



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escola Politècnica Superior de Gandia

Disseny i construcció d'un altaveu actiu amb equips de so integrats.

Treball Fi de Grau

Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació, So i Imatge

AUTOR/A: Zafrilla Magraner, Ferran

Tutor/a: Alba Fernández, Jesús

Cotutor/a extern: RODRIGUEZ VERCHER, JUAN CARLOS

CURS ACADÈMIC: 2021/2022

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA  
GRAU EN ENGINYERIA DE SIST. DE TELECOM., SO I IMATGE

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Disseny i construcció d’un altaveu  
actiu amb equips de so integrats”**

**TREBALL FINAL DE GRAU**

Autor/a:  
**Ferran Zafrilla Magraner**

Tutor/a:  
**Jesús Alba Fernández**  
**Juan Carlos Rodríguez Vercher**

**GANDIA, 2022**

**Títol del TFG:**

Disseny i construcció d'un altaveu actiu amb equips de so integrats

**Alumne:** Ferran Zafrilla Magraner

**Tutor Acadèmic:** Prof. Jesús Alba Fernández

Gandia, Juliol 2022

**Resum**

Este TFG comprén el disseny i construcció d'un altaveu actiu, a més de la integració d'un equalitzador gràfic i un RTA. En una primera fase del projecte, i una vegada escollits els materials i circuits a implementar, es muntarà el sistema fora de caixa per comprovar el seu correcte funcionament. Una vegada satisfets amb estes proves, es passarà a estudiar les actuals caixes del mercat per a estudiar l'estat d'art actual i, després, dissenyar-ne una per al nostre sistema. Finalment, es realitzarà un estudi complet del nou sistema i es proposaran possibles millores.

L'objectiu d'este projecte és obtindre un disseny òptim per a un altaveu amb unes prestacions, durabilitat i atractiu visual igual o superior a les actuals ofertes del mercat. També s'aconseguirà millorar la interacció de l'usuari en integrar en l'altaveu diversos equips d'àudio per a la seua posterior configuració.

Es procedirà a fer un estudi dels antecedents, això és, una cerca d'altaveus existents actualment en el mercat i que ens ajudarà a inspirar-nos.

Amb totes les propostes realitzades, s'identificarà quin disseny és el més adequat per a aconseguir el producte que es desitja.

**Paraules clau**

Electroacústica, disseny d'altaveus, recinte acústic, equalitzador gràfic, RTA, crossover.

**Title:**

Design and construction of an active speaker with integrated sound equipment

**Student:** Ferran Zafrilla Magraner

**Academic Tutor:** Jesús Alba Fernández

Gandia, July 2022

**Abstract**

This TFG includes the design and construction of an active loudspeaker, as well as the integration of a graphic equalizer and an RTA. In the first phase of the project, and once the materials and circuits to be implemented have been chosen, the system will be assembled out of the box to check its correct operation. Once satisfied with these tests, we will go on to study the current boxes on the market in order to study the actual art state and, later, design one for our system. Finally, a complete study of the new system will be carried out and possible improvements will be suggested.

The aim of this project is to obtain an optimal design for a speaker with performance, durability and visual appeal equal to or greater than current market offerings. It will also be possible to improve user interaction by integrating various audio equipment into the speaker for later configuration.

We will carry out a study of the background, that is, a search for speakers currently on the market and that will help us to be inspired.

With all the proposals made, it will be identified which design is the most suitable to achieve the desired product.

**Key words**

Electroacoustics, speaker's design, acoustic box, graphic equalizer, RTA, crossover.

## Agraïments

Este treball ha sigut realitzat amb molta dedicació, molt d'esforç i molt de sacrifici. No obstant, cal destacar la importància del suport de tots aquells que m'envolten.

Primer de tot, començarem per els meus pares. Ells han estat al llarg de tota la meua carrera donant-me en tot moment i animant-me a seguir endavant. Sense oblidar al meu germà Rafa, que m'ha ajudat a resoldre un fum de dubtes particulars que m'impediien seguir endavant. Gràcies per tot, família, hui i sempre!

El meu agraïment també al meu tutor Jesús Alba, així com al professor Juan Carlos Rodríguez i a la resta del professorat del grau per estar ahí sempre que ho he necessitat i compartir els seus coneixements.

Per altra banda, agraïsc als tècnics Enrique Spath i Toni Bou per aguantar-me les meues innumerables visites als seus despatxos en busca d'ajuda, i al Departament de Física Aplicada per la confiança que ha demostrat en mi al deixar-me tot el material que he requerit per a l'elaboració d'este projecte.

Per suposat he d'anomenar als meus companys de classe que han estat aconsellant-me i donant-me suport en tot moment, Michael, Borja, Alfonso i Arnau. També he d'anomenar als meus amics Giovanni i Joan, que han hagut d'aguantar estoicament els meus aclaparaments i queixes al llarg d'esta trajectòria i a la meua amiga Paula per les seues ajudes artístiques.

Gràcies a tots!

# Índex

1.	Introducció .....	7
1.1.	Presentació.....	7
1.2.	Objectius .....	7
1.3.	Etapas del projecte.....	7
2.	Marc teòric .....	8
2.1.	Naturalesa física del so.....	8
2.2.	Llei de Faraday.....	8
2.3.	Característiques generals d'un transductor dinàmic .....	9
2.4.	Paràmetres d'un transductor .....	11
2.5.	Tipus d'amplificadors .....	13
2.6.	Tipus d'equalitzadors .....	15
3.	Elecció dels materials i muntatge previ .....	16
3.1.	Transductors.....	16
3.2.	Amplificador .....	17
3.3.	Equalitzador .....	17
3.4.	RTA .....	18
3.5.	Placa receptora d'àudio .....	19
3.6.	Commutador Jack Femella Estèreo.....	20
3.7.	Transformador .....	20
3.8.	Diagrama de connexions .....	21
4.	Desenvolupament del treball.....	22
4.1.	Caracterització electroacústica dels transductors .....	22
4.2.	Sensibilitat.....	24
4.3.	Resposta en freqüència.....	25
4.4.	Estudi del consum dels equips d'àudio .....	27
4.5.	Estudi de l'amplificador.....	29
4.6.	Disseny i construcció de la caixa .....	33
4.7.	Mesures a la càmera anecoica .....	39
5.	Conclusions .....	42
6.	Annex.....	43
6.1.	Pressupost.....	43
6.2.	Peces .....	44
7.	Bibliografia .....	45



# 1. Introducció

---

## 1.1. Presentació

Este treball naix de la idea de crear un altaveu a partir d'un sistema 2.1, antic el qual estava ja en desús.

Este nou sistema pretén, per una part, mudar d'un sistema 2.1 a un únic monitor i, per altra part, tindre una millor funcionalitat al incorporar diversos equips de tractament d'àudio, els quals permeten a l'usuari interactuar amb l'altaveu.

Quan al disseny, estarà enfocat a la creació d'un monitor de caixa tancada amb dues configuracions en angle diferents, amb la finalitat de que el monitor es puga utilitzar en diversos escenaris.

## 1.2. Objectius

El present treball té com a objectiu principal la construcció d'un altaveu de rang complet amb una resposta en freqüència modificable per l'usuari. Per tal d'aconseguir este objectiu, s'hauran d'utilitzar circuits impresos secundaris tant per a modificar la resposta en freqüència com per a observar-la en temps real.

A més, també es realitzarà un estudi de la directivitat de l'altaveu, així com de la resposta en freqüència i del comportament de l'altaveu al utilitzar un absorbent acústic en la caixa.

## 1.3. Etapes del projecte

El següent treball es dividirà en un total de cinc etapes. En la primera etapa es farà un estudi del mercat sobre els actuals dissenys de caixes d'altaveus per estudiar l'estat d'art actual i establir unes bases sobre el que es vol fer en este treball. En la segona etapa es caracteritzaran els transductors a utilitzar en el projecte per a disposar de la màxima informació possible. En la tercera etapa es realitzarà un estudi del crossover que incorpora l'amplificador, el qual s'utilitzava per a alimentar el sistema antic. En la quarta etapa es realitzarà el diagrama de connexionat, el disseny de la caixa i l'estudi del mateix. En la quinta etapa, una vegada es tinga l'altaveu muntat, es procedirà a realitzar un estudi complet de l'altaveu en qüestió, de forma que es puga obtenir un producte final en correcte funcionament preparat per a donar-li un ús quotidià.



## 2. Marc teòric

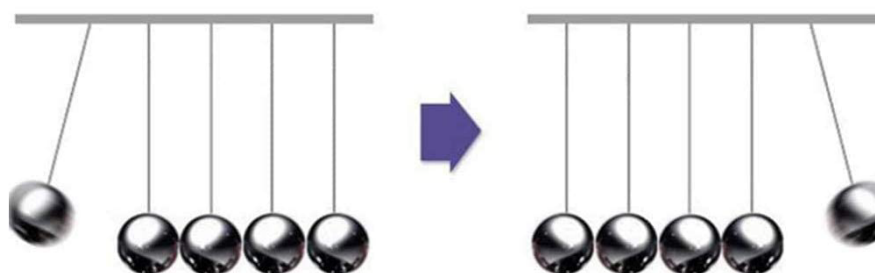
---

### 2.1. Naturalesa física del so

Per a entendre com un altaveu genera un so, primer hem d'entendre com es produeix un so en un medi, com per exemple, l'aire.

A començaments del segle XX, la ciència va aconseguir establir que el so no són unes partícules que generem nosaltres quan parlem, com es pensava al segle XVII, sinó que són unes ones de partícules que ja existien en el medi i que nosaltres estem movent.

Per tant, quan nosaltres generem un so, el que fem és colpejar les molècules d'aire, les quals transfereixen la seua energia a les molècules contigües i van generant variacions de pressió en l'aire. Estes variacions van incidint sobre el timpà, el qual les converteix en impulsos nerviosos i són percebudes en el cervell.



