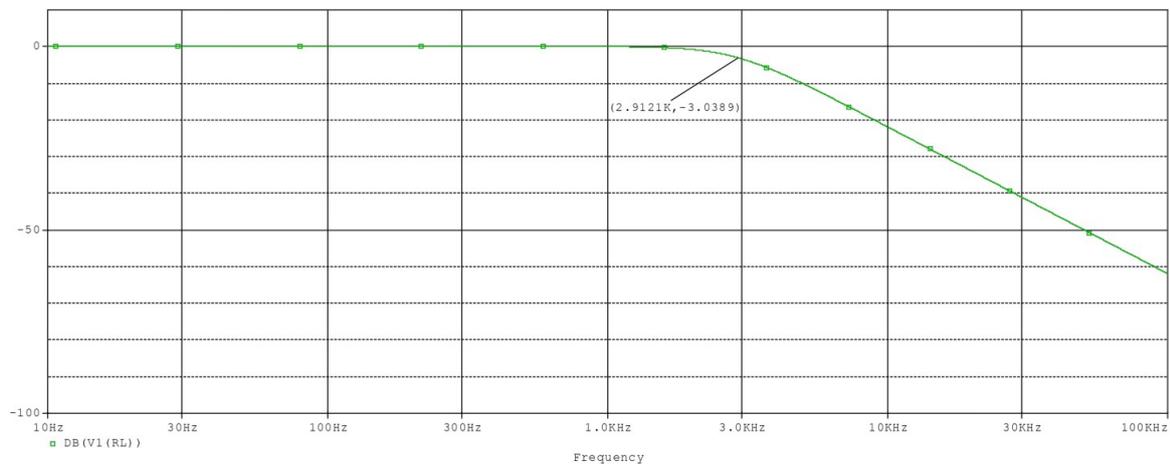


Ilustración 24: Simulación del filtro paso bajo con los valores de la serie E24

El problema ha sido resuelto al sustituir la bobina de 680 $\mu$ H por una bobina de 620 $\mu$ H en serie con una bobina de 22 $\mu$ H, debido a que el valor obtenido se acerca más al ideal. En la Ilustración 25 se puede observar que la frecuencia de corte es ahora de 2.8 kHz, por lo tanto, se ha decidido utilizar estas dos bobinas.

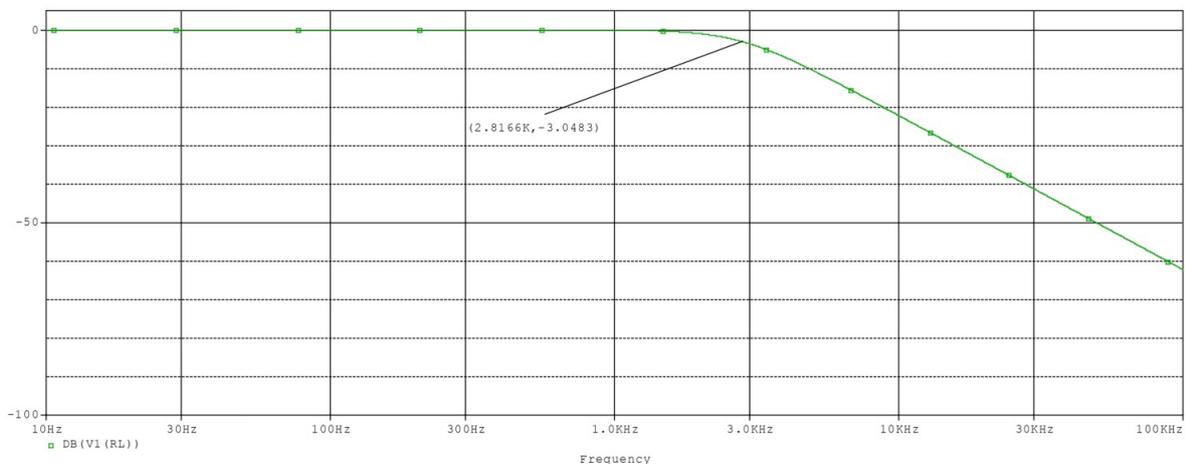


Ilustración 25: Simulación del filtro paso bajo con los valores de la serie E24 con dos bobinas en serie

En la Ilustración 26 se presenta la respuesta del filtro paso alto al utilizar los valores de los componentes de la serie E24. Se ha observado que, al emplear los componentes de la serie E24, se ha logrado mantener la frecuencia de corte en 2.8 kHz. Este resultado se atribuye a la similitud entre los valores de los componentes utilizados y los valores obtenidos en los cálculos realizados. Además, es importante destacar que este filtro exhibe una pendiente de 40 dB/década en la banda eliminada.

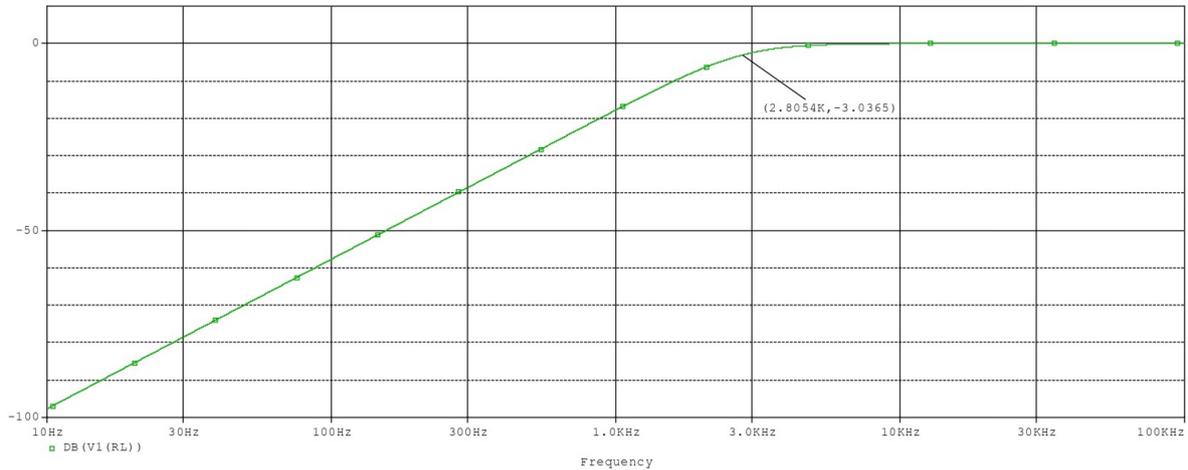


Ilustración 26: Simulación del filtro paso bajo con los valores de la serie E24

Una vez concluidas las simulaciones individuales de ambos filtros, se ha procedido a realizar la simulación del *crossover* utilizando los valores correspondientes a la serie E24. El resultado obtenido ha sido presentado en la Ilustración 27. En dicha representación gráfica, se puede apreciar que la frecuencia de cruce coincide con el valor esperado de 2.8 kHz, y ambos filtros mantienen una pendiente de 40 dB/década en la banda eliminada, tal como lo hacen cuando se analizan por separado.

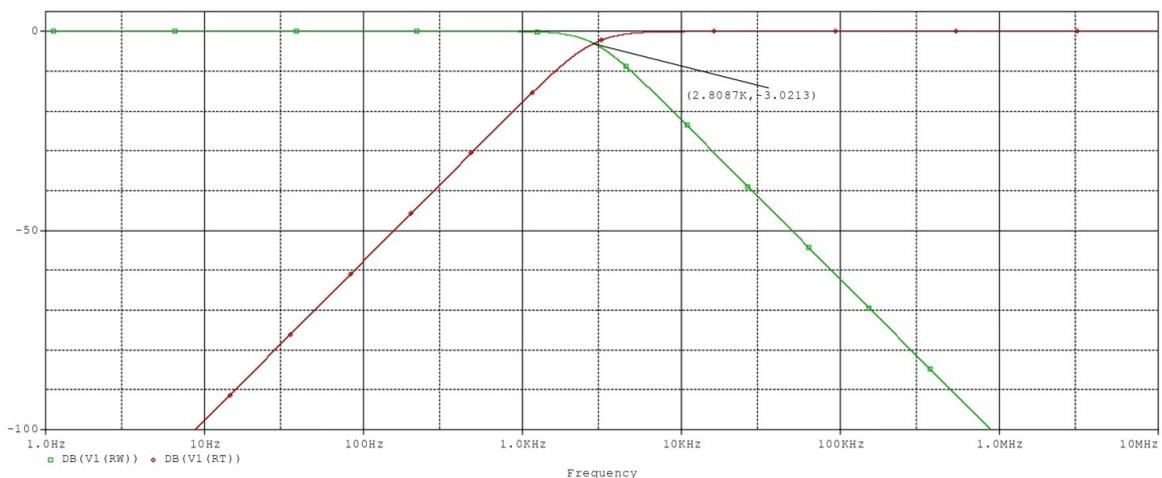


Ilustración 27: Simulación del *crossover* con los valores de la serie E24

#### 4.4.3 Simulación en MATLAB del resultado con *crossover*

Con el fin de obtener una aproximación inicial del resultado, se han exportado los valores obtenidos después de llevar a cabo las mediciones de respuesta en frecuencia de los altavoces (Ilustración 10 y 13) y se han filtrado mediante dos filtros *Butterworth* de segundo orden en Matlab, con una frecuencia de corte de 2.8 kHz.

