

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA
Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Diseño y Prototipado De Un Altavoz Portátil”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:
Alejandro Marco Ibáñez

Tutor/a:
Jesús Alba Fernández
Romina Del Rey Tormos

GANDÍA, 2018

RESUMEN

Este TFG abarca el diseño y construcción de una caja acústica para la creación de un altavoz portátil. Además, se incluye del prototipado electrónico necesario para dotarlo de una gran conectividad con distintos dispositivos. En una primera fase del proyecto, una vez escogido el diseño a llevar a cabo y realizadas las pertinentes simulaciones, se construirá el prototipo. De esta forma, se pasará a una fase de pruebas y mediciones, en la cual el altavoz y distintas variaciones de este serán estudiadas en una cámara anecoica a fin de mejorar el diseño de la caja acústica final.

ABSTRACT

This bachelor's thesis involves the design and making of an enclosure for a small portable speaker. Furthermore, the electronic prototyping that is needed for wireless communication across different devices is included. In a first stage of the project, and once the design has been made and simulated, the prototype will be made. Secondly, a process of test and measure will be conducted in an anechoic chamber, varying different aspects of the speaker and measuring the changes to improve the result.

PALABRAS CLAVE

Electroacústica, diseño, caja acústica, altavoz portátil.

KEY WORDS

Electroacoustic, design, acoustic enclosure, portable loudspeaker.

CONTENIDO

1. Objeto y antecedentes	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	6
2. Diseño	7
2.1 Definición estratégica	7
2.2 Diseño del concepto	8
2.2.1 Ejemplos actuales de altavoces portátiles	8
2.2.2 Consideraciones del proceso	9
2.2.3 Estudio de los elementos del altavoz	10
2.2.4 Proceso de creación y herramientas para la visualización	17
2.2.7 Conclusiones	19
2.3 Diseño en detalle	20
2.3.2 Drivers escogidos	20
2.3.3 Diseño de la caja	25
2.3.4 Diseño de la electrónica para el prototipado	29
3. Construcción del prototipo	30
3.1. Mecanizado de la caja acústica	30
3.1.1. Mecanización del marco	31
3.1.2 Mecanización de las tapas trasera y delantera	32
3.2 Ensamblado	32
4. Verificación y testeo	34
4.1 Metodología	34
4.1.1 Medida de la sensibilidad para el ajuste de la respuesta en frecuencia	35
4.1.2 Medida de la respuesta en frecuencia	35
4.2 respuesta en frecuencia	36
4.4 Introducción de material de relleno y efectos provocados en la respuesta en frecuencia	36
4.5 Introducción de distintas protecciones de drivers y efectos provocados en la respuesta en frecuencia	37
4.5.1 Tela	37
4.5.2 Rejilla metálica	38
4.5 Discusión y Conclusiones de los resultados	38
5. Prototipo final y extracción de características	39
6. Conclusiones	40
7. Bibliografía y referencias	42

8. Declaración de trabajo original	42
9. Agradecimientos	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Aspecto del altavoz comercial Bose SoundLink Mini II.	8
Figura 2 -Elementos del Bose SoundLink Mini II.....	9
Figura 3 – Respuesta en frecuencia del Bose SoundLink Mini II.....	9
Figura 4 – Esquema de una caja cerrada	13
Figura 5 – Esquema de una caja Bass-réflex	13
Figura 6 – Respuesta típica de un sistema con radiador pasivo	14
Figura 7 – Esquema de una caja con radiador pasivo	15
Figura 8 – Representación de las distintas curvas de Olson	15
Figura 9 – Tablero de inspiración creado durante el proceso creativo	17
Figura 10 – Reproductor de vinilo del diseñador Dieter Rams.....	18
Figura 11 – Radio portátil del diseñador Dieter Rams	18
Figura 12 – Boceto creado durante el proceso de creación.....	18
Figura 13 – Dibujo en detalle de uno de los conceptos de altavoz	19
Figura 14 – Render del concepto final de altavoz.....	19
Figura 15 – Detalle de los drivers escogidos	21
Figura 16 – Esquema eléctrico para la medición de los parámetros Thielle-Small	22
Figura 17 – Montaje para la medición de los parámetros Thielle-Small	22
Figura 18 – Curva de impedancia típica.....	23
Figura 19 – Curva de impedancia de los drivers escogidos	23
Figura 20 – Detalle de los radiadores pasivos escogidos	25
Figura 21 – Respuesta en frecuencia simulada para caja sellada	26
Figura 22 – Respuesta en frecuencia simulada para un radiador pasivo	26
Figura 23 – Respuesta en frecuencia simulada para un doble radiador pasivo	26
Figura 24 – Comparación de la respuesta en frecuencia simulada en los modelos doble y único radiador pasivo.....	27
Figura 25 – Vista frontal y lateral del marco	28
Figura 26 – Vista frontal y lateral de la tapa delantera.....	28
Figura 27 . Vista frontal y lateral de la tapa trasera.....	29
Figura 29 – Esquema de conexionado para el prototipado electrónico.....	30
Figura 30 – Momento previo al fresado de las piezas.....	31
Figura 31 – Piezas del marco en distintas fases antes de su encolado	32
Figura 32 – Conjunto de piezas obtenido tras la mecanización.....	32
Figura 33 – Proceso de encolado del marco.....	33
Figura 34 – Detalle de las perforaciones para la colocación de los drivers	33
Figura 35 – Prototipo antes del sellado de la tapa trasera.....	34
Figura 36 – Esquema del montaje en la cámara anecóica.....	34
Figura 37 – Respuesta en frecuencia del prototipo	36
Figura 38 – Material absorbente utilizado para el relleno.....	36
Figura 39 – Comparativa de la respuesta en frecuencia con y sin relleno de material absorbente	37

Figura 40 – Comparativa de la respuesta en frecuencia con y sin protector de tela	37
Figura 41	38
Figura 42	39
Figura 43	39
Figura 44	40
Figura 45	41

1. OBJETO Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción

La reducción del tamaño de altavoces de consumo se ha hecho patente en los últimos años. El cambio no se ha reflejado solo en su tamaño, sino que ha ido acompañado de una serie de funcionalidades como son la conexión inalámbrica, la portabilidad e incluso la resistencia al agua. El mercado se ha adaptado al uso de nuestro teléfono móvil como principal reproductor de música y a los servicios de audio bajo demanda. En este cambio, hemos visto cómo también han mutado las reglas de diseño básicas que conocemos en equipos de alta fidelidad, sucumbiendo a la portabilidad y una mayor presencia de electrónica y procesado del audio. También hemos visto como materiales como los plásticos y metales han tomado un mayor protagonismo, dando como resultado nuevos conceptos y diseños.

Este trabajo nace del intento de crear un altavoz de pequeñas dimensiones y conectividad inalámbrica. Para ello, estudiaremos el proceso que conlleva la creación de un altavoz e intentaremos adaptarlo a una pequeña caja acústica. Además de fundamentos básicos de electroacústica, se hará uso de los conocimientos y técnicas tradicionales recogidas por distintos autores especializados en su diseño y fabricación. En el proceso se intentará en todo momento ceñirnos a materiales y técnicas que estén dentro de las posibilidades y capacidades técnicas a nuestro alcance. Por otra parte, se intentará sacar el máximo rendimiento al conjunto eléctrico-mecánico-acústico que conforman los transductores y la caja acústica *per se*, alejándose de las potenciales mejoras que nos permitirían técnicas de procesado de audio. Se intentarán alcanzar ciertos requisitos técnicos y estéticos, estudiándose distintas opciones en el diseño y cómo estas pueden afectar al resultado final.

1.2 Objetivos

El objeto de este estudio es la construcción de un prototipo de altavoz portátil y su caracterización.

Los principales objetivos del trabajo son:

- Analizar y aplicar el proceso de diseño de un altavoz.
- Construir un prototipo de altavoz portátil.
- Evaluar el comportamiento del altavoz construido.

Para ello, se ha dividido este documento en los siguientes apartados:

- Objeto y antecedentes: Breve introducción al proyecto y enumeración de los objetivos propuestos.
- Diseño: En este apartado se reúnen una serie de fundamentos y conceptos básicos que permitirán crear un diseño completo del prototipo de altavoz.
- Construcción: Descripción del proceso de construcción del prototipo.
- Verificación y testeo: Se describen las actividades realizadas para caracterizar el altavoz y los resultados obtenidos.
- Conclusiones: Se resaltan una serie de puntos una vez obtenidos y analizado los resultados. Se incluyen limitaciones del estudio, así como posibles líneas futuras para avanzar en este.

- Bibliografía: Recoge las fuentes consultadas y referencias.

2. DISEÑO

El diseño va a jugar un papel importante en el desarrollo del altavoz. Lo concebiremos como un proceso de creación con un propósito que busca cubrir una serie de exigencias. En este caso, al tratarse de un dispositivo, debe satisfacer a la persona que vaya a utilizarlo. Dicho de otra manera, se analiza y planifica para crear un producto que cubra las necesidades de un consumidor. Este proceso no es solo una actividad estética, sino que se debe buscar la mejor forma para que el producto sea conformado, fabricado, usado y relacionado con su ambiente.

El proceso a seguir se puede dividir en una serie de fases. Primeramente, a partir de unas informaciones iniciales, se desarrollaría un concepto básico. En una segunda fase, se desarrollaría un prototipo, el cual se pondría a prueba para finalmente, en un supuesto futuro, adaptarse a su comercialización. Podríamos diferenciar entre:

- 1. Definición estratégica
- 2. Diseño del concepto
- 3. Diseño en detalle
- 4. Verificación y testeo
- 5. Producción
- 6. Mercado
- 7. Disposición final

El alcance de este trabajo se limita a los puntos que van del 1 al 4. Aunque tendremos en cuenta en la aplicación de estos el resto del proceso.

2.1 Definición estratégica

Dentro de este apartado se definen una serie prestaciones que buscamos en nuestro producto final tanto como ciertos requisitos que hacen factible el proyecto. De esta forma queda definido el producto objetivo sin entrar en cómo realizarlo.

Características básicas:

- Tamaño reducido
- Conectividad inalámbrica
- Portabilidad
- Estética atractiva y elegante
- Calidad de sonido
- Poder ser transportado con una mano

Requisitos:

- Facilidad de construcción
- Costes reducidos

2.2 Diseño del concepto

En esta parte del proceso entra en juego el análisis y la creatividad, de forma que la idea y concepto del producto pueda ser entendida por terceros. Se analizarán las distintas alternativas para acabar seleccionando una de ellas y entrar en el diseño en detalle. Definiremos tanto las tecnologías y elementos a utilizar como los materiales. Para ello, hablaremos de los distintos elementos que conforman el altavoz y se describirá el concepto mediante una serie de herramientas como renders, bocetos, esquemas, o collages de inspiración.

2.2.1 Ejemplos actuales de altavoces portátiles

Podemos encontrar algunos referentes dentro de los fabricantes de altavoces portátiles, los cuales servirán como ejemplo en el proceso de creación. Entre ellos encontramos la empresa *©Bose Corporation*, la cual ha sido aclamada por sus productos por diferentes medios de comunicación, gurús del audio y blogs de tecnología (Yuen, 2018). Entre sus altavoces inalámbricos más conocidos encontramos el *Bose SoundLink Mini II*, el cual podemos ver en detalle en la Figura 1.



Figura 1 – Aspecto del altavoz comercial Bose SoundLink Mini II.

Con unas medidas de 5.1 x 18 x 5.8 cm y un peso de 0.68 kg, este altavoz es capaz de proporcionar una gran calidad de sonido en un tamaño reducido. Como se puede apreciar en la Figura 2, este dispositivo incorpora dos pequeños drivers⁽²⁾ que permiten reproducir contenido en estéreo. Además, incluyen un diseño de caja con radiador pasivo⁽¹⁾, el cual, como veremos y explicaremos más adelante, permite extender la respuesta en frecuencia de este, realzando los graves.

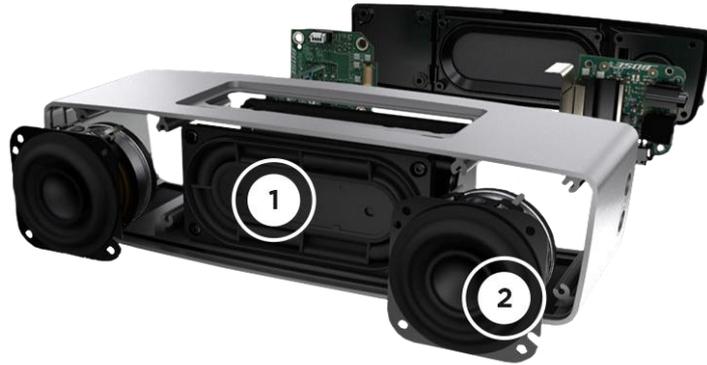


Figura 2 -Elementos del Bose SoundLink Mini II

Para tener una referencia en nuestro proceso de creación, se ha analizado la respuesta en frecuencia del altavoz en una cámara anecoica. Para ello, se ha hecho uso de la instrumentación acústica adecuada y se ha reproducir ruido rosa a través de un smartphone por medio de conectividad bluetooth a distintos niveles de reproducción. Tras el proceso de medida y extracción de resultados, se presenta la curva de respuesta en frecuencia en la Figura 3.