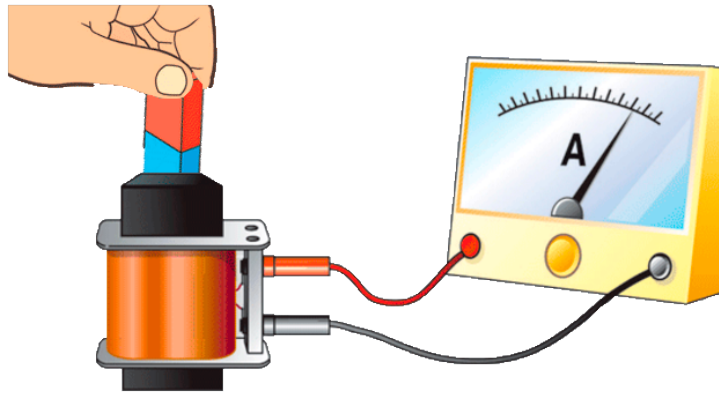
*Figura 1: Pèndol de Newton*

En la Figura 1 es mostra un exemple del famós pèndol de Newton, el qual està basat en la llei de la transferència d'energia i ens il·lustra el comportament de les molècules d'aire quan es produeix una variació d'energia.

### 2.2. Llei de Faraday

Altra de les lleis que hem de conèixer per a entendre el funcionament d'un transductor es la llei d'inducció electromagnètica o llei de Faraday.

En 1831, una sèrie d'experiments portaren al físic Michael Faraday a descobrir que el magnetisme i l'electricitat tenien un estrany vincle. Faraday utilitzà un tub de cartró i va enrotllar al seu voltant fil de coure aïllat per a formar una bobina. Després, va connectar un voltímetre a la bobina i registrà la força electromagnètica (FEM) induïda al passar un imant a través de la bobina. Este experiment es mostra en la Figura 2.



*Figura 2: Experiment de Faraday*

Per tant, Faraday va descobrir que quan l'imant estava en repòs, s'observava un voltatge igual a zero, mentre que quan l'imant estava en moviment dins de la bobina s'observava una variació del voltatge [1].

Gràcies a este descobriment, hem pogut aplicar esta llei per a crear transformadors, cuines d'inducció, generadors, motors elèctrics i, el que a nosaltres ens interessa, els transductors.

### **2.3. Característiques generals d'un transductor dinàmic**

Una vegada explicats els apartats anteriors, ja som capaços d'entendre el funcionament d'un transductor dinàmic. Este consta de les següents parts:

- Culata: es tracta d'una estructura metàl·lica pesada que s'encarrega de subjectar l'imant i la bobina.
- Imant: esta part del transductor proporciona un camp magnètic estacionari per a oposar-se al camp electromagnètic de la bobina i, per tant, farà que el diafragma es moga de forma proporcional al camp elèctric.
- Placa superior: este component, generalment de ferro, en companyia de la culata i l'imant, completa el circuit magnètic.
- Xassís: pot ser de ferro, alumini o plàstic. Proporciona una estructura rígida en què es munten els components del altaveu.
- Aranya: és la suspensió del altaveu. Esta part té dues funcions: centrar la bobina en l'espai del circuit magnètic i amortir les variacions magnètiques.

- Bobina: és una bobina de fil de coure o alumini, a través de la qual fluix el senyal elèctric altern d'àudio, creant un camp electromagnètic a què s'oposa el camp magnètic permanent del circuit magnètic. Açò fa que la bobina i el diafragma es moguen.

El camp magnètic que travessa un solenoide ve definit per la següent fórmula:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{L}$$

On  $\mu_0$  és una constant de valor  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ,  $I$  és la intensitat que corre per la bobina,  $N$  és el número de voltes que té la bobina i  $L$  és la longitud de la bobina.

Per tant, quan major siga el valor de la intensitat i del número de voltes, i menor siga la longitud de la bobina, major serà el camp magnètic.

- Diafragma: esta part té la funció de propagar les ones que s'han creat en els processos anteriors. L'objectiu del diafragma és reproduir amb exactitud la forma d'ona del senyal de veu. La reproducció inexacta causaria distorsió acústica.
- Marc: encaixa sobre la vora del diafragma i actua com a un espaiador. Esta part no està en tots els altaveus, ja que no és essencial.
- Tapa: també conegut com "antipols", manté la brutícia fora de la bobina.

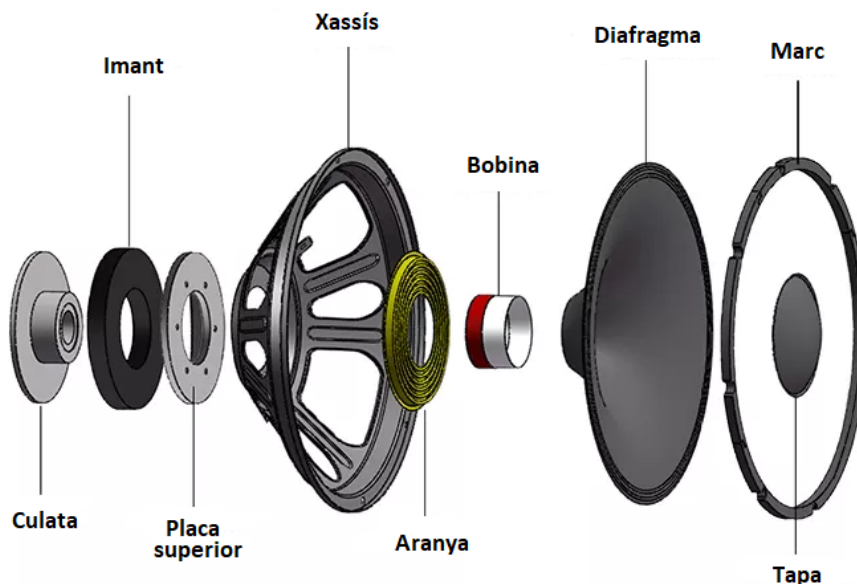


Figura 3: Parts d'un transductor dinàmic

## 2.4. Paràmetres d'un transductor

Els paràmetres Thiele/Small són un conjunt de paràmetres electromecànics que defineixen el rendiment d'un transductor. Estos paràmetres es poden trobar fàcilment en la fulla d'especificacions del transductor i són els següents:

- $S_d$  : esta és la superfície real del diafragma, normalment expressada en  $\text{cm}^2$ .
- $F_S$  : mesurada en Hz, és la freqüència a la qual l'elasticitat de la suspensió és màxima i el con es mou amb un esforç mínim. Els woofers solen tindre una  $f_o$  en el rang de 13 a 60 Hz. Els mitjos en el rang de 60 a 500 Hz i els tweeters entre 500 Hz i 4 kHz. Este paràmetre es pot obtindre de la corba d'impedància i calcular amb la següent fórmula:

$$F_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{MS} \cdot M_{MS}}}$$

- $M_{MS}$  : este paràmetre és la combinació del pes dels components mòbils del transductor ( $M_{MD}$ ) més la càrrega acústica (pes de l'aire que el con ha de moure). S'expressa en grams o en kilograms i es pot calcular amb la següent fórmula:

$$M_{MS} = \frac{m}{\left(\frac{F_S}{F'_S}\right)^2 - 1}$$

on  $m$  és una massa coneguda,  $F_S$  és la freqüència de ressonància, i  $F'_S$  la nova freqüència de ressonància amb la massa afegida.

- $C_{MS}$  : este paràmetre defineix la compliància (inversa de la rigidesa) de la suspensió del transductor. És inversament proporcional a la  $F_S$  i pot variar amb la temperatura ambient, ja que a mesura que augmenta la temperatura, la suspensió es torna més fluixa. Es mesura en  $\text{m/N}$  i es pot calcular amb la següent fórmula:

$$C_{ms} = \frac{1}{(\omega_o)^2 \cdot M_{MS}} = \frac{1}{(2\pi \cdot F_S)^2 \cdot M_{MS}}$$

- $R_{MS}$  : mesurada en kilograms per segon ( $\text{kg/s}$ ), ens informa de la resistència mecànica del transductor, tenint en compte les pèrdues de suspensió del conductor (amortiment).

- $L_E$  : es tracta de l'autoinductància de la bobina, i s'expressa en Henris (H). Es pot obtenir amb la següent fórmula:

$$L_E = \frac{Z_{ET} (1 \text{ kHz})}{\omega (1 \text{ kHz})}$$

- $R_E$  : mesurat en Ohms, és la resistència del transductor quan el con està en repòs. La resistència es pot obtenir amb un multímetre.
- $Bl$  : es tracta del factor de força i mesura la força del motor. És el producte de la densitat de flux ( $B$ ) i la longitud de la bobina mòbil ( $l$ ). Normalment un transductor amb un  $Bl$  més alt pot controlar millor els transistors.

$$Bl (N/A) = \frac{mg}{I}$$

Amb l'anterior equació podem calcular el factor de força al fer passar per la bobina mòbil un corrent ( $I$ ), que produirà un desplaçament de la membrana que anul·larem amb un pes ( $mg$ )

- $V_{AS}$  : mesurat en litres o en  $m^3$ , representa el volum del aire que té la mateixa compliància que la suspensió del transductor. Es pot calcular amb la següent fórmula:

$$V_{AS} = C_{MS} \cdot \rho_o \cdot c^2 \cdot S_d^2$$

on  $\rho_o$  és la densitat de l'aire i  $c$  és la velocitat del so en l'aire.

