



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Diseño y construcción de un altavoz dinámico de tipo
planar para uso en decoración

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e
Imagen

AUTOR/A: de Magalhaes Pires, Renan Vinicius

Tutor/a: Alba Fernández, Jesús

Cotutor/a externo: RODRIGUEZ VERCHER, JUAN CARLOS

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

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 construcción de un altavoz dinámico de tipo planar para uso en decoración”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

De Magalhães Pires, Renan Vinicius

Tutor/a:

Alba Fernández, Jesús

GANDIA, 2022

RESUMEN

El presente trabajo final de grado consiste en el diseño y construcción de un altavoz con tecnología planar. Este altavoz se diseñará teniendo en cuenta que sea idóneo para su utilización en entornos residenciales, que cumpla con una función decorativa y que el grosor de este sea mínimo. El producto tiene por objetivo, aprender el funcionamiento de la tecnología planar, así como, desarrollar un prototipo funcional para añadir valor a la tecnología. Se procede a simular el comportamiento de imanes y su interacción entre ellos para poder establecer los parámetros necesarios para el diseño. Además, se diseña un recinto acústico para un altavoz de frecuencias graves que ayudará a completar el espectro acústico que un altavoz planar no puede emitir. A continuación, se procede a su construcción, así como, medición de parámetros acústicos del mismo, analizando los parámetros arrojados por el altavoz planar. Finalmente se exponen las conclusiones obtenidas tras la realización de las mediciones.

Palabras clave:

Electroacústica, diseño, planar, lámina delgada, electrodinámico.

ABSTRACT

The document consists of the design and construction of a speaker with planar technology. This loudspeaker will be design having into consideration that it will be suitable for residential environments, that has a decorative with a function and that the thickness is minimum. This product has the goal, to learn about the performance of planar technology, as well as, developing a functional prototype to add additional value to it. It proceeds to simulate the behavior of magnets and the interaction between them. In addition, an acoustic enclosure for a loudspeaker is designed to help complete the acoustic spectrum that a planar loudspeaker cannot deliver. Next, its construction is carried out, as well as its acoustic parameters measurement, analyzing the parameters thrown by the planar loudspeaker. Finally, the conclusions obtained after carrying out the measurements are presented.

Keywords:

Electroacoustics, design, planar, thin film, electrodynamic.

INDICE

Resumen	2
1. Justificación y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	6
2. Fundamentos teóricos	7
2.1 Funcionamiento de un altavoz	7
2.2 Tipo de altavoces	8
2.2.1 Sin diafragma	8
2.2.2 Con diafragma	9
2.3 Parámetros de los altavoces	10
2.3.1 Parámetros fundamentales	10
2.3.2 Pequeña señal	11
2.3.2 Parámetros de gran señal	12
3. Diseño planar	13
3.1 Concepto	13
3.2 Motor magnético	14
3.2.1 Diseño del motor magnético por software.	14
3.3 Membrana	17
3.3.1 Hilo conductor	18
3.4 CONSTRUCCION DEL ALTAVOZ	18
4. Altavoz de graves	25
4.1 Parametrización del altavoz	26
4.2 Simulación WinISD	29
4.3 Diseño del recinto acústico	32
5 mediciones	34
5.1 Altavoz planar	35
5.2 <i>Subwoofer</i>	39
6 Conclusiones y futuras líneas	41
7 Bibliografía	42

TABLA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1 Sistema Dolby Atmos 7.1.4. Fuente: <i>Dolby Atmos® Home Theater Installation Guidelines</i> , (2018)	6
Ilustración 2 diagrama de un altavoz [1]	8
Ilustración 3 <i>Subwoofer</i> rotativo de la marca EMINENT. Fuente Eminent Technology: home. (s. f.) de http://www.rotarywoofer.com	9
Ilustración 4 Altavoz electrostático de martin logan. Fuente Premium HiFi Speakers for Home Theater & Stereo. (s. f.). MartinLogan, Ltd. De https://www.martinlogan.com:443/en/	10
Ilustración 5 dibujo del libro. Fuente Serway, R. A., & Jewett, J. W. J. (2015). Física para ciencias e ingeniería vol. 2 (9a. ed.)	13
Ilustración 6 esquema un altavoz planar push-pull. Fuente Planar theory. (s. f.). De http://www.integracoustics.com/MUG/MUG/articles/planar/	14
Ilustración 7 esquema de un altavoz planar single-end. Fuente Planar theory. (s. f.). De http://www.integracoustics.com/MUG/MUG/articles/planar/	14
Ilustración 8 simulación <i>single-end</i>	15
Ilustración 9 simulación <i>single-end</i> 1 mm de distancia.	16
Ilustración 10 simulación <i>push-pull</i>	16
Ilustración 11 simulación <i>push-pull</i> 1 mm distancia.	16
Ilustración 12 Tabla de propiedades físicas y térmicas de mylar. Fuente Mylar® polyester film (s.f.). De https://usa.dupontteijinfilms.com/wp-content/uploads/2017/01/Mylar_Physical_Properties.pdf	17
Ilustración 13 Plano de altavoz planar	19
Ilustración 14 Imanes en la placa metálica.	20
Ilustración 15 Membrana de mylar tensado y preparado con cola de contacto.	21
Ilustración 16 Marco adherido a la membrana.	22
Ilustración 17 Frecuencia de resonancia membrana.	23
Ilustración 18 Altavoz planar finalizado.....	24
Ilustración 19 Altavoz SB Acustic 8". Recuperado del Datasheet del fabricante.	25
Ilustración 20 Respuesta en frecuencia proporcionada por el fabricante, azul en el eje, verde 30° fuera del eje, rojo a 60° fuera del eje. Recuperado del datasheet del fabricante.	26
Ilustración 21 Circuito para medición de impedancia. Fuente manual del software REW	27
Ilustración 22 impedancia Subwoofer aire libre	28
Ilustración 23 Impedancia Subwoofer con 23,53g	28
Ilustración 24 Impedancia Subwoofer con 45,98g	28
Ilustración 25 Parámetros Thiele-Small del subwoofer	29
Ilustración 26 Izquierda recinto de caja cerrada, Derecha recinto <i>bass-reflex</i>	30
Ilustración 27 Simulación de recinto, amarillo <i>Bass reflex</i> , azul caja cerrada.....	31
Ilustración 28 Simulación optimizada del recinto <i>Bass reflex</i>	31
Ilustración 29 Simulación de la excursión del cono a 150w y dimensiones del resonador de Helmholtz.	32
Ilustración 30 jarrón moderno. recuperado de la página web (https://www.listamminimalista.com). ..	33
Ilustración 31 Boceto axial recinto <i>Bass reflex</i>	33
Ilustración 32 boceto 3D altavoz de subwoofer.	34
Ilustración 33 medición altavoz planar en cámara anecoica.	36
Ilustración 34 Respuesta en frecuencia cámara anecoica altavoz planar.	37
Ilustración 35 respuesta en frecuencia altavoz planar campo cercano, verde a 7cm, amarillo a 30cm.	38
Ilustración 36 armónicos del altavoz planar.	38

Ilustración 37 curva de impedancia altavoz planar.	39
Ilustración 38 medición de un modelo temprano del subwoofer en cámara anecoica.....	40
Ilustración 39 Respuesta en frecuencia cámara anecoica subwoofer.	40

1. JUSTIFICACION Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La complejidad de los sistemas multicanales en entornos residenciales ha sufrido en los últimos años grandes avances, como, por ejemplo, sistemas de sonido orientado a objetos, estos sistemas implementan una cantidad de altavoces nada despreciable, pasando de la pareja estéreo a sistemas multicanal 5.1 y los sistemas 7.1.4 de dolby atmos, (Dolby Atmos® Home Theater Installation Guidelines, 2018). Esto hace que los altavoces tengan un protagonismo importante en la decoración de las estancias donde se instala. Unas de las tendencias de la decoración de interiores es hacer el mejor uso del espacio disponible. Esto es un hándicap cuando los sistemas multicanales necesitan una cantidad de altavoces elevada. Los grandes altavoces de suelo, así como sistemas multi vías son voluminosos y estorban en un entorno pequeño residencial, la cual es la mayoría en los hogares. Las soluciones a ese problema es diseñar altavoces que se integren bien en el escenario planteado.



Ilustración 1 Sistema Dolby Atmos 7.1.4. Fuente: *Dolby Atmos® Home Theater Installation Guidelines*, (2018)

Unas de las soluciones es utilizar altavoces con una integración al mobiliario. Esta integración es compleja ya que debemos diseñar altavoces y muebles útiles. Por ejemplo, diseñar un mueble de televisión integrando los canales estéreo y central en el mueble. O bien integrando los altavoces en la decoración. Esta última es más fácil de integrar en más hogares, ya que no tiene por qué tener una utilidad de mueble sino meramente decorativa.

1.2 Objetivos

Una de las ideas que se plantea en este trabajo es utilizar todos los conocimientos, así como técnicas disponibles para diseñar un altavoz que se integre en un bastidor de un cuadro. Esto hará que sea una pieza muy fácil de integrar en un entorno residencial y es un sistema de decoración muy útil y fácil de cambiar, solo con cambiar la lámina expuesta en ella podemos cambiar el estilo de decoración rápidamente.

Para ello, se debe tener en consideración lo siguiente:

- La respuesta en frecuencia
- Distorsión armónica
- Potencia acústica
- Tamaño y grosor
- Función decorativa
- Facilidad de construcción

En este trabajo fin de grado se pretende realizar el diseño, en base al equilibrio de todas esas cuestiones, que, obviamente, pueden ser contrapuestas. Por ejemplo, disminuir el tamaño, va asociado con una reducción de potencia, o cambios en la respuesta en frecuencia.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Funcionamiento de un altavoz

Según Dickanson, V. (2006) el funcionamiento de un altavoz clásico suele ser análogo a los motores eléctricos, un bobinado con corriente alterna inducido en un campo magnético permanente, el cual, con la interacción de sus campos magnéticos realiza un movimiento. Como bien se observa en la ilustración 2 consta de varias partes diferenciadas, cada una con una función específica.

El motor magnético es el encargado de realizar la transformación eléctrica para realizar el movimiento del diafragma o del cono. Este compuesto por un imán permanente de neodimio o ferrita, unas placas frontales y traseras que redirigen el campo magnético por ellas, pieza polar que se encarga conjunto a las placas de redirigir el campo magnético hacia un espacio definido y la bobina de voz que se induce un campo eléctrico alterno la cual interacciona con el campo magnético permanente realizando movimiento de repulsión y atracción.

El diafragma encargado de transportar y transformar el movimiento de la bobina móvil en una onda acústica, actuando así el diafragma como un pistón que mueve las partículas del aire que este alrededor de este, suele ir desde el espacio (GAP) que se encuentra entre las placas y la pieza polar (entre hierro), donde permanece unida a la bobina de voz, hasta la suspensión exterior, puede ser de varios materiales como la seda, papel, kevlar, etc. Y tener varias geometrías, una de las formas más tradicionales es la de cono, así como la forma de domo.

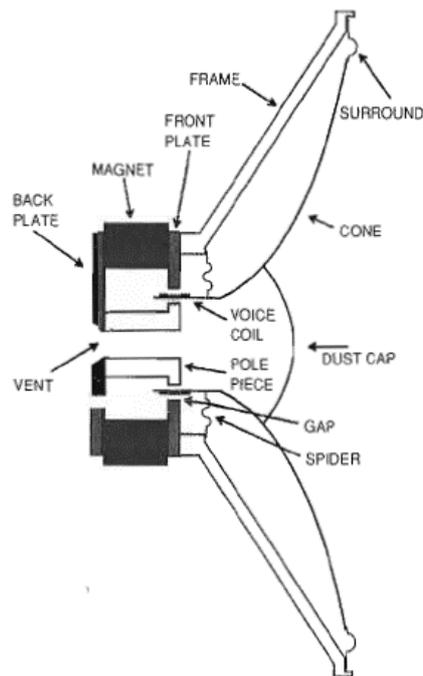


Ilustración 2 Diagrama de un altavoz [1]

El sistema de suspensión compuesto por la araña y la suspensión se encarga de amortiguar y centrar el diafragma del altavoz controlando y disipando los excesos de energía mecánica, un buen sistema amortiguado puede solventar problemas de distorsión, también se encarga de poner límite a la excursión máxima del cono.

2.2 Tipo de altavoces

Los altavoces en general se clasifican con 2 grandes grupos. Estos dos grandes grupos se diferencian en un elemento esencial, el diafragma, el cual es importante para la transmisión mecánica acústica del conjunto. Los sistemas sin diafragma en general suelen ser experimentales o de poca aceptación comercial ya que al carecer de esta parte fundamental usan otros principios físicos para sustituir el mismo. Los altavoces más comunes y que más abundan son con diafragma, específicamente altavoces dinámicos, en este conjunto tenemos una parte móvil que genera un movimiento a través de principios físicos, el más común es el electromagnético. También se puede clasificar por su respuesta en frecuencia, ya que es poco común que un altavoz se comporte bien en todo el rango audible, se clasifica sobre su especialidad sobre que rango audible es el más eficiente de este altavoz, en este tipo de clasificación tenemos el subwoofer especializado en frecuencias más bajas del espectro usualmente menor de 100Hz *woofer* altavoz especializado en frecuencias graves no suele superar el 1kHz, medios altavoces especializado en frecuencias medias o de rango completo no suele ser muy buenos ni en graves ni frecuencias agudas y *tweeter* enfocado a frecuencias más agudas usualmente 5kHz o más.

2.2.1 Sin diafragma

1. **Altavoz de plasma:** Son altavoces los cuales usan un arco de plasma como medio radiante. El plasma tiene una masa casi despreciable así que tiene un acoplamiento con el aire casi perfecto, el principio de su funcionamiento es sencillo, se genera un arco de plasma de alto voltaje y se modula ese voltaje para poder crear un arco móvil y generar una onda sonora.

2. **Subwoofer rotativo:** se compone de un motor giratorio que hace girar unas aspas a gran velocidad, mientras que la señal de audio inducida hace cambiar el ángulo de ataque de las aspas, generando así una presión sonora de frecuencias tan bajas como 1Hz.



Ilustración 3 *Subwoofer* rotativo de la marca EMINENT. Fuente Eminent Technology: home. (s. f.) de <http://www.rotarywoofer.com>

2.2.2 Con diafragma.

- **Piezoeléctricos:** su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico induciendo una corriente a una cerámica podemos hacer que esa cerámica vibre a la frecuencia dada, un tipo de altavoz poco lineal y de bajo rendimiento, generalmente se utiliza para generar ultrasonidos, aunque también se utiliza para frecuencia altas en equipo de bajo costo.
- **Dinámicos:** altavoces convencionales que su funcionamiento se ha descrito anteriormente, son baratos y el más utilizado actualmente.
- **Electroestáticos:** utiliza una membrana fina cargada electrostáticamente junto a una placa metálica, necesita una tensión permanente de alta tensión para tener una carga entre la placa y la membrana, la cual actúa como un condensador, al incrementar la energía almacenada en la placa genera un movimiento del diafragma de forma lineal que impulsará toda la membrana a la vez, las distorsiones armónicas son ínfimas, son caros de desarrollar y tiene problemas con los amplificadores.
- **Planar y de cinta:** los de cinta utiliza una fina película de un material metálico inmerso en un campo magnético, al aplicar una corriente eléctrica, la fina película actúa como una membrana moviéndose y creando una presión sonora, al ser su masa muy pequeña puede tener aceleraciones rápidas dando una buena respuesta en frecuencias agudas. Al utilizar una película metálica la impedancia de entrada es muy baja siendo necesario un transformador para adaptar su impedancia. En su contraparte los planar tiene el mismo principio, pero cambia la fina película metálica por una película de material no metálica y encima de ella se pone un hilo o imprime como un circuito impreso. Los dos tipos se comporta casi como una resistencia pura para un amplificador.