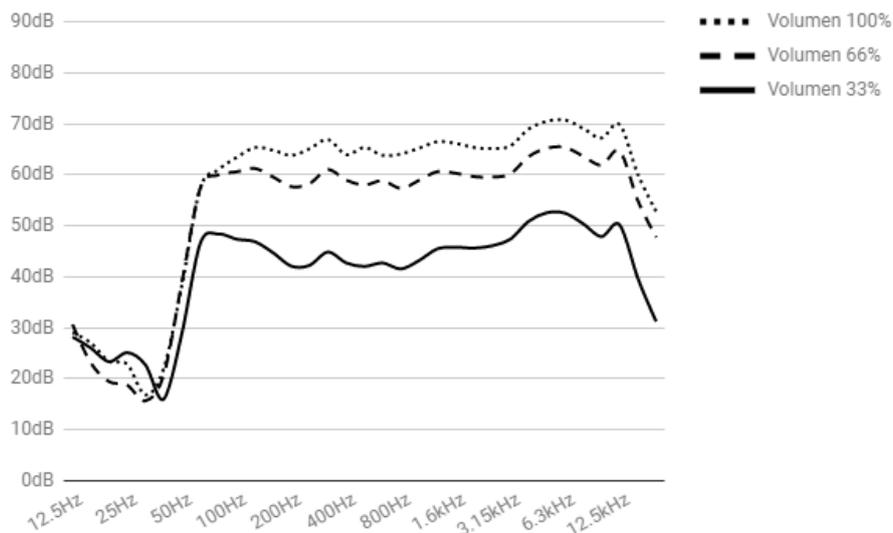


Figura 3 – Respuesta en frecuencia del Bose SoundLink Mini II

Podemos ver una curva que se mantiene entre los 60dB y 70dB desde los 80Hz a los 16kHz reproduciendo al máximo de volumen posible. Por otra parte, el nivel de presión sonora máximo a 1kHz es de:

$$\text{SPL}_{\text{máx.}} = 65,19\text{dB}$$

Utilizaremos estos datos a lo largo del proceso de verificación y testeo como referencia.

2.2.2 Consideraciones del proceso

El proceso típico a la hora de crear un altavoz típico puede variar, pero sigue una serie de pasos. Lo primero es determinar las características sonoras que

buscamos, principalmente la respuesta en frecuencia. La respuesta en frecuencia de un altavoz o sistema de altavoces ideal sería totalmente plana, de forma que sea totalmente fiel a lo que estamos reproduciendo. Posteriormente, elegiríamos unos drivers o conjunto de ellos que se ajustarán a nuestras necesidades y propósito. En base a las características físicas y mecánicas de estos simularíamos su comportamiento una vez colocados en un recinto acústico, es decir, una caja, lo cual nos permitiría conocer las dimensiones de esta para proceder a su construcción.

Este proceso nunca es el mismo y suele basarse en una serie de “recetas típicas” que se aplican en distintos escenarios. En pequeños estudios de grabación suelen utilizarse una pareja de altavoces de dos vías, en los cuales encontramos un driver para bajas y medias frecuencias y otro para las agudas. En este diseño, debe planificarse además un filtro que dividirá las frecuencias que reproducirá cada transductor, de forma que no se anulen el uno al otro.

En ocasiones, a este sistema se le añade un tercer elemento, un subwoofer. Este se encarga de las frecuencias más graves, y podemos encontrar numerosos diseños que permiten crear un altavoz que únicamente reproduzca bajas frecuencias.

Con estos dos ejemplos, aunque encontramos muchos más, se pretende ilustrar los distintos caminos que se pueden tomar a la hora de crear un sistema de sonido, y cómo el proceso puede variar en cada uno de ellos.

Hasta ahora, a la hora de construir un altavoz se presentaban menos limitaciones. Primaba el rendimiento y las cualidades técnicas sobre el diseño y la funcionalidad. Construir un altavoz portátil supone un reto distinto, la funcionalidad y el tamaño priman y determinan las decisiones que se tendrán que tomar.

En nuestro caso estamos limitados principalmente por el tamaño de nuestro altavoz, el cual debe poder cogerse fácilmente con una mano. Por otra parte, buscamos que este pueda cubrir la mayoría de las frecuencias en el espectro audible permitiendo una reproducción fiel de música y cualquier contenido de audio.

2.2.3 Estudio de los elementos del altavoz

A continuación, se estudian los distintos elementos que componen un altavoz, a fin de utilizar esta información a la hora de elegir los componentes

2.2.3.1 Drivers

Los drivers o transductores son el elemento que convierte la energía eléctrica en acústica. Estos son el último eslabón dentro de la cadena electroacústica, y deben cumplir una serie de requisitos como son un tamaño y costes moderados y una gran durabilidad. Dentro de estos podemos encontrar distintas clasificaciones, una de ellas está basada en como la energía se convierte. Dando lugar a la siguiente lista:

- Electrodinámico: Basado en la inducción magnética.
- Magnético: Variación de la reluctancia magnética
- Piezoeléctrico: Basado en el efecto piezoeléctrico de algunos materiales
- Magnetostrictivo: Basado en el fenómeno de magnetostricción

También pueden ordenarse según la banda de frecuencias en la que funcionan, distinguiendo entre graves, agudos, medios y otras variaciones que abarcan un rango de frecuencias mayor.

La última clasificación diferencia entre altavoces de radiación directa, que representan la mayoría de los altavoces existentes, y de radiación indirecta, los cuales no radian directamente al aire, interponiéndose un dispositivo entre este y el diafragma.

Actualmente, el altavoz electrodinámico de radiación directa es el más utilizado en la mayoría de los altavoces que se fabrican. Su funcionamiento se basa en el movimiento conjunto de una bobina móvil y una membrana, las cuales están inmersas dentro de un campo magnético creado por un imán permanente. El rango de frecuencias que cubran dependerá de la aplicación para la que estos han sido diseñados.

Por lo tanto, una de las elecciones más importantes serán los drivers a utilizar en la construcción de nuestro prototipo. Dado que uno de los requisitos en la primera fase del diseño es la reducción de costes, intentaremos encontrar un equilibrio entre la calidad y el precio de estos. Los drivers deberán ser de tamaño reducido para adaptarse a las dimensiones de un altavoz de este tipo y reducir el consumo energético de forma que logremos alargar la autonomía. En la mayoría de los altavoces portátiles del mercado, se utilizan altavoces de rango completo. Normalmente se utiliza una pareja de ellos, la cual sirve para crear una imagen estéreo o un sonido más envolvente. Algunos ejemplos de esto serían el anteriormente citado *Bose Soundlink Mini II*, aunque se pueden encontrar más ejemplos. A continuación, se presenta un listado en la Tabla 1 de 5 altavoces portátiles y sus respectivos drivers.¹

Modelo	Drivers
UE Boom 2	Dos transductores activos de 45 mm y dos radiadores pasivos de 45 mm x 80mm.
Fugoo Style	Dos altavoces de agudos de neodimio de 28mm, dos altavoces de medios de 39mm de aluminio de neodimio y dos radiadores pasivos de 43mm x 54
JBL Charge 3	Dos transductores de 43 mm y dos radiadores pasivos de tamaño desconocido.
Anker Soundcore Flare	Dos drivers de 44mm de rango completo y dos radiadores pasivos
UE Wonderboom	Dos transductores activos de 40 mm y dos radiadores pasivos de 46.1 mm x 65.2 mm

Tabla 1 – Comparación de los drivers usados por distintos altavoces comerciales

Como se puede apreciar, todos incorporan una pareja de altavoces de rango completo, los cuales se complementan con un sistema de radiador pasivo. Estos

¹ Selección de la revista *Techradar* como los mejores altavoces portátiles de 2018. (Pino, 2018)

drivers oscilan entre los 40mm y 45mm de diámetro, tamaño que usaremos de referencia en la elección de los drivers que incorporará nuestro altavoz. La única excepción sería el modelo *Fugoo Style*, que emplea un conjunto de drivers donde podemos diferenciar una pareja para los agudos y otra para los medios.

2.2.3.2 La caja acústica

La caja acústica es la estructura que proporciona soporte a los drivers de nuestro altavoz y moldeará las propiedades acústicas de este. Este recinto puede ser de numerosas formas: cerrado o abierto, ocultar estructuras internas... etc.

El objetivo de encerrar el driver en una caja proviene de la propia naturaleza de estos. La membrana de estos tiene dos lados, uno exterior y otro interior. Cuando uno de los lados crea una onda, el otro crea la misma, pero en fase inversa. Este fenómeno se denomina cortocircuito acústico. Esto nos lleva a una cancelación de los sonidos graves, debido a que estas se propagan de forma más omnidireccional al ser su longitud de onda mayor que el tamaño de la membrana del altavoz.

Una de las opciones para evitar este cortocircuito acústico sería situar el altavoz en una pantalla la cual tenga unas dimensiones superiores a la longitud de onda más baja reproducida por el altavoz. Sin embargo, esto puede ser difícil de implementar cuando trabajamos con frecuencias por debajo de los 250Hz. Para ejemplificar esto, supongamos que desea reproducir una nota musical a 200Hz y se desea evitar el cortocircuito acústico:

Considerando que la velocidad de propagación del sonido en el aire a 15° C es de $c=340$ m/s y $f=200$ Hz tenemos que:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$
$$\lambda = \frac{340}{200} = 1,7m$$

Una pantalla de 1,7 metros se hace imposible de aplicar en la mayoría de los casos reales. Al introducir el transductor dentro de un recinto cerrado eliminamos este problema de una forma práctica. Al hacer esto, la onda de la parte interior refleja en la pared trasera de la caja y rebota sumándose en ocasiones a la onda creada por la parte exterior. Esto es un problema menor ya que puede solucionarse mediante distintas técnicas como la introducción de absorbente, la cual aplicaremos posteriormente a nuestro diseño.

A continuación, se presentan una serie de consideraciones a tener en cuenta.

Diseños típicos de cajas

A la hora de colocar los drivers en un recinto cerrado, nos encontramos con una serie de sistemas típicos los cuales ofrecen distintos resultados, entre ellos encontramos:

Caja cerrada

El sistema más simple es una caja cerrada o sellada. Entre sus principales ventajas encontramos un tamaño moderado y una buena respuesta temporal. Como desventaja, presentan en general un sonido más plano a bajas frecuencias y una frecuencia de corte no muy baja.



Figura 4 – Esquema de una caja cerrada

Bass-Réflex

Encontramos otro tipo de soluciones como el Bass-réflex, que consiguen reforzar las bajas frecuencias que se pierden con un diseño de caja cerrada. En una caja cerrada, la mayor parte de la energía de la emisión acústica producida por la parte trasera de la membrana se pierde en forma de calor a través del material absorbente. La caja Bass- Réflex intenta recuperar parte de esta energía mediante la introducción de un tubo que conecta el interior de la caja con el exterior. Variando el volumen de la caja y las dimensiones de este tubo es posible optimizar las características del sistema. La principal desventaja es el tamaño necesario de caja para conseguir que el sistema funcione correctamente, aunque también se encuentra que la respuesta temporal no es demasiado buena.

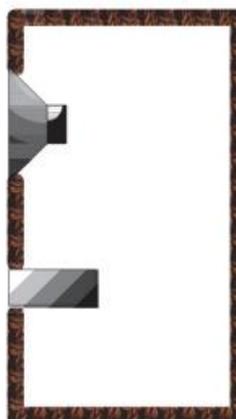


Figura 5 – Esquema de una caja Bass-réflex

Radiador Pasivo

El sistema de radiador pasivo consiste en colocar un altavoz sin bobina móvil ni motor. En bajas frecuencias esta pieza se mueve en respuesta a los cambios de presión producidos en el recinto. En la Figura 6, podemos ver cómo afecta su uso a la respuesta en frecuencia.