- $Q_{MS}$  : és l'amortiment mecànic de la suspensió del transductor. Este paràmetre és adimensional, representa les pèrdues en l'entorn i l'aranya. Es pot calcular amb la següent fórmula:

$$Q_{MS} = \frac{2\pi \cdot F_S \cdot M_{ms}}{R_{MS}} = \frac{F_S \cdot \sqrt{r_o}}{f_2 - f_1} \quad r_o = \frac{Z_{max}}{R_e}$$

- $Q_{ES}$  : és l'amortiment elèctric degut a la bobina i al conjunt de l'imant. Este paràmetre és adimensional i es pot calcular amb la següent fórmula:

$$Q_{ES} = \frac{2\pi \cdot F_S \cdot M_{ms} \cdot R_E}{Bl^2} = \frac{Q_{MS}}{r_o - 1}$$

- $Q_{TS}$  : representa el comportament de l'altaveu combinant l'amortiment elèctric i mecànic. Este paràmetre és adimensional, representa les pèrdues en l'entorn i l'aranya. Es pot calcular amb la següent fórmula:

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} \cdot Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} = \frac{Q_{MS}}{r_o}$$

- $X_{max}$  : mesurat en mil·límetres (mm), és la distància màxima per la qual la membrana del transductor pot moure's sense provocar distorsió.
- $\eta_o$  : especificat en percentatge (%) representa l'eficiència del transductor. Es pot obtenir un valor estimat a partir de la següent fórmula:

$$\eta_o = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f_s^2 \cdot V_{AS}}{c^3 \cdot Q_{ES}}$$

## 2.5. Tipus d'amplificadors

Un amplificador, també conegut com a etapa de potencia o amplificador de potència, és un dispositiu electrònic que té com a finalitat amplificar el nivell d'un senyal de baixa potència, com pot ser la pastilla d'una guitarra o el senyal d'un mòbil, incrementant la seua amplitud sense alterar la informació que conté.

En l'àudio, esta tasca és complicada, ja que té un ampli rang de freqüències, les quals han de ser amplificades amb el mateix guany per a evitar distorsions i, per tant, evitar que perden qualitat. Per a poder elegir una classe d'amplificador, hem de conèixer els seus avantatges i inconvenients, així com altres amplificadors competents per a poder elegir-ne un d'òptim.

Els amplificadors es classifiquen com A, B, AB i C per a dissenys lineals, i classe D per a dissenys de commutació. A continuació veurem cada un d'ells:

- Classe A: són els menys eficients, ja que agafen el voltatge d'entrada i fan funcionar el transistor tot el temps al llarg de tota la forma d'ona del senyal. Açò te com a avantatge que reproduïx la forma d'ona tal com entra, però a costa de molta energia i calor.

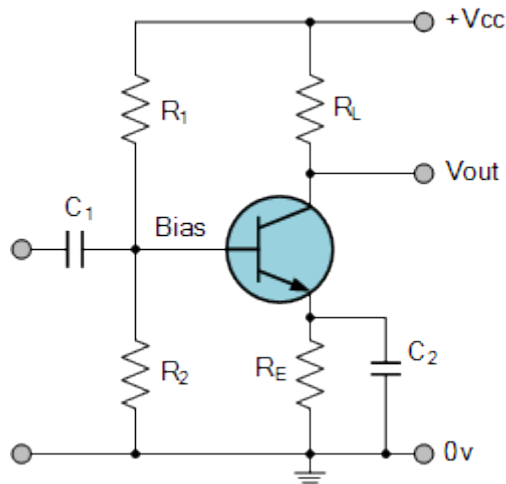


Figura 4: Exemple d'un amplificador de classe A

- Classe B: esta classe d'amplificadors gasten dos transistors diferents que treballen en cada meitat de la forma d'ona (positiva i negativa). Per tant, a diferència de la classe A, els transistors s'encenen i apaguen depenent de quina part del senyal estan rebent.

És més eficient que la classe A, ja que els transistors poden romandre apagats el 50% del temps i, per tant, generen menys calor. En canvi, la qualitat del so pot veure's afectada, ja que com el senyal es divideix en una part positiva i una negativa, existeix la possibilitat de distorsió quan els senyals es creuen.

- Classe AB: esta classe d'amplificador ofereix el millor de la classe A i de la classe B, ja que es considera una combinació d'estes dos.

Funcionen com un amplificador de classe B, sols que existeix una corrent menuda que circula pels dos transistors constantment, que els polaritza reduint la distorsió per creuament.

- Classe C: esta classe d'amplificador no es gasta per a senyals d'àudio, ja que generen una gran distorsió. Es solen utilitzar en radiofreqüència (amplificador de RF, oscil·lador de RF, etc) on no es requereix linealitat entre la tensió d'entrada i la tensió d'eixida.
- Classe D: es consideren uns amplificadors de molt alta eficiència, ja que commuten els dispositius d'eixida al menys dues voltes per cicle. No obstant, genera bastanta distorsió i no manté tan bé la qualitat de so en comparació a les classes anteriors.

## 2.6. Tipus d'equalitzadors

Els equalitzadors d'àudio són circuits, dispositius o complements que ens permeten exercir control sobre el contingut harmònic d'un so, és a dir, podem alterar la resposta en freqüència.

Els equalitzadors es solen utilitzar per a:

- Corregir problemes específics en un instrument o so.
- Superar les deficiències en la resposta en freqüència d'un micròfon.
- Alterar un so com, per exemple, reforçar tons fonamentals, afegir claredat, sensacions d'allunyament, etc.

Podem dividir els equalitzadors en tres tipus:

- Equalitzador paramètric: permet el control individual de tres paràmetres per cada banda: la freqüència central, el guany i l'ample de banda.



Figura 5: Equalitzador paramètric EQF-100

- Equalitzador semiparamètric: és igual que equalitzador paramètric, a diferència de que només pots controlar la freqüència central i el guany, ja que l'ample de banda està fixat.
- Equalitzador gràfic: este equalitzador ens permet dividir el senyal en diferents bandes de freqüència, podent alterar el guany de cada banda de forma independent.

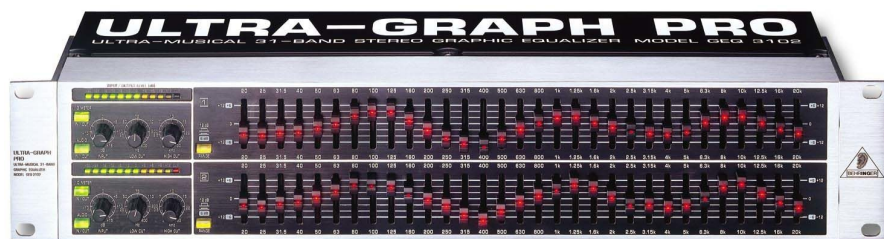


Figura 6: Equalitzador gràfic Behringer GEQ3102



## 3. Elecció dels materials i muntatge previ

---

### 3.1. Transductors

Els transductors utilitzats en este projecte es poden observar a la Figura 7.



Figura 7: Transductors utilitzats en el projecte. D'esquerra a dreta: woofer, mid1 i mid2

Tant els transductors encarregats de reproduir les freqüències mitges, o mitjos, com el transductor encarregat de reproduir les baixes freqüències, o woofer, han sigut reutilitzats d'un altaveu que estava en desús amb la finalitat de no encarir més el pressupost. Este altaveu és el *Woxter Big Bass 260*, un altaveu 2.1 amb una potència total de 150 W, segons ens indica el fabricant.

El woofer utilitzat és el model *FD165-19BEH* de Woxter, un driver de 6.5 polzades i una impedància de  $4 \Omega$  que compta amb una resposta en freqüència de 45 Hz a 130 Hz, segons ens indica el fabricant, pel que compleix amb els requisits d'un dispositiu reproductor de baixes freqüències. A més, el fabricant ens indica també que té una potència nominal, o RMS, de 30 W.

Quant als mitjos, o altaveus de rang mig, s'ha pogut obtindre de la fulla d'especificacions de l'altaveu que es tracta d'un transductor de 3 polzades, una impedància de  $4 \Omega$  i una resposta en freqüència de 90 Hz a 20 kHz. En canvi, el fabricant no ens dona cap dada sobre la potència nominal de l'altaveu.

Els paràmetres dels transductors s'han obtingut de manera experimental utilitzant el software LIMP ja que, com que es tracta d'un transductor reutilitzat, no es disposa de full d'especificacions ni s'ha pogut obtindre resposta del fabricant. El procediment de mesura i els paràmetres obtinguts es detallen en l'apartat 4.1.

## 3.2. Amplificador

Un amplificador d'àudio és un dispositiu que conté circuits electrònics que permeten augmentar o amplificar els senyals d'àudio al incrementar el corrent, tensió o potència d'un senyal que s'aplica a l'entrada.

L'amplificador utilitzat per a este projecte ha sigut el A511-B de Woxter, un amplificador de classe A el qual compta amb un canal per al woofer i dos per al canal dret i esquerre. A més, compta amb un potenciòmetre de control del baix i un potenciòmetre de control de volum.

L'amplificador utilitzat en aquest projecte ha sigut reutilitzat del sistema antic, el qual es pot observar en la Figura 8.



Figura 8: Amplificador A511-B utilitzat per al projecte

## 3.3. Equalitzador

Per a este treball utilitzarem una placa d'equalitzador gràfic de la marca AIYMA (Figura 9). Esta placa requereix una alimentació d'entrada simètrica positiva i negativa de 5V a 15V, la qual serà proporcionada per una font d'alimentació predissenyada per a este.

L'equalitzador ens permet dividir el senyal en 15 bandes de freqüència per a, posteriorment, aplicar un filtrat. Estes bandes es mostren en la Taula 1.

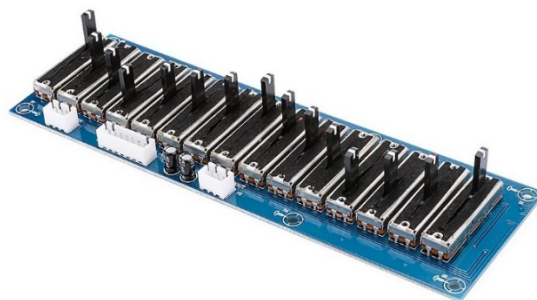


Figura 9: Equalitzador gràfic AIYMA

Bandes de freqüència (Hz)														
35	70	160	320	600	1k	1.8k	3.5k	4.7k	5.6k	7.5k	9.5k	12k	16k	20k

Taula 1: Bandes de freqüència de l'equalitzador

A més, compta amb un socket de 7 pins per a l'alimentació i la transferència d'àudio analògic, i altres 2 sockets per a l'eixida i entrada d'àudio, respectivament. El socket de 7 pins s'utilitzarà per a connectar-lo a la font d'alimentació preparada per a l'equalitzador, i el socket d'eixida d'àudio s'utilitzarà per a enviar el senyal d'àudio equalitzat a l'analitzador d'espectres (RTA).