Ilustración 4 Altavoz electrostático de Martin Logan. Fuente Premium HiFi Speakers for Home Theater & Stereo. (s. f.). MartinLogan, Ltd. De <https://www.martinlogan.com:443/en/>

2.3 Parámetros de los altavoces

Los altavoces tienen una serie de parámetros basados en la parte mecánica, eléctrica y electromecánica. Estos parámetros se denominan parámetros Thiele-Small, llamados después que Albert Neville Thiele y Richard H. Small los definieron en sus publicaciones [3],[4],[5] y [6]. Estos parámetros hoy en día lo utilizan todos los fabricantes, definen el rendimiento y el diseño de los altavoces medidos y son fundamentales para diseñar las cajas acordes a estos altavoces. Dentro de estas publicaciones mencionan parámetros universales los cuales se definen como parámetros fundamentales, de pequeña señal, de gran señal y parámetros de las cajas. Normalmente los fabricantes suelen mostrar este dato en sus hojas de características, pero las tolerancias que tienen los altavoces obliga a medirlos siempre que se quiera diseñar una caja para ese altavoz, aunque las variaciones son mínimas en fabricantes con altavoces de gran calidad.

2.3.1 Parámetros fundamentales

En este apartado se definen los parámetros físicos del altavoz medidos en niveles de pequeña señal, prácticamente todos los altavoces de bobina móvil tienen parámetros en este campo, cuyas definiciones son las siguientes.

- **BL:** Factor de fuerza o producto BL, medido en Tesla * metros. La fórmula que define es:

$$BL = B * L.$$

Donde el parámetro B define la densidad de flujo magnético y L la longitud de la bobina de voz, este parámetro mide la fuerza del motor, con motores más fuertes es capaz de mover diafragmas más grandes y más potencia admisible. Aunque tener un parámetro BL más grande tampoco significa tener una eficiencia más alta, en cambio sí proporcionan una respuesta transitoria mejor al poder controlar con mayor precisión y velocidad del diafragma.

- **C_{ms}**: Compliancia mecánica de la suspensión, medido en metros/Newton. Este parámetro define el comportamiento de la suspensión y araña del altavoz, es inversa a la rigidez, define la fuerza que ejerce la suspensión mecánica. Teniendo una suspensión rígida permite vibraciones más cortas y por lo tanto rápidas, en su contra una suspensión más suelta permite vibraciones largas y lentas. Al diseñar un altavoz este tipo de parámetros, junto a otros, se diseñan para poder controlar la suspensión cuando el altavoz llega a su frecuencia de resonancia (F_s).
- **L_e**: inductancia de la bobina de voz, medidos en mili Henrios. La inductancia es la oposición de un conductor eléctrico al cambio de corriente, este parámetro es importante ya que los altavoces reciben señales de corriente alterna, por lo tanto, en la bobina móvil siempre hay cambios de corrientes. La bobina móvil de un altavoz siempre va a tener una tendencia de resistencia al movimiento, provocado por una fuerza electromotriz que se produce en dirección opuesta al flujo de corriente. Debido a este parámetro la impedancia aumenta conforme aumenta la frecuencia, esto es un problema para altavoces de agudos y en el diseño debe tener en cuenta este parámetro.
- **M_{md}**: Masa del diafragma, medidos en gramos. Este parámetro debe tener en cuenta el peso del diafragma, así como el bobinado. También está incluido el peso de la mitad de la suspensión, esto es debido a que la suspensión está conectada al diafragma, por lo tanto, una parte de esta suspensión se mueve y se computa el cálculo de la masa móvil del conjunto.
- **M_{ms}**: Masa del diafragma incluido la masa de aire, medido en gramos. Este parámetro combina la masa de M_{md} y la carga de aire que tiene alrededor el diafragma, esta carga es el peso del aire que el diafragma debe empujar para el movimiento del diafragma, a medida que este parámetro y el anterior aumente, la frecuencia de resonancia baja, dando esto a que los diafragmas más pesados pueden oscilar lentamente, a la inversa tenemos los diafragmas ligeros que pueden tener oscilaciones más rápidas.
- **R_e**: Resistencia en continua de la bobina de voz, medida en ohmios. Este parámetro define la impedancia mínima que veremos en todo el rango de frecuencias, debido a la composición de un altavoz es raro que presente una carga puramente resistiva hacia un amplificador, aunque esas excepciones ocurren como más adelante veremos.
- **R_{ms}**: Resistencia mecánica, medida en kilogramos/segundos. Un parámetro que define la resistencia mecánica del altavoz, en esto se tiene en cuenta las pérdidas de la suspensión. También es uno de los factores principales del factor Q mecánico que veremos más adelante.
- **S_d**: Superficie del cono, medido en m². Este parámetro se define con el área del cono móvil utilizada para generar sonido. Este parámetro también incluye el área pertinente de la suspensión que en ocasiones es la mitad de su anchura.

2.3.2 Pequeña señal

Estos parámetros se miden con niveles de entradas pequeños ya que es la parte lineal de un altavoz y sin distorsiones apreciables que sí podemos tener con grandes señales, se pueden determinar midiendo la impedancia cerca de la frecuencia de resonancia.

- **F_s**: Frecuencia de resonancia al aire libre, medida en Hercios. la fórmula que define este parámetro es:

$$F_s = \frac{1}{(2 * \pi * (\sqrt{C_{ms} * M_{ms}}))}$$

Definida también como F₀, es la frecuencia donde el altavoz a aire libre tiene una resonancia natural, esta resonancia se da como el equilibrio de fuerzas que se tiene en movimiento con

las partes móviles y la suspensión, un C_{ms} y M_{ms} altos harán que baje la F_s . También se tiene en cuenta que esta es la frecuencia más baja que un altavoz sin caja podrá tener un movimiento eficiente sin producir desviaciones o daños a las partes mecánicas del altavoz.

- **Q_{es} :** Factor de calidad eléctrico, es adimensional. Su fórmula es la siguiente:

$$Q_{es} = \frac{(2 * \pi * F_s * M_{ms} * R_e)}{(BL)^2}$$

Un parámetro que define el amortiguamiento eléctrico que tiene el altavoz debido a la bobina móvil y el motor magnético. Los parámetros Q son inverso a la relación de amortiguación, dando que valores Q bajos significa más control.

- **Q_{ms} :** Factor de calidad mecánico, es adimensional. Su fórmula es la siguiente:

$$Q_{ms} = \frac{(2 * \pi * F_s * M_{ms})}{R_{ms}}$$

Un parámetro que define el amortiguamiento mecánico que tiene el altavoz debido a sus pérdidas en la suspensión. Valores altos de este parámetro Q definen menores pérdidas mecánicas y por ende mejor control del movimiento físico.

- **Q_{ts} :** Factor de calidad total, es adimensional. Su fórmula es la siguiente:

$$Q_{ts} = \frac{(Q_{es} * Q_{ms})}{(Q_{es} + Q_{ms})}$$

Se define como una combinación de los parámetros Q_{ms} y Q_{es} , al ser inverso a la relación de amortiguación tenemos que valores bajos de Q tenemos más control.

- **V_{as} :** Volumen equivalente de compliancia, se mide en Litros. Su fórmula es:

$$V_{as} = \rho * c^2 * S_d^2 * C_{ms}$$

Este parámetro mide el volumen de aire que es equivalente a la rigidez de la suspensión cuando este actúe como un pistón sobre la misma superficie de S_d . Esto es debido al que el aire de un recinto tiene una compliancia propia, de modo cuando intentamos comprimir el aire del recinto hay cierta resistencia. Con eso tenemos que cuando un recinto es pequeño tiene menos volumen de aire, esto hace que sea más difícil de comprimir y viceversa. Teniendo esto en cuenta un recinto con un volumen superior que este parámetro hará que el altavoz actúe en una caja infinita.

2.3.2 Parámetros de gran señal

Este conjunto de parámetros predice el comportamiento con una entrada de gran señal, los cuales hacen que el altavoz actúe fuera de su parte lineal. Los parámetros son los siguientes:

- **P_e :** Máxima potencia continua también W_{rms} , se mide en vatios. Se refiere a la admisión máxima de energía eléctrica que un altavoz soporta de forma continua, sin derretirse, quemarse o sufrir daños. Se tiene como la máxima potencia que puede admitir el altavoz, aunque en bajas frecuencias podía ser menor debido al límite mecánico de las oscilaciones de la suspensión.
- **V_d :** volumen de desplazamiento, se mide en litros. Es el parámetro que indica cual es el volumen máximo de aire es capaz de desplazar el altavoz en su parte lineal. Es un parámetro usualmente usado para bajas frecuencias ya que cuanto más alto sea, más intensidad sonora podrá generar en frecuencias bajas. Su cálculo se basa en el parámetro S_d y el parámetro X_{max} .
- **X_{max} :** excursión lineal máxima, se mide en milímetros. Es el desplazamiento de el diafragma en su parte lineal sin distorsionar el sonido emitido. Este parámetro interviene la oscilación máxima de la suspensión y la máxima distancia que puede desplazar la bobina de voz sin perder la influencia del motor magnético y perdiendo el control, creando distorsiones cuando

sale de la influencia de este. Normalmente sobrepasar este parámetro no tiene por qué destruir el transductor.

3. DISEÑO PLANAR

Una cosa fundamental del diseño de transductores es la elección de la tipología y materiales, ya que estos definen su comportamiento, así como su rango de funcionamiento, por ejemplo, materiales duros para una membrana como el aluminio nos da una rigidez alta, pero por el contrario podemos tener modos resonantes en la membrana, haciendo que el rango de funcionamiento del transductor se aleje de esas resonancias para evitar distorsiones armónicas. Una de las características de este tipo de altavoz es su comportamiento en forma de dipolo por tener la parte trasera abierta, teniendo cortocircuito acústico y pérdida de respuesta en frecuencias bajas. La tipología del transductor también nos define la forma que se comportara como el principio físico que aplicaremos para crear ondas sonoras.

3.1 Concepto

Para entender el funcionamiento de un transductor de tipo planar, hay que entender cómo se comporta un alambre con una corriente eléctrica dentro de un campo magnético. Entender las fuerzas ejercidas según la dirección de la corriente. Todo ello está recogido en la ley de Ampere cuya formulación es la siguiente:

$$\vec{F} = I * \vec{L} \times \vec{B}$$

Donde F es la fuerza del alambre, I la intensidad que fluye por el alambre, L la longitud del alambre y B el campo magnético en la posición del alambre. El producto vectorial $\vec{L} \times \vec{B}$ es el parámetro Thiele-Small (BL) con lo cual podemos parametrizarlo desde el inicio.

Como se puede observar en la ilustración 5, dependiendo del flujo de corriente y su dirección, el alambre se moverá dentro del campo magnético. flexionando al eje x según la ilustración. Teniendo en cuenta que, teniendo un flujo de corriente senoidal, el alambre se moverá en consecuencia adoptando la forma de onda, eso mismo ocurre con una señal con información sonora, se moverá conforme esa señal. Con esto tenemos un motor magnético capaz de moverse en consonancia a la señal de entrada.

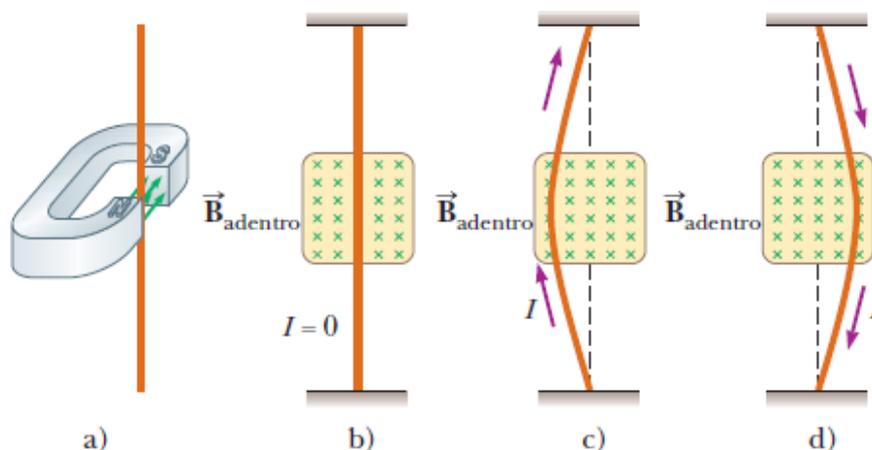


Ilustración 5 Dibujo del libro. Fuente Serway, R. A., & Jewett, J. W. J. (2015). Física para ciencias e ingeniería vol. 2 (9a. ed.)

Adhiriendo al alambre una membrana o cono, comprimimos el aire circulante, creando una onda sonora que viaja por el aire teniendo así un transductor rudimentario. Paradójicamente también podemos tener el efecto contrario, capturando con la membrana o cono la presión acústica que tenemos en el aire. El alambre se moverá en el campo magnético induciendo un flujo de corriente en él, lo cual podemos usar para captar variaciones de presión sonora en el aire.

3.2 Motor magnético

Una de las partes fundamentales de un transductor, compuesta de un imán o de varios, los sistemas clásicos utilizan un imán potente para generar el campo magnético en el entrehierro. En los tipos de transductores tipo planar es importante tener un campo magnético uniforme en el plano donde van a estar el hilo, los diseños suelen ser de dos tipos:

- *Push-pull*: Sistema compuesto de dos planos de imanes enfrentados, es el sistema ideal ya que tiene una densidad del campo magnético alto. Son más costosos de diseñar y construir.

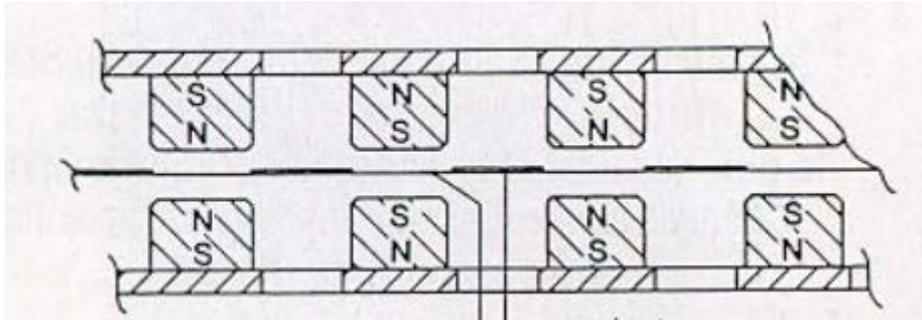


Ilustración 6 Esquema un altavoz planar push-pull. Fuente Planar theory. (s. f.). De <http://www.integracoustics.com/MUG/MUG/articles/planar/>

- *Single-end*: Sistema compuesto solamente de un plano de imanes, es mucho más sencillo de implementar y de bajo costo, en contra la densidad del campo magnético decae con respecto a la distancia de los imanes.

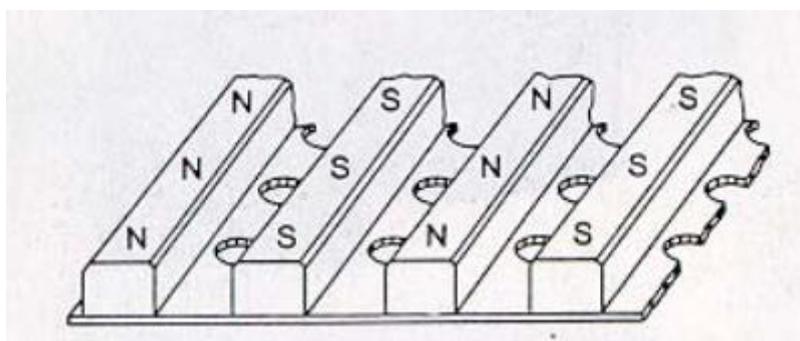


Ilustración 7 Esquema de un altavoz planar single-end. Fuente Planar theory. (s. f.). De <http://www.integracoustics.com/MUG/MUG/articles/planar/>

3.2.1 diseño del motor magnético por software.