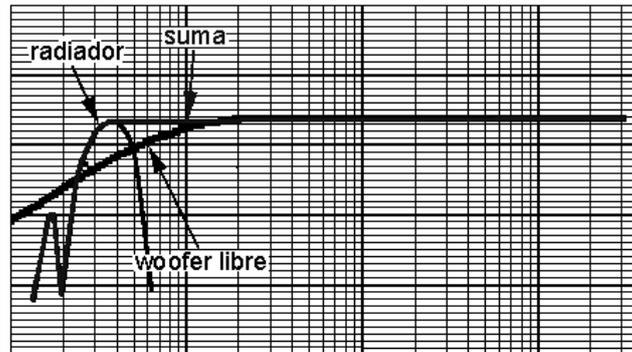


Figura 6 – Respuesta típica de un sistema con radiador pasivo

Como se puede apreciar, esta técnica permite reforzar las bajas frecuencias y además presenta una serie de ventajas respecto al sistema Bass-réflex

- Eliminan la coloración introducida por los tubos debido a frecuencias de resonancia propias y ruidos de turbulencia.
- Son más prácticos en recintos pequeños en los que no cabría un tubo con las dimensiones requeridas.
- Sistemas más sencillos, con menos ajustes y menos sensibles a las variaciones producidas por pérdidas en la caja.

Por contrapartida, estos elementos presentan una pendiente en bajas frecuencias más pronunciada y responden peor a los transitorios. Además, poseen una frecuencia de corte algo más elevada. Las características del radiador pasivo juegan un papel de vital importancia en el funcionamiento del sistema. Normalmente se utiliza una réplica del cono utilizado sin los elementos ya nombrados, debido a que la superficie efectiva suele ser igual y el coste económico es menor. Esto no implica que otros diseños no funcionen adecuadamente. Si conseguimos un radiador pasivo el cual tenga un desplazamiento volumétrico mayor que los activos, conseguiremos mayores potencias con menor distorsión.

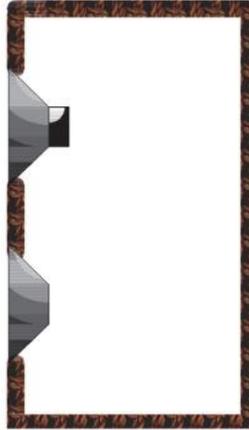


Figura 7 – Esquema de una caja con radiador pasivo

Curvas de Olson

El 27 de octubre de 1950, la AES publica un artículo científico escrito por Harry F. Olson, en el que este analiza el efecto de la forma de la caja acústica en la respuesta en frecuencia de un altavoz de caja cerrada. En la Figura 8, podemos ver un resumen de los resultados obtenidos, siendo la esfera y la caja "tipo I", los que consiguen una respuesta más plana y dejando en evidencia la importancia de la forma de la caja acústica en la respuesta en frecuencia. Encontramos variaciones de hasta 10dB en algunas de las cajas debido a las difracciones producidas dentro de estas.

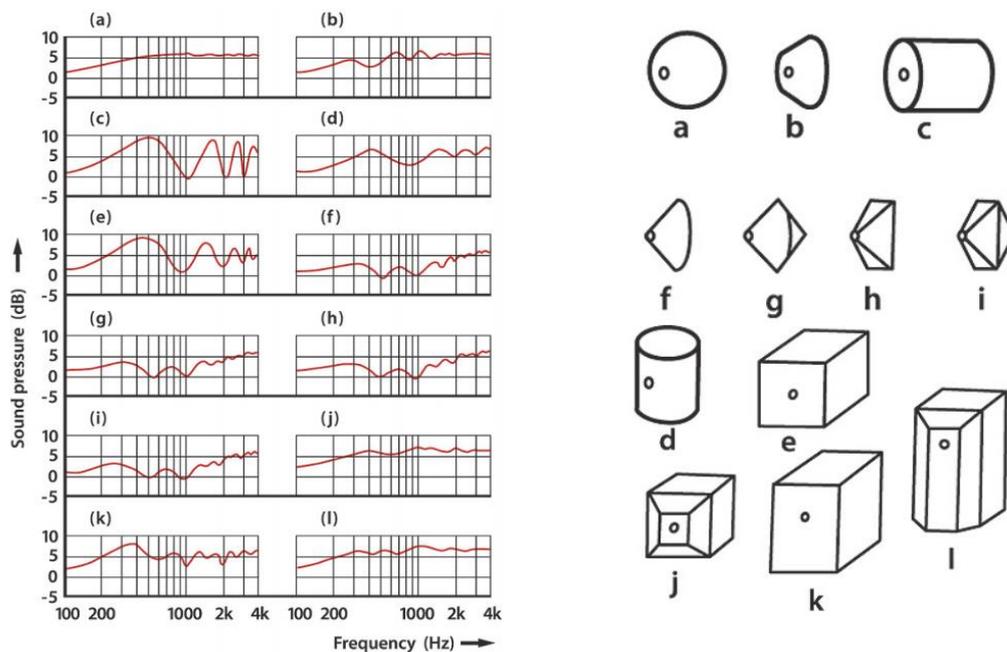


Figura 8 – Representación de las distintas curvas de Olson

El propio Olson concluye al final del artículo:

“Los experimentos descritos en este trabajo demuestran que los efectos nocivos de la difracción pueden reducirse eliminando todos los límites definidos en la parte delantera del gabinete sobre el cual se monta el mecanismo, de manera que la amplitud de las ondas difractadas sea reducida en amplitud, haciendo que las distancias del mecanismo a los bordes varíen de modo que habrá una relación aleatoria de la fase entre las ondas acústicas primarias y las difractadas”

(Olson, 1950) (Traducción)

Tendremos en cuenta los resultados de este estudio en las siguientes fases de creación, en las cuales se intentará suavizar los bordes interiores de la caja para evitar grandes variaciones en la respuesta en frecuencia.

Materiales

Tradicionalmente, la mayoría de las cajas acústicas de altavoces han sido construidas con madera. Algunas ventajas son las siguientes:

- Es relativamente no resonante.
- La mayoría de los países tienen una industria maderera establecida, por lo que esta puede suministrarse a precios realistas y en distintos formatos.
- Es un material fácil de trabajar y los costes son relativamente bajos.

Entre los materiales basados en madera, el aglomerado es el mas denso y está presente en la mayoría de las cajas acústicas. Como alternativa se encuentra la madera de abedul y los tableros de fibra de densidad media, también conocidos como MDF acrónimo ingles de *Medium Density Fibreboard*.

Encontramos otra serie de materiales menos comunes, como el cemento y el acero. En lo que respecta a altavoces portátiles, predominan materiales como el plástico o metales. Podemos ver en la siguiente lista que materiales utilizan los altavoces analizados anteriormente.

Modelo	Material
UE Boom 2	Estructura plástica, recubierto en telas sintéticas.
Fugoo Style	Estructura plástica con acabados en telas
JBL Charge 3	Estructura plástica con algunos elementos en aluminio y recubrimiento en telas sintéticas.
Anker Soundcore Flare	Estructura plástica con base gomosa y recubrimiento con telas.
UE Wonderboom	Estructura plástica, recubierto en telas sintéticas.

Tabla 2 - Comparación de los materiales usados por distintos altavoces comerciales

La Tabla 2 nos permite encontrar un patrón, al igual que en el caso de los drivers utilizados. Encontramos otros ejemplos como el caso del Bose SoundLink Mini II, el cual utiliza una estructura metálica con rejillas metálicas a modo de protección de los drivers, pero, por general, tendencia queda bastante definida.

2.2.4 Proceso de creación y herramientas para la visualización

Una vez analizados los diferentes elementos que componen el altavoz y su funcionamiento, así como las tendencias actuales, daremos paso a una fase creativa en la que se intentará sintetizar los conceptos asimilados durante la fase anterior. A continuación, se muestran una serie de herramientas empleadas que nos han llevado nuestro concepto de altavoz portátil.

2.2.4.1 Tableros de inspiración

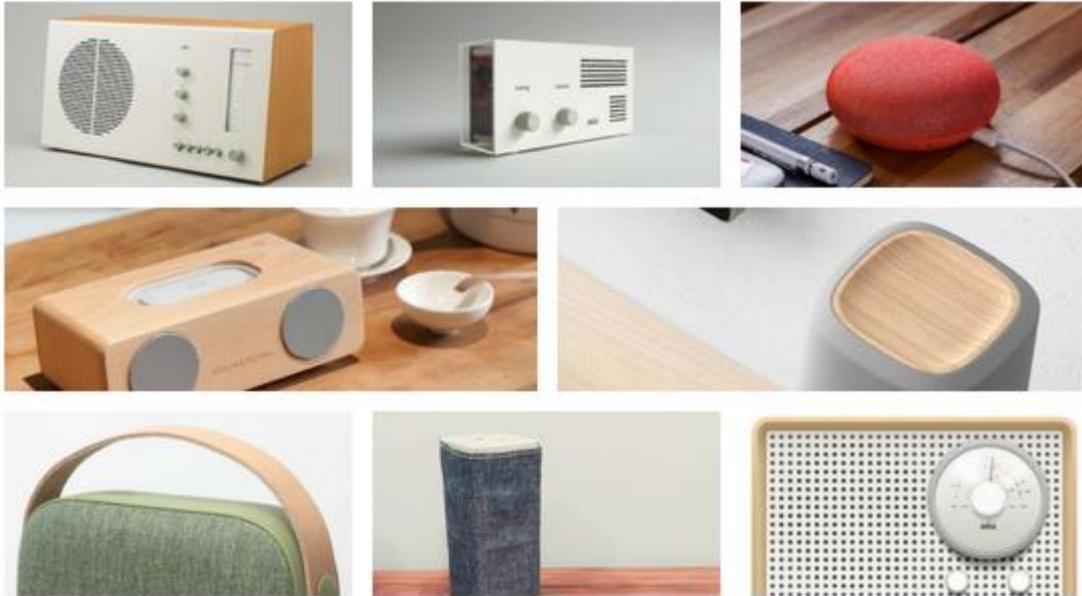


Figura 9 – Tablero de inspiración creado durante el proceso creativo

Para la creación de los tableros de inspiración como el que se observa en la Figura 9 se ha utilizado la herramienta *Pinterest*. Esta es una plataforma que permite compartir imágenes y colecciones de estas e incluye un motor de búsqueda que posibilita centrarnos en distintos temas, hobbies, productos... etc.

Una gran inspiración ha sido el diseñador industrial alemán Dieter Rams, el cual estuvo muy asociado a la marca Braun, en la Figura 10 y 11 (Pinterest, 2018) encontramos algunos de sus diseños:



Figura 10 – Reproductor de vinilo del diseñador Dieter Rams



Figura 11 – Radio portátil del diseñador Dieter Rams

2.2.4.2 Bocetos y renders

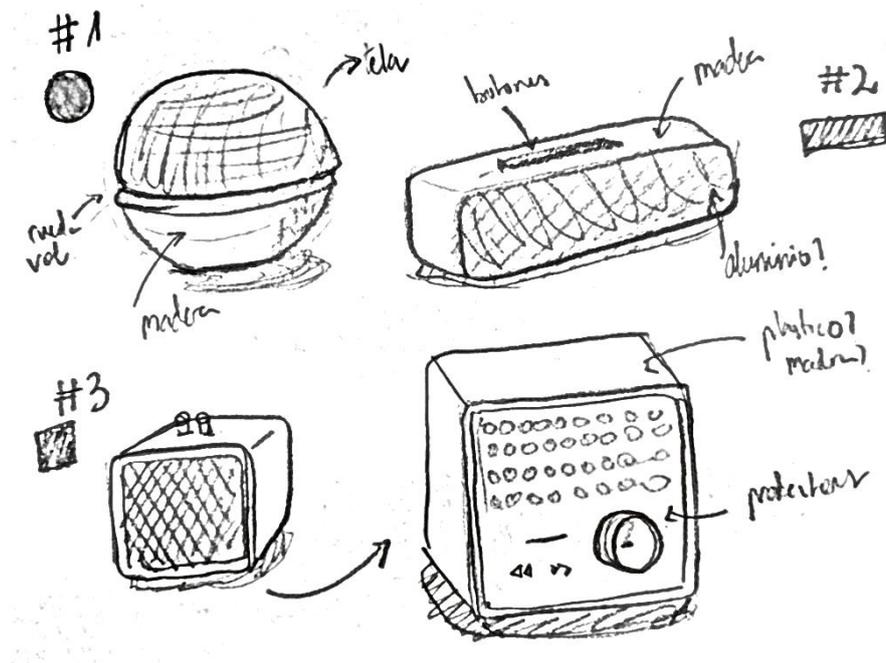


Figura 12 – Boceto creado durante el proceso de creación

En la figura 12, podemos ver uno de los bocetos y dibujos que se crearon durante el proceso de creación. En concreto, se trata de un estudio con distintas formas geométricas básicas y la colocación de distintos elementos dentro de estas.