En la Ilustración 28 se muestra una aproximación de la respuesta de los altavoces después de aplicar el *crossover* diseñado, en la que se observa que el pico generado por el *woofer* alrededor de los 3 kHz se ha atenuado gracias al filtro paso bajo. Esto ha resultado en una respuesta más plana, logrando una transición apenas perceptible entre los altavoces.

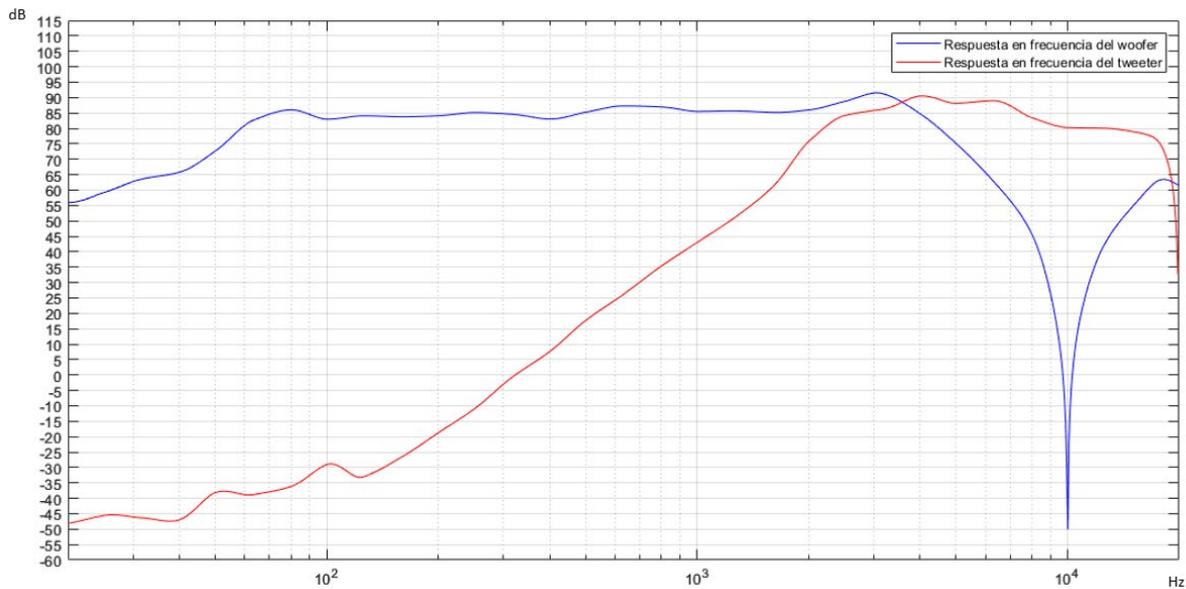


Ilustración 28: Estimación del resultado final simulando *crossover*

#### 4.5 Elección del *crossover*

Después de calcular los valores de los componentes que formarían el *crossover*, se ha llevado a cabo una búsqueda en el mercado de las bobinas y condensadores disponibles. Se optó por seleccionar condensadores de película y bobinas de cinta y toroidales, ya que estos se utilizan cuando se requieren inductancias o capacitancias de gran valor, con bajas pérdidas y capacidad para soportar altas corrientes o voltajes [7]. En la Tabla 6 se presenta el listado de los componentes que formarían parte del *crossover* diseñado, junto con su tensión o corriente máxima, precio y distribuidor correspondiente.

Componente	Valor	Vmax o Imax	Precio	Distribuidor
Bobina	620 $\mu H$	5.9A	39€	<a href="#">AUDIOXCELL</a>
Bobina	22 $\mu H$	3A	0.7€	<a href="#">TECNOTECA</a>
Condensador	5.1 $\mu F$	400V	5.3€	<a href="#">AUDIOXCELL</a>
Condensador	10 $\mu F$	400V	7€	<a href="#">AUDIOXCELL</a>
Bobina	330 $\mu H$	3.7A	28€	<a href="#">AUDIOXCELL</a>
TOTAL			80€	

Tabla 6: Componentes pasivos disponibles en el mercado

Antes de iniciar el diseño del PCB para implementar el *crossover*, se ha realizado una búsqueda de *crossovers* comerciales que se pudieran usar para el altavoz con el fin de comparar el coste y el tiempo de desarrollo. En la Tabla 7 se detallan los cinco *crossovers* preseleccionados, incluyendo la frecuencia de corte correspondiente, la potencia máxima de entrada de cada uno, el precio y el distribuidor asociado a cada opción. Entre ellos, el *crossover* NEYOANN tiene la frecuencia de cruce deseada, una potencia máxima suficiente para nuestro altavoz (nuestro *tweeter* tiene una potencia RMS de 190 W y el *woofer* de 100 W) y un bajo coste. Teniendo en cuenta el bajo coste y tiempo de desarrollo, se ha decidido usar el *crossover* comercial en vez de implementar el diseñado.

<i>Crossover</i>	Frecuencia del <i>crossover</i>	Potencia máxima	Precio	Distribuidor
EMINENCE PXB 22 K 5	2.5kHz	250W	59€	<a href="#">Djmania</a>
Beyma F-130	3kHz	300W	33.38€	<a href="#">Madridhifi</a>
Monacor DN-2618	3kHz	350W	37€	<a href="#">Thomann</a>
Monacor DN-1218 PAX	2.5kHz	600W	53€	<a href="#">Thomann</a>
NEYOANN 500007002	2.8kHz	800W	28.93€	<a href="#">Amazon</a>

Tabla 7: Características de los *crossovers* preseleccionados

En la Ilustración 29 se muestra el *crossover* NEYOANN 500007002 que se ha utilizado para llevar a cabo este proyecto.

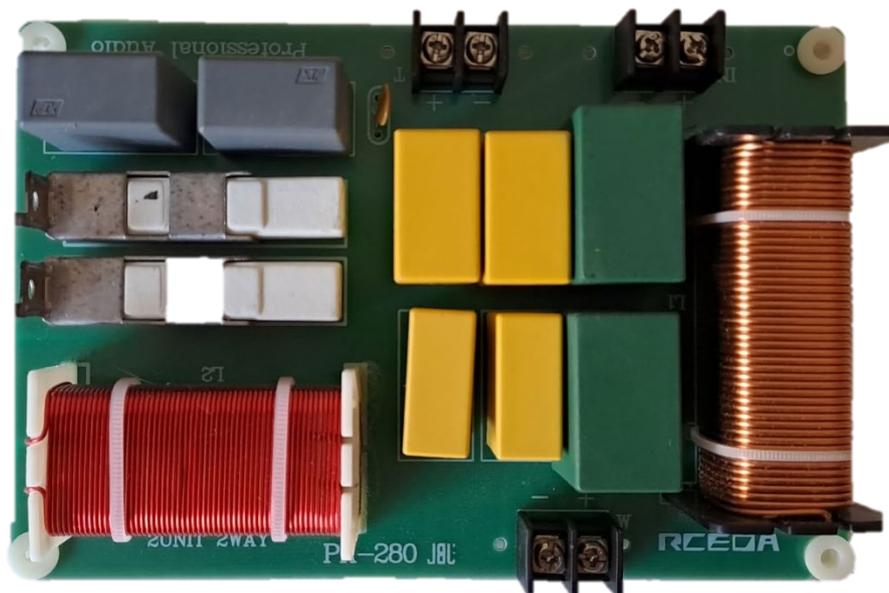


Ilustración 29: *Crossover* modelo 500007002 Neyoann

#### 4.6 Test del *crossover*

Una vez adquirido el *crossover*, se ha procedido a verificar su funcionamiento mediante la medición de la respuesta en frecuencia proporcionada por el filtro paso bajo y paso alto que lo componen. Para realizar estas mediciones, se ha utilizado el amplificador BEHRINGER EUROPOWER EP1500, la interfaz de audio M-AUDIO y el software ARTA y [9].