Para simular el comportamiento del motor magnético se realizan simulaciones con el software de distribución libre femm (Meeker, 2019), que utiliza el método de elementos finitos para la simulación del campo magnético. Para las primeras simulaciones se dispone de 9 filas de imanes de neodimio N35 de 2mm de grosor y 10 mm de ancho, separados entre sí por 10mm. Sujutando los imanes una pletina

de aluminio de 0,8 mm de grosor, como se observa en la ilustración 8. Las líneas que se observan son las fuerzas del campo magnético y el mapa de calor la densidad de éste.

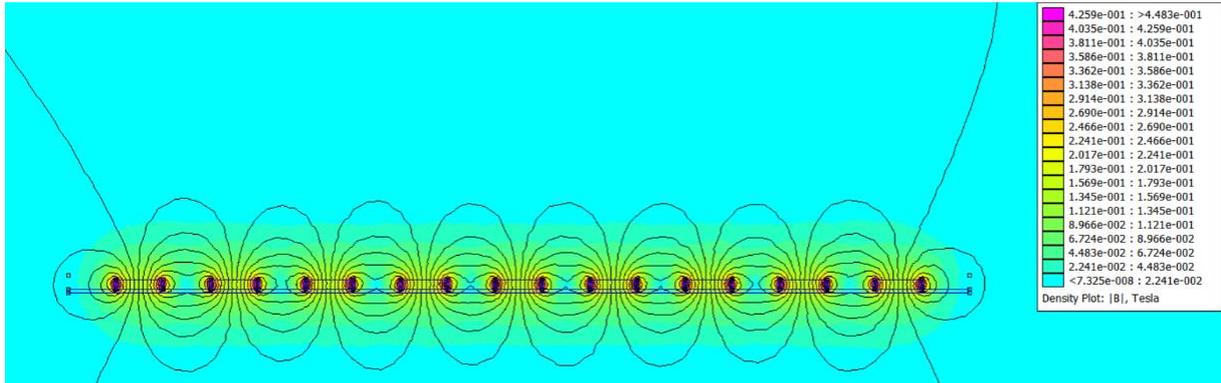


Ilustración 8 Simulación *single-end*.

Se observa que el plano donde mejor se comporta el campo magnético es a 1 mm de distancia de los imanes, esta será el plano donde ira situada la membrana, aunque se debe tener en cuenta también el comportamiento en los planos 0mm y 2 mm ya que será la zona de máxima excursión de la membrana. En la ilustración 9 se observa que el comportamiento en 1 mm. Dado que el hilo debe pasar por las zonas con más densidad magnética, se saca la conclusión que el hilo debe pasar a distancias equidistantes de los imanes, dando una media de 0.17 Teslas en la zona. También con la simulación definimos la excursión máxima que va a tener el transductor ya que físicamente no puede sobrepasar el plano de los imanes.

En simulaciones de un sistema *push-pull*, se dispone de la mismas distancias y tipo de imanes iguales que la simulación anterior, agregando, como en se define en su diseño, un segundo plano de imanes enfrentados haciendo un plano espejo a 1 mm de distancia de los imanes. Se observa en la ilustración 10 como se crea un campo magnético contenido dentro de los dos planos de imanes. La ilustración 11 nos muestra a 1 mm de distancia de los imanes la densidad que se obtiene, observando que comparado con la topología *single-end* la densidad crece comparado con la simulación anterior, en distancias equidistantes de los imanes, la gráfica nos muestra una v bastante agresiva dando que la parte más baja de la gráfica densidades mayores a la simulación anterior, con una media de 0,25 Teslas.

Con estas simulaciones modelamos el campo \vec{B} del prototipo, además de definir donde situar el campo \vec{L} , con estas simulaciones se modela el motor magnético del transductor, el parámetro BL que va a tener el traductor y la excursión máxima.

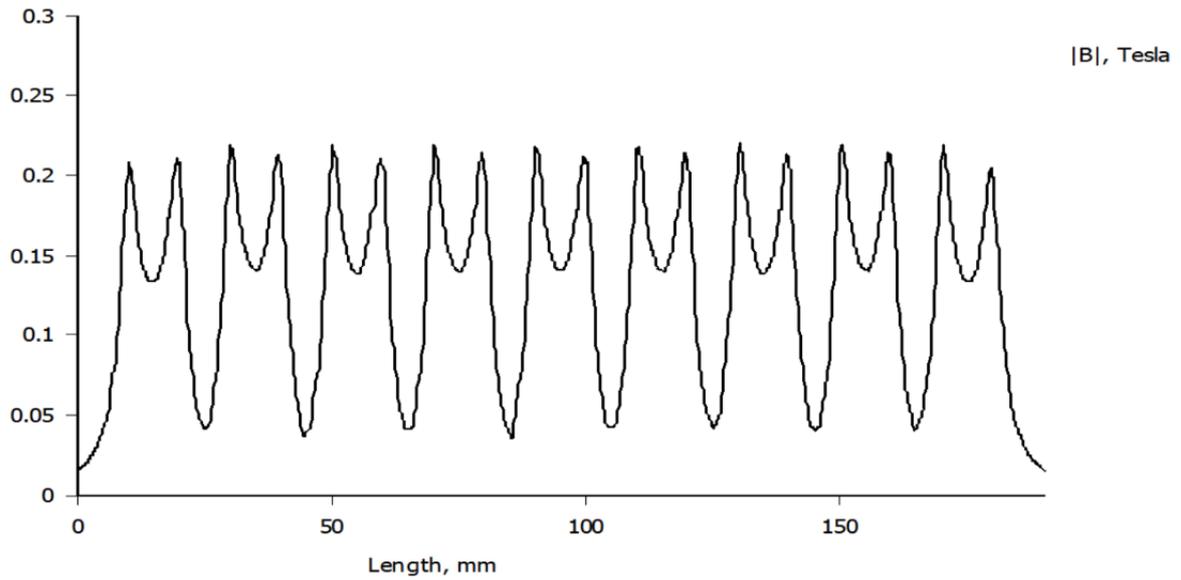


Ilustración 9 Simulación *single-end* 1 mm de distancia.

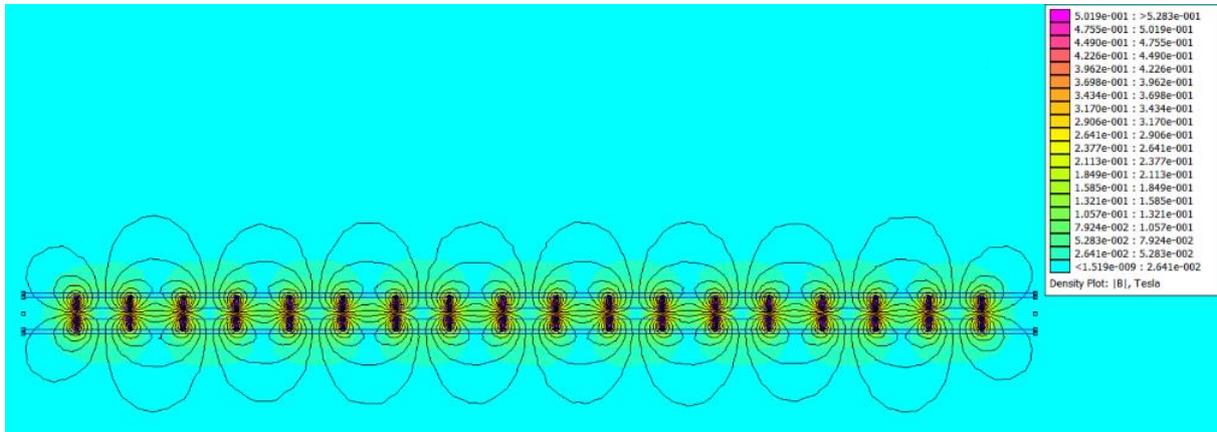


Ilustración 10 Simulación *push-pull*.

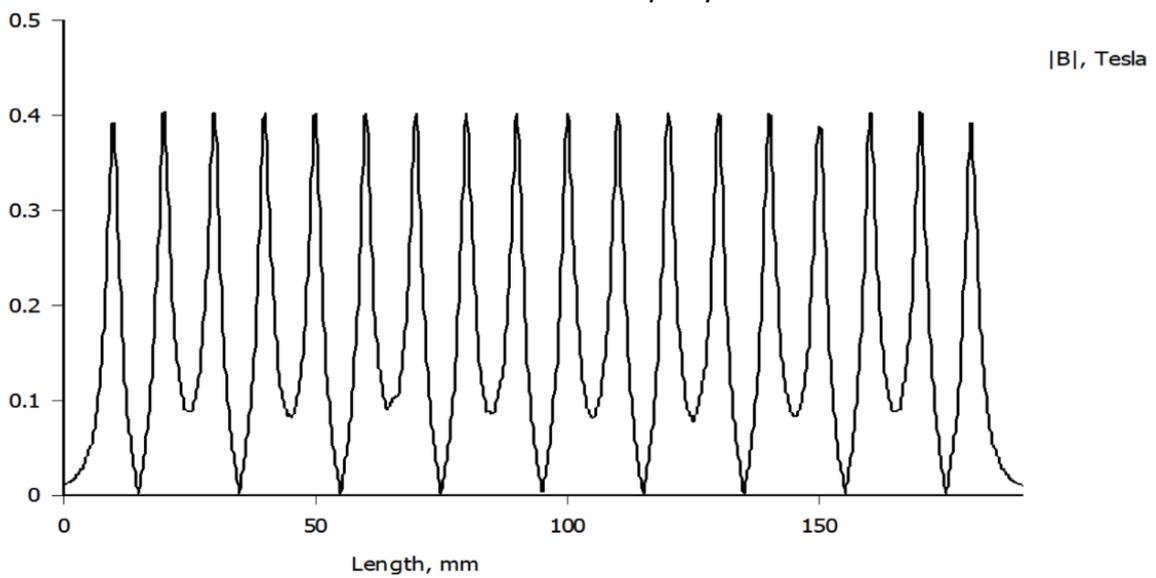


Ilustración 11 Simulación *push-pull* 1 mm distancia.

3.3 Membrana

Una de las ventajas de los transductores planar es una membrana ultraligera, puede ser compuesta de un material o de varios, en este prototipo nos basaremos en un material bastante conocido como el tereftalato de polietileno (PET) plástico usado en la industria alimentaria como recipiente de bebidas o textiles, comercialmente llamado mylar. Es un material reciclable así se puede usar plástico reciclado para crear membranas, además es la película plástica más ligera y resistente que se puede construir ahora mismo.

Como podemos observar en la ilustración 12, la resistencia térmica del material esta entre -70 hasta 150°C, una resistencia a la deformación del 1,8% máximo a una temperatura de 150°C, una resistencia a la tensión de 20-24 kg/mm² y densidad de 1,39 g/cm³. La tensión del material también es importante en este paso, ya que define la resonancia natural de la membrana, poca tensión en la membrana deja la membrana floja con una resonancia natural baja, teniendo una tensión elevada, sin llegar a la rotura, nos da una membrana firme con una resonancia alta. Como analogía podemos ver la membrana de un tambor con poca tensión tenemos poca firmeza y una resonancia baja en frecuencia, con una tensión alta tenemos más firmeza y una frecuencia de resonancia alta. Con esto podemos controlar la respuesta en frecuencia ideal de la membrana, sacrificando frecuencias bajas, membrana tensa, obtenemos mejor respuesta en la parte alta del espectro audible esto también nos da mejor control de la membrana y auto amortiguamiento.

Property	Typical Value	Unit
Gauge and Type End Use	92A Industrial	
Ultimate Tensile Strength, MD TD	20 (29) 24 (34)	kg/mm ² (kpsi)
Strength at 5% Elongation (F-5), MD TD	10 (15) 10 (14)	kg/mm ² (kpsi)
Modulus, MD TD	490 (710) 510 (740)	kg/mm ² (kpsi)
Elongation, MD TD	116 91	%
Surface Roughness Ra	38	nm
Density	1.390	g/cm ³
Viscosity	0.56	
Melt Point	254	°C
Dimensional Stability at 105°C (221°F), MD TD at 150°C (302°F), MD TD	0.6 0.9 1.8 1.1	%
Specific Heat	0.28	cal/g/°C
Coefficients of Thermal Expansion Thermal Conductivity (Mylar® 1000A)	1.7×10^{-5} 3.7×10^{-4}	$\frac{\text{in/in/}^\circ\text{C}}{\text{cm}^2\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}}$
UL94 Flame Class	See UL file # E93687	VTM

Ilustración 12 Tabla de propiedades físicas y térmicas de mylar. Fuente Mylar® polyester film (s.f.). De https://usa.dupontteijinfilms.com/wp-content/uploads/2017/01/Mylar_Physical_Properties.pdf

3.3.1 Hilo conductor

También se define el hilo que recorre toda la membrana ya que es una parte fundamental, los materiales más comunes de un hilo conductor no magnéticos son el cobre y el aluminio. Estos dos materiales son propensos a la oxidación con el contacto con el aire, la solución de esto es contar con un hilo esmaltado evitando así la oxidación, así como posibles contactos eléctricos con ellos. Otro de los desafíos es conseguir una membrana más ligera posible así que se requiere que el material tenga la conductividad deseada con la mínima masa posible. Eso sin olvidar que debe ser dúctil ya que la membrana debe tener el poder de deformarse y auto amortiguarse.

El aluminio tiene como ventaja de ser más ligero que el cobre, sobre el 30% del peso de este último, pero tiene una conductividad también más baja, alrededor del 60%, eso significa que un hilo de aluminio con la misma resistencia eléctrica con uno de cobre pese aproximadamente un 50%. Dado que un hilo de aluminio es el ideal para membranas ligeras, aunque el inconveniente de encontrar un hilo de aluminio esmaltado es más tedioso que uno de cobre, ya que este último es más utilizado en la industria. Una de las soluciones para poder utilizar un hilo de aluminio es imprimir sobre la membrana las pistas de aluminio directamente. esto conlleva al coste en maquinaria sea elevado comparado con un hilo de cobre.

En el bobinado se busca que la impedancia mínima sea acorde a la que se puede usar en un amplificador medio, estando esto entre los 4 y 8 Ω . El diseño de su impedancia se basa en la resistencia de un hilo pudiéndose calcular con la formula siguiente:

$$R = \rho * \frac{L}{S}$$

Donde ρ es una constante conocida del material llamada resistividad, L es la longitud en metro del conductor y S la sección en mm^2 del conductor. Según podemos deducir de la formula, a mayor longitud, mayor resistencia y a mayor sección, menor resistencia. Tomando un hilo de cobre de 0,2mm de grosor, con una sección de 0,031 mm^2 y una resistividad de 0,0172 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, para tener una resistencia de 4 Ω necesitaremos una longitud aproximada de 7,4 metros del hilo de cobre. Con esto ya tenemos definido el campo \vec{L} .

3.4 CONSTRUCCION DEL ALTAVOZ

La construcción del altavoz es simple, se trata de tener una membrana a 1 mm del plano superior de los imanes, esto se consigue haciendo una estructura en forma de marco con un grosor de 3mm, la cual estará puesta por encima de la placa metálica donde se alojan los imanes, quedando así los imanes a 1 mm de la membrana. Las dimensiones después de ensayo y error se definen en la ilustración 13, este tamaño es contenido ya que hacer un altavoz planar más grande haría más costoso su fabricación a causa del uso masivo de imanes de neodimio, actualmente al ser una tierra rara cotiza en máximos históricos.

Se define la membrana con unas dimensiones de 19x29cm lo cual nos da una superficie radiante equivalente a un altavoz de 10". La membrana debe reposar sobre un marco, pieza azul, lo cual se escoge la madera como un material fácilmente trabajable. Al ser la madera tan fina se procede a hacer un submarco de madera de más grosor (10mm para darle una mejor resistencia a la flexión). Este submarco se pondrá detrás la madera dejando un espacio para colocar la lámina metálica.