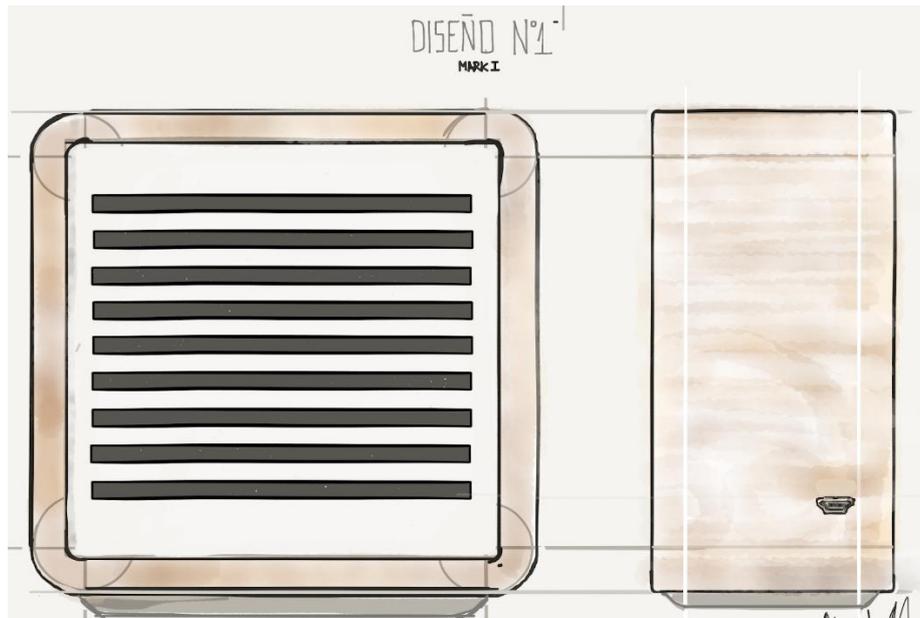


Figura 13 – Dibujo en detalle de uno de los conceptos de altavoz

Otro de los ejemplos que se muestran es el de la Figura 13, la cual es un dibujo más detallado de una de las formas desarrolladas en el boceto visto anteriormente. Esto nos permite empezar a visualizar cosas como los colores o materiales.



Figura 14 – Render del concepto final de altavoz

Por último, en la Figura 14, encontramos un render del mismo concepto, al cual se le han añadido las texturas de los posibles materiales a utilizar. La vista con perspectiva y la inclusión de luces y sombras, permite una mejor visualización del posible aspecto final del altavoz.

2.2.7 Conclusiones

Como se puede apreciar, no hemos entrado en detalle de cómo realizaremos la construcción. A pesar de esto, a base de analizar y pensar en el concepto y estudiar

las distintas soluciones, hemos llegado a una serie de conclusiones que nos ayudarán en la siguiente fase.

- Se utilizará la madera como material de construcción para la caja acústica. Esto cumple varios de los requisitos que se proponen en un primer momento: Facilidad de construcción y un acabado de calidad.
- Utilizaremos una pareja de drivers de rango completo la cual nos permita la reproducción estéreo.
- Utilizaremos un sistema de radiador pasivo. Quedará por determinar por medio de simulaciones si este estará conformado por un único elemento o dos elementos
- La caja acústica incluirá borde redondeados a fin de romper con la forma cuadrada que, como se ha visto en las curvas de Olson, crea fluctuaciones en la respuesta en frecuencia.
- Se implementará la tecnología Bluetooth para dotar al altavoz de conectividad inalámbrica debido a su estandarización y fácil implementación en la fase de prototipado.
- Para cubrir y proteger los drivers, se utilizará algún tipo de tela o rejilla.
- Se incluirá una batería dentro del dispositivo que permita su transporte y uso sin depender de la red eléctrica.

Además, dentro de esta fase, ha cobrado importancia la parte creativa. En un primer momento, se ha intentado buscar inspiración a través de distintos productos y la consiguiente creación de un tablero. Posteriormente, se crearon una serie de bocetos probando distintas formas básicas. Entre ellas, se eligió una forma cuadrada de bordes redondeados de la que se realizó un dibujo más elaborado. Finalmente, se crea un render en 3D para conseguir una mejor idea de cómo podría lucir el resultado.

2.3 Diseño en detalle

Basándonos en las consideraciones tratadas en el diseño del concepto y las conclusiones, se han tomado una serie de decisiones. Estas quedan detalladas en esta fase, el diseño en detalle, en la cual se diseñará un prototipo para su consecuente verificación y testeo.

2.3.2 Drivers escogidos

El modelo de driver escogido aparece en la Figura 15, y ha sido adquirido a un fabricante asiático, *Aiyima*.



Figura 15 – Detalle de los drivers escogidos

Tienen un diámetro de 40 mm, lo cual entra dentro de las medidas utilizadas en altavoces portátiles, como se puede ver en la Tabla 1. Por otra parte, en la figura X, podemos ver los datos facilitados por el fabricante.

Parámetro	Valor	Magnitud
Fs	177.09	Hz
Re	4.00	Ω
Qt	0.5412	-
Qes	0.7494	-
Qms	1.94	-
Mms	1.6497	g
Rms	-	kg/s
Cms	489.6	m/N
Vas	0.0790	L
Sd	11	cm ²
Bl	3.1302	Tm
ETA	0.0562	%

Tabla 3 – Parámetros Thiele-Small proporcionados por el fabricante

Estudio de la curva de impedancia y parámetros Thiele-Small

Los parámetros de Thiele-Small son una serie de parámetros que describen el funcionamiento de los drivers y serán fundamentales para construir el recinto acústico ya que nos permitirán simular y predecir su funcionamiento.

Para trazar la curva de impedancia se va a utilizar una medición por software. En concreto, utilizaremos el programa LIMP. Este programa está diseñado para la medición de impedancia en altavoces y la estimación de los parámetros físicos y dinámicos de estos, es decir, los parámetros Thiele-Small. La utilización de

software permite un proceso más sencillo que otros métodos como el de corriente constante.

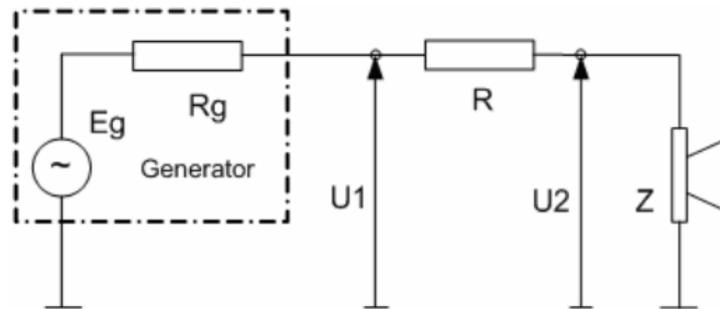


Figura 16 – Esquema eléctrico para la medición de los parámetros Thielle-Small

Si hablamos en el dominio de la frecuencia, la impedancia se define como $Z(f)$. Basándonos en el esquema de la Figura 16 (ARTA, n.d.), dividiendo los voltajes $U_1(f)$ y $U_2(f)$, a ambos extremos de la resistencia R , podemos estimar la impedancia del altavoz como:

$$Z(f) = \frac{U_2(f)}{U_2(f) - U_1(f)} R$$

Este esquema se traduciría en el siguiente montaje, mostrado en la Figura 17 (ARTA, n.d.).

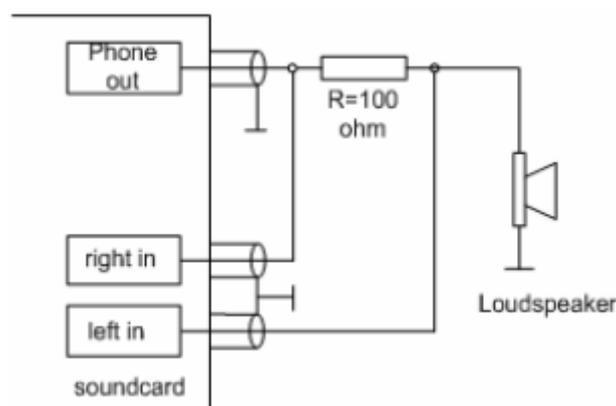


Figura 17 – Montaje para la medición de los parámetros Thielle-Small

El proceso en detalle queda fuera del alcance de este documento, pero, una vez calibradas las entradas y salidas de la tarjeta de audio y habiendo colocado el

altavoz sobre una superficie plana, podríamos proceder a las mediciones. De ellas obtendremos un gráfico que representará la curva de impedancia de nuestro altavoz. Esta debería parecerse a la típica de un altavoz montado al aire libre mostrada en la Figura 18 (ARTA, n.d.).

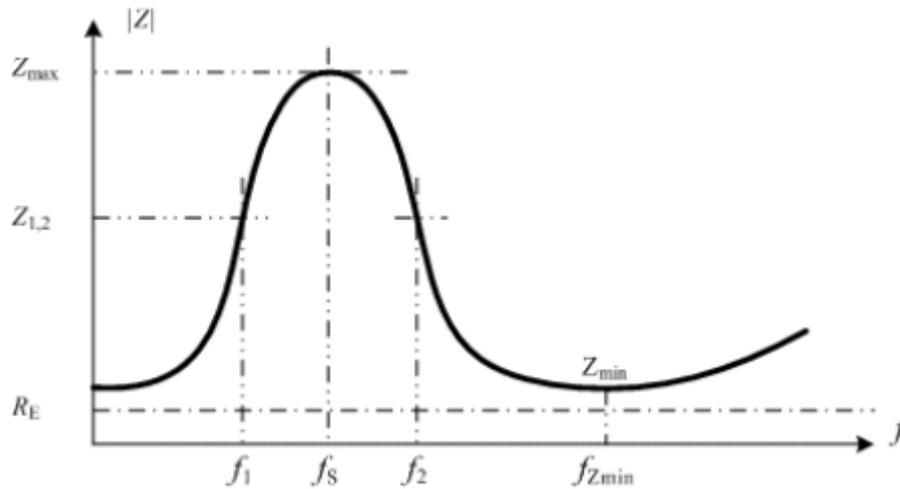


Figura 18 – Curva de impedancia típica

Una vez tengamos los resultados podemos estimar los parámetros de Thiele-Small. La impedancia encuentra su máximo valor en la frecuencia de resonancia f_s . Podemos obtener la ecuación del factor Q mecánico Q_{MS} , y partir de ahí crear un procedimiento para obtener los factores Q. Este proceso queda totalmente automatizado ahorrando gran cantidad de tiempo mediante el uso del software LIMP. En la Figura 19 podemos ver el resultado de la curva de impedancia de los altavoces.

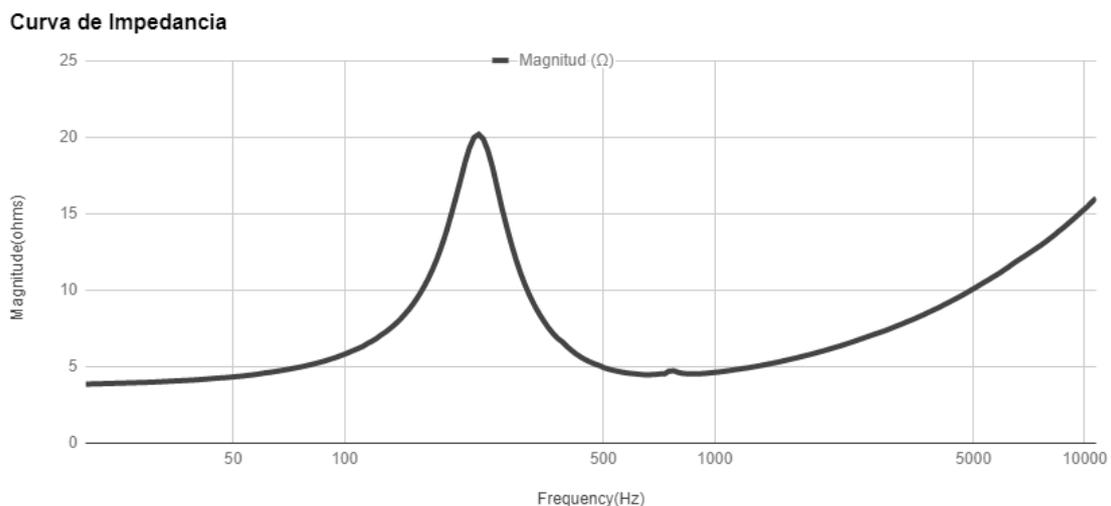


Figura 19 – Curva de impedancia de los drivers escogidos

Para poder obtener los parámetros físicos de un altavoz (M_{MS} , C_{MS} y R_{MS}) necesitaremos realizar una nueva medición. Para ello utilizaremos el método de la masa añadida, que consiste en colocar una masa en la membrana del altavoz y volver a estimar la frecuencia de resonancia resultante f_M y los factores Q_{EM} y Q_{ES} .

$$M_{MS} = \frac{M_{added}}{\frac{f_S Q_{EM}}{f_M Q_{ES}} - 1}$$

De esta forma podemos obtener M_{MS} y sería sencillo obtener la elasticidad mecánica C_{MS} y la resistencia R_{MS} mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_{MS} = \frac{1}{M_{MS} \omega_S^2}, \quad V_{AS} = \rho_0 c^2 S^2 C_{MS}, \quad Bl = \sqrt{\frac{\omega_S M_{MS} R_E}{Q_{ES}}}, \quad R_{MS} = \frac{\omega_S M_{MS}}{Q_{MS}}$$

En la Tabla 4 podemos ver los resultados obtenidos.