### 3.4. RTA

Un analitzador en temps real (RTA) és un dispositiu d'àudio que mesura i ens mostra a temps real l'espectre de freqüència d'una senyal d'àudio.



Figura 10: Analitzador d'espectres AS1424

Per al nostre altaveu adquirirem l'analitzador en temps real AS1424, que compta amb les següents característiques:

- Processador d'alta velocitat de 32 bits.
- Dos tipus de senyal d'entrada diferents: MIC (micròfon electret) i LIN (entrada de línia Jack 3.5 mm).
- 24 bandes de freqüència.
- 3 modes clàssics d'il·lustració del espectre i 5 nivells de brillantor ajustables.
- Tensió d'entrada de 5V (micro-USB).

### 3.5. Placa receptora d'àudio

La placa impresa que s'utilitzarà per a la recepció d'àudio per radiofreqüència es la XY-BT, la qual es pot observar a la Figura 11:



Figura 11: Placa receptora d'àudio XY-BT

Segons les especificacions obtingudes del comerç, els paràmetres de la placa receptora són els que es mostren a la Taula 2:

<b>Voltatge d'entrada</b>	<b>3.7 – 5V</b>
<b>Relació Senyal a Soroll (SNR)</b>	<b>90 dB</b>
<b>Distorsió Amònica (THD + N)</b>	<b>-70 dB</b>
<b>Diafonia (Crosstalk)</b>	<b>- 86 dB</b>
<b>Rang Dinàmic (DNR)</b>	<b>91 dB</b>
<b>Nivell de servici</b>	<b>&gt; 5 metres</b>

Taula 2: Especificacions obtingudes de la placa receptora d'àudio

Esta placa disposa d'una sola entrada d'àudio, la qual és a través de la tecnologia Bluetooth. Quant a les eixides, disposa de 2 eixides en forma de Jack 3.5mm o en forma de soldadura. No obstant, s'ha observat posteriorment que els pins del Jack estan connectats amb els pins de la soldadura, per tant, al utilitzar una eixida es bloquejaria immediatament l'altra.

### 3.6. Commutador Jack Femella Estèreo

Per a l'entrada d'àudio per línia s'ha utilitzat un Jack femella de 3.5mm com el que s'observa en la Figura 12:

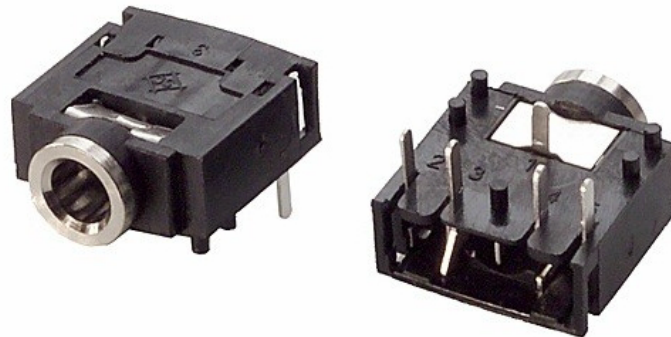


Figura 12: Jack Femella 3,5mm Estèreo C. Imprès de 5 pins

Donat que la placa receptora d'àudio Bluetooth no disposa d'una entrada auxiliar, s'ha hagut d'utilitzar este dispositiu electrònic que té dues funcions: entrada d'àudio i commutador. El dispositiu electrònic funciona de la següent forma: si hi ha un jack connectat a l'altaveu, s'envia a l'amplificador l'entrada auxiliar. En canvi, si no hi ha res connectat al jack femella, el dispositiu electrònic funciona com un circuit tancat i envia el senyal d'àudio des de la placa Bluetooth.

### 3.7. Transformador

Este transformador serà l'encarregat de disminuir els 230V entrants als 5V necessaris per a que la resta dels circuits de l'altaveu funcionen correctament.



Figura 13: Transformador de doble eixida utilitzat al projecte

Com es pot observar en la Figura 13, el transformador que s'utilitza no s'ha adquirit exclusivament per a este projecte sinó que s'ha decidit reutilitzar-lo. Este transformador en concret té dues eixides USB-A, una de 5V 1A, i altra de 5V 2A.

### 3.8. Diagrama de connexions

Una vegada s'ha disposat de tot el material necessari per al muntatge del sistema fora de caixa, s'ha procedit a realitzar un muntatge preliminar per a comprovar el seu correcte funcionament. D'esta forma, es va realitzar un connexionat de tots els equips, junt amb diverses soldadures, seguint l'esquema que es mostra en la Figura 14:

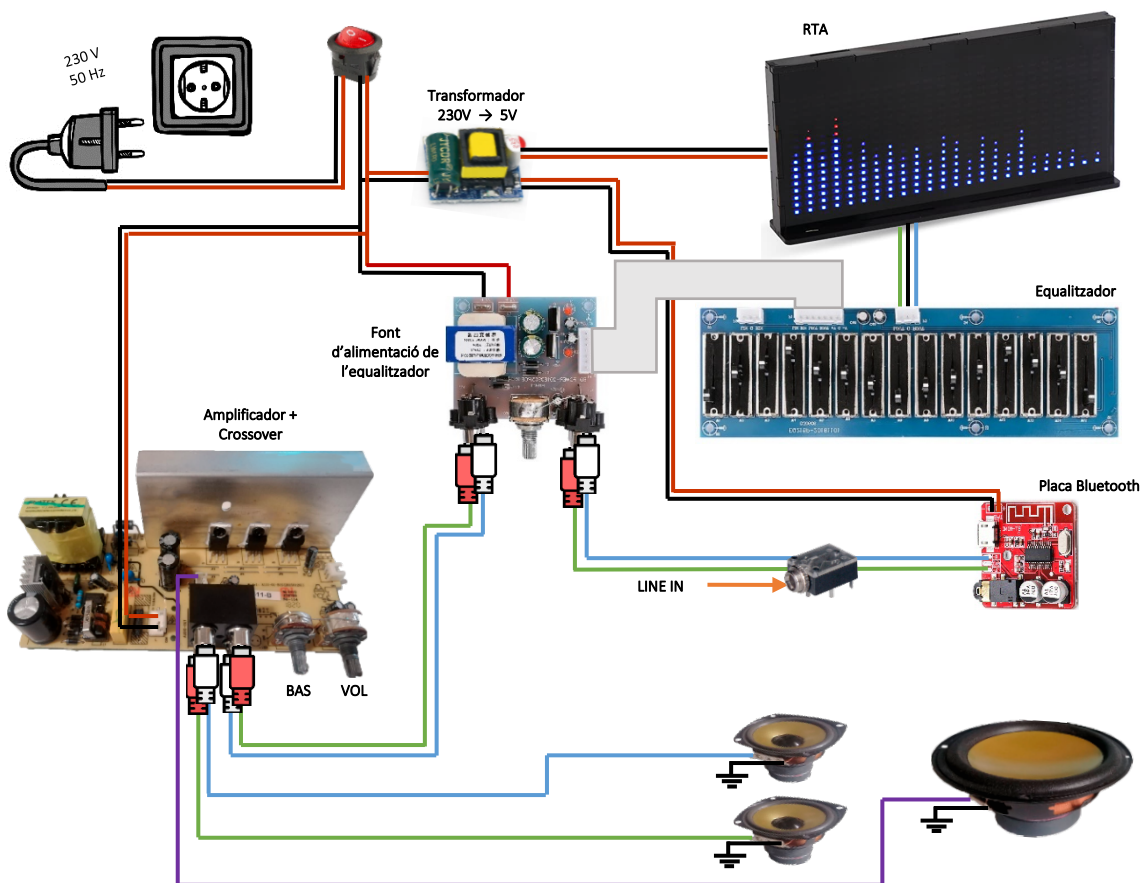


Figura 14: Esquema del circuit elèctric

## 4. Desenvolupament del treball

---

### 4.1. Caracterització electroacústica dels transductors

Una vegada s'han extret els transductors del sistema anterior, és hora d'extraure totes les seues característiques en camp lliure per a que, d'esta forma, es puguin iniciar els càlculs per al disseny de la caixa on s'instal·laran els transductors.

Per a això, es farà us del *software* LIMP. A més, s'utilitzarà la targeta de so Behringer U-Phoria UMC202HD i un PCB proporcionat pel Departament de Física Aplicada del Campus de Gandia, el qual ens simplificarà el muntatge del circuit necessari.

Abans de començar a prendre mesures s'ha de calibrar els canals de la targeta de so. D'esta manera es reduirà al màxim l'error en les mesures que es prendran a continuació. Este procés de calibratge consisteix en igualar la sensibilitat de cadascuna de les entrades per a obtindre un mateix resultat en les dues entrades.

Una vegada calibrada i configurada la targeta de so, és hora d'implementar el circuit de mesura seguint l'esquema que es mostra a la Figura 15:

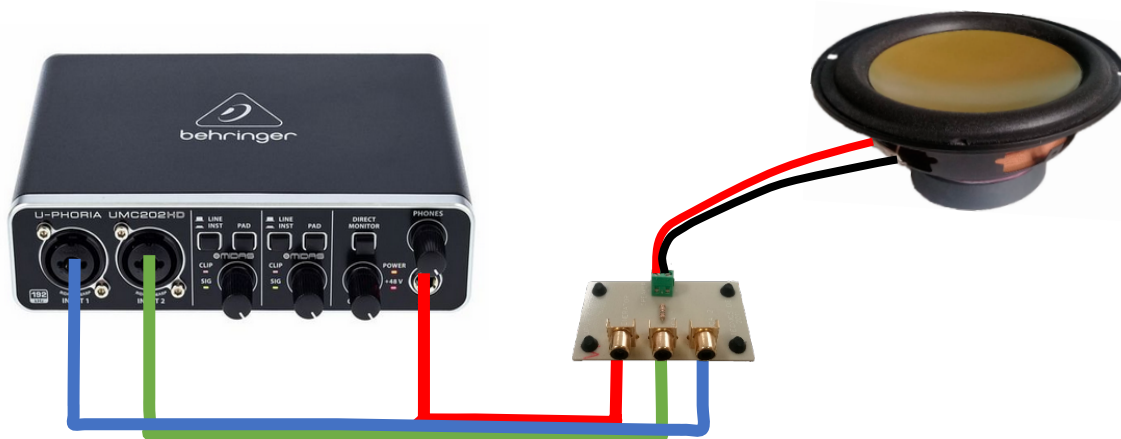


Figura 15: Connexions entre la targeta de so i la PCB

La PCB que es mostra a la Figura 15 s'encarrega de simplificar el muntatge del circuit necessari per a la mesura de la impedància elèctrica mitjançant el *software* LIMP. Aquest circuit es pot observar a la Figura 16.