Se utiliza una lámina metálica de aluminio perforada, estas perforaciones son importantes para dejar pasar la presión sonora generada por la parte trasera de la membrana. Idealmente debe ser un metal que sea permeable al magnetismo, por no ser posible la obtención de este, se opta por aluminio esto

nos hace perder rendimiento que en la práctica es una disminución de 6 dB en la presión sonora. La lamina metálica se corta con unas dimensiones de 21x31cm para poder así encastrar en el marco, se compone de 9 tiras de imanes de neodimio, pieza verde, esta tira de imanes está compuesta a su vez por pequeños imanes adheridos con cola de contacto a la lámina metálica, véase la ilustración 14.

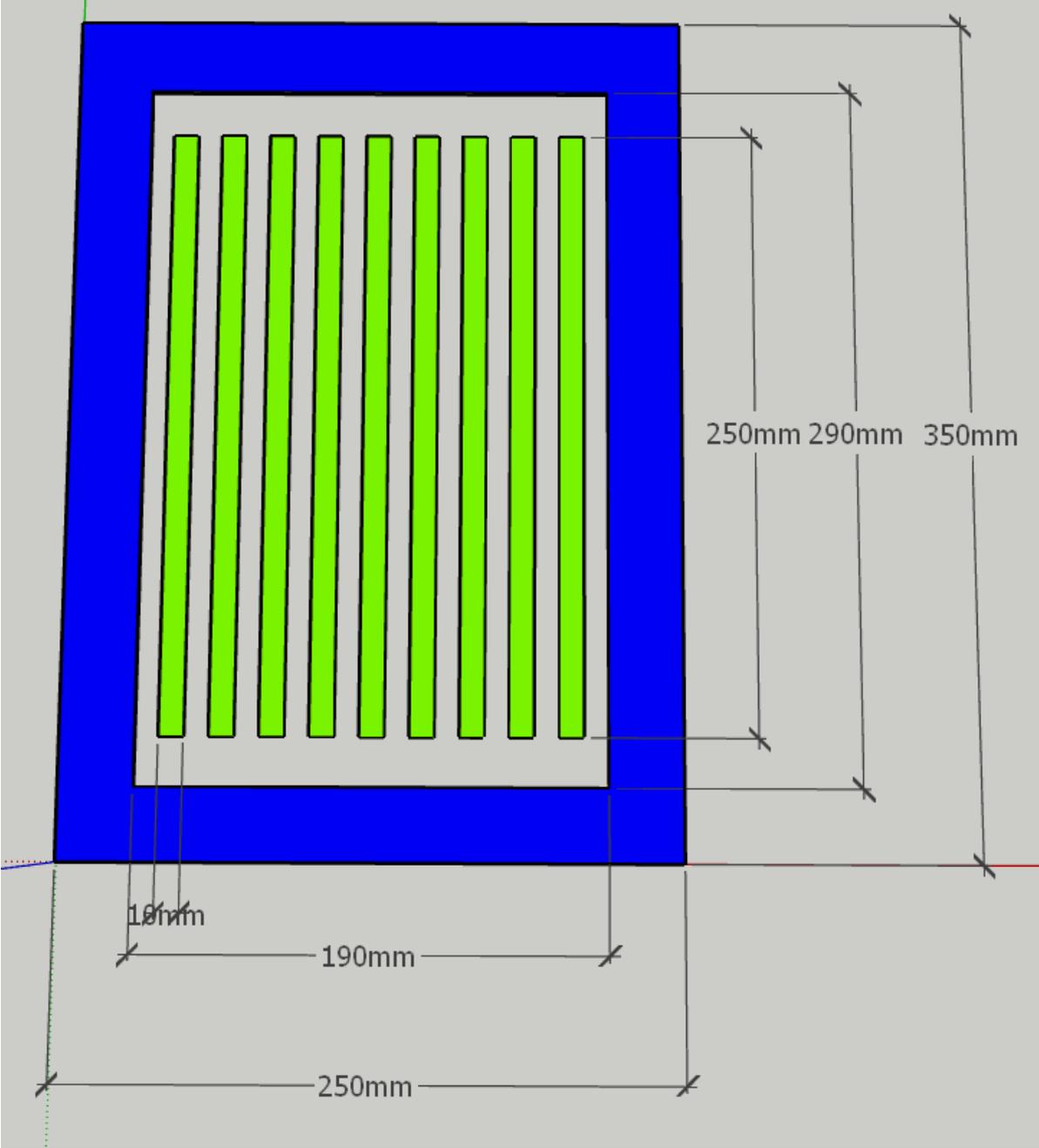


Ilustración 13 Plano de altavoz planar

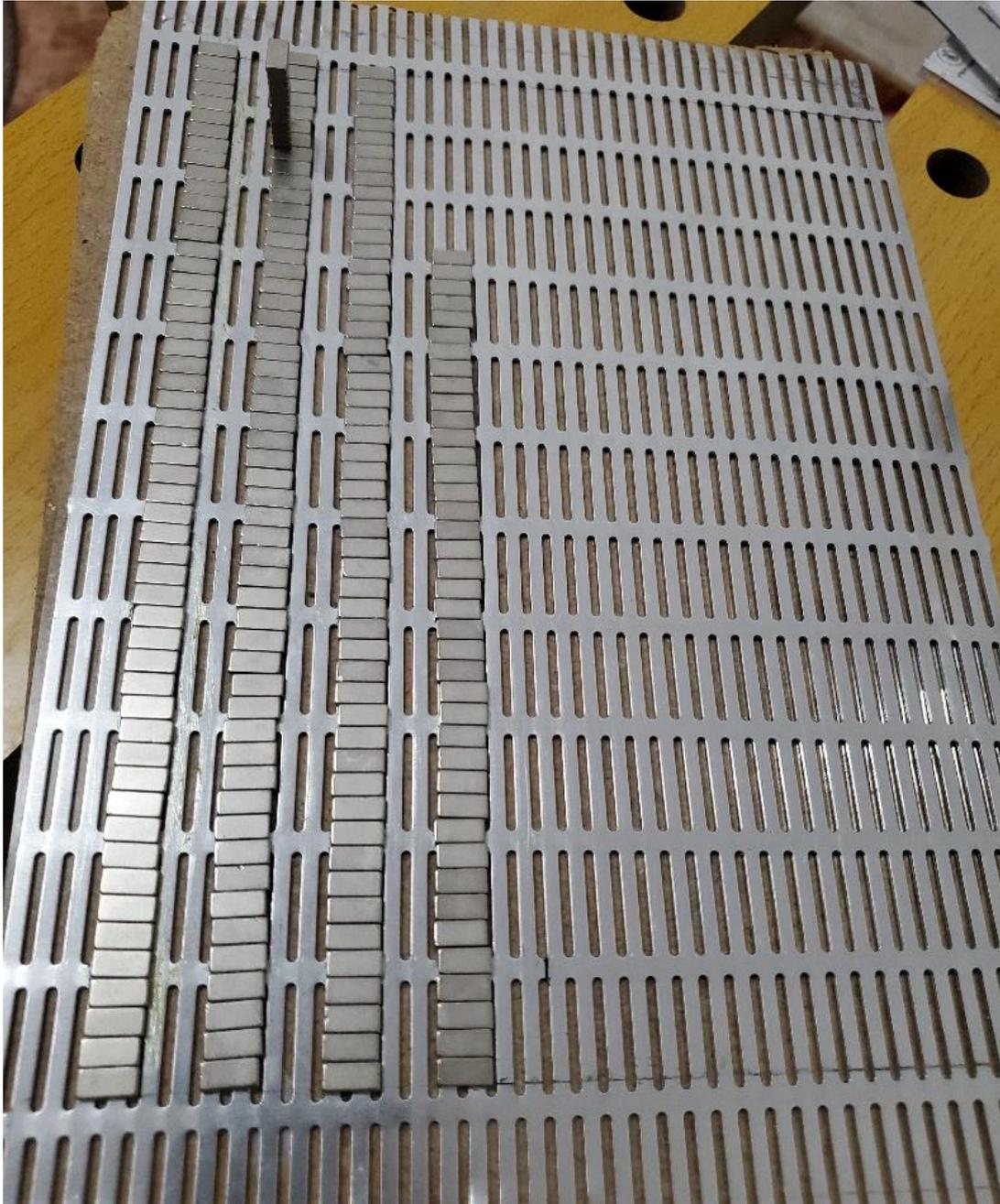


Ilustración 14 Imanes en la placa metálica.

Cortado la madera, se procede a preparar la lámina de mylar para su adhesión al marco, como se observa en la ilustración 15, se tensa la membrana en un marco grande con tiras de cinta americana para tener una tensión más alta posible. Una vez con tensión suficiente, se impregna de cola de contacto Fastbond™ 30NF de 3M™ la superficie que tendrá contacto con el marco. En la ilustración 16 se observa el marco adherido a la lámina. Una vez la cola de contacto está seca se procede a cortar el sobrante de la lámina y realizar la medición de la frecuencia de resonancia de la membrana. Este procedimiento es muy sencillo de hacer. Capturamos sonido a través de un programa de RTA. Un micrófono cerca de la lámina, se golpea suavemente la lámina. Se obtendrá la frecuencia a la que la membrana resuena, así como sus armónicos, ilustración 17. Dando un resultado de 72Hz, idealmente debería tener una frecuencia de resonancia mayor, para así tener respuesta en frecuencias altas.



Ilustración 15 Membrana de mylar tensado y preparado con cola de contacto.



Ilustración 16 Marco adherido a la membrana.

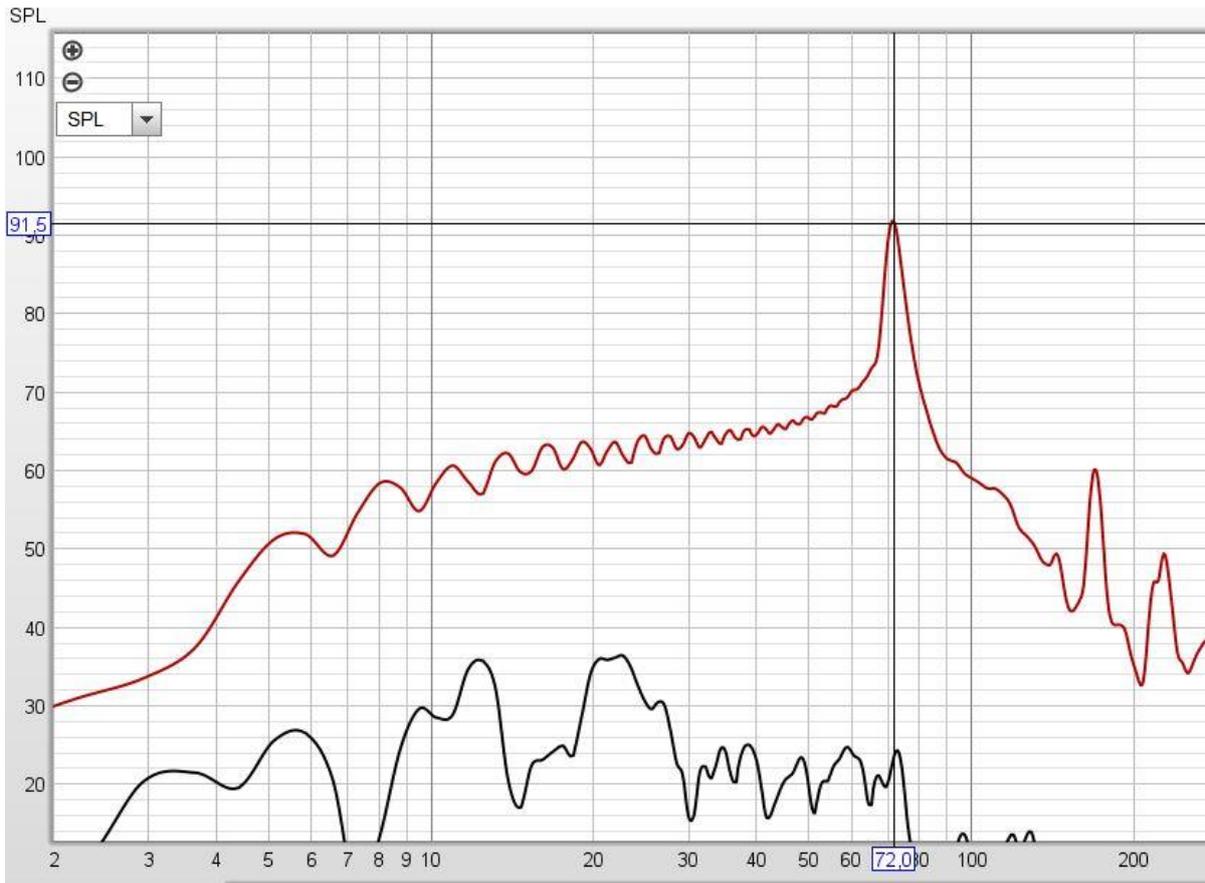


Ilustración 17 Frecuencia de resonancia membrana.

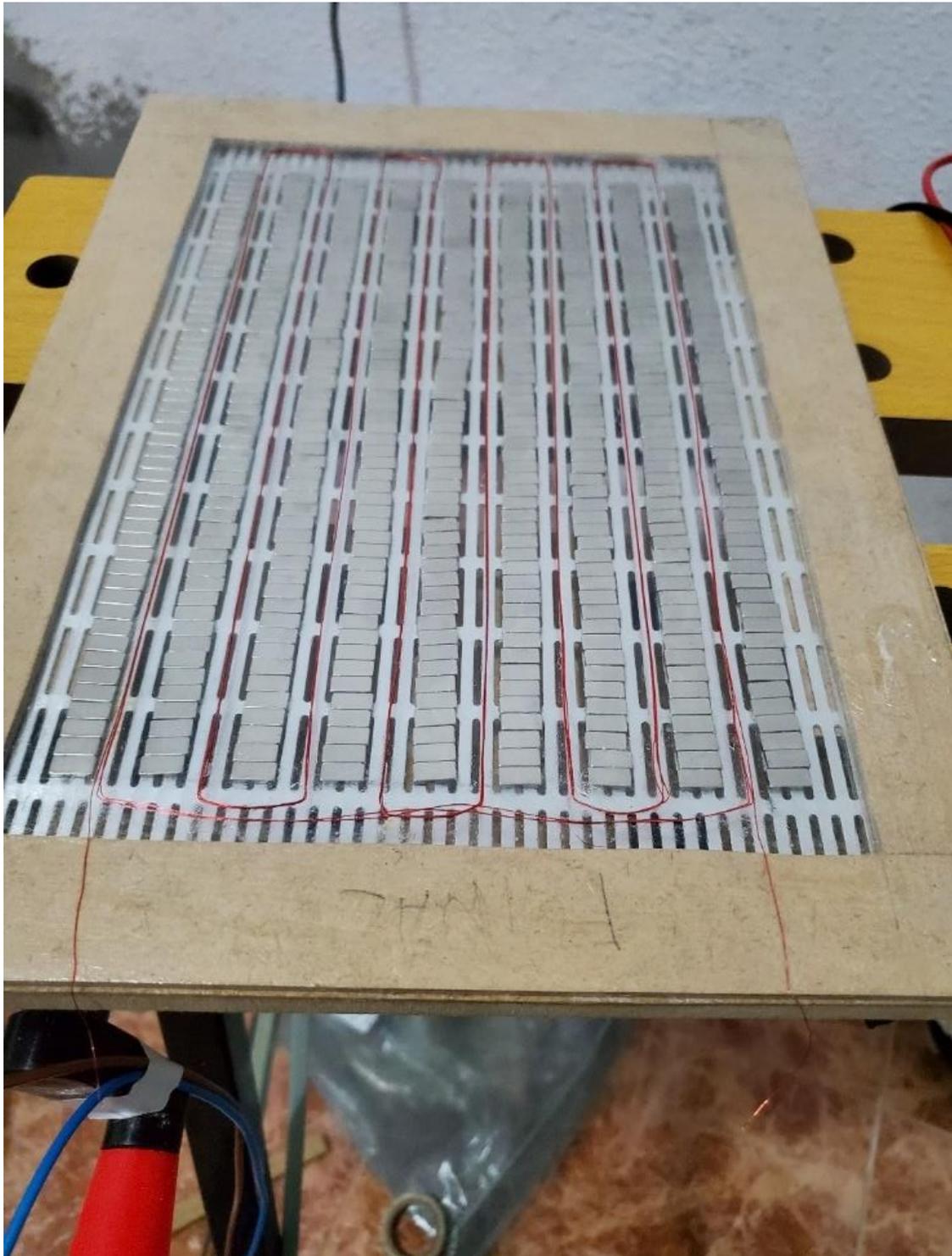


Ilustración 18 Altavoz planar finalizado.