Con el propósito de realizar las mediciones correspondientes del *crossover*, se ha procedido a conectar la salida de la interfaz de audio a la entrada del *crossover*. Se han conectado tanto el *tweeter* como el *woofer* al *crossover* para añadir las respectivas cargas. Asimismo, se ha conectado la salida del *crossover* destinada al *woofer* con la entrada del canal 1 de la interfaz, para medir la respuesta del filtro paso bajo, y posteriormente se ha conectado el *tweeter* con el fin de medir la respuesta del filtro paso alto.

En la Ilustración 30 se muestra la conexión establecida entre la interfaz de audio y la entrada del *crossover*, así como la conexión de la salida de la interfaz al puerto designado para el *tweeter*. La conexión con el *woofer* se ha llevado a cabo de manera análoga.

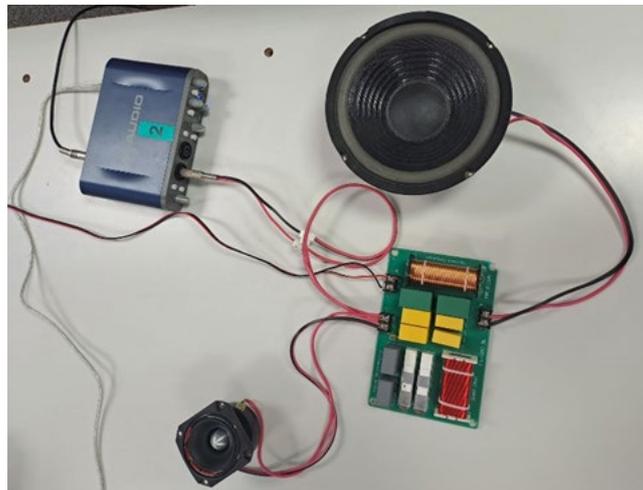


Ilustración 30: Conexión realizada para llevar a cabo la verificación del *crossover*

Tras realizar la conexión entre el *crossover* y la interfaz de audio, se ha conectado esta última al ordenador que cuenta con el software ARTA. Una vez conectada, se han ajustado algunos parámetros en el software, como el rango frecuencial y el tipo de escala deseado para representar la respuesta. Después de establecer estos parámetros, se ha encendido la interfaz, se ha seleccionado la opción FR1 en el software y se ha procedido a realizar la medición.

Después de llevar a cabo la simulación individual de ambos filtros, se han superpuesto ambas gráficas, obteniendo como resultado la respuesta en frecuencia del *crossover* que ha sido exhibida en la Ilustración 31.

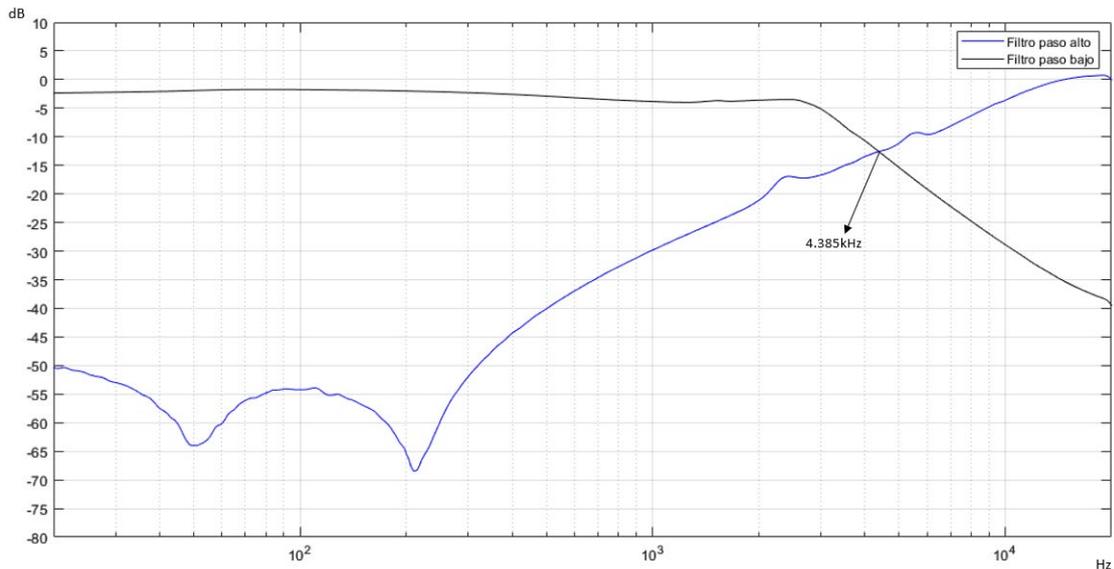


Ilustración 31: Respuesta en frecuencia medida del *crossover*

La frecuencia de cruce medida es de 4.385kHz, que difiere de los 2.8kHz de las especificaciones. Así pues, es necesario realizar las medidas de presión sonora del sistema completo para comprobar si el *crossover* tiene efectos negativos en ésta.

Se ha llevado a cabo el mismo procedimiento, pero en esta ocasión se ha medido la frecuencia de cruce del *crossover* utilizando una resistencia de 8.2Ω conectada al filtro paso alto. El valor de esta resistencia se obtiene en la sección 6.2.1. El resultado de la medición se muestra en la ilustración 32, donde se observa una frecuencia de cruce de 3.431kHz.

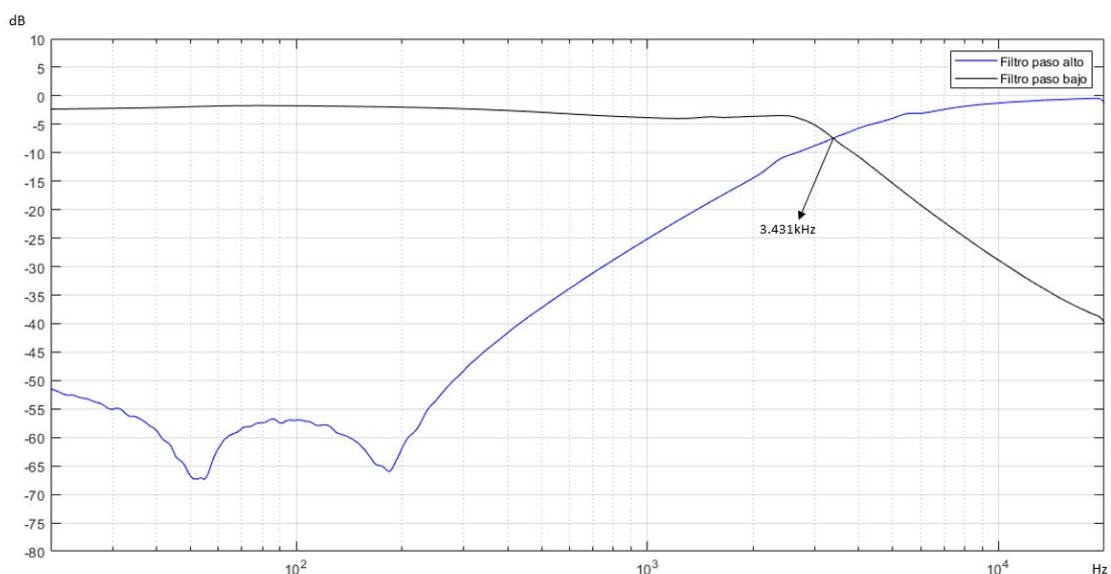


Ilustración 32: Respuesta en frecuencia medida del *crossover* con la resistencia de 8.2Ω

## 5. Diseño y construcción de la caja

Las cajas acústicas se emplean en los altavoces con el propósito de mejorar la controlar las ondas generadas en la parte posterior, evitando la cancelación o interferencia con las ondas emitidas por la parte frontal. Asimismo, brindan protección física contra daños externos, como golpes o humedad, y previenen interferencias de elementos cercanos.