Parámetro	Valor	Magnitud
Fs	229.90	Hz
Re	4.00	Ω
Qt	0.54	-
Qes	0.67	-
Qms	2.71	-
Mms	1.39	g
Rms	7,4	kg/s
Cms	344	m/N
Vas	0.08	L
Sd	12.57	cm ²
Bl	3.4	Tm
ETA	0.13	%

Tabla 4 - Parámetros Thiele-Small obtenidos

Una vez obtenidos estos parámetros podremos utilizarlos para simular el comportamiento del altavoz con distintas configuraciones y técnicas.

2.3.3 Diseño de la caja

Dado la especial forma de nuestro altavoz, hemos optado por un diseño en tres piezas, que permitirá la creación de los bordes redondeados que conforman el altavoz. Para el diseño de nuestra caja acústica haremos uso del programa SolidWorks, es un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D. Esto facilita su posterior mecanización, extracción de planos técnicos y cualquier otro tipo de información necesaria para la producción.

2.3.3.1 Simulaciones previas

Antes de entrar en el diseño en detalle de la caja, deberemos decir el tipo de recinto que utilizaremos. Como se concluyó en la fase previa, crearemos una caja con un sistema de radiador pasivo, pero falta por esclarecer si incluiremos uno o dos radiadores pasivos en nuestro diseño. El mismo fabricante al que hemos adquirido los drivers, nos ofrece los radiadores pasivos adecuados, los cuales han sido adquiridos y se muestran en la Figura 20.



Figura 20 – Detalle de los radiadores pasivos escogidos

Mediante las especificaciones y dimensiones de estos, la cuales pueden encontrarse en el Anexo de este documento, procederemos a una serie de simulaciones en las cuales modelaremos la respuesta en frecuencia que obtendríamos en las siguientes configuraciones:

- Caja cerrada
- Sistema con un único radiador pasivo
- Sistema con doble radiador pasivo

Para realizar estas simulaciones, se ha hecho uso del programa *Virtuix CAD*, un software de simulación de distribución libre. Obtenemos los siguientes resultados, mostrados en las Figuras 21, 22 y 23. Se ha supuesto un volumen de caja de 1L, ya que será el volumen aproximado de la caja final y el programa de simulación no trabaja con volúmenes mayores. Por otra parte, al reproducir cada altavoz un

canal, se ha tratado el conjunto de drivers como un sistema en paralelo, y no en serie. En el eje horizontal se representa la frecuencia en Hz, y en el eje vertical el nivel de presión sonora en dB.

Caja cerrada

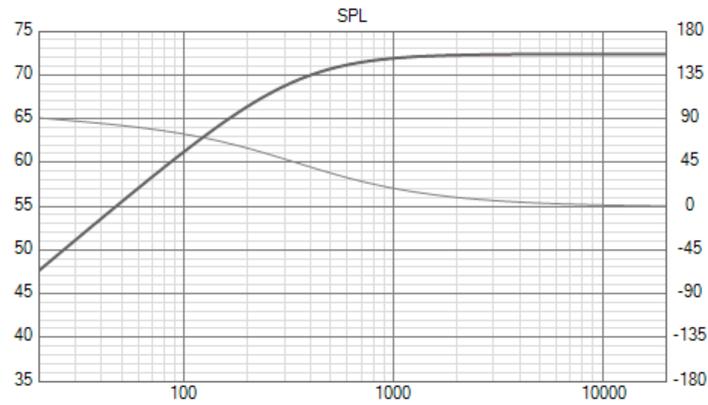


Figura 21 – Respuesta en frecuencia simulada para caja sellada

Sistema con un único radiador pasivo

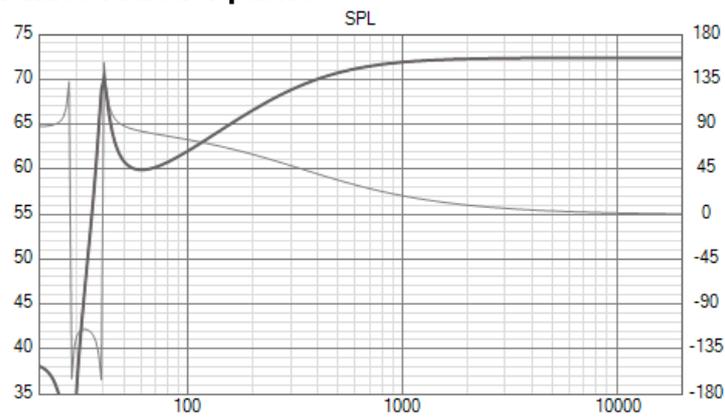


Figura 22 – Respuesta en frecuencia simulada para un radiador pasivo

Sistema con doble radiador pasivo

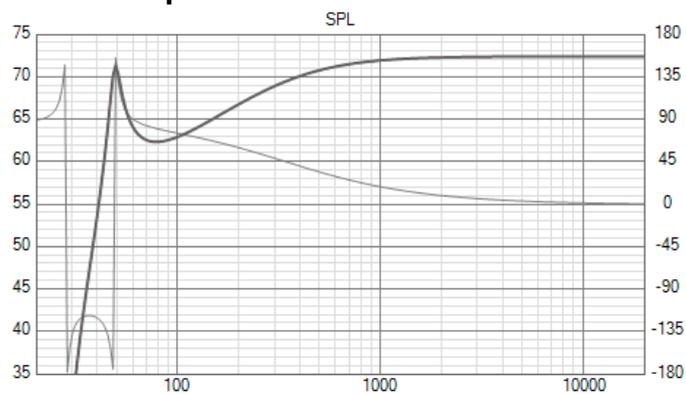


Figura 23 – Respuesta en frecuencia simulada para un doble radiador pasivo

Conclusiones

Lo primero que podemos apreciar es una notable mejora en las bajas frecuencias con el sistema de radiador pasivo en comparación a la caja cerrada. Sin embargo, para apreciar mejor las diferencias entre el uso de uno o dos radiadores pasivos, se han superpuesto las gráficas en la Figura 24. Encontramos el sistema con un radiador pasivo sombreado en color azul, mientras que el de dos está sombreado en color rojo.

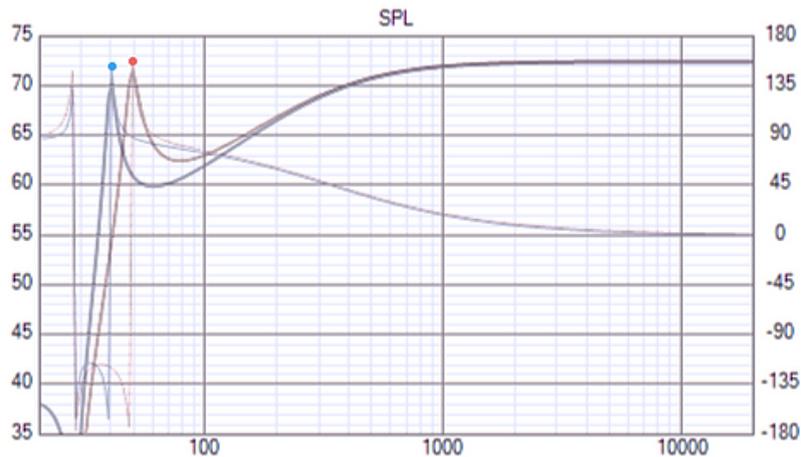


Figura 24 – Comparación de la respuesta en frecuencia simulada en los modelos doble y único radiador pasivo

Como se puede ver, el sistema con radiador pasivo doble mejora la respuesta en frecuencia en graves respecto al sistema con un único radiador pasivo desde los 45Hz a los 110Hz, con un pico máximo que roza los 73dB en la frecuencia de 50Hz. Por otra parte, el sistema con un radiador pasivo presenta un pico de 72dB en los 40Hz, quedando el resto de las frecuencias graves más atenuadas que en el sistema de doble radiador pasivo.

Esto nos lleva a elegir la introducción de dos radiadores pasivos a nuestro diseño final ya que, según las simulaciones, estos permitirán un mayor realce de las frecuencias graves en nuestro altavoz.

2.3.3.2 Diseño en 3 piezas

Para facilitar el ensamblado de la caja, se ha optado por un diseño en tres piezas. Este diseño rompe con el ensamblado típico de cajas de altavoces de madera, en el cual encontramos una pieza por cada cara, las cuales son posteriormente encoladas o atornilladas. Además, esta técnica permite curvar las esquinas del interior de la caja. Las medidas exteriores de la caja son de 8 x 12 x 12 cm, y está conformada por las siguientes piezas que se presentan en las figuras 25, 26 y 27. Los planos técnicos completos de estas se adjuntan en el Anexo de este documento.

Marco

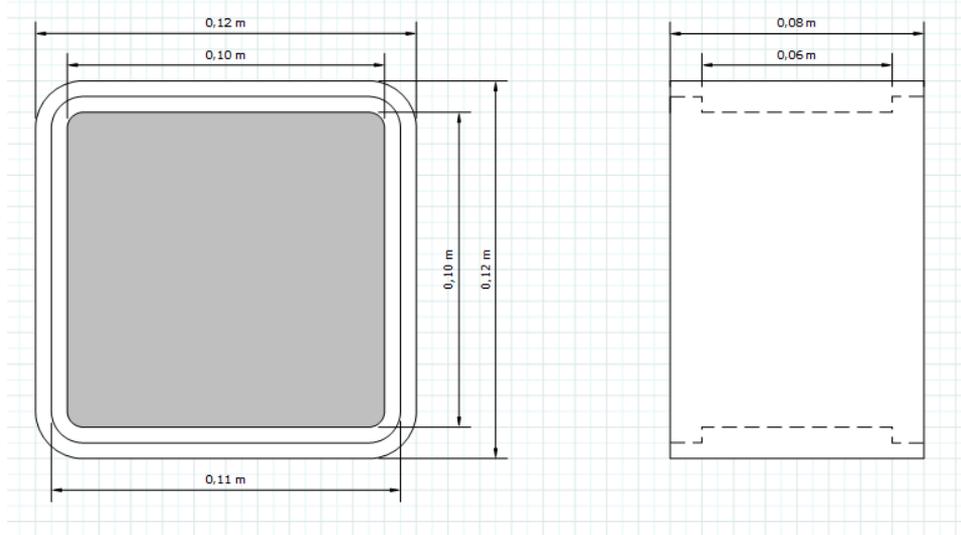


Figura 25 – Vista frontal y lateral del marco

El material elegido para el marco será madera maciza. Al emplear este material, buscamos conseguir una estética más elegante y refinada. También evitamos tener que cubrir la pieza con pinturas o lacados para ocultar el material de construcción. Podemos ver algunas de las medidas de la pieza para comprender mejor su forma y dimensiones.

Tapa delantera

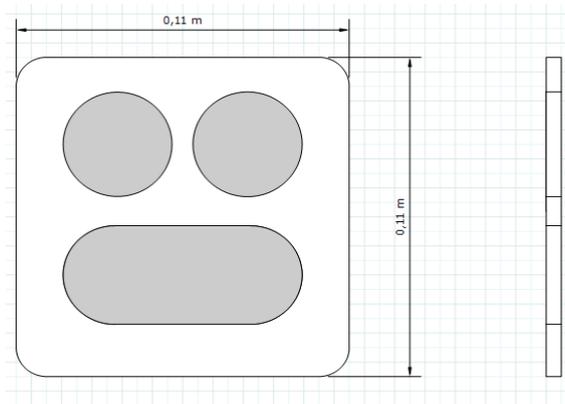


Figura 26 – Vista frontal y lateral de la tapa delantera

La tapa delantera incorpora dos perforaciones para los drivers y otra para la incorporación del radiador pasivo, el cual hemos situado en la parte inferior para facilitar el emplazamiento de la electrónica en la base del altavoz. Estará fabricada en DM, ya que no quedará a la vista una vez quede terminado el dispositivo.