Anteriormente se calculó el hilo de cobre necesario para tener una resistencia de 4Ω , la cual debemos adherir a la membrana. Con las dimensiones de la membrana debemos recorrer el circuito 3 veces para así obtener la longitud de 7,4 metros. Adherido en zigzag entre los imanes como figura en la ilustración 18, procederemos a ensamblar las 2 partes. Quedando como resultado un transductor de 1 cm de grosor y unas dimensiones de 25x35 cm. Quedando únicamente ocultar este transductor detrás de un bastidor con una tela acústica para poder emitir las ondas de presión acústica correctamente.

4. ALTAVOZ DE GRAVES

Debido a limitaciones de un altavoz planar en la parte más baja del espectro, es necesario para una reproducción adecuada del sonido la incorporación de un altavoz de subwoofer dentro del sistema. Elegir un altavoz de *subwoofer* es complicado ya que hay muchos parámetros que tenemos que tener en cuenta, el parámetro X_{max} debe ser lo suficiente para tener una excursión alta para poder generar sonidos graves profundos, el parámetro V_{as} debe de definir cuál es el volumen máximo que podría funcionar el altavoz en una caja cerrada, parámetro F_s debe ser lo suficientemente bajo para que el altavoz funcione a partir de esa frecuencia, así como los parámetros Q_{es} , Q_{ts} y Q_{ms} que define la calidad mecánica y eléctrica del altavoz. Encontrar candidatos es fácil dado el gran abanico de fabricantes disponible, así como gamas de todos los precios. El candidato elegido es el SB23MFCL45-4 de la marca SB ACUSTIC, un altavoz de 8" con cono de polipropileno (SB ACOUSTICS,2016).



Ilustración 19 Altavoz SB Acustic 8". Fuente Datasheet 8" SB23MFCL45-4, SB ACOUSTICS <https://sbacoustics.com/wp-content/uploads/2020/03/8in-SB23MFCL45-4.pdf>

Según el fabricante este altavoz dispone de un F_s de 27Hz, V_{as} bajo de 37 litros y parámetros Q adecuados para la función de graves. Estos parámetros que nos da el fabricante no suelen ser tan veraces como la realidad, ya que las tolerancias de fabricación hacen que las unidades varíen uno de otras, así que uno de los pasos a seguir después de adquirir el mismo, es parametrizar todos los datos para tener fielmente los parámetros de nuestra unidad. La respuesta en frecuencia del altavoz llega hasta los 500Hz linealmente tanto fuera del eje como en él, ideal para un altavoz de frecuencias graves.

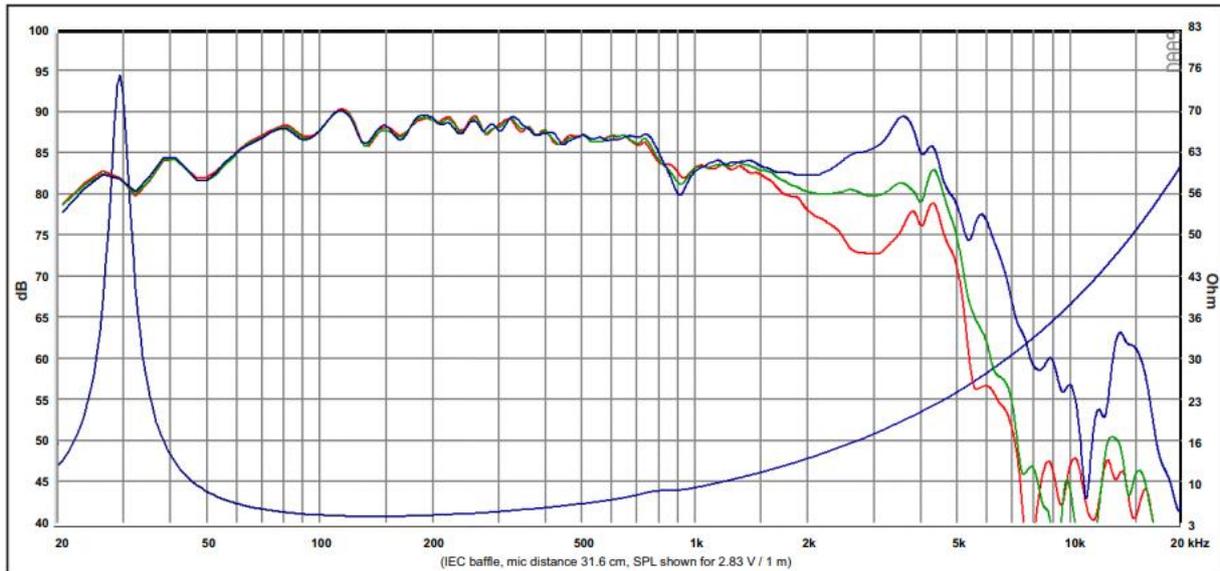


Ilustración 20 Respuesta en frecuencia proporcionada por el fabricante, azul en el eje, verde 30° fuera del eje, rojo a 60° fuera del eje. Fuente Datasheet 8" SB23MFCL45-4, SB ACOUSTICS <https://sbacoustics.com/wp-content/uploads/2020/03/8in-SB23MFCL45-4.pdf>.

4.1 Parametrización del altavoz

Unas de las técnicas para estimar los parámetros de un altavoz se basan en la aportación de una masa o contener una parte del altavoz en un volumen conocido, con eso se mide la impedancia del altavoz y se compara con la impedancia del altavoz al aire libre. Con ello se determina los parámetros electromecánicos de un altavoz.

Actualmente los fabricantes usan alternativas de aproximación basándose en medidores laser, con el efecto Doppler del láser, se mide la velocidad y posición del cono. Con ello se estima los parámetros. Como no se tiene acceso a medidores laser, se utiliza aproximaciones de masa o volumen. Es mucho más sencillo medir la masa de un objeto puesto en el cono, por eso se utiliza este tipo de medición por aproximación. Más concretamente en los últimos años se creó una nueva técnica basada en masa. Esta técnica consiste en medir dos veces la curva de impedancia con dos masas conocidas. Así la aproximación es más fiel a la realidad. Todo ello se puede ver en el documento publicado (Candy & Futtrup, 2017). Usando el programa REW de código libre (Mulcahy, 2022), podemos medir las curvas de impedancia, usando un pequeño circuito, ver ilustración 21, compuesto por una resistencia conocida y no inductiva, R_{sense} , conexiones a una tarjeta de sonido y al altavoz que se pretende medir.

Utilizando el software libre de REW (Mulcahy, 2022) podemos medir curvas de impedancia, respuesta en frecuencia y parámetros acústicos de la sala altavoz. Este será el software el cual mediremos la impedancia del altavoz, así como sus parámetros electroacústicos. El programa provee en el manual, un circuito con que medir la impedancia del altavoz con una tarjeta de sonido.

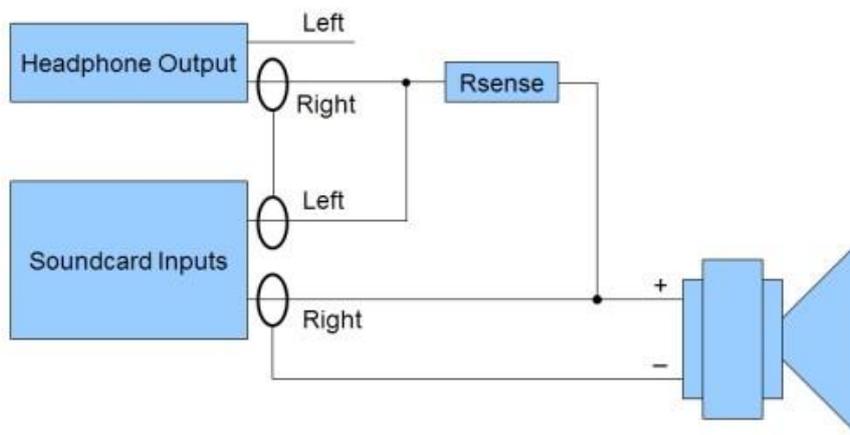


Ilustración 21 Circuito para medición de impedancia. Fuente manual del software REW (Mulcahy, 2022)

Este circuito consigue medir la impedancia del altavoz midiendo el voltaje diferencial entre las dos patillas de la R_{sense} y dividiendo esa diferencia entre el valor en de R_{sense} , con ello se puede calcular la impedancia de la frecuencia que generamos en la salida de la tarjeta de sonido. Haciendo un barrido de frecuencias desde los 20hz hasta los 20khz dibujamos la curva de impedancia del altavoz. Previamente se calibra la tarjeta de sonido con dos curvas para eliminar errores de precisión de la tarjeta, así como los cables utilizados, la primera medida se realiza sin altavoz de carga, la segunda con sustituyendo el altavoz por un cortocircuito.

En el altavoz en aire libre se obtiene una frecuencia de resonancia de 34Hz y una resistencia de 56Ω , ilustración 22, añadimos una masa conocida de 23.53 gramos y obtenemos la curva de impedancia de la ilustración 23, se observa como la F_s baja conforme se le añade masa, con esas dos graficas podríamos obtener los parámetros electromecánicos del altavoz, pero como se menciona anteriormente se obtiene otra curva con más masa para tener más precisión, véase ilustración 24.

Con las gráficas obtenidas podemos calcular con el programa REW los parámetros, rellenando los campos de resistencia en continua, área efectiva del cono, así como la temperatura y la presión atmosférica actual. dando resultado de la ilustración 25. Comparados estos datos con el *datasheet* (Mulcahy, 2022) del fabricante se observa que la unidad aquí presentada tiene desviaciones, la F_s del fabricante nos facilita es de 27 Hz cuando medimos la unidad nos da un resultado de 33,9 casi un tercio de octava de desviación, algo grande si se quiere diseñar un *bass-reflex* con un resonador a una frecuencia cercana a F_s . También observamos desviaciones en el Q_{es} , Q_{ms} y Q_{ts} . Dejando ver que hay desviaciones en el control eléctrico y mecánico del amortiguamiento del altavoz, lo cual nos influye en el aumento de volumen del recinto acústico. Nada desdeñable al tratar de hacer un recinto lo más pequeño posible.