### 5.1 Diseño de la caja

Para diseñar la caja, en primer lugar, se ha determinado el tipo de caja a diseñar, a partir de la simulación de la respuesta del *woofer* en dos tipos de cajas. En segundo lugar, se ha establecido el volumen de la caja a partir de la simulación del comportamiento del *woofer* en una caja de diferentes volúmenes. Finalmente, se han calculado las dimensiones de la caja a partir del volumen establecido y del volumen que ocuparán los transductores y el *crossover* dentro de la caja.

#### 5.1.1 Elección del tipo de caja

Con el objetivo de determinar el tipo de caja, se ha realizado una comparativa entre una caja cerrada y un bass reflex. Para ello, se han introducido en el software WinISD los parámetros de Thiele-Small del transductor, presentados en la Tabla 1, junto con las dimensiones del transductor y la membrana. Estas simulaciones han permitido evaluar el comportamiento que el *woofer* exhibiría en cada una de las cajas, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones.

La comparación ha partido de la simulación de ambos tipos de cajas, utilizando el volumen recomendado por el software para cada una de ellas. En el caso de la caja cerrada, se ha recomendado un volumen de 187.40 litros, mientras que para el bass reflex, el software ha sugerido un volumen de 219.79 litros. Se ha optado por desarrollar una caja cerrada debido a que su diseño prescinde de la necesidad de un puerto bass reflex o un resonador pasivo, lo que simplifica el control de las frecuencias bajas. La Ilustración 33 muestra una gráfica que representa la simulación del comportamiento del *woofer* tanto en la caja cerrada como en el bass reflex.

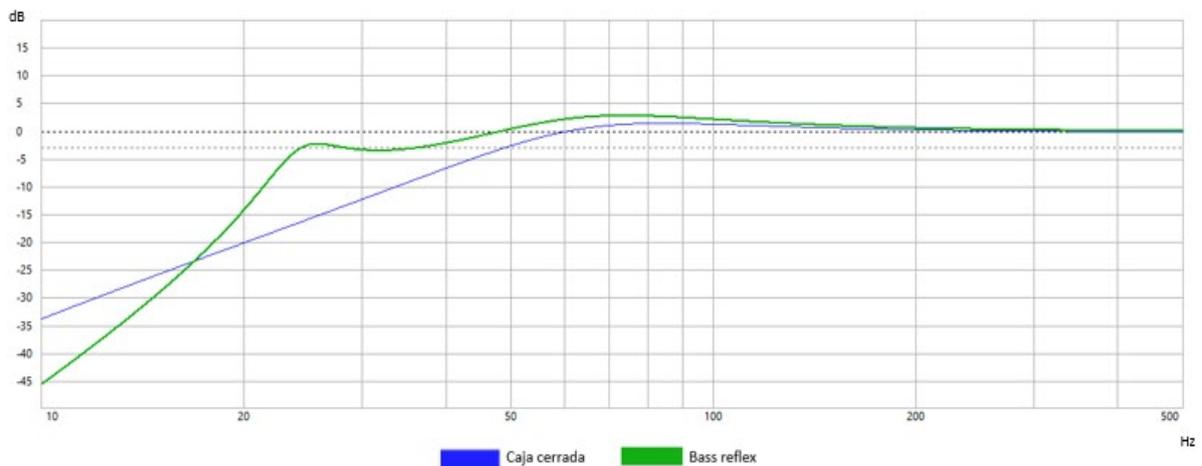


Ilustración 33: Simulación de caja cerrada y bass reflex

### 5.1.2 Determinación del volumen de la caja

Una vez establecido el tipo de caja, se ha procedido a determinar el volumen que esta tendrá, partiendo del volumen recomendado por el software y realizando una reducción progresiva en busca de un equilibrio entre el tamaño y la respuesta en frecuencia. Se han llevado a cabo simulaciones utilizando los diferentes volúmenes para determinar cuál ofrece un mejor rendimiento, teniendo en cuenta la necesidad de dimensiones reducidas del altavoz para su uso en entornos domésticos. En la Ilustración 34 se exhiben las representaciones gráficas de las respuestas en frecuencia resultantes al simular los diversos volúmenes de la caja cerrada. Además, en la Tabla 8 se presentan los valores de las frecuencias a -3 dB y a -6 dB, en relación con los distintos volúmenes evaluados.

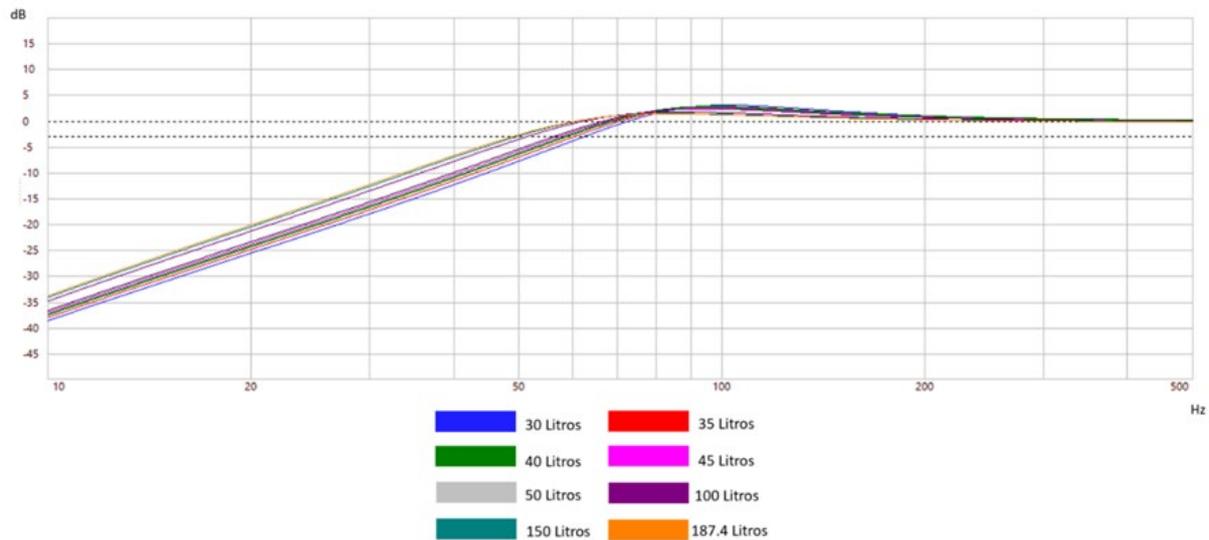


Ilustración 34: Simulación de la respuesta en frecuencia de la caja cerrada con diferentes volúmenes

Volumen (l)	Frecuencia a -3dB (Hz)	Frecuencia a -6dB (Hz)	Frecuencia de resonancia
187.40	47.98	40.75	60.34
150	48.64	41.45	61.65
100	51.18	43.62	64.81
50	56.11	48.31	73.37
45	57.26	49.30	73.13
40	58.45	50.49	77.26
35	60.06	52.08	79.92
30	62.14	54.05	83.31

Tabla 8: Frecuencias obtenidas de la simulación de la caja cerrada con diferentes volúmenes

Si se comparan la frecuencia de resonancia que ha simulado el software que presentaría el *woofer* dentro de la caja con cada volumen, con la frecuencia de resonancia del *woofer* de 54.38 Hz de la Ilustración 7, se comprueba que la frecuencia de resonancia aumenta al introducirlo dentro de la caja.

Durante las simulaciones con diferentes volúmenes, se ha observado que el tamaño de la caja afecta tanto a las frecuencias de corte como a la frecuencia de resonancia del *woofer*. Las cajas más grandes como 150 litros, 100 litros o 50 litros tienen una frecuencia de corte mínima de 56 Hz, mientras que las cajas más pequeñas como 35 litros o 30 litros, tienen una frecuencia de corte mínima de 62 Hz, limitando la reproducción de sonidos percusivos de baja frecuencia como, por ejemplo, el bombo de la batería, el cual emite frecuencias a partir de los 60 Hz.