Tapa trasera

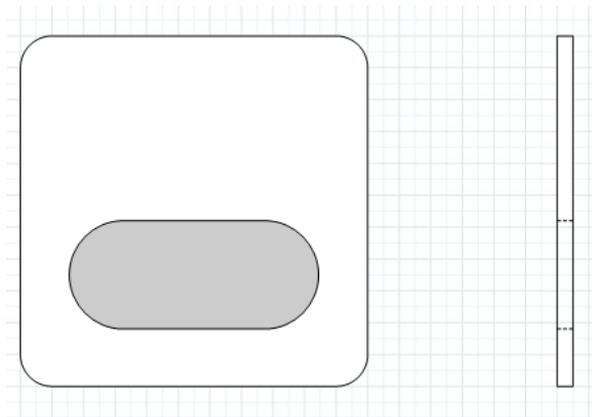


Figura 27 . Vista frontal y lateral de la tapa trasera

La tapa trasera del altavoz esta perforada en la parte superior para la colocación del radiador pasivo, dejando la parte inferior libre para la posterior colocación de elementos como el puerto de carga, entrada auxiliar... etc. Su colocación se estudiará en posteriores fases.

2.3.4 Diseño de la electrónica para el prototipado

Para poder extraer las características finales de nuestro prototipo de altavoz se dotará a este de una serie de características como una conexión Bluetooth. Para ello se necesitará crear un prototipado electrónico. Este prototipado no conformará el diseño electrónico final que pudiera crearse en futuras fases del proyecto dado que no es el objetivo de este trabajo. Sin embargo, nos permite tener una idea del funcionamiento final del altavoz portátil, siendo este uno de los fines de nuestro prototipo. Los elementos que conformarán la parte electrónica del prototipo son los siguientes:

Módulo bluetooth

Para el módulo Bluetooth se ha utilizado el modelo de *Lanny, LN-BT02*, el cual nos permite un gran rango de tensiones de alimentación, incluir una entrada auxiliar, micrófono y botones para el control del módulo. Este modelo incluye el cableado necesario, lo que ahorra otros costes. Utiliza la versión de bluetooth 4.0, por lo que se espera que el consumo sea reducido respecto a otros receptores bluetooth.

Amplificador

Utilizaremos el modelo PAM8610, el cual nos permite trabajar con altavoces de 4Ω con una alimentación a 12V, llegando a los 15W de potencia. En el anexo se adjunta la hoja de especificaciones.

Batería

Para dotar al prototipo de portabilidad y autonomía, se ha utilizado un par de baterías de litio del tipo 18650. Las ventajas principales de estas baterías son un bajo nivel de descarga y la ausencia de efecto memoria. Las pilas 18650 son relativamente livianas, no exigen mucho mantenimiento y tienen larga vida útil.

Otros componentes

Necesitaremos usar otros componentes como convertidores de corriente continua para alimentar los distintos componentes, cables y conectores. La función de estos componentes queda más clara en el esquema de conexionado.

Conexionado

El esquema de conexionado de la Figura 29 es ilustrativo. En el podemos ver como tanto el módulo bluetooth y el amplificador están alimentados por las baterías 18650, las cuales van seguidas de un transformador DC de 3.6V a 12V, para suministrar la tensión de corriente necesaria. Posteriormente, el módulo Bluetooth, que ha recibido los datos por radiofrecuencia, envía los canales izquierdo y derecho al módulo del amplificador. Por último, este amplifica la señal recibida y la envía a los drivers izquierdo y derecho.

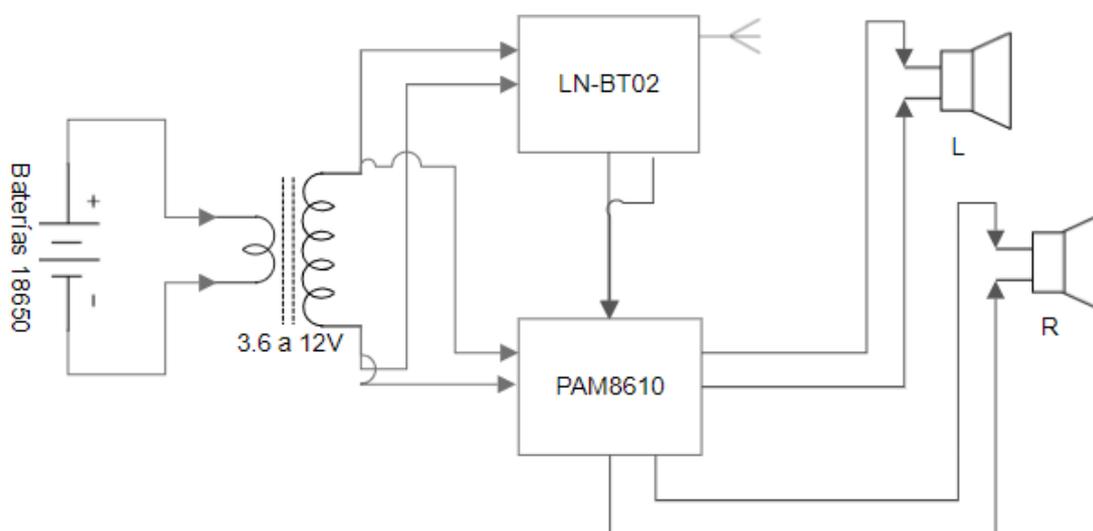


Figura 28 – Esquema de conexionado para el prototipo electrónico

3. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez realizado el diseño de todas las piezas y haber seleccionado todos los componentes, se procederá a la construcción del prototipo para poder realizar las medidas necesarias para la verificación y testeo.

3.1. Mecanizado de la caja acústica

Para la mecanización de la caja del altavoz se ha contactado con distintas empresas a las cuales se le ha pedido presupuesto. En la tabla X, se muestran estas empresas, su localización y detalles acerca de la propuesta. Las facturas proforma correspondientes a cada una de las propuestas se adjuntan en el Anexo de este documento.

Empresa	Localización	Coste	Detalles
Riebog	Galicia	73,48€	Tres piezas. Madera de pino maciza y DM
Marcos Muñoz	Madrid	165,00 €	Contrachapado fenólico y DM.

Argullo	Madrid	180,00 €	Madera maciza y DM.
Océano Naranja	Valencia	45 €/hora	Madera de haya y DM. Posibilidad de participar en el proceso.

Tabla 5 – Comparativa de distintos presupuestos para la mecanización de las piezas

Tanto por cercanía, como por la posibilidad de involucrarse en el proceso, se escoge la empresa *Océano Naranja S.L.* para llevar a cabo el mecanizado de las piezas que conforman la caja acústica.

3.1.1. Mecanización del marco

Para la mecanización del marco se ha empleado madera maciza de haya. Esta es una madera homogénea y con pocos nudos. Además, es muy fácil de trabajar, presentando un buen comportamiento frente al aserrado, atornillado, encolado y distintos acabados. Entre sus propiedades mecánicas encontramos:

- Resistencia a la flexión: 1000 kg/cm²
- Resistencia a la compresión: 580 kg/cm²
- Resistencia a la tracción paralela: 1200 kg/cm²
- Módulo de elasticidad: 145.000 kg/m²

Respecto a la maquinaria utilizada, se ha utilizado una fresadora de la serie 3000 de *Multicam*, la cual puede verse en la Figura 30, junto con la pieza de madera preparada para la mecanización.



Figura 29 – Momento previo al fresado de las piezas

Finalmente, por cuestiones técnicas, se ha optado por crear dos piezas que irán posteriormente encoladas para formar el marco. El primer paso es la creación de archivos tipo .dwg, de forma que puedan ser entendidos por el programa que transformará la información del archivo a coordenadas en el plano de trabajo de

la fresadora. Una vez hecho esto, se coloca el material sobre la superficie de trabajo para la realizar distintos procesos hasta conseguir la pieza final. En la Figura 31 podemos ver el resultado de las dos piezas, encontrando a la izquierda una de ellas tras el proceso de lijado y a la derecha sin lijar.



Figura 30 – Piezas del marco en distintas fases antes de su encolado

3.1.2 Mecanización de las tapas trasera y delantera

Para la mecanización de las tapas delantera y trasera se ha empleado DM. La maquinaria utilizada ha sido una cortadora láser de la marca *RedSail*, la cual trabaja con láser de CO₂. Esta permite el corte de figuras complejas con una gran precisión. Una vez convertidos los archivos al formato correspondiente para el funcionamiento de la máquina, se ha procedido al corte de las piezas. Podemos ver el resultado de estas junto a las piezas del marco en la Figura 32.



Figura 31 – Conjunto de piezas obtenido tras la mecanización

3.2 Ensamblado

Una vez que se ha realizado el mecanizado de las piezas se han ensamblado para culminar el prototipo. En primer lugar, se ha realizado el encolado de las dos piezas que conforman el marco. Para ello, se ha hecho uso de cola de poliuretano expandido, la cual se he dejado secar durante 24 horas en las cuales se ejercía

presión sobre ambas piezas. En la Figura 33 se puede observar parte de este proceso.

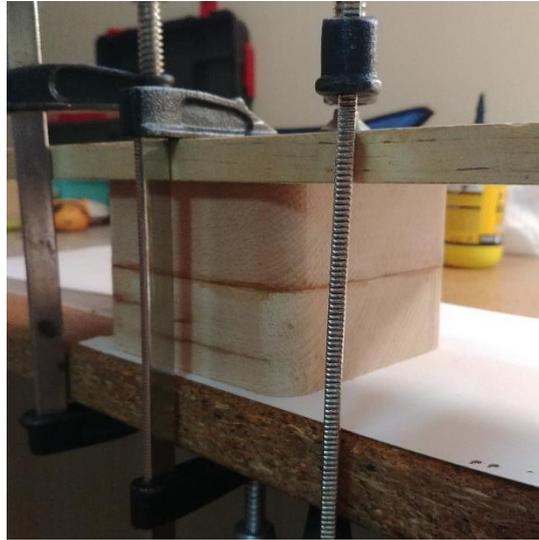


Figura 32 – Proceso de encolado del marco

Por otra parte, como se puede apreciar en la Figura 34, se han realizado las perforaciones necesarias para sujetar los drivers a las tapas delantera y trasera.



Figura 33 – Detalle de las perforaciones para la colocación de los drivers

Una vez realizadas todas las perforaciones se ha procedido a colocar los drivers en sus respectivas posiciones. Posteriormente, se ha barnizado el marco, para evitar posibles daños a la madera y se ha realizado el montaje final. Como se puede ver en la Figura 35. Se ha añadido el cableado necesario para las mediciones en cámara, así como dos entradas tipo banana para poder conectar el altavoz al amplificador del laboratorio.

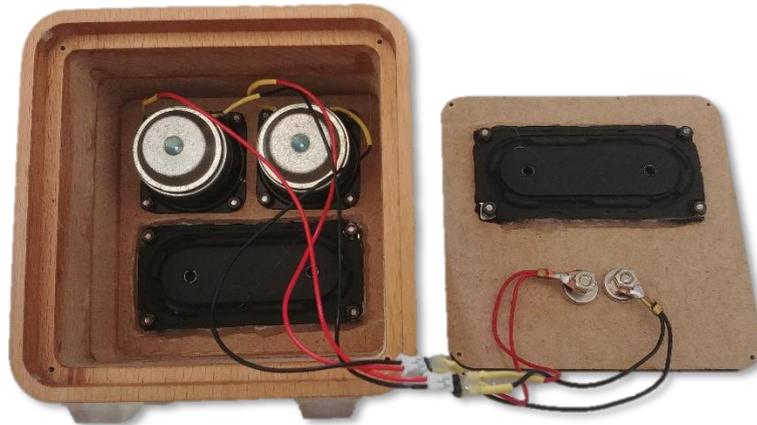


Figura 34 – Prototipo antes del sellado de la tapa trasera

4. VERIFICACIÓN Y TESTEO

Una vez realizada la construcción del prototipo es hora de verificar el comportamiento de este mediante las correspondientes mediciones. En un primer lugar estudiaremos la respuesta en frecuencia del prototipo y la sensibilidad. Posteriormente, compararemos estos resultados con los de nuevas mediciones en las cuales introduciremos elementos como material de relleno y protecciones para los drivers.