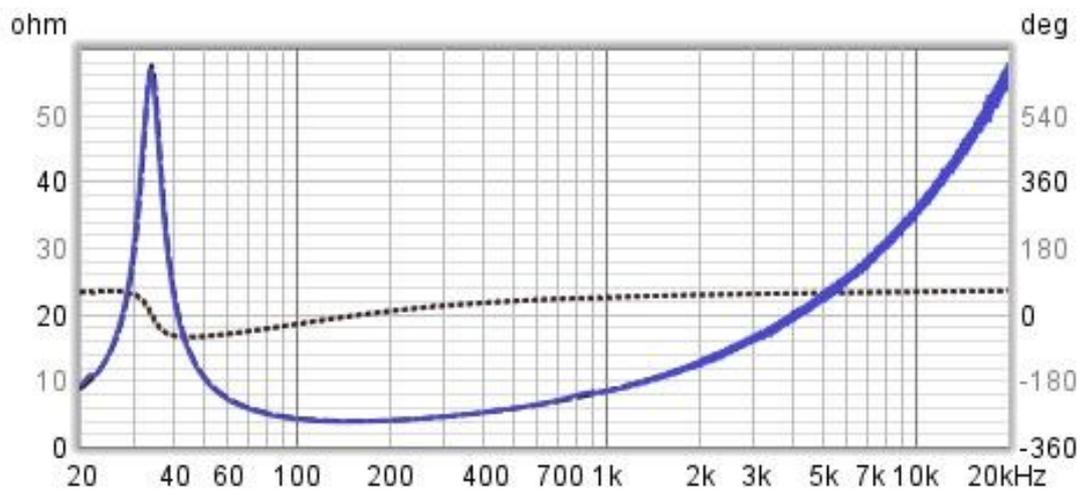


Ilustración 22 Impedancia *Subwoofer* aire libre

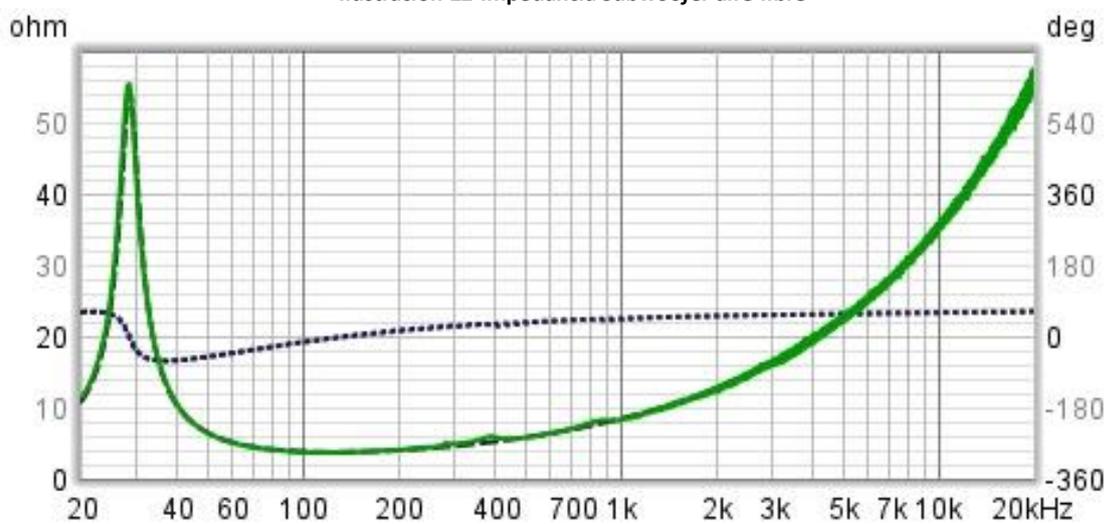


Ilustración 23 Impedancia *Subwoofer* con 23,53g

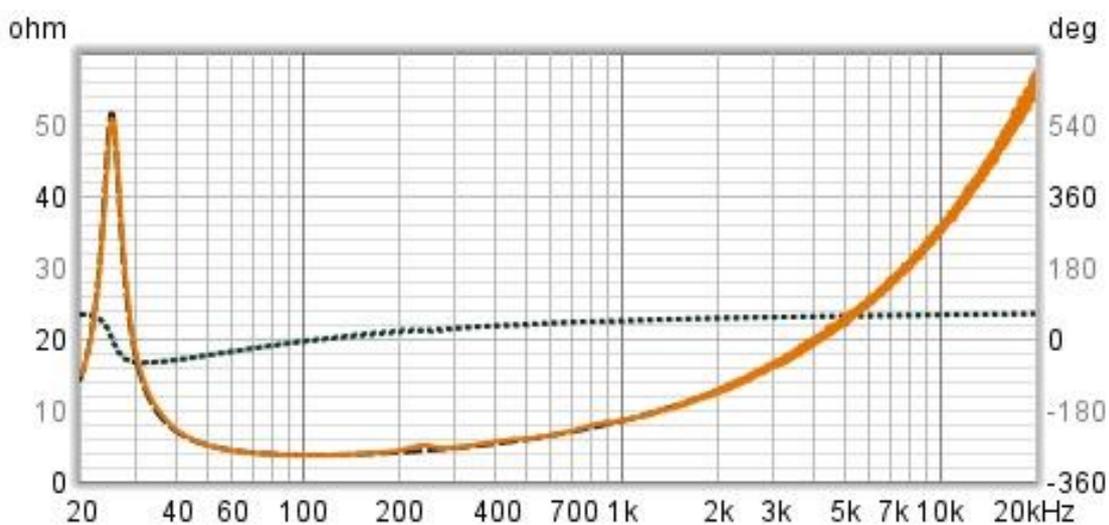


Ilustración 24 Impedancia *Subwoofer* con 45,98g

Measurement method		Motional Impedance (Ritter 3PC)	
Dual added mass		R_0 (ohm):	69,24
		C_{MES} (uF):	587,1
Free Air Measurement		L_0 (mH):	36,847
3: nov 26		β :	0,0338
		ω_0 :	320,7
Added mass measurements		Blocked Impedance (T-F)	
4: nov 26		dR (ohm):	0,060
Added mass 1 (g):	45,980	L_{EB} (uH):	185,0
5: nov 26		L_E (mH):	2,096
Added mass 2 (g):	23,530	R_{SS} (ohm):	100000,00
		K_E (S-H):	0,1089
Manually Entered Values		Simplified Model Parameters	
Voice Coil DC Resistance (ohm):	3,300	R_E 3,360 ohm	L_E 348,5 uH
Effective Area (cm ²):	226,38	R_{ES} 53,98 ohm	R_2 16,58 ohm
Air Temperature (Celsius):	20	C_{MES} 587,1 uF	L_2 342,5 uH
Air Pressure (mbar):	1013,25	L_{CES} 37,63 mH	R_3 4,05 ohm
Calculate Parameters			L_3 859,1 uH
Write Parameters to File			
R_E 3,360 ohm	f_s 33,9 Hz	M_{MS} 56,20 g	
Z_{min} 3,644 ohm	Q_{MS} 6,743	C_{MS} 0,393 mm/N	
f_{min} 137 Hz	Q_{ES} 0,420	R_{MS} 1,773 kg/s	
f_3 398 Hz	Q_{TS} 0,395	V_{AS} 28,58 litres	
L_E (f_3) 1,002 mH	F_{TS} 85,7 Hz	$B\ell$ 9,784 Tm	
Dd 16,98 cm	L_P 86,28 dB (1W/1m)	Eta 0,26 %	
Sd 226,4 cm ²	$m1$ 45,980 g	$m2$ 23,530 g	
Secondary measurement: Air temperature 20,0 C, pressure 1.013,25 mbar giving density 1,2041 kg/m ³ , c 343,2 m/s			

Ilustración 25 Parámetros Thiele-Small del *subwoofer*

4.2 Simulación WinISD

Obtenido los parámetros anteriores podemos simular el comportamiento en un recinto. El programa usado es el WinISD (WinISD, 2004), lo cual nos simula el comportamiento del altavoz con distintas configuraciones de recintos. Lo cual solo simularemos comportamientos en caja cerrada y *bass-reflex*.

- La caja cerrada es un tipo de recinto de tamaño reducido. los altavoces aíslan la parte trasera de la parte delantera, esto se hace para evitar el efecto de cortocircuito acústico, ese efecto cancela las frecuencias más bajas del espectro, las ondas traseras salen con un Angulo de 180° respecto de las delanteras creando cancelaciones de estas. Este tipo de recinto tiene un corte de frecuencia, F_b , que actúa como un filtro paso alto con una pendiente de 12dB/oct a partir de la frecuencia de resonancia del altavoz inducido en este, lo cual sube respecto a la FS del altavoz en aire libre.

- La caja *Bass-reflex* es un tipo de recinto con abertura, resonador de Helmholtz. Esto se hace para poder tener una extensión de frecuencias bajas mediante el resonador. Que se utiliza para bajar el F_b del recinto cerrado, sintonizando el resonador a una frecuencia superior que el F_s pero inferior a la F_b . Uno de los inconvenientes es que el corte de frecuencia sube a 24dB/oct cayendo más rápido la frecuencia fuera del corte.

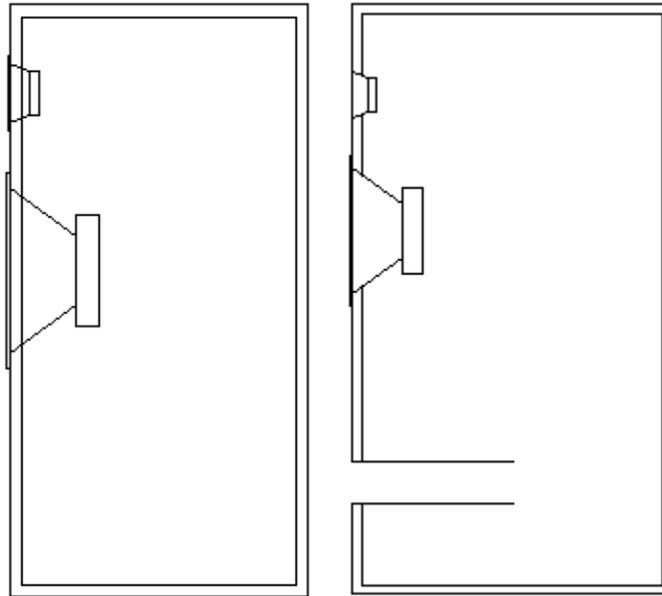


Ilustración 26 Izquierda recinto de caja cerrada, Derecha recinto *bass-reflex*.

Como se observa en la ilustración 26, tenemos dos curvas de respuesta en frecuencias bajas. La curva amarilla representa un recinto *bass-réflex* con mejor extensión de graves pero un cubillaje del recinto más alto, en contra la curva celeste tenemos un recinto más contenido perdiendo parte de extensión de frecuencias bajas. Estos dos recintos simulados son las primeras aproximaciones para hacerse una idea del comportamiento global, en el *recinto bass-reflex* la optimización se puede realizar cambiando el volumen del recinto, así como la frecuencia del resonador de Helmholtz asociado. Dando como resultado la curva representada en la ilustración 28. En el diseño del resonador usaremos dos tubos de PVC con dimensiones internas de 4,4cm de diámetro y externo de 5cm, dando un resultado de 33cm de largo esto se debe tener en cuenta para el diseño del recinto, así como el volumen ocupado del resonador como bien se observa en la ilustración 29, en esta última también podemos observar el comportamiento que va a tener el altavoz en su excursión, simulando su máxima potencia admisible de 150W, se observa que el límite de excursión máxima está en 20Hz, esta frecuencia está fuera de la frecuencia máxima al que altavoz va a responder, ya que se diseña para que sea de 30Hz a -3dB, dando como resultado que esta configuración de volumen y frecuencia del resonador es adecuada, ya que no se excede los límites mecánicos del altavoz.

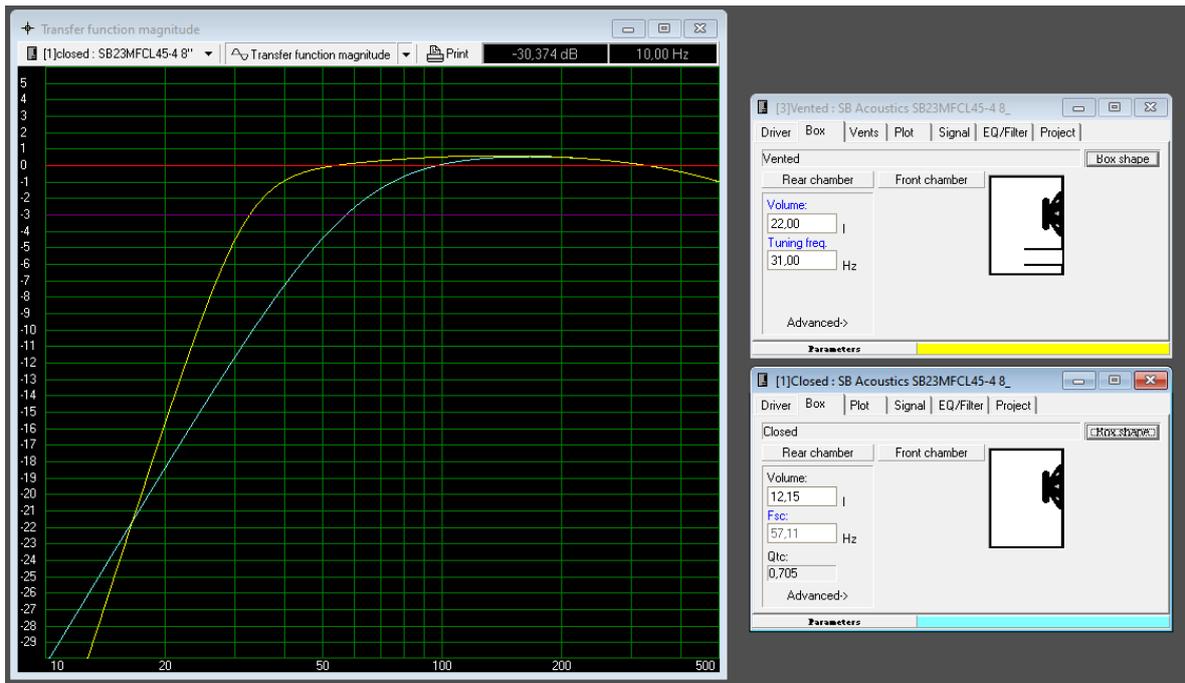


Ilustración 27 Simulación de recinto, amarillo *Bass reflex*, azul caja cerrada.

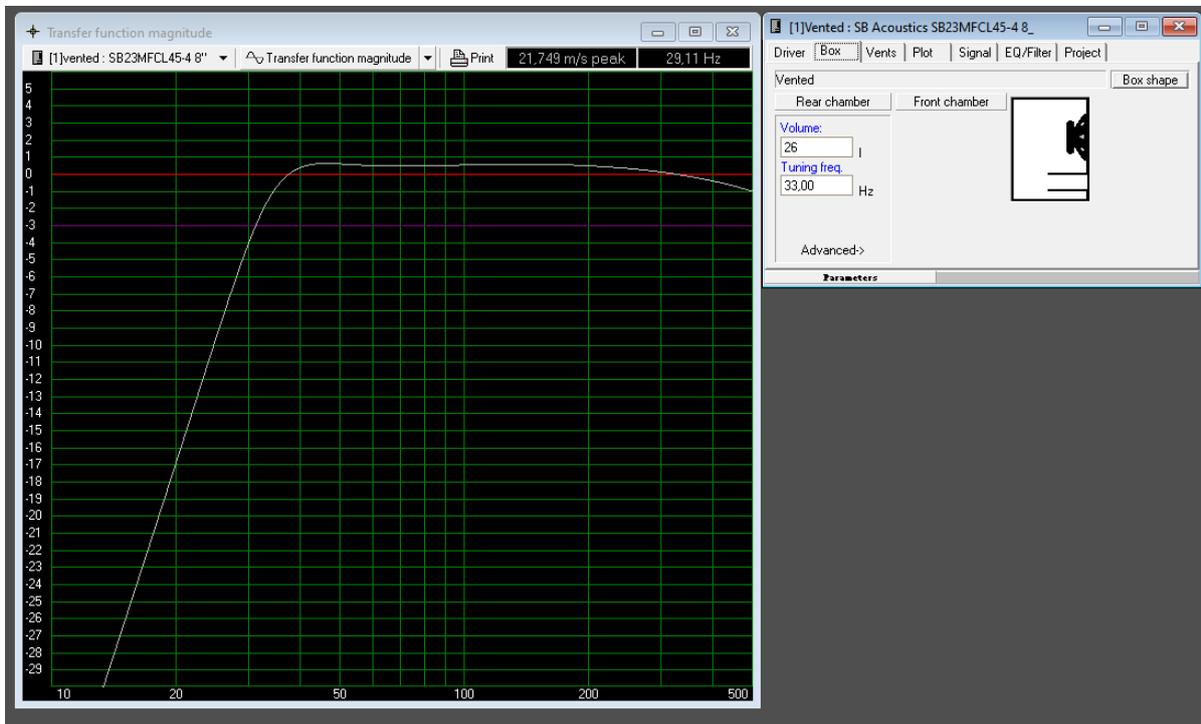


Ilustración 28 Simulación optimizada del recinto Bass reflex.

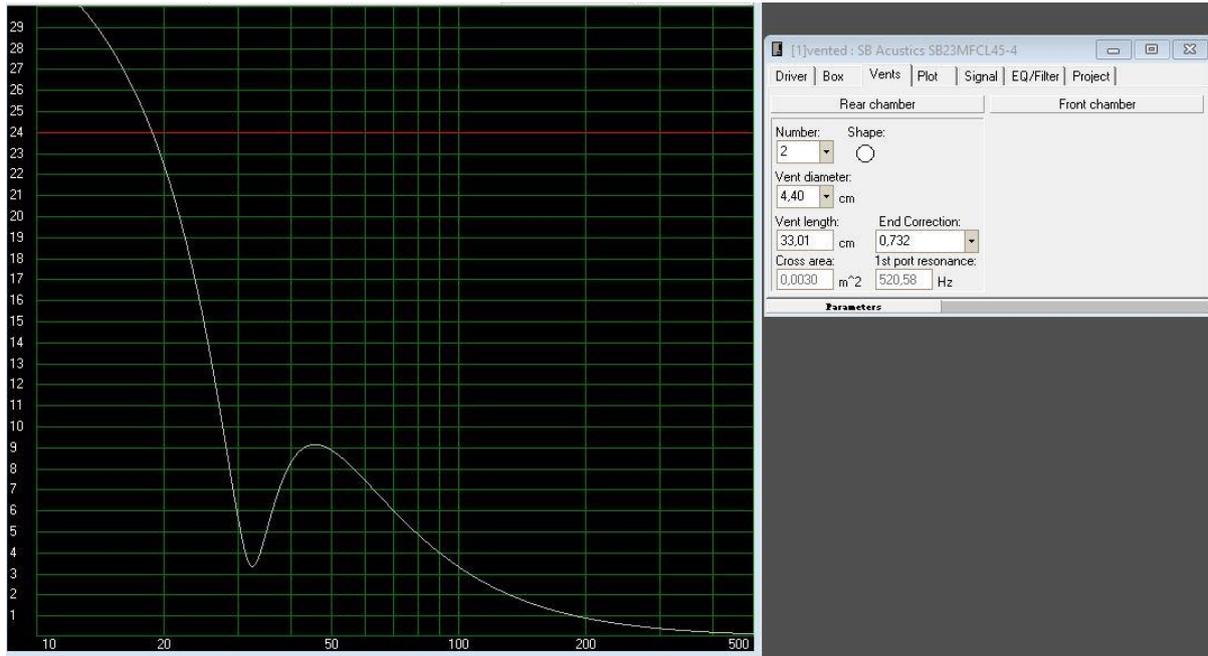


Ilustración 29 Simulación de la excursión del cono a 150w y dimensiones del resonador de Helmholtz.

4.3 Diseño del recinto acústico

El diseño del recinto acústico del altavoz de *subwoofer* tiene una pequeña particularidad, debe ser transparente para y encajar bien en la decoración de un hogar. Se plantea varias formas de hacerlo, con volúmenes de formas diversas. Llegando a la conclusión que la mejor manera de abordar el proyecto es ocultarlo imitando un objeto cotidiano de un hogar, como en el altavoz planar. Se busca la forma que imite a un jarrón. Es importante tener una limitación de altura de 80 cm, esta limitación es para no generar inconvenientes ya que los muebles de un hogar suelen tener esa altura máxima.