Como resultado de estas observaciones, se ha llegado a la conclusión de que una caja de 40 litros proporciona un equilibrio adecuado entre tamaño y respuesta en frecuencia.

### 5.2.3 Volumen de aire que ocupan los transductores y el *crossover* dentro de la caja

Habiendo decidido utilizar una caja cerrada de 40 litros para el proyecto, se ha procedido a determinar sus dimensiones. En primer lugar, se ha calculado el volumen de aire ocupado por los transductores y el *crossover* dentro de la caja. La suma de estos volúmenes ha sido sustraída al volumen previamente determinado mediante las simulaciones, lo que ha permitido obtener el volumen interno de aire de la caja. Con este volumen obtenido, se han realizado los cálculos para determinar las dimensiones que adoptará la caja [8].

A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar el volumen ocupado por el *woofer*, el *tweeter* y el *crossover* dentro de la caja:

#### ***Volumen del woofer***

El volumen del *Woofer* ha sido obtenido tomando como referencia un cono truncado, debido a su similitud. La fórmula empleada ha sido la siguiente:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot (r_1^2 + r_2^2 + r_1 \cdot r_2)$$

Siendo:

- V: el volumen del *woofer* (m<sup>3</sup>).
- h: la altura del *woofer* (m).
- r<sub>1</sub>: el radio de la membrana (m).
- r<sub>2</sub>: el radio del transductor (m).

Tras realizar las medidas de la altura y los radios del *woofer*, se han plasmado los valores en la Ilustración 35 y a partir de ellos se ha calculado el volumen que ocupará el *woofer* dentro de la caja.



Ilustración 35: Dimensiones del woofer

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot 0.085 \cdot (0.1^2 + 0.05^2 + 0.1 \cdot 0.05) = 1.5577 \text{ dm}^3 = 1.56 \text{ litros}$$

### **Volumen del tweeter**

El volumen del *tweeter* se ha obtenido debido a su similitud, tomando como referencia un cilindro. La fórmula empleada ha sido la siguiente:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Siendo:

- V: el volumen del *tweeter* (m<sup>3</sup>).
- r: el radio del transductor (m).
- h: la altura del *tweeter*(m).

Tras realizar las medidas de la altura y el radio del *tweeter*, se han plasmado los valores en la Ilustración 36 y a partir de ellos se ha calculado el volumen que ocupará el *tweeter* dentro de la caja.



Ilustración 36: Dimensiones del tweeter

$$V = \pi \cdot 0.035^2 \cdot 0.06 = 0.2309 \text{ dm}^3 = 0.23 \text{ litros}$$

### **Volumen del *crossover***

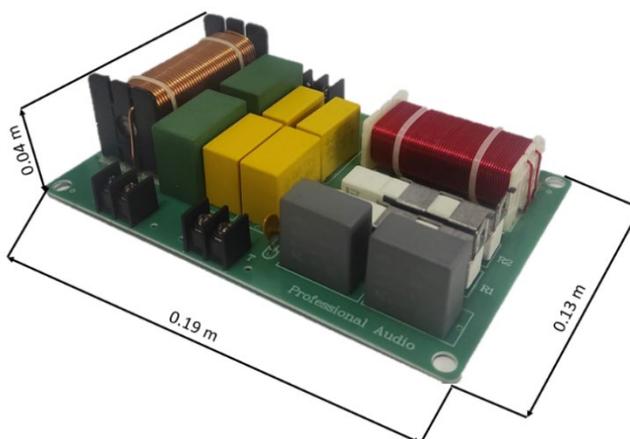
El volumen del *crossover* ha sido obtenido tomando como referencia un ortoedro, debido a su similitud. La fórmula empleada ha sido la siguiente:

$$V = A \cdot B \cdot C$$

Siendo:

- V: el volumen del *crossover* (m<sup>3</sup>).
- A: el largo del *crossover* (m).
- B: el ancho del *crossover* (m).
- C: el alto del *crossover* (m).

Tras realizar las medidas de las dimensiones del *crossover*, se han plasmado los valores en la Ilustración 37 y a partir de ellas se ha calculado el volumen que ocupará el *crossover* dentro de la caja.



*Ilustración 37: Dimensiones del crossover*

$$V = 0.19 \cdot 0.13 \cdot 0.04 = 0.988 \text{ dm}^3 = 0.99 \text{ litros}$$

En la Tabla 9 se resumen los valores de los volúmenes calculados.

Volumen del <i>woofer</i>	Volumen del <i>tweeter</i>	Volumen del <i>crossover</i>
1.56 litros	0.23 litros	0.99 litros

*Tabla 9: Volúmenes de los componentes*

### **Volumen interno de los equipos**

La suma del volumen interno de los equipos ha sido de 2.78 litros, el cual ha sido restado al volumen determinado tras las simulaciones, el cual era de 40 litros. Como resultado, se ha obtenido un volumen interno de aire de la caja de 37.22 litros.

#### 5.2.4 Cálculo de las dimensiones de la caja

Para calcular las dimensiones de la caja se ha empleado el número áureo, 1.61803. Esta proporción, conocida como la proporción dorada, tiene una relación especial con la geometría y el arte. En el diseño de cajas acústicas, se utiliza esta proporción para determinar las dimensiones de la caja y la ubicación de los altavoces, consiguiendo una respuesta en frecuencia óptima. Al utilizar esta proporción, se pretende minimizar las resonancias internas de la caja y mejorar la calidad del sonido.

Se ha llevado a cabo el cálculo de las dimensiones de la caja basándose en la siguiente ecuación:  $V=A \cdot B \cdot C$ , donde  $V$  representa el volumen interno de aire de la caja,  $A$  denota la altura de la caja,  $B$  representa el ancho de la caja y  $C$  corresponde a la profundidad de la caja.

En primer lugar, se ha estimado el ancho de la caja, representado por la incógnita  $B$ , mediante la obtención de la raíz cúbica del volumen interno de la caja,  $V$ :

$$B = \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{0.03722 \text{ m}^3} = 0.333881 \text{ m}$$

A continuación, se ha calculado la altura de la caja  $A$ , considerando que su valor debe ser el resultado del producto entre el número áureo 1.618 y el valor del ancho calculado  $B$ .

$$A = 1.618 \cdot B = 1.618 \cdot 0.333881 \text{ m} = 0.540219 \text{ m}$$

El cálculo de la profundidad de la caja  $C$ , se ha realizado mediante el producto entre la inversa del número áureo 0.618 y el valor del ancho calculado  $B$ .

$$C = 0.618 \cdot 0.333881 \text{ m} = 0.206338 \text{ m}$$

Una vez obtenido el valor de las dimensiones de la caja, se ha verificado que el producto de las tres constantes resulte en el valor del volumen de aire interno de la caja.

Tras haber corroborado dicho volumen, se procede a diseñar la caja con dimensiones internas de 20.6 x 33.4 x 54 cm. En el Anexo 1 se presenta el croquis de la caja junto con los valores de las dimensiones internas.

### 5.3 Construcción de la caja

La construcción de la caja se ha llevado a cabo utilizando las dimensiones calculadas en el apartado anterior. Para ello, se ha empleado un tablero de madera DM (Densidad Media) proporcionado por la universidad, con un grosor de 2 cm y un tamaño de 180 x 120 cm. Durante el proceso de construcción, se ha utilizado una sierra de calar para dividir el tablón en secciones más manejables. Para poder realizar un corte recto, se ha empleado una sierra circular. Además, se ha utilizado un taladro junto con coronas del diámetro adecuado para realizar los agujeros destinados a los altavoces. Asimismo, se ha aplicado cola blanca especial para garantizar un ensamblaje apropiado entre todas las caras de la caja.

#### 5.3.1 Proceso de construcción de la caja

El proceso de fabricación de la caja acústica ha empezado con el corte de las caras del altavoz. Una vez cortadas las caras, se ha procedido a lijar cuidadosamente las 6 caras con el objetivo de obtener una superficie suave y uniforme, logrando así un mejor acabado. Posteriormente, se han trazado y cortado dos circunferencias del tamaño adecuado para el *tweeter* y el *woofer*. En la Ilustración 38 se muestra el resultado obtenido tras haber realizado los cortes.