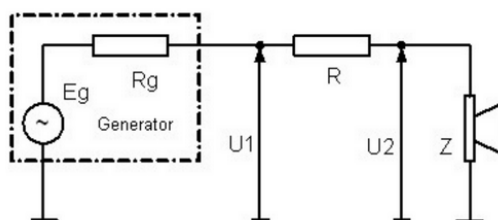


Figura 16: Circuit proposat per a la mesura de la impedància elèctrica

Arribats a este punt, ja està tot el sistema preparat per a poder extraure els paràmetres Thiele & Small [4][5][6] mitjançant el mètode de la massa afegida. Este mètode consisteix en l'extracció dels paràmetres comparant el comportament del transductor amb i sense una massa afegida de valor conegut. Els paràmetres que s'han obtingut es resumeixen en la Taula 3:

PARÀMETRES THIELE & SMALL	WOOFER	MID 1	MID 2
Freqüència de ressonància, $F_S$	62.0 Hz	197.58 Hz	217.82 Hz
Resistència elèctrica, $R_E$	3.69 $\Omega$	3.5 $\Omega$	3.61 $\Omega$
Factor de qualitat mecànica, $Q_{MS}$	7.69	8.82	5.87
Factor de qualitat elèctrica, $Q_{ES}$	1.14	3.79	3.76
Factor de qualitat total, $Q_{TS}$	0.99	2.65	2.29
Volum d'aire equivalent, $V_{AS}$	6.95 litres	0.3 litres	0.41 litres
Compliancia mecànica, $C_{MS}$	0.26 mm/N	0.23 mm/N	0.31 mm/N
Resistència mecànica, $R_{MS}$	1.31 kg/s	3.39 kg/s	0.40 kg/s
Eficiència del altaveu, %	0.14%	0.06%	0.11%
Àrea efectiva, $S_d$	138.93 cm <sup>2</sup>	30.68 cm <sup>2</sup>	30.68 cm <sup>2</sup>
Autoinductància de la bobina, $L_e$	282.34 $\mu$ H	43.47 $\mu$ H	8.35 $\mu$ H

Taula 3: Paràmetres Thiele & Small dels transductors

Una vegada s'han obtingut els paràmetres Thiele & Small dels transductors, els introduïrem al programa VituixCAD2. Este programa no només ens donarà la funció de transferència del sistema a partir d'un valor de volum fix, sinó que a més ens calcularà el volum ideal de la caixa, que és precisament el que necessitem per al seu disseny.

Cal destacar que per a la simulació de la resposta en freqüència en caixa, introduïrem només els paràmetres del *woofer*, degut a que les caixes actuen com a filtre passalt i no té efecte en les freqüències altes. La simulació de la funció de transferència del sistema a partir del volum recomanat es detalla en l'apartat 4.6.



## 4.2. Sensibilitat

Entenem com a sensibilitat d'un altaveu ( $S$ ) el nivell de pressió sonora (SPL) que es mesura a 1 metre de distància quan s'excita amb un vat ( $1 W$ ) de potència elèctrica. Esta mesura de la sensibilitat és un indicador del rendiment de l'altaveu ja que, tenint la sensibilitat i el factor de directivitat màxim, es pot calcular el rendiment del bafle.

Este valor s'ha determinat al generar un to d'1 kHz al transductor, del qual es vol obtenir la sensibilitat, des d'un generador de funcions, en este cas, el Behringer Ultra-Curve DSP8000 proporcionat per la UPV.

Tenint en compte la definició de la sensibilitat d'un transductor, coneixent la impedància nominal del sistema  $Z_N$  ( $4 \Omega$ ) i la fórmula de la potència elèctrica, haurem de regular l'etapa de potència de l'altaveu fins que mesurem amb l'ajuda d'un multímetre la tensió equivalent a un vat de potència. En el nostre cas, la tensió a mesurar serà:

$$P = \frac{V^2}{Z_N} \quad \rightarrow \quad V = \sqrt{P \cdot Z_N} \quad \rightarrow \quad \boxed{V = 2 V}$$

El primer pas per a mesurar la sensibilitat és situar la caixa en camp obert o, en el nostre cas, en la càmera anecoica, i col·locar el sonòmetre de forma que el transductor enfoque el centre de la tapa de l'altaveu a una distància d'1 metre, tal com s'observa en la Figura 17.

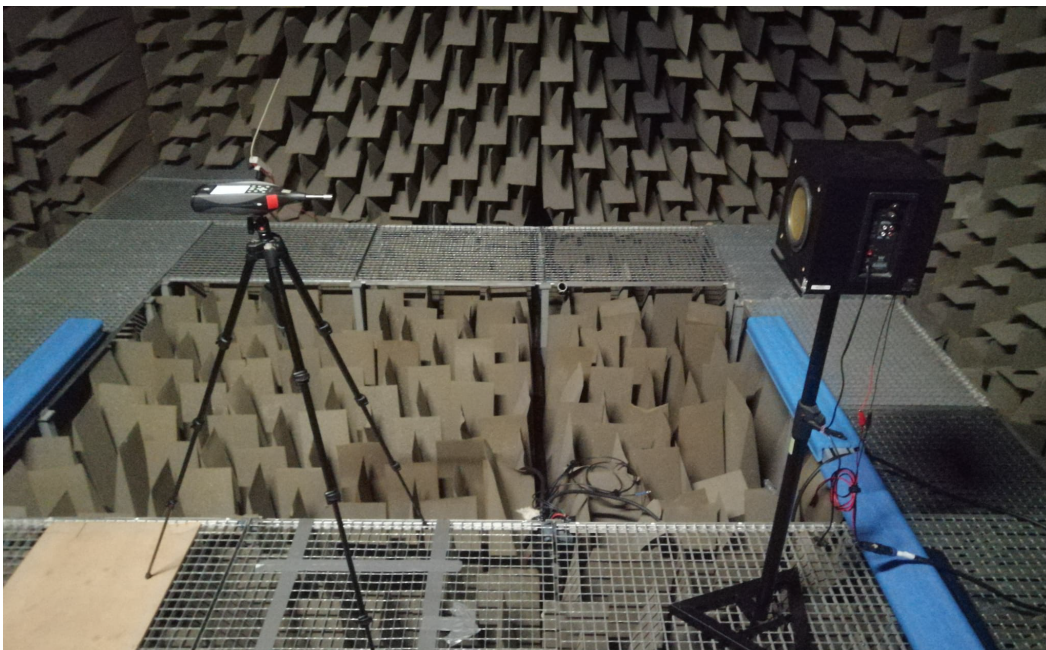


Figura 17: Disposició del sistema caixa-sonòmetre

A continuació, s'ha configurat el generador de funcions amb un to sinusoidal d'1 kHz, i s'ha regulat l'etapa de potència fins mesurar 2 V en els borns de l'altaveu. En este cas, s'ha fet la mesura per a un voltatge de 2.02 V.

Una vegada s'ha configurat el sistema i el sonòmetre, s'ha mesurat durant 15 segons la resposta de l'altaveu. Per al *woofer* s'ha obtingut un valor de 84.5 dB a 1 kHz.

Quant als mitjos, per al mid1 s'ha obtingut un valor de 83.0 dB a 1 kHz i per al mid2 s'ha obtingut un valor de 86.2 dB a 1 kHz.

### 4.3. Resposta en freqüència

Avaluar la resposta en freqüència d'un transductor ens permet saber la seua capacitat de reproduir tot el marge de les audiofreqüències (20 – 20 kHz). Esta informació és de gran utilitat sobretot a l'hora de voler dissenyar un filtre *crossover*, ja que ens permet saber a quines freqüències tallar amb la finalitat d'optimitzar al màxim la resposta en freqüència final de l'altaveu.

Aprofitant la disposició del sistema caixa-sonòmetre utilitzada per a la mesura de la sensibilitat, s'ha configurat el generador de funcions per a emetre soroll rosa amb la finalitat de realitzar la mesura de la resposta en freqüència.

D'esta forma, s'ha realitzat una mesura d'una durada de 15 segons per cada transductor. En este cas, no ha sigut rellevant la potència elèctrica induïda al sistema, ja que s'han escalat els resultats en funció del valor de la sensibilitat.