Se tiene en cuenta el volumen calculado anteriormente, así como el volumen que requiere los resonadores y se realiza un diseño axial de un boceto como se observa en la ilustración 31, con una altura máxima de 70cm y un radio circular máximo de 13,5cm, componiendo únicamente el recinto acústico 60cm de altura, ya que se diseña unas patas de 10cm de altura para poder ubicar el altavoz mirando al suelo y ocultándolo a la vista. Quedando en vista 3D como se observa en la ilustración 32.

Uno de los principales retos, es realizar la forma de jarrón, esto es debido que los recintos acústicos históricamente son realizados con madera. Actualmente el uso del plástico está extendido y podemos encontrar en el mercado recinto acústicos realizados con este material. Otro de los materiales que se empiezan a ver es materiales compuestos, material fibroso con resina, estos materiales son muy fáciles de amoldar a cualquier forma, su peso es contenido y una vez realizado el molde es fácil de fabricar en cadenas de producción, son muy utilizados en la náutica o en la automoción. Para la realización de este recinto se propone varias ideas, una de ellas la utilización de resina epoxi con fibra de vidrio, lo cual son materiales muy resistentes y ligeros.



Ilustración 30 jarrón moderno. Fuente jarrones (7 Jarrones Modernos Minimalistas para tu Casa, 2019)

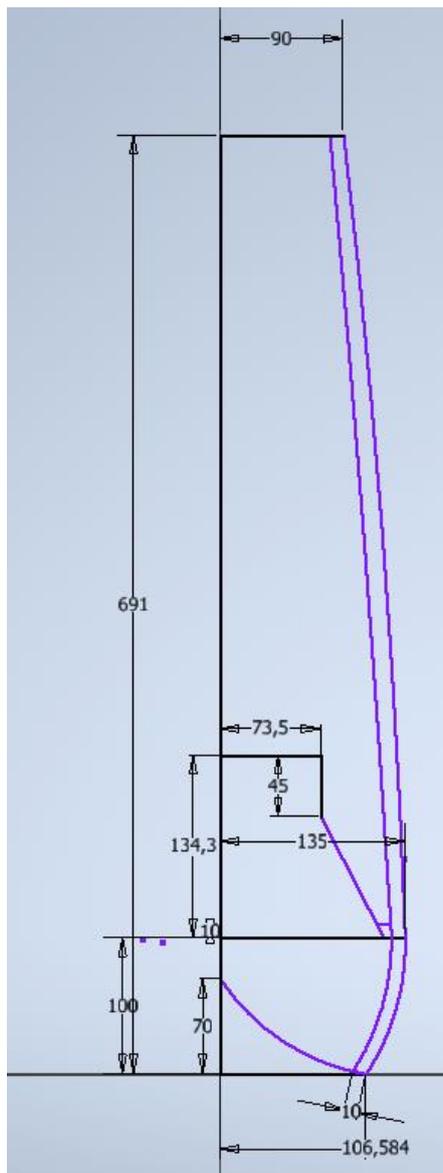


Ilustración 31 Boceto axial recinto *Bass reflex*.



Ilustración 32 Boceto 3D altavoz de *subwoofer*.

5 MEDICIONES

Una de las partes fundamentales en todo el diseño de un altavoz es ver su comportamiento en la vida real, ver irregularidades que se salen del diseño o del comportamiento esperado, pudiendo hacer análisis de ellos corregirlos para futuros diseños. Una de las formas de medir el comportamiento de un altavoz es medir su respuesta en frecuencia, esto nos da una idea del comportamiento que tenemos en el altavoz a lo largo del espectro audible, un altavoz ideal tendrá la misma potencia en todo el espectro audible. Otro de los parámetros que podemos medir de un altavoz es su distorsión armónica total (THD), un parámetro compuesto de los armónicos que el altavoz trasmite en su funcionamiento, es habitual medirlo para saber las no linealidades del altavoz en el rango de funcionamiento. Y, por último, el parámetro de impedancia, con ellos podemos ver la carga que supone el altavoz para un amplificador, es el único parámetro eléctrico medido. Estos son los parámetros principales que se miden en este trabajo por ser suficientes y precisos.

Las condiciones de las mediciones son importantes, ya que al tratarse de ondas mecánicas el recinto donde se mide puede alterar las mediciones obtenidas. La sala anecoica o sala muda, una sala donde el sonido es absorbido por todas sus paredes, incluido techo y suelo, es la mejor sala para realizar mediciones de respuesta en frecuencia, al ser la sala neutra no modifica la realidad del altavoz. Dentro de ella se coloca un micrófono de medición de respuesta plana y el transductor a medir. Las mediciones

de campo cercano, se mide el altavoz con un micrófono de respuesta plana a una distancia muy corta al altavoz, consiguiendo así minimizar el efecto de la sala donde nos encontramos.

Como se mide es otro dato fundamental, los altavoces se pueden medir por 2 sistemas, emitiendo un ruido con todo el espectro aleatoriamente o haciendo un barrido de frecuencias. El primero es el más simple y se compone de 3 tipos principales de ruido a emitir, ruido blanco (todo el espectro con la misma potencia) y ruido rosa (pendiente de 6dB de caída hacia frecuencias altas). De entre estos 2 para las mediciones con el sonómetro de precisión se escoge el ruido rosa, por el motivo principal de que, al separar las frecuencias en tercios de octava, el ruido blanco generaría una pendiente de ganancia hacia frecuencias altas debido a la cantidad de energía que se representa al tener más frecuencias por octava en la parte más alta. El ruido rosa corrige esta desviación. El segundo método, el barrido de frecuencia, es la técnica que se utiliza normalmente para análisis de armónicos, aunque también se emplea para medición de curva de respuesta en frecuencia. Consiste en una señal que crece en frecuencia con el paso del tiempo hasta el máximo especificado, esto lo recoge un micrófono y luego se analiza la señal recibida, con esto se permite mediciones en ambientes ruidosos ya que aísla de forma temporal ruidos aleatorios, ya que solo se analiza una frecuencia en cada instante.

5.1 Altavoz planar

Primeramente, se realizan mediciones en cámara anecoica. Estas mediciones están realizadas con ruido rosa con un voltaje de salida de 2,83V. Se sitúa el altavoz en el suelo para simular su comportamiento cerca del techo de una vivienda, capturamos el sonido con un sonómetro a 1 metro de distancia, obteniendo así la curva de respuesta que podemos ver en la ilustración 34. Con esta gráfica podemos concluir que el comportamiento frecuencias no es del todo lo que se busca en un altavoz. Teniendo diversos picos y valles dentro del rango de funcionamiento del altavoz, el pico de 50 Hz coincide con la frecuencia de resonancia natural de la membrana con el hilo de cobre.

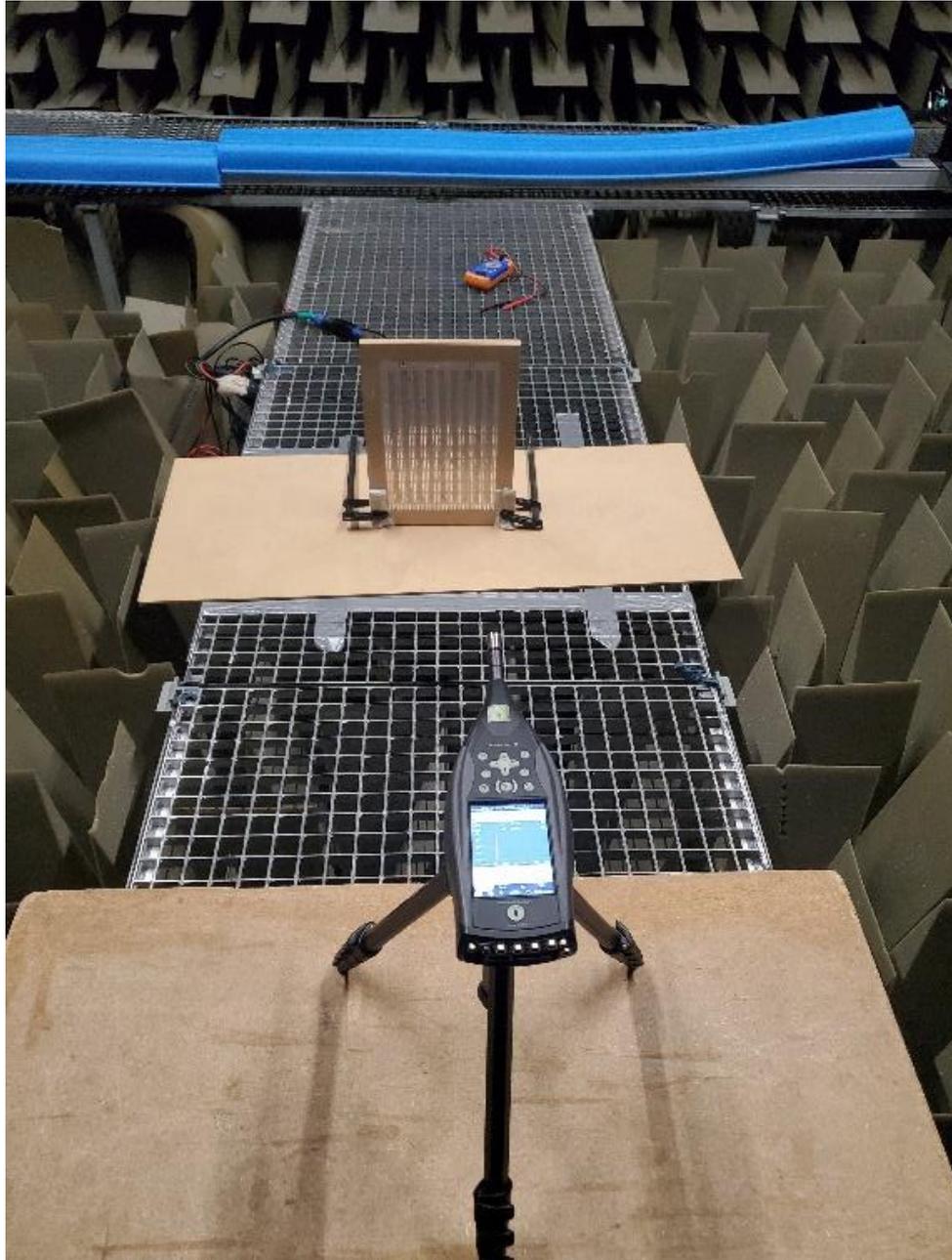


Ilustración 33 medición altavoz planar en cámara anecoica.

A continuación, procedemos a realizar dos mediciones de campo cercano con barrido de frecuencias a distintas distancias, 7cm y 30cm, se configura la frecuencia inicial de 150Hz, el resultado lo observamos en la ilustración 35, nos indica más claro los picos y valles del altavoz. El pico denominado "A" después de un análisis visual del altavoz emitiendo solo esa frecuencia, vemos que hay una excusión alta en las zonas que rodean el hilo de cobre. podemos deducir entonces que ese pico es creado por una resonancia que interactúa la membrana y el hilo. El valle nombrado "B" se modifica según las tensiones presentes en la membrana, esto se puede comprobar presionando la membrana con la mano, haciendo que ese valle de desplace a la derecha del espectro. También observamos la caída abrupta en frecuencia 6kHz se modifica al presionar la membrana, siendo desplazado hacia la izquierda o derecha del espectro según la presión ejercida. No podemos sacar conclusiones claras sobre este último ya que esto requiere de un estudio exhaustivo del caso.

Finalmente se realiza un análisis de armónicos a partir de la señal capturada utilizada en el barrido de frecuencias a 30cm. Solo representaremos la distorsión armónica total THD (color negro), los 2 primeros armónicos (2.º armónico rojo y 3.º armónico naranja) y gris franja de los armónicos que están por debajo del suelo del ruido. La cual podemos ver en la ilustración 36. Como se menciona a 1kHz tenemos un pico, tanto en el armónico 2.º como el 3.º, esto como se menciona anteriormente es debido a una resonancia. Continuado por picos en forma de sierra creados por el armónico 2.º, este continua hasta llegar al valle que mencionamos antes, estos dos armónicos son el problema que se debe solucionar para que el altavoz tenga una respuesta en frecuencia suficiente.

También como comprobación del comportamiento de resistencia pura de un transductor tipo planar, se mide la impedancia con el método mencionado en el apartado 4.1, dando como resultado la gráfica de la ilustración 37. Como se observa es prácticamente una recta con un aumento de resistencia en la parte alta del espectro. Se concluye que este tipo de altavoces son los que mejor se comporta con amplificadores ya que se comporta como una carga perfecta.

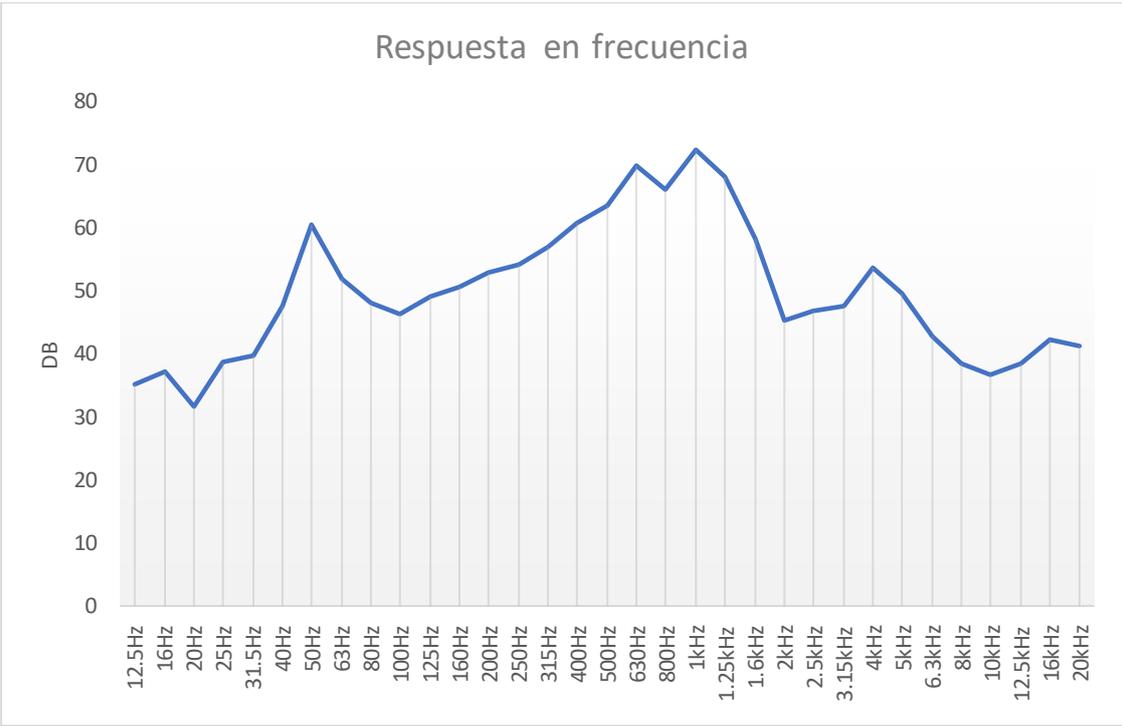


Ilustración 34 Resposta en frecuencia cámara anecoica altavoz planar.



Ilustración 35 Respuesta en frecuencia altavoz planar campo cercano, verde a 7cm, amarillo a 30cm.