4.1 Metodología

Las mediciones realizadas en esta fase han tenido lugar en la cámara anecoica de la Escola Politècnica Superior de Gandía. Esta presenta unas condiciones que recrean el espacio libre, por lo que es ideal para la caracterización de altavoces. Para llevarlas a cabo se ha utilizado la siguiente instrumentación:

- Ecuador profesional Behringer DSP 8000 Ultra-Curve, el cual es capaz de generar ruido rosa y señales sinusoidales.
- Sonómetro profesional Bruel & Kjaer 2250.
- Amplificador de potencia 2716 Bruel & Kjaer.

A la hora de realizar las mediciones, se coloca el sonómetro sobre un trípode, colocando el micrófono de este a 1m del altavoz. El esquema del montaje es el siguiente:



Figura 35 – Esquema del montaje en la cámara anecoica

4.1.1 Medida de la sensibilidad para el ajuste de la respuesta en frecuencia

Lo primero es medir la sensibilidad del altavoz. La sensibilidad es el nivel de presión sonora a un metro del altavoz con 1W de entrada. Dado que nuestro altavoz contiene dos drivers los cuales crearán una imagen estéreo, estos se conectarán en paralelo a la salida del amplificador y se introducirán 2W de potencia que equivaldrán a 1W por altavoz. Esto se puede probar con los siguientes cálculos:

Teniendo dos altavoces de 4Ω tendremos que:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4}$$
$$R_T = 2\Omega$$

Sabiendo que la potencia equivale a la tensión suministrada multiplicada por la corriente tal que:

$$W = V * I$$

Y que según la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Tenemos que:

$$W = \frac{V^2}{R}$$

Esto nos lleva a que, si queremos suministrar 2W al sistema, necesitaremos un voltaje de:

$$V = \sqrt{W * R}$$
$$V = \sqrt{2 * 2} = \sqrt{4}$$
$$V = 2V$$

Por tanto, para calcular la sensibilidad de nuestro sistema mediremos la tensión en bornes del altavoz al tiempo que estamos emitiendo una onda sinusoidal de 1kHz. Modificaremos la potencia suministrada por el amplificador hasta que la lectura del multímetro coincida con el valor calculado. Posteriormente, mediremos el valor de presión sonora a 1kHz haciendo uso del sonómetro, obteniendo un valor de:

$$SPL_{1kHz} = 51,1 \text{ dB}$$

Por tanto, se utilizará este dato para realizar normalizar la respuesta en frecuencia en los resultados de las siguientes mediciones.

4.1.2 Medida de la respuesta en frecuencia

Para medir la respuesta en frecuencia, se utilizará el mismo montaje de la Figura X. Para ello, se generará ruido rosa mediante el Behringer DSP 8000 Ultra-Curve.

El sonómetro seguirá colocado a un metro del altavoz y se medirá el nivel de presión sonora para posteriormente extraer los datos y normalizarlos a la sensibilidad del altavoz.

4.2 Respuesta en frecuencia

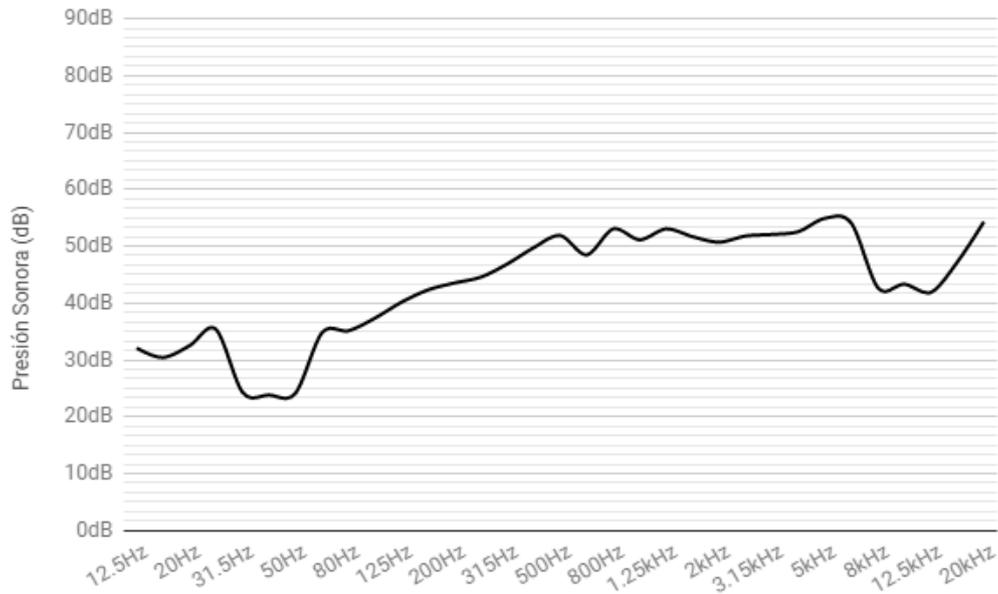


Figura 36 – Respuesta en frecuencia del prototipo

4.4 Introducción de material de relleno y efectos provocados en la respuesta en frecuencia

El volumen acústico de la caja del altavoz puede aumentarse mediante la introducción de material absorbente. En este caso se ha introducido un material absorbente orgánico procedente de lana de oveja, el cual se puede ver en la Figura 38.



Figura 37 – Material absorbente utilizado para el relleno

Tras las correspondientes mediciones se ha obtenido la siguiente respuesta en frecuencia:

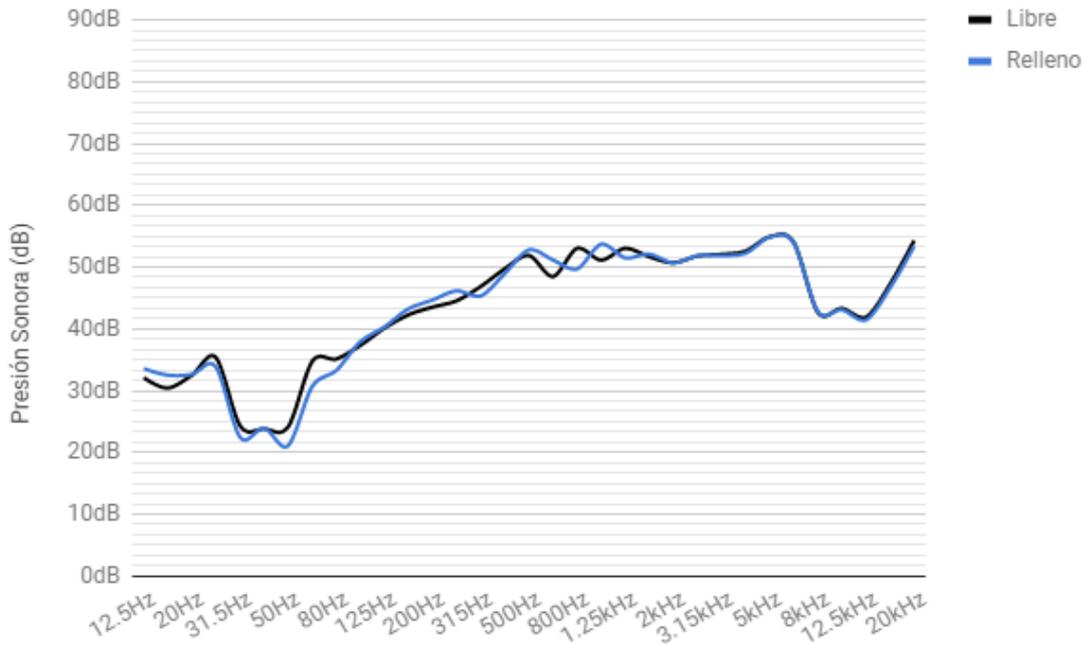


Figura 38 – Comparativa de la respuesta en frecuencia con y sin relleno de material absorbente

4.5 Introducción de distintas protecciones de drivers y efectos provocados en la respuesta en frecuencia

4.5.1 Tela

Para la realización de estas medidas se ha utilizado una tela de recubrimiento especialmente diseñada para altavoces, los resultados obtenidos aparecen en la Figura 40 comparados con la respuesta en frecuencia sin ningún elemento protector.

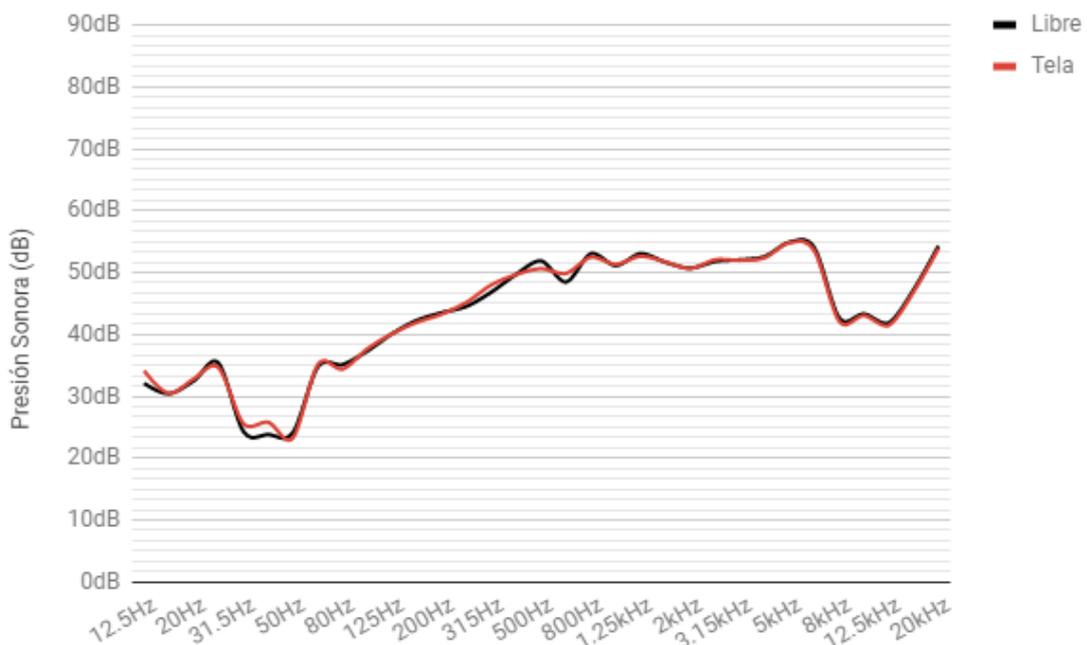


Figura 39 – Comparativa de la respuesta en frecuencia con y sin protector de tela

4.5.2 Rejilla metálica

Otro de los materiales a introducir es una rejilla metálica de acero bruto, la cual presenta un patrón en rombos. Tras realizar las mediciones, se muestran en la Figura 41 los resultados obtenidos comparados con el altavoz radiando sin ningún tipo de protección.



Figura 40 – Comparativa de la respuesta en frecuencia con y sin protector metálico

4.5 Discusión y Conclusiones de los resultados

Tras los resultados obtenidos en la medición, y sin entrar en la evaluación de la respuesta en frecuencia del altavoz, se concluye que:

- Tanto la rejilla metálica como la tela ofrecen una respuesta bastante parecida a la ofrecida por el altavoz sin ningún tipo de protección. Aunque no se pueda concluir que estas son totalmente transparentes, no suponen ningún tipo de inconveniente a la hora de añadirlas al diseño del altavoz.
- Los resultados obtenidos tras la introducción de absorbente en la caja acústica no son los esperados. No se encuentra ningún cambio significativo en la respuesta en frecuencia que nos pudiera llevar a concluir que la utilización de este mejoraría las características sonoras del altavoz. Este resultado puede deberse al mal sellado de la caja acústica tras el proceso de introducción de material o que el material absorbente bloquee el movimiento de los radiadores pasivos, perdiendo algunos decibelios en las frecuencias más graves.

Por tanto, y vistos los resultados de las pruebas, no se introducirá ningún tipo de material absorbente en el prototipo final y se utilizará la rejilla metálica como protección de los drivers por motivos estéticos y facilidad técnica.

5. PROTOTIPO FINAL Y EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Finalmente, se ha optado por montar el prototipo final con la rejilla metálica protegiendo los drivers. En la Figura 42 se puede ver una foto del resultado final.



Figura 41 – Aspecto final del prototipo

A continuación, se introducirá el diseño electrónico realizado dentro del altavoz para realizar las mediciones de la respuesta en frecuencia haciendo uso del altavoz desde un smartphone. Para ello, se ha utilizado un generador de tonos y se han realizado las medidas correspondientes con el sonómetro para tres volúmenes distintos, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 43.