Una vegada realitzada la mesura, observem a la Figura 18 la gràfica del woofer:

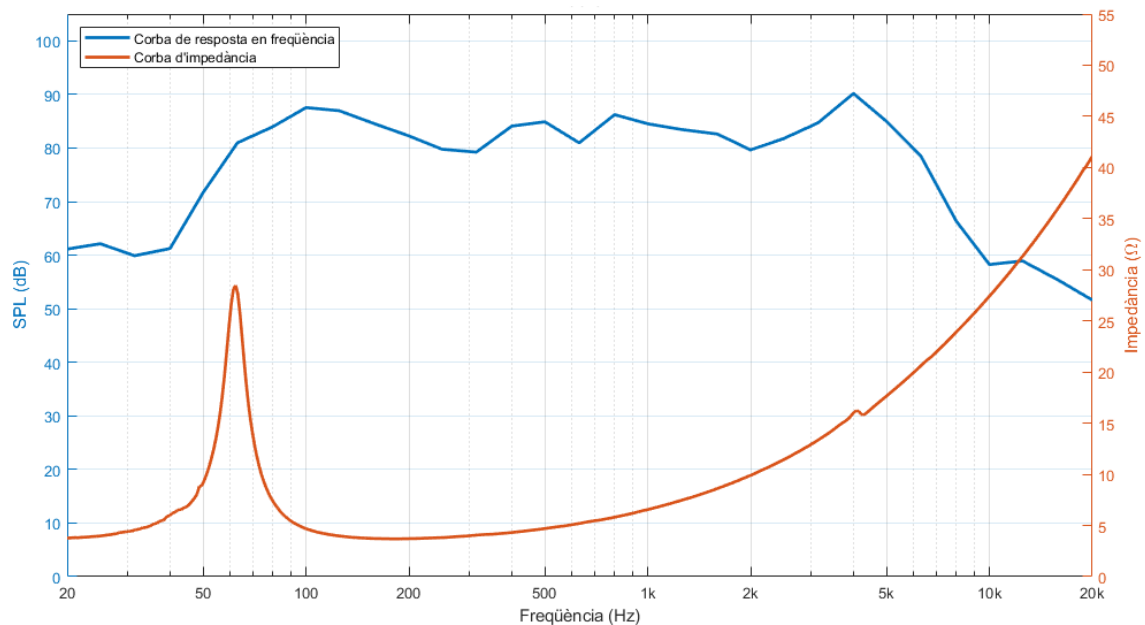


Figura 18: Resposta en freqüència del woofer muntat en caixa

Realitzant el mateix procediment que en el cas anterior, s'han mesurat les respostes en freqüència dels mitjos, les quals es mostren en les següents figures:

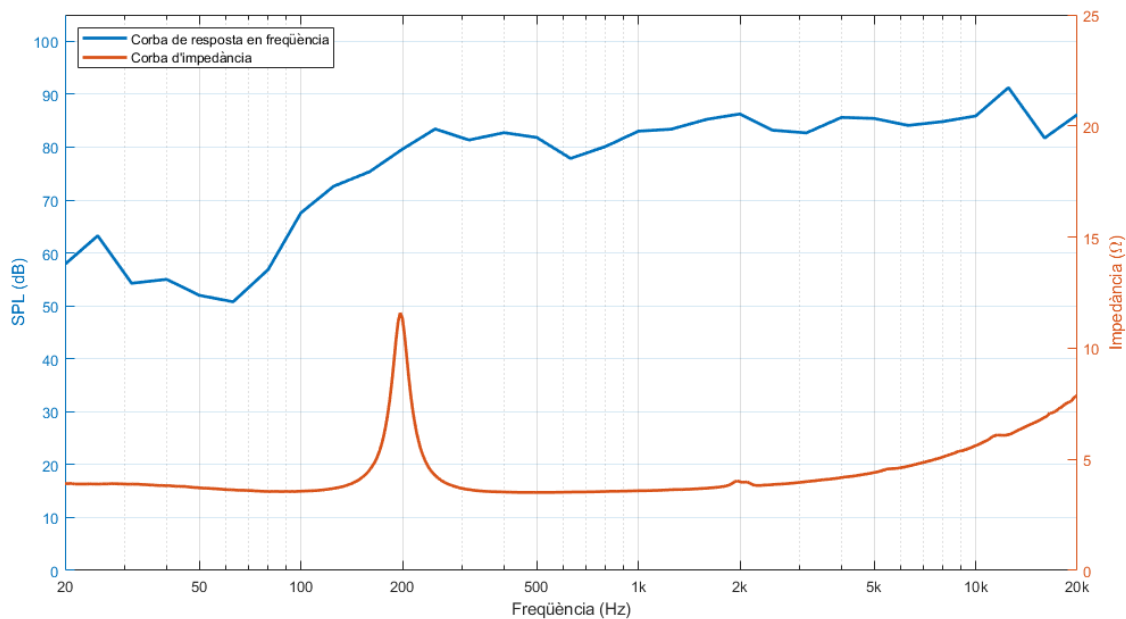


Figura 19: Resposta en freqüència del mid1 muntat en caixa

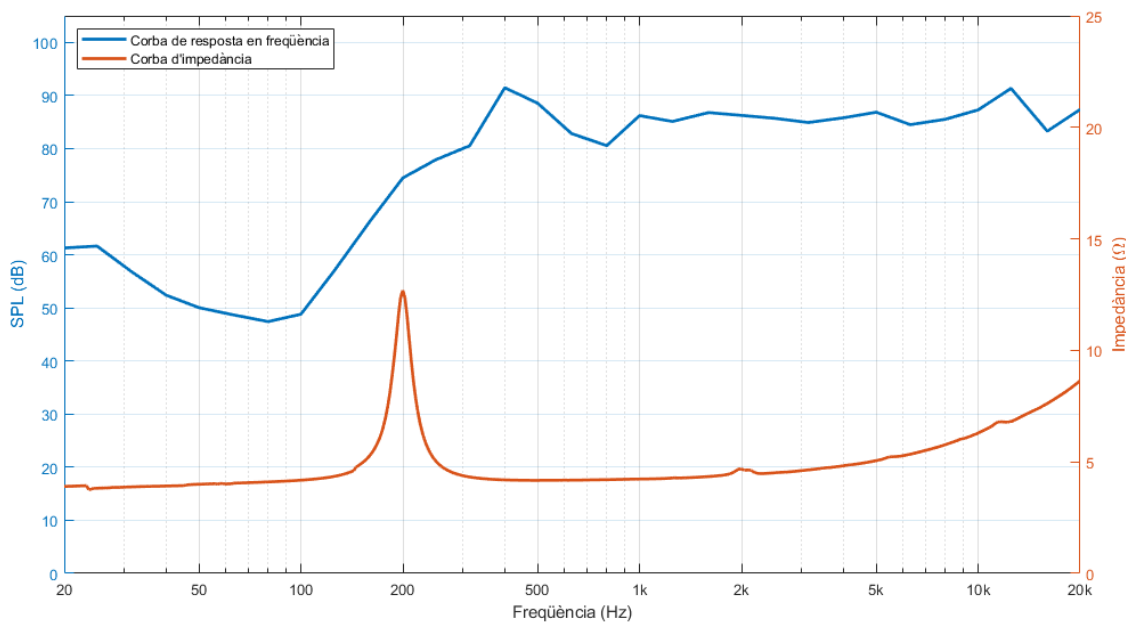


Figura 20: Resposta en freqüència del mid2 muntat en caixa

Es pot apreciar que la resposta en subgrues (20 a 100 Hz) no és molt bona en el woofer, ja que es produeixen grans oscil·lacions. És en la part baixa de les baixes freqüències (prop dels 100 Hz) on la corba del woofer s'estabilitza.

En la part dels mitjos (250 a 2 kHz) els tres transductors mostren una resposta en freqüència prou estabilitzada amb algunes oscil·lacions, però no tan abruptes.

En la zona dels aguts (2k a 20 kHz) els mitjos mostren una corba prou estable, mostrant quasi les mateixes oscil·lacions entre el mid1 i el mid2. En canvi, s'observa que el *woofer* decau a partir dels 4 kHz.

## 4.4. Estudi del consum dels equips d'àudio

Per a assegurar-nos que el corrent que arriba a l'equipament és suficient, s'ha de conèixer quina és el corrent que necessita cada aparell. Cal destacar que com es fan connexions en paral·lel, tot i que no afecten al voltatge, sí ho fan a l'amperatge. És per este motiu que s'han de fer les mesures necessàries per a assegurar-nos que cadascun dels aparells rep la quantitat de corrent suficient per al seu correcte funcionament.

Una primera aproximació per conèixer el corrent necessària per al funcionament de cadascun dels aparells es consultar el full d'especificacions. Si no tenim disponible esta informació al full d'especificacions, haurem d'esbrinar-les empíricament mitjançant medicions.

Per a esta mesura, s'ha fet us del multímetre digital Keithley DMM6500. D'esta forma, s'ha procedit a agafar un cable d'alimentació, del qual s'ha extret el cable que alimenta als aparells i s'ha tallat de forma que el circuit ha quedat obert. Seguidament, s'ha connectat el positiu i negatiu del multímetre a cada extrem del cable. A la Figura 21 es mostra la gràfica del consum de la placa Bluetooth.

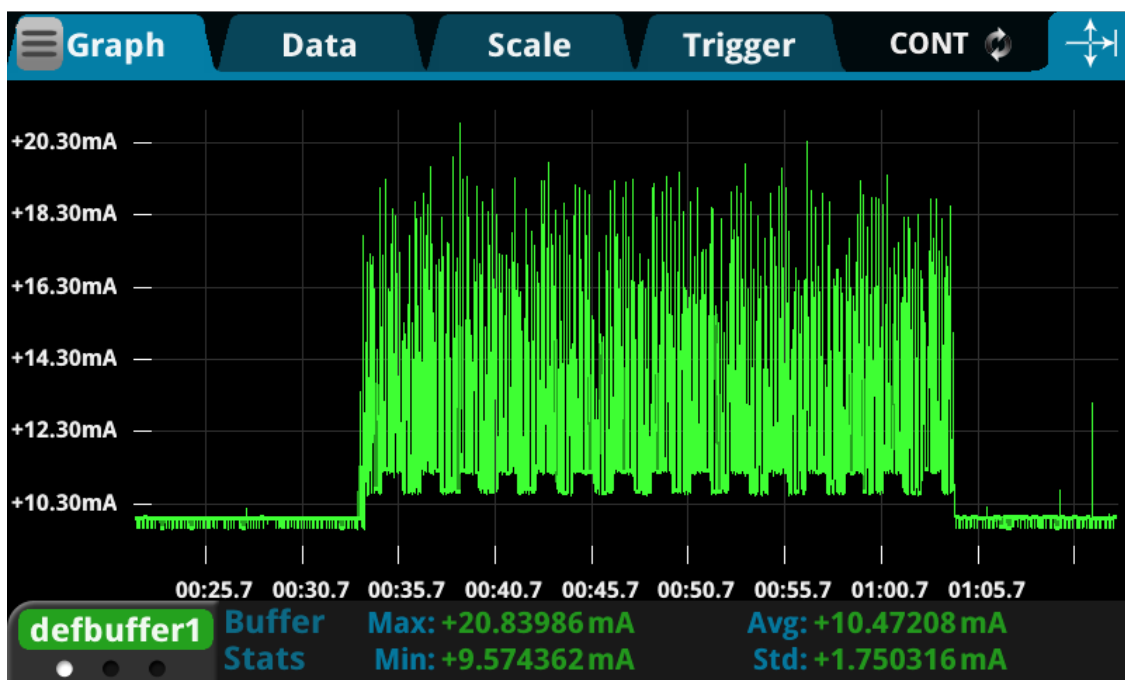


Figura 21: Consum de la placa Bluetooth

Tal com es pot veure en la gràfica anterior, s'ha mesurat el consum de la placa Bluetooth en dos modes de funcionament: el mode repòs i el mode recepció. Amb el mode repòs, en el qual la placa està únicament connectada sense rebre cap senyal, s'ha obtingut un consum de 10 mA. Per contra, amb el mode recepció, s'ha obtingut un consum màxim de 21 mA aproximadament.