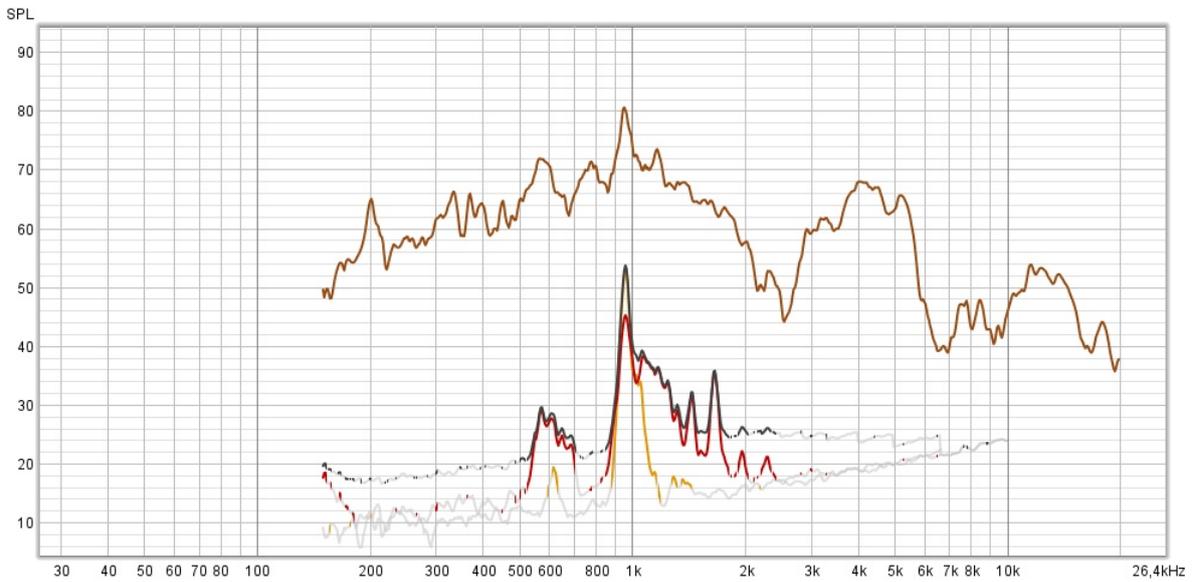


Ilustración 36 Armónicos del altavoz planar.

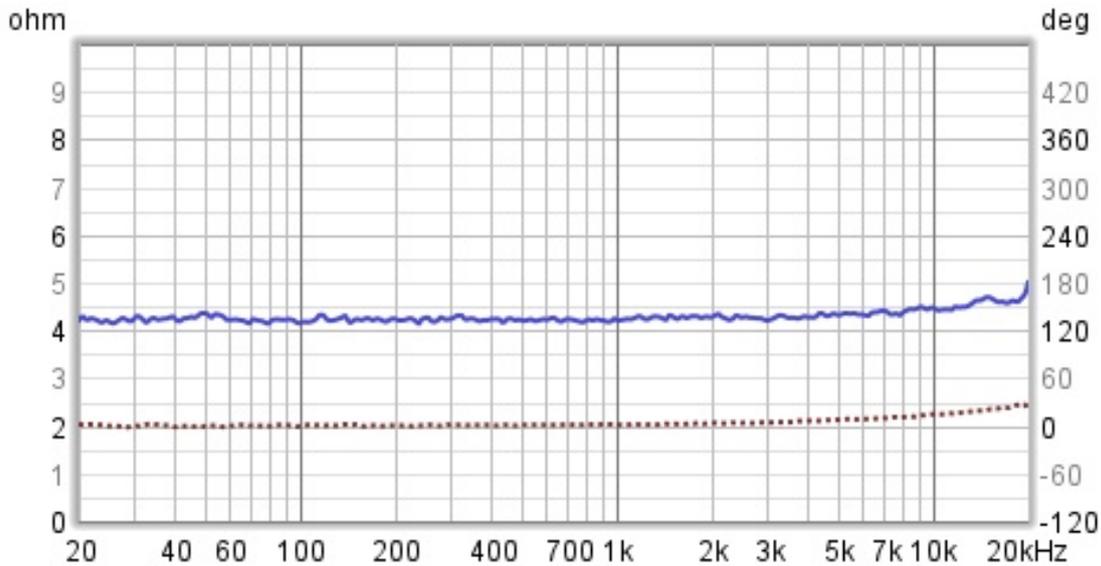


Ilustración 37 Curva de impedancia altavoz planar.

5.2 subwoofer

Se crea un prototipo temprano del *subwoofer* para hacer mediciones en sala anecoica, se procede a emitir ruido rosa con 2,83V con un sonómetro a 1 metro de distancia, debido a la posición del altavoz dentro del recinto se procede a incluir un tablón de madera para simular un suelo, ya que esta es la posición natural de este en recinto, realizamos las medidas teniendo el resultado mostrado en la ilustración 39.

Como primer análisis podemos observar comportamiento lineal desde los 63Hz hasta los 315Hz, comportamiento esperable de un *subwoofer*, vemos una caída a partir de 63Hz hacia frecuencias inferiores. Como primera impresión vemos que el comportamiento difiere del simulado en el punto 4.2, pero se da como valido al ser un *subwoofer* de bajas dimensiones capaz de reproducir frecuencias graves bastante lineal por lo medido. También vemos que el *subwoofer* puede emitir frecuencias hasta los 4 kHz, eso es poco habitual en altavoces de este estilo, aunque por el tamaño del cono de este podemos achacar como un altavoz que se puede comportar casi como un altavoz de medios-graves.

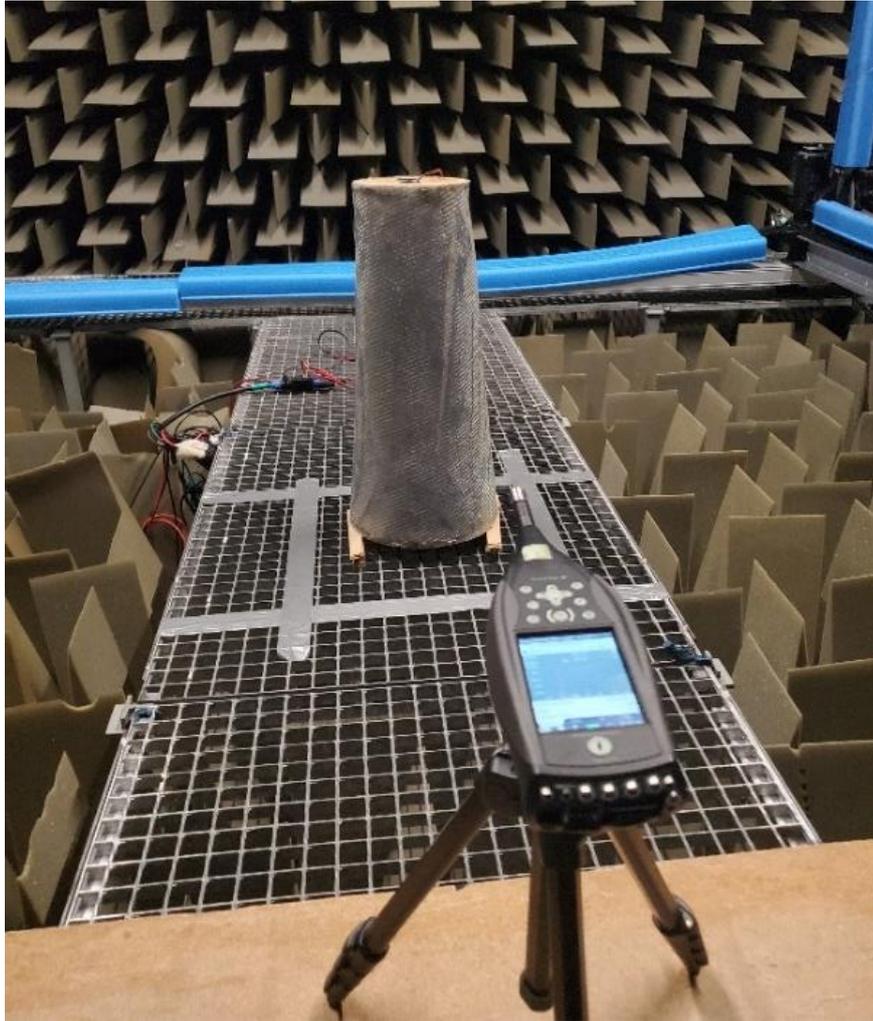


Ilustración 38 Medición de un modelo temprano del *subwoofer* en cámara anecoica.

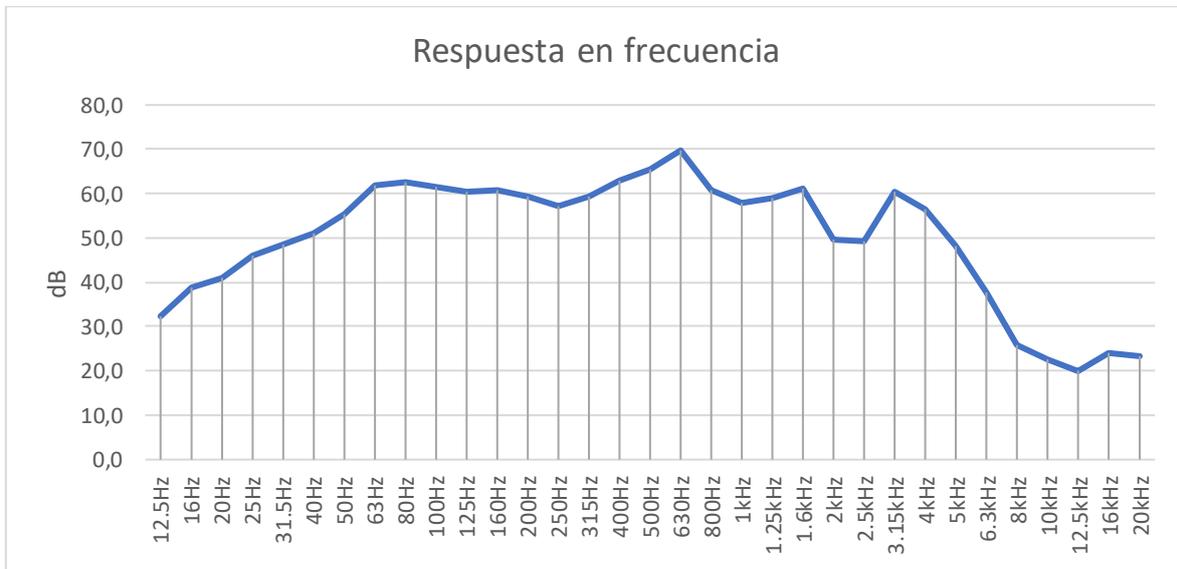


Ilustración 39 Respuesta en frecuencia cámara anecoica *subwoofer*.

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS

En este capítulo se analiza las conclusiones del diseño y prototipado de un altavoz planar.

En primer lugar, se observa que el resultado de la calidad de sonido no es el deseado, debido a varios factores, tales como la poca respuesta en frecuencias agudas del espectro, que se puede achacar a la falta de rigidez de la membrana. Esta debería tener una rigidez mayor de la obtenida, para así mejorar la tensión de esta aumentado a su vez la frecuencia de resonancia.

Otro de los factores a tener en consideración, es la superficie ocupada por el hilo de cobre, esta es importante ya que al diseñar el hilo de cobre con separaciones más cortas hace que suba la respuesta en frecuencias altas, debido a los modos propios de la membrana.

Un aspecto positivo que destacar es la versatilidad del tamaño que se puede diseñar los altavoces planares para emplearlos en elementos decorativos, ya que se pueden disimular muy bien en cualquier lugar gracias a su grosor de 10mm. También dando rienda suelta a la imaginación en la fase de diseño.

Analizando el recinto del *subwoofer* podemos concluir que un diseño en forma de jarrón encaja bien en la decoración de un hogar, puesto que se disimula perfectamente con elementos ya dispuestos en él. Es un elemento indispensable si se quiere acompañar de un altavoz tipo planar, debido al efecto llamado cortocircuito acústico, las frecuencias más bajas del espectro es irreproducible en ellos.

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 planar, así como un recinto de graves, llegando a obtener un prototipo final.

Se plantean diversas soluciones para mejorar los prototipos a futuro, como resolver los problemas de rigidez en la membrana, podemos utilizar una membrana más gruesa a la utilizada en el prototipo, esto nos da una resistencia mayor a la tensión, pudiendo aumentar este último. Para mejorar la interacción de la membrana con el hilo de cobre, se plantea soluciones de sustitución de este último, así como imprimir directamente un circuito de aluminio en la membrana, dejando espacios de 1 mm entre cada pasada del circuito. Esto encarece mucho un altavoz planar ya que para poder imprimir en la membrana un circuito es necesario maquinaria de precisión industrial.

Para mejorar la respuesta en frecuencias bajas es indispensable el diseño de un recinto de graves. Esto nos da un hándicap importante ya que no solo debemos tener en cuenta donde situar el altavoz planar sino como diseñamos un volumen tan grande como un *subwoofer*. Dentro del tamaño establecido al diseño se considera un *subwoofer* pequeño, ya que normalmente para que un altavoz reproduzca frecuencias muy bajas el tamaño y la excursión máxima es importante. Dando usos de altavoces con 12" o más con su considerable volumen que no suele bajar de los 40 litros en un recinto *Bass reflex*.

Finalmente, para mejoras y futuras líneas de investigación se trabaja en mejorar la membrana del altavoz planar, así como su hilo conductor.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] DICKANSON, V., Loudspeaker Design Cookbook, Audio Amateur Press, 2006.
- [2] PUEO ORTEGA, B. y ROMÁ ROMERO, M. Electroacústica. Altavoces y Micrófonos. Prentice Hall, 2003.
- [3] Richard H. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems, Part I: Analysis, JAES vol. 20, No.10, pp. 798-808, December 1972.
- [4] Richard H. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems-Part 2: Synthesis, J. Audio Eng. Soc., vol. 21, no. 1, pp. 11-18, February 1973.
- [5] Thiele, A. N. Loudspeakers in Vented Boxes: Part 1. Journal of the Audio Engineering Society, May 1971.
- [6] Thiele, A. N. Loudspeakers in Vented Boxes: Part 2. Journal of the Audio Engineering Society, June 1971.
- [7] Furihata, K., Hayama, A., Asano, D. K., & Yanagisawa, T. (2003). Acoustic characteristics of an electrodynamic planar digital loudspeaker. Acoustical Society of America.
- [8] Jium-Ming Lin, Ubadigha Chinweze Ukachukwu, & Cheng-Hung Lin. (2016). A low cost flexible electro-dynamic planar loudspeaker. JVE INTERNATIONAL LTD.JOURNAL OF VIBROENGINEERING.
- [9] Wisdom audio. (2021). PLANAR MAGNETIC TECHNOLOGY, Wisdom audio. Obtenido de Wisdom audio Corporation web site: <https://www.wisdomaudio.com/planar-magnetics-tech/>
- [10] Zenker, B., Merchel, S., & Altinsoy, M. E. (2019). Rethinking Flat Panel Loudspeakers - an ObjectiveAcoustic Comparison of Different Speaker Categories. AudioEngineering Society Convention Paper 10243.
- [11] Finite Element Method Magnetics (4.2). (2019, 21 abril). [Software]. David Meeker. <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [12] Dolby Atmos® Home Theater Installation Guidelines . (2018, diciembre). dolby.com. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de https://www.dolby.com/siteassets/technologies/dolby-atmos/atmos-installation-guidelines-121318_r3.1.pdf
- [13] Candy, J., & Futtrup, C. (2017, 22 diciembre). An Added-Mass Measurement Technique for Transducer Parameter Estimation. Journal of the Audio Engineering Society, 65(12), 1005-1016. <https://doi.org/10.17743/jaes.2017.0040>
- [14] Mulcahy, J. (2022, junio). Room EQ Wizard (v5.20.9) [Software]. <https://www.roomeqwizard.com/index.html>
- [15] SB ACOUSTICS, Datasheet 8" SB23MFCL45-4,2016. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de <https://sbacoustics.com/wp-content/uploads/2020/03/8in-SB23MFCL45-4.pdf>
- [16] 7 Jarrones Modernos Minimalistas para tu Casa. (2019, 17 septiembre). Lista Minimalista. Recuperado 7 de septiembre de 2022, de <https://www.listaminimalista.com/decoracion-minimalista/7-jarrones-modernos-minimalistas-para-tu-casa/>
- [17] WinISD (Nº de versión 0.50). (2004). Windows. Linearteam [Software]. <http://www.linearteam.org>