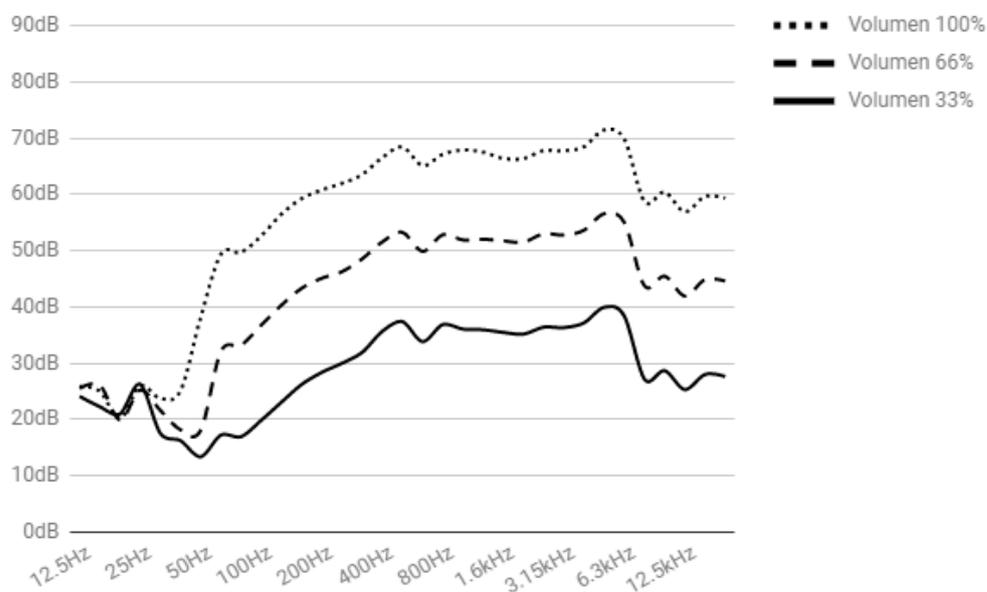


Figura 42 – Respuesta en frecuencia haciendo uso de la conexión Bluetooth del prototipo

Si comparamos con la radiación libre sin el añadido del prototipado electrónico, aparecen ciertas pérdidas en la zona de frecuencias graves por debajo de los 100 Hz y las frecuencias agudas por encima de los 16kHz, como se puede apreciar en la Figura 44.

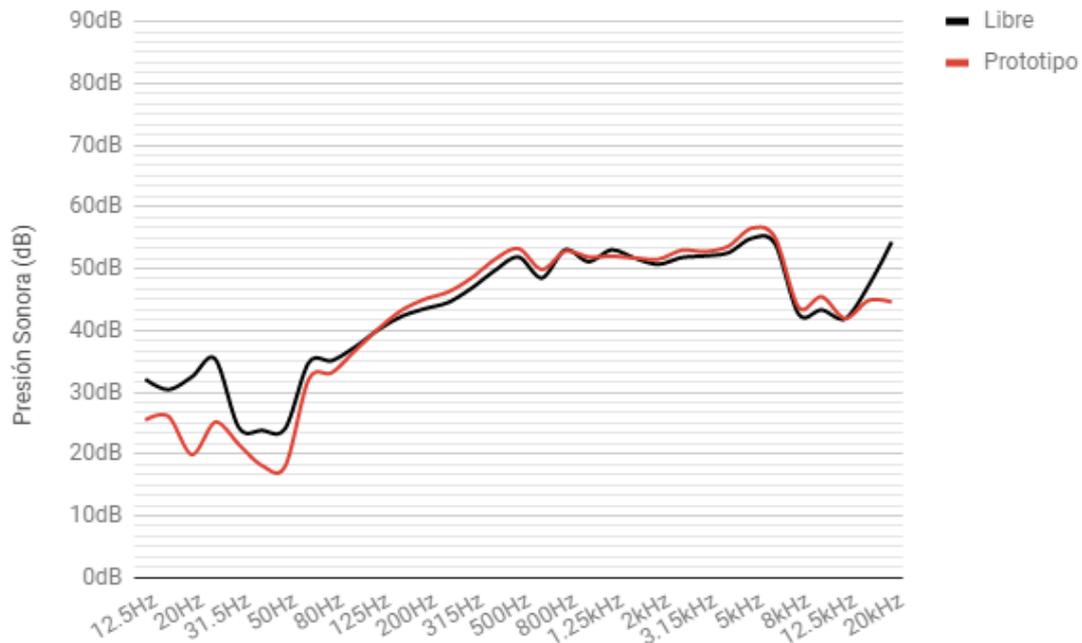


Figura 43 – Comparativa del prototipo con y sin la inclusión de la electrónica

6. CONCLUSIONES

Analizando los resultados de las distintas medidas tomadas en el aparato anterior, podemos concluir que no se han obtenido los resultados esperados a partir de las simulaciones realizadas. A pesar de esto, en la Figura 45 se puede apreciar como se consiguen niveles de presión de sonora similares en algunos rangos de frecuencia respecto a otros altavoces comerciales (en este caso el modelo que nos ha servido de referencia a lo largo de este trabajo, el Bose SoundLink Mini II). A pesar de esto, encontramos importantes pérdidas a partir de los 50Hz hasta los 300Hz, y desde los 5Khz a los 16kHz. Esto puede darse debido a:

- Un mal sellado de la caja, lo que impediría funcionar correctamente el sistema de radiador pasivo.
- Mala calidad de los componentes usados, tanto a nivel electrónico como en los drivers usados.

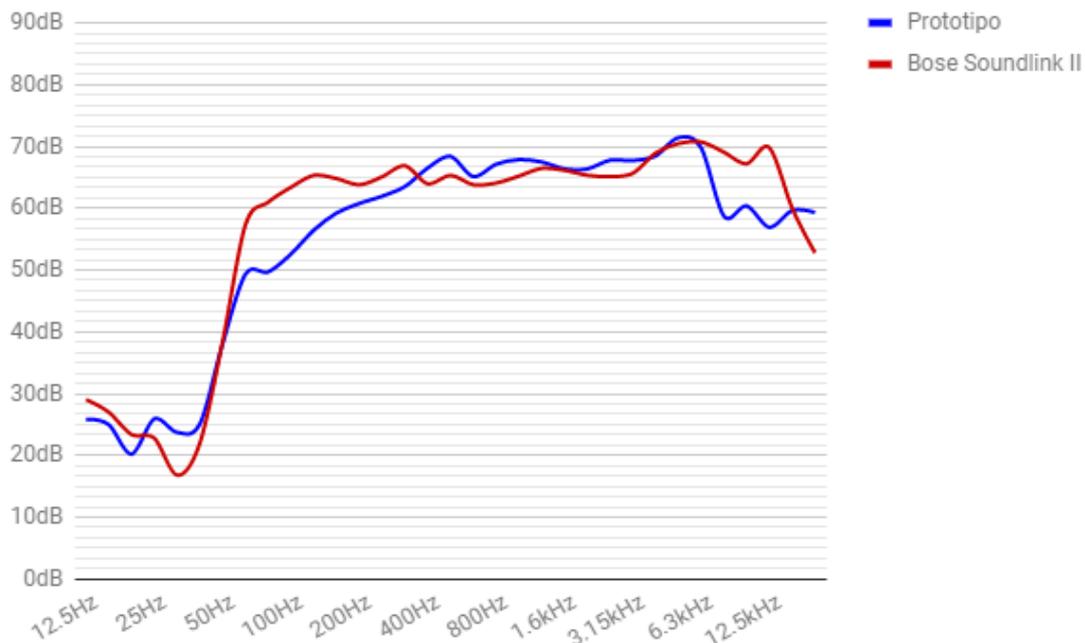


Figura 44 – Comparativa de la respuesta en frecuencia ante un modelo comercial

Tras los resultados obtenidos se indagó más en la electrónica y componentes de los altavoces portátiles. Se encontró así que, en los últimos años, ha aparecido una nueva generación de amplificadores que en inglés se denominan *Smart amplifiers*, los cuales incorporan a su diseño procesado digital de la señal. Como resultado de esto, los diseñadores son capaces de implementar grandes mejoras en el volumen de los altavoces portátiles comerciales a pesar de que utilicen drivers pequeños y de bajo coste. Estos son capaces de realizar esto evitando el fallo mecánico o térmico de los drivers. La extensión de este documento no permite entrar en detalle en el funcionamiento de este nuevo tipo de amplificadores, pero puede obtenerse más información en el artículo publicado por Paul Pickering en la revista *Electronic Design* titulado "How To Get Big Sounds From Small Speakers", el cual queda referenciado en el apartado bibliográfico de este documento. En el se explica el uso de distintas técnicas psico acústicas para mejorar la percepción sonora, así como la aplicación de distintas correcciones de la respuesta en frecuencia, mejorando el sonido final de los altavoces (Pickering, 2018). Podemos concluir así, como la electrónica y el procesado de audio cobran una importancia enorme e ineludible en el diseño de altavoz portátil, llevando a un segundo plano la influencia de elementos como la caja acústica.

A pesar de que los resultados no han sido los esperados, podemos afirmar que se han completado las distintas fases del proceso de diseño de un altavoz, llegando a obtener un prototipo final. Este prototipo, a pesar de presentar algunas diferencias en la respuesta en frecuencia frente a los modelos comerciales, se acerca a unos niveles de presión sonora que pueden considerarse aceptables.

Futuros estudios contemplan el desarrollo de un prototipado electrónico haciendo uso de los nuevos amplificadores presentes en el mercado, así como la mejora en el diseño de la caja a fin de evitar pérdidas debidas a un mal sellado.

7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Yuen, C. (2018).** Best Bluetooth Speakers 2018: The best speakers to consider [Blog]. Retrieved from <https://www.trustedreviews.com/best/bluetooth-speakers-3431819>
- Pino, N. (2018).** The best Bluetooth speakers 2018: the best portable speakers for any budget. Retrieved from <https://www.techradar.com/news/audio/portable-audio/10-best-portable-speakers-1069079>
- Olson, H. (1950).** Direct Radiator Loudspeaker Enclosures. *AES*, 34-64.
- Pickering, P. (2018).** How To Get Big Sounds From Small Speakers. Retrieved from <http://www.electronicdesign.com/print/systems/how-get-big-sounds-small-speakers>
- Beraneck L.L.** Acoustics. A.S.A. (1993)
- Miyara, Federico.** Parámetros de Thielle-Small.
- García Puertas, Carlos.** Diseño de cajas acústicas
- Miyara, Federico.** Introducción a la electroacústica.
- John Wiley & Sons .**Fundamentals of Acoustics, Inc. New York (1982)
- Ramis J., Alba J., Martínez J., y Espinosa V. (2002).** El transductor dinámico. SPUPV. UNE-EN 60268-5:2004/A1:2011. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 5: Altavoces
- Olson H.** Acoustical engineering , D. Van Nostrand Co., New York 1967
- Davis D. Y C.** Sound System Engineering, Howard W. Sams and Con, Seg. Edición.
- Eargle J.,** Handbook of sound Design, Elar Publishing Co., New York 1989.
- Marcel Urban, Christian Heil, Paul Bauman,**“Wavefront Sculpture technology”, J. Audio Eng. Soc., Vol. 51, No 10, 2003
- Martin Colloms ,** High Performance Loudspeakers. Ed. Pentech Press 1982.
- Leo Beranek ,**Acoustics. Ed. Mc Graw Hill . New York 1954.
- M. Recuero,** Ingeniería Acústica.
- Small, R.H.,** Passive radiator Loudspeaker systems.

FUENTES FIGURAS

- ARTA. [Image]. Retrieved from http://www.artalabs.hr/AppNotes/LIMP_Tutorial_Version_2_4_English.pdf
- Pinterest. (2018). [Image]. Retrieved from <https://www.pinterest.co.uk/>

8. DECLARACIÓN DE TRABAJO ORIGINAL

Yo, *Alejandro Marco Ibáñez*, declaro que soy el autor de este trabajo y que no ha sido copiado o hecho por otras personas.

9. AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas las personas que me han ayudado a lo largo de este trabajo y durante mis años en la universidad, especialmente:

- *A mis padres y mi hermano, porque sin su esfuerzo y sacrificio este trabajo no sería posible.*
- *A mi pareja, por ser la mejor compañera a lo largo de este viaje.*
- *A todos los compañeros de carrera, con los que he podido compartir horas de trabajo duro en las que nos hemos apoyado los unos a los otros, pero también por todas las aventuras que hemos vivido.*
- *A mis tutores en este trabajo, por su apoyo en numerosos sentidos y su agilidad y eficacia para ayudarme con este documento.*
- *A todos los profesores que me han inspirado y por los que hoy puedo concluir mi etapa académica en esta facultad.*