De la mateixa manera que s'ha fet abans, s'ha procedit a mesurar el consum de l'analitzador de freqüències, o RTA. En la Figura 22 es pot observar la gràfica en qüestió:

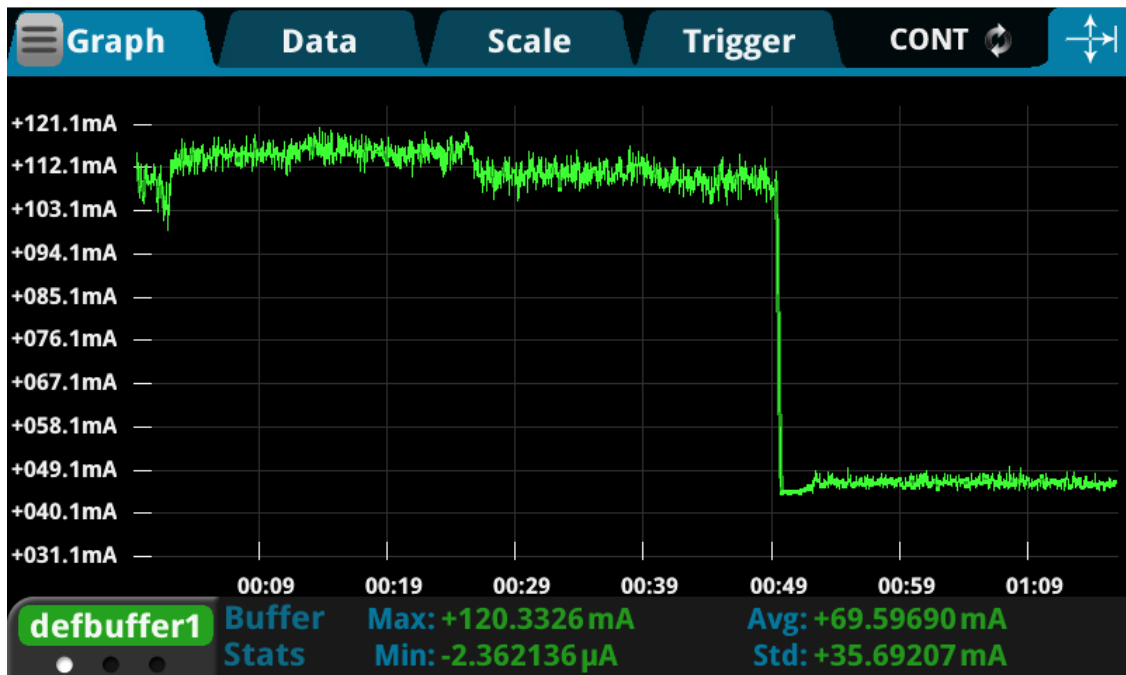


Figura 22: Consum del RTA

En esta prova, s'ha calculat el consum del RTA en dos modes de funcionament: nivell baix i nivell alt. Al contrari que el cas anterior, el consum d'este circuit és proporcional al nombre de LED's que s'encenen i apaguen en temps real. Per a fer esta prova, s'ha utilitzat el soroll rosa, ja que este soroll conté la mateixa energia per a totes les bandes d'octava i permet il·luminar el major nombre de LED's possibles. Amb un nivell baix, s'ha obtingut un consum de 50 mA, mentre que amb un nivell alt, s'ha obtingut un consum màxim de 121 mA, aproximadament.

Com que el transformador té dues eixides USB-A, s'ha elegit finalment que l'eixida de 2A serà per a l'analitzador d'espectres, el qual té un consum més elevat, mentre que l'eixida de 1A serà per a la placa Bluetooth, que compta amb un consum inferior.

## 4.5. Estudi de l'amplificador

Per a l'estudi de l'amplificador s'ha fet us del *software* ARTA, el qual és una col·lecció de programes per a medicions i anàlisis d'àudio en sistemes acústics i de comunicacions. La targeta d'àudio que s'ha utilitzat per a este estudi ha sigut la M-Audio Fast Track Pro, l'eixida de la qual s'ha connectat a l'entrada de l'amplificador i enviada de tornada a la targeta d'àudio.

En primer lloc, s'ha estudiat el canal del woofer i el comportament d'este a tres distintes configuracions dels dos potenciòmetres de l'amplificador: el potenciòmetre corresponent al filtre de baixes freqüències "Bass" i el potenciòmetre corresponent al guany o volum de l'amplificador "Vol". Les configuracions que s'han elegit per a l'estudi dels potenciòmetres en qüestió són: posició mínima, posició neutra o "zero" (situant el potenciòmetre en el centre) i posició màxima.

En la Figura 23 observem el comportament del potenciòmetre "Bass" per al canal del transductor "Woofer":

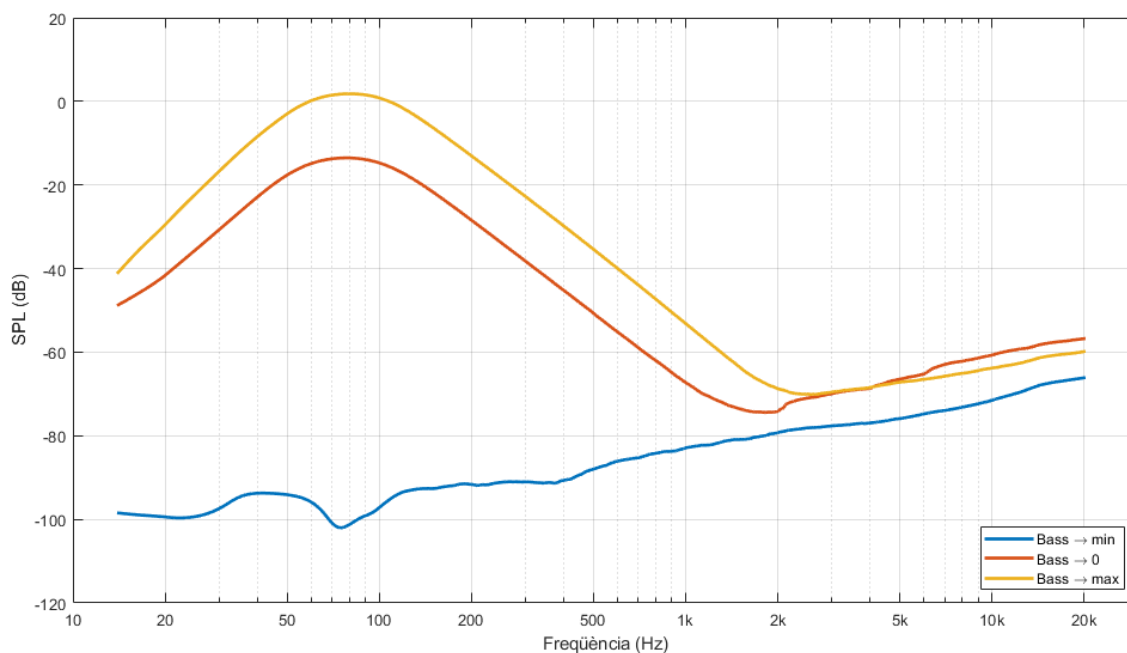


Figura 23: Comportament del potenciòmetre "Bass" per al canal "Woofer"

Tal com s'observa en la Figura 23, al disminuir el potenciòmetre del filtre al mínim s'introdueix una atenuació del senyal d'un nivell de 100 dB respecte al màxim. En canvi, quan el potenciòmetre està en posició neutra actua un filtre pas banda amb una banda de pas compresa entre els 45 Hz i 150 Hz, aproximadament. Finalment, si el potenciòmetre es troba al màxim, actua el mateix filtre però amb un guany d'aproximadament 18 dB respecte l'anterior des dels 15 Hz als 2 kHz.