*Ilustración 38: Caras del altavoz*

Posteriormente, se ha llevado a cabo una prueba de colocación de las caras, verificando la corrección de las medidas y asegurando un ajuste perfecto entre todas las caras. Una vez comprobado que encajan adecuadamente, se han unido las 5 caras traseras mediante el uso de una cola especial. En la Ilustración 39 se puede apreciar el ensamblado de las caras.



*Ilustración 39: Estructura de la caja*

Una vez pegadas, se ha llevado a cabo otro proceso de lijado en las 5 caras traseras para asegurar un acabado uniforme. Asimismo, se han realizado dos agujeros en la cara trasera para permitir la conexión de los conectores banana hembra, que facilitarán la conexión de los cables de los altavoces.

Por último, se ha pegado la cara principal al resto de las caras y se ha aplicado una capa de pintura especial en toda la caja, brindándole un acabado estético y protector. Con estas acciones, se concluye el proceso de fabricación de la caja. La Ilustración 40 muestra el resultado final del acabado de la caja.



Ilustración 40: Prototipo final

#### 5.4 Elección del material absorbente

Con el objetivo de minimizar las reflexiones y resonancias no deseadas que se generan durante la reproducción del altavoz en el interior de la caja, así como de reducir la frecuencia de resonancia del altavoz, se ha llevado a cabo la selección del material absorbente. Estas pruebas consistieron en medir la respuesta en frecuencia del conjunto con cada absorbente y compararla con la respuesta en frecuencia sin utilizar absorbente. Además, se midió la frecuencia de resonancia del *woofer* dentro de la caja con cada uno de los absorbentes y se comparó con la medida realizada sin ellos.

En dichas mediciones se han utilizado lana de oveja, con un espesor de 40 mm y una densidad de 15 Kg/m<sup>3</sup>, y fieltro textil con un espesor de 14 mm y una densidad de 4.7 Kg/m<sup>3</sup> como materiales absorbentes. La Ilustración 41 muestra ambos materiales empleados en el proceso.



Ilustración 41: Materiales absorbentes comparados

### 5.4.1 Medida de la respuesta en frecuencia para escoger absorbente

Para realizar la medición de la respuesta en frecuencia del sistema con cada absorbente, se ha colocado el sonómetro frente al altavoz en la cámara anecoica y se ha emitido ruido rosa desde el generador hacia el altavoz. Los altavoces y el *crossover* se han colocado dentro de la caja y se han llevado a cabo tres mediciones.

En la primera medición, no se ha utilizado ningún material absorbente con el fin de comparar los resultados obtenidos con cada absorbente y observar las posibles mejoras que ofrecen. En la segunda medición, se ha introducido lana de oveja como material absorbente dentro de la caja. Por último, en la tercera medición, se ha utilizado fieltro industrial.

Los resultados obtenidos se presentan en la gráfica de la Ilustración 42. Se ha observado que, al utilizar lana de oveja como material absorbente, se ha mantenido constante la respuesta en frecuencia entre los 80 y 200 Hz. Por otro lado, al emplear el fieltro industrial, se ha observado una ligera atenuación en este rango de frecuencias.

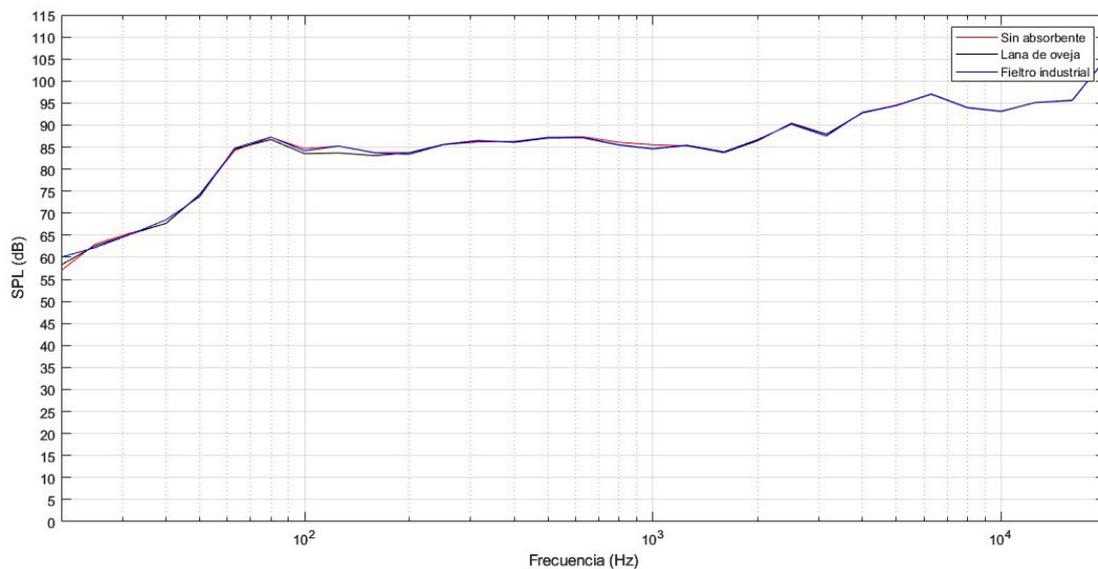


Ilustración 42: Resultados de las medidas de la respuesta en frecuencia con los absorbentes

### 5.4.2 Medida de la curva de impedancia con cada absorbente

La medida de la curva de impedancia se ha realizado de la misma manera que en el apartado 3.2.1.1, con la diferencia de que en esta ocasión se ha colocado el *woofer* dentro de la caja para evaluar el efecto de la presencia del material absorbente. En la Ilustración 43 se muestra el conexionado realizado.



Ilustración 43: Medida de la curva de impedancia para comprobar el efecto del material absorbente

Con el fin de verificar el efecto del material sobre la frecuencia de resonancia del sistema, se han realizado nuevamente tres mediciones de la curva de impedancia dentro de la caja (sin material absorbente, con lana de oveja y con fieltro industrial) para comparar sus resultados y determinar qué material absorbente emplear. El resultado obtenido se muestra en la gráfica de la Ilustración 44.

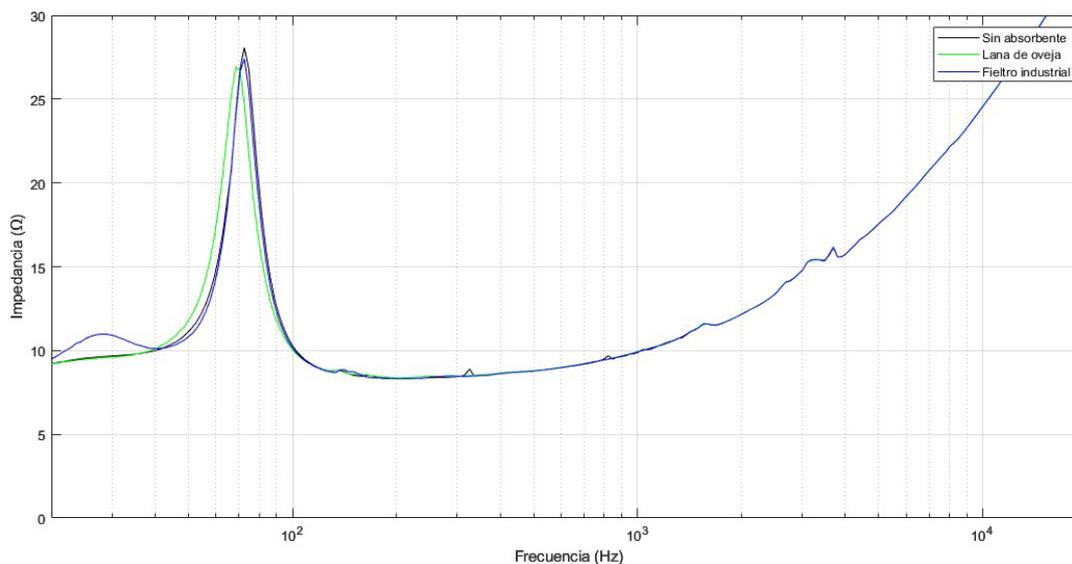


Ilustración 44: Resultados de las medidas de la curva de impedancia con los absorbentes

Si se compara la Ilustración 44 con la Ilustración 7, se aprecia que al haber introducido el *woofer* en la caja, la frecuencia de resonancia ha experimentado un aumento de 54.38Hz a 72.51Hz. En la ilustración 44, se observa que, al utilizar fieltro industrial, la frecuencia de resonancia se mantiene en 72.51Hz, mientras que, al utilizar lana de oveja, la frecuencia de resonancia dentro de la caja se ha reducido a 68.48Hz.

Tras valorar los resultados obtenidos para la frecuencia de resonancia de la caja, se ha decidido emplear lana de oveja como absorbente debido a su capacidad para reducir el incremento de la frecuencia de resonancia causado por la caja.

## 6. Test del sistema completo

Habiendo construido la caja y adquirido el *crossover* comercial, se ha procedido a completar el montaje final del altavoz. En este proceso, se han atornillado los altavoces a la parte frontal de la caja, se ha ubicado el *crossover* y el material absorbente en el interior de la caja, y se han colocado los conectores banana hembra en la parte trasera de la caja.

Una vez se ha construido el altavoz, se ha llevado a cabo la verificación del sistema completo en la cámara anecoica. En este proceso, se ha realizado la medición de la respuesta en frecuencia del conjunto, lo que ha permitido verificar si el conjunto cumple con las expectativas descritas en el proyecto.

### 6.2 Verificación del conjunto

Se ha empleado el amplificador de potencia DAS D10 disponible en la cámara. Además, se ha empleado un sonómetro para llevar a cabo las mediciones. En la Ilustración 45 se puede observar la disposición del altavoz frente al sonómetro dentro de la cámara anecoica.

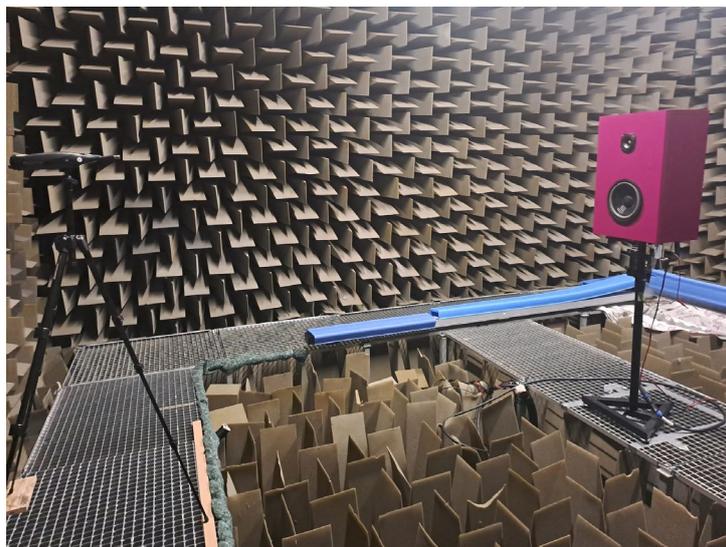


Ilustración 45: Distribución del sonómetro y el altavoz dentro de la cámara anecoica

### 6.2.1 Medida de la respuesta en frecuencia del sistema con diferentes resistencias

Tras haber realizado la medida de la respuesta en frecuencia del sistema del apartado 5.4.1, se ha observado en la ilustración 42 que, a partir de la frecuencia de cruce del filtro, el nivel de presión sonora en el rango de frecuencias del *tweeter* ha sido aproximadamente 10 dB más alto en comparación con el rango de frecuencias del *woofer*. Con el objetivo de lograr una respuesta más uniforme en el conjunto, se ha tomado la decisión de añadir una resistencia en serie con el *tweeter* para intentar atenuar esta diferencia. El valor de la resistencia utilizado ha sido calculado en base a los 10 dB que se desea atenuar en el *tweeter* y usando la ecuación de un divisor de tensión:

$$20 \cdot \log\left(\frac{4}{4 + R}\right) = -10\text{dB}; R = 8.65\Omega$$

Se ha utilizado una resistencia de  $8.2\Omega$  debido a que es el valor de la serie E12 que más se aproxima al valor calculado. Además, se ha llevado a cabo una medición adicional utilizando una resistencia de  $6.8\Omega$  para poder comparar los resultados obtenidos. Para efectuar las mediciones, se ha situado el *crossover* dentro de la caja, se ha conectado la salida del filtro paso alto a cada una de las resistencias y, a su vez, se ha conectado el *tweeter* al otro extremo de cada resistencia. Tras realizar todas las conexiones, se ha colocado el altavoz en la cámara anecoica y se ha medido la respuesta en frecuencia del sistema. Los resultados obtenidos se han representado en la Ilustración 46.

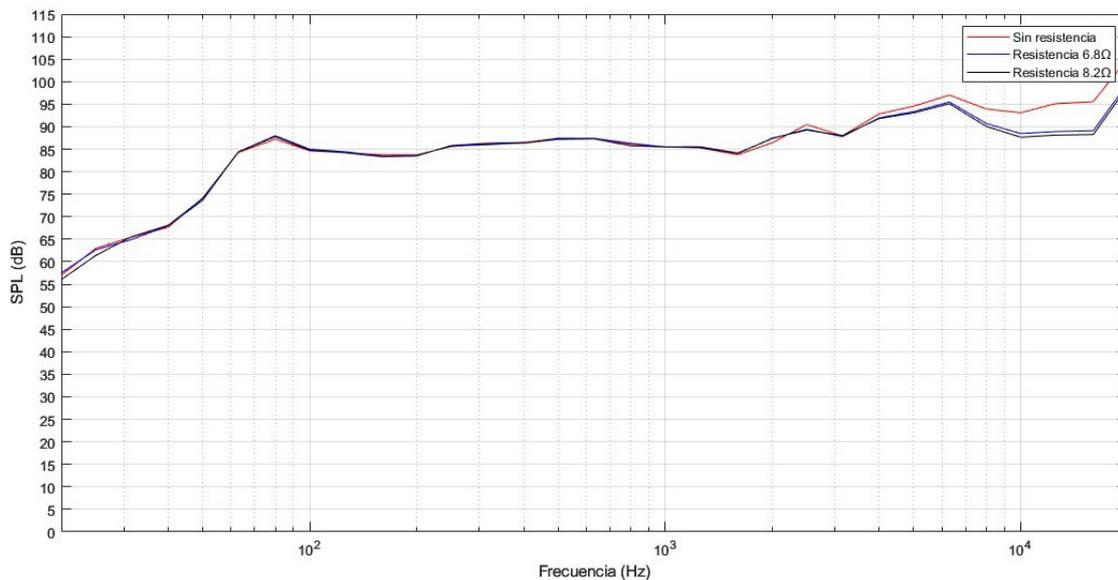


Ilustración 46: Respuesta en frecuencia con varias resistencias

En las gráficas se destaca que la atenuación más significativa se ha producido a partir de los 5 kHz. A pesar de haber utilizado una resistencia para atenuar el nivel de presión sonora del *tweeter* no se ha conseguido igualar al resto de la respuesta.

### 6.2.2 Medida de la respuesta en frecuencia del conjunto completo

La medida de la respuesta en frecuencia del conjunto completo, compuesto por el woofer, el tweeter, la caja, el *crossover*, la resistencia de  $8.2\Omega$  y la lana de oveja como material absorbente, se ha llevado a cabo suministrando al altavoz una potencia de 1 vatio mediante la etapa. Una vez se ha obtenido este valor en la etapa de potencia, se ha emitido ruido rosa desde el generador en funciones hacia el altavoz y se ha medido la respuesta en frecuencia del altavoz con un sonómetro. Los valores resultantes se han representado el gráfico de la Ilustración 47.

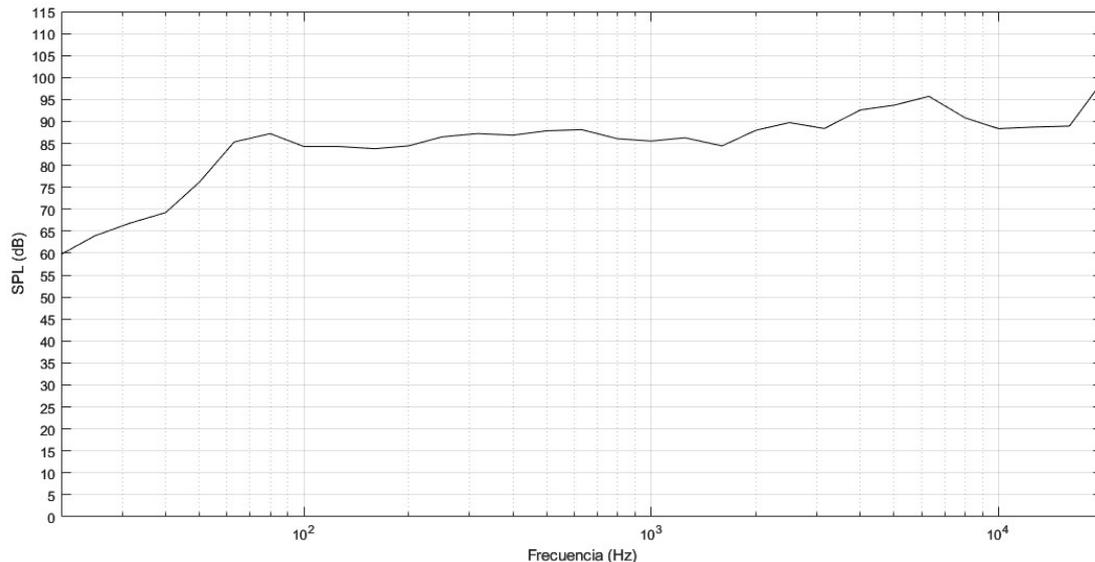


Ilustración 47: Respuesta en frecuencia final del conjunto

En la gráfica se observa que, a pesar de que la frecuencia de cruce del *crossover* no ha sido la esperada de 2.8kHz, se ha logrado reducir el pico del woofer presente en los 3kHz con el fin de igualar ese nivel con el del tweeter. Además, a partir de los 3kHz, se ha registrado un incremento en el nivel de presión sonora emitido por el tweeter, y se ha intentado compensar esto mediante la incorporación de una resistencia de  $8.2\Omega$ . Sin embargo, dicha resistencia no ha sido capaz de corregir la respuesta del tweeter, lo que ha generado variaciones en el nivel de presión sonora en el rango de frecuencias comprendido entre los 3kHz y los 20kHz.

### 6.2.2 Medida de la directividad del conjunto

Se ha llevado a cabo la medida de la directividad mediante la colocación del altavoz en la cámara anecoica sobre la base giratoria LT360. Para realizar dicha medida, se ha ubicado el sonómetro a una distancia de un metro. Se ha procedido a emitir ruido rosa a través del altavoz y, posteriormente, se ha girado la base cada 15°, realizando un total de 24 medidas. El propósito de este procedimiento ha sido obtener información acerca de la directividad del altavoz en un rango de 0° a 360°. En la Ilustración 48 se muestra el diagrama polar que se ha obtenido como resultado de esta medida.

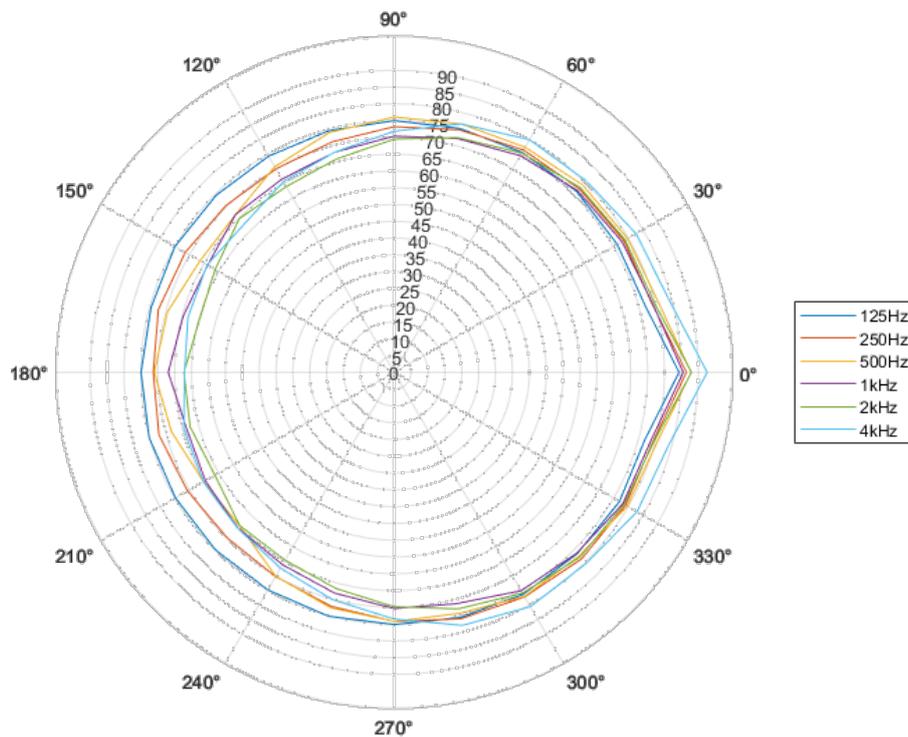


Ilustración 48: Diagrama polar de directividad de 125Hz a 4kHz

## 7. Conclusiones

Tras la finalización de este proyecto, cabe destacar que se ha logrado diseñar e implementar la caja del altavoz, así como llevar a cabo el diseño del *crossover*, mediante la integración de todos los estudios realizados durante su desarrollo.

Todos los parámetros, materiales y ajustes realizados en este proyecto se han seleccionado mediante comparativas y búsqueda de posibles soluciones para lograr la mejor respuesta en frecuencia posible con los altavoces disponibles.

Como propuesta de mejora, se sugiere considerar la adquisición de transductores que exhiban una respuesta en frecuencia más plana. Esto facilitará el proceso de ajuste en el *crossover*, permitiendo una integración más sencilla entre los diferentes componentes del sistema de altavoces.

También se sugiere como mejora, considerar el diseño de un sistema bass reflex para reducir el tamaño de la caja acústica. Esto se debe a que los sistemas bass reflex permiten un movimiento de aire más libre, lo que a su vez proporciona una mejor extensión en las frecuencias bajas.

Estas propuestas de mejora proporcionarían una oportunidad para optimizar más el diseño del altavoz y alcanzar una respuesta en frecuencia más equilibrada.

## Bibliografía

- [1] Center for Music Ecosystems. Guía sobre la música y los ODS. Última vez visto el 22 de abril de 2023, de <https://www.centerformusicecosystems.com/sdgs>
- [2] Newell, Philip Richard, and K. R. Holland. Loudspeakers: for Music Recording and Reproduction. Focal. 2007.
- [3] Manual de instrucciones Yamaha HS Series. Visto por última vez el 8 de mayo de 2023, de [https://es.yamaha.com/files/download/other\\_assets/0/793650/hs8i\\_es\\_om\\_c0.pdf](https://es.yamaha.com/files/download/other_assets/0/793650/hs8i_es_om_c0.pdf)
- [4] Arta, Apuntes de Aplicación: N°6 Directividad y Polaridad. Última vez visto el 24 de abril de 2023, de [https://artalabs.hr/AppNotes/AP6\\_Mediciones%20de%20Directividad%20y%20Polaridad.pdf](https://artalabs.hr/AppNotes/AP6_Mediciones%20de%20Directividad%20y%20Polaridad.pdf)
- [5] Thiele A.N. The Thiele-Small Parameters for Measuring, Specifying and Designing Loudspeakers, PALA International Conference, Singapur. 2004.
- [6] Bowick Chris, Newnes. RF Circuit Design. 1982.
- [7] Colloms, Martin. High Performance Loudspeakers. 5th ed., John Wiley & Sons. 1997.
- [8] Ruiz Vassallo, Francisco. Diseño y fabricación de bafles. Creaciones Copyright. 2007.
- [9] Mateljan, Ivo. Manual de usuario Arta. Se vio por última vez el 16 de marzo de 2023, de <https://www.artalabs.hr/AppNotes/ArtaManualDeUsuarioEspanol.1.2.0.pdf>