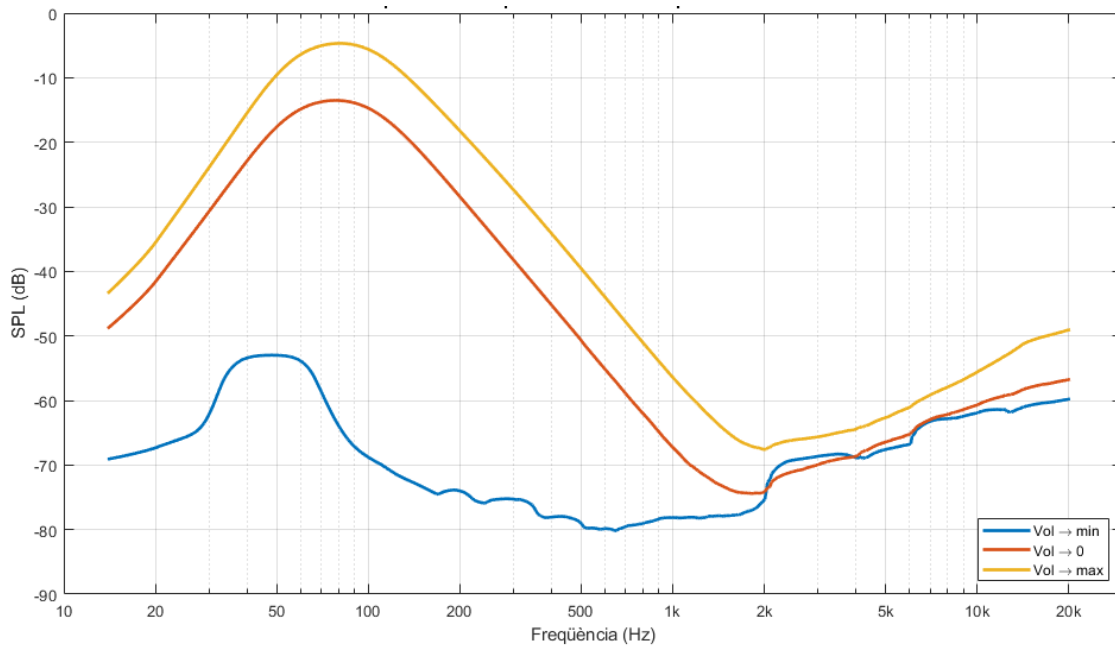


Figura 24: Comportament del potènciòmetre "Vol" per al canal "Woofers"

Si observem la Figura 24, el comportament del potènciòmetre del guany té un efecte lleugerament diferent. Quan el potènciòmetre del volum es troba al mínim s'observa un espectre freqüencial un poc estrany degut al so produït per la targeta d'àudio o el soroll elèctric produït per l'amplificador. No obstant, quan el potènciòmetre es troba en posició neutra, actua el filtre pas banda ja inclòs en l'amplificador. Finalment, al posar al màxim el potènciòmetre del guany observem un augment de 10 dB del senyal respecte a la posició neutra en totes les bandes.

Seguidament del woofer s'ha realitzat el estudi d'un dels canals "mid", concretament el corresponent al canal esquerre o L. Això es degut a que prèviament s'ha introduït un senyal als canals L i R i s'ha comprovat que els dos reproduïxen un senyal idèntic. En la Figura 25 s'observa l'efecte potènciòmetre "Vol" a un dels canals "mid".

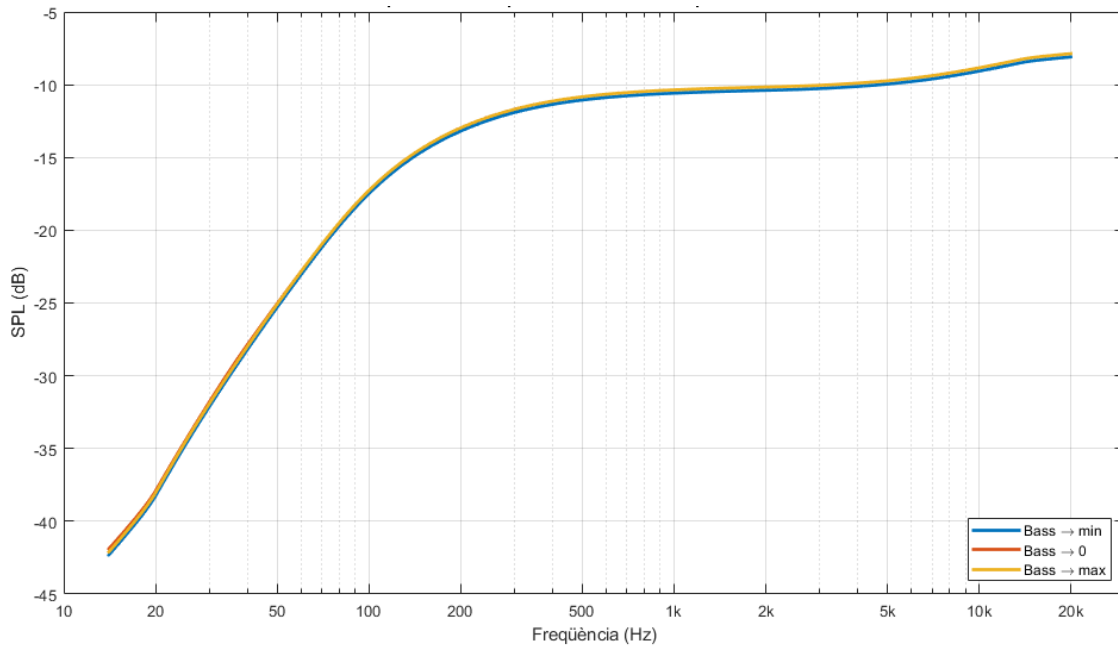


Figura 25: Comportament del potenciòmetre "Bass" per al canal "Mid"

Tal com s'observa en la Figura 25, el potenciòmetre "Bass" no té cap efecte en els canals dels mitjos. No obstant, cal destacar que en aquests dos canals actua un filtre passalt, amb una freqüència de tall de 200 Hz, aproximadament.

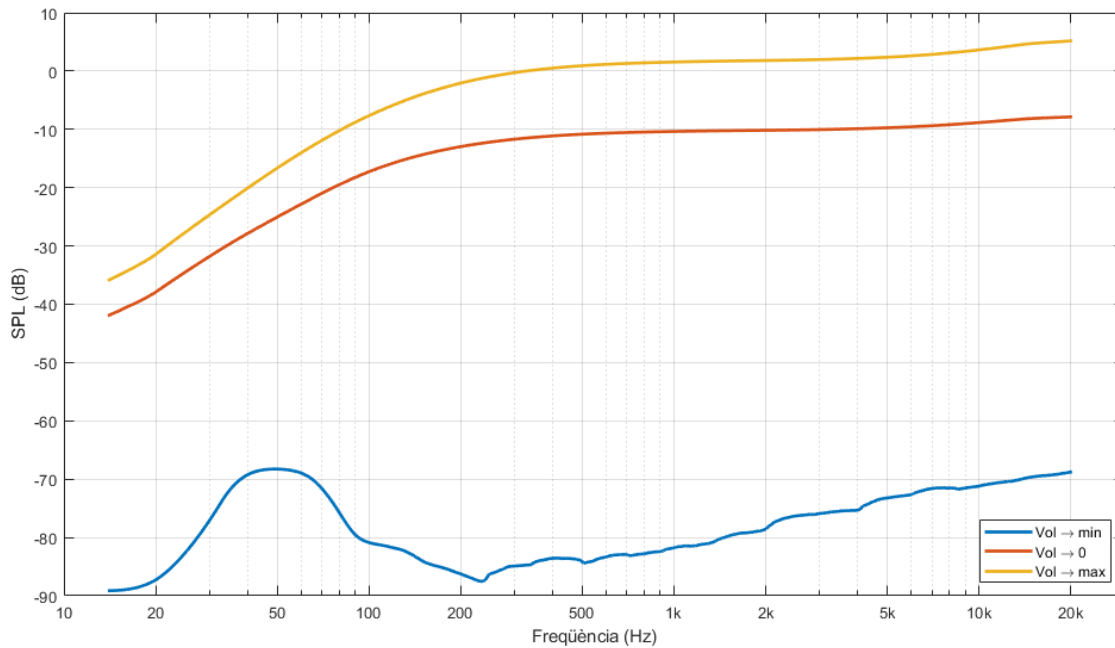


Figura 26: Comportament del potenciòmetre "Vol" per al canal "Mid"



Tal com s'observa en la Figura 26, al baixar al mínim el potenciòmetre del guany, s'observa únicament el soroll elèctric comentat abans. En canvi, al centrar el potenciòmetre, observem que actua un filtre passalt amb una freqüència de tall de 200 dB, aproximadament. Finalment, al situar al màxim el potenciòmetre, s'observa un guany de 10 dB en el filtre respecte a la posició central.

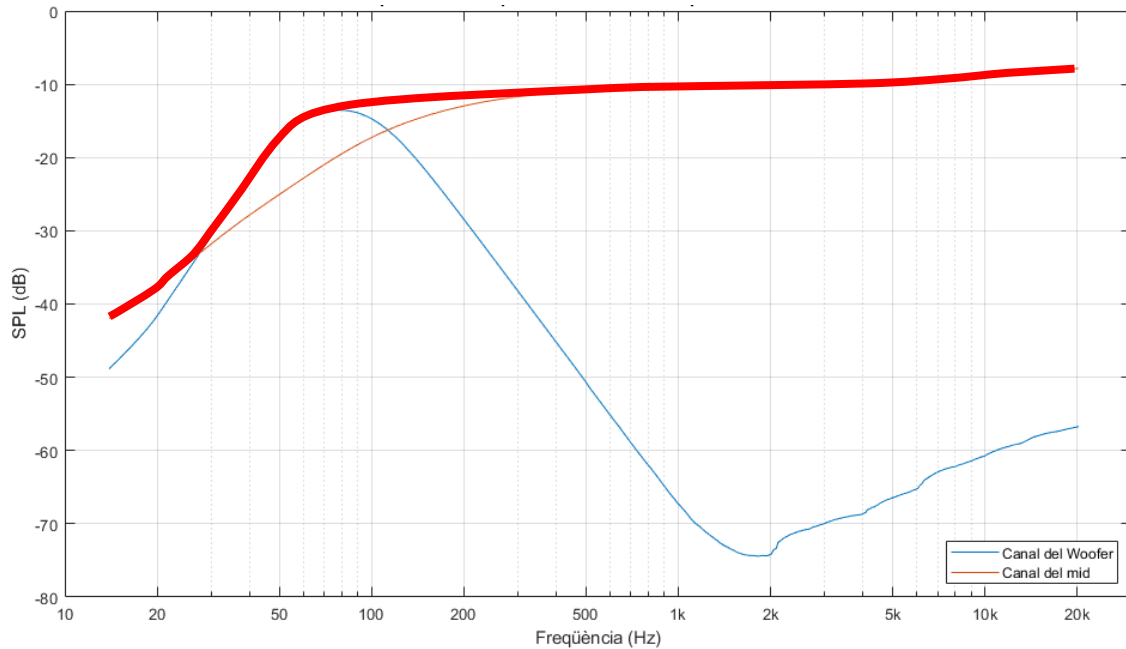


Figura 27: Funció de transferència del sistema muntat

A la Figura 27 s'observa la resposta final al sistema, la qual ve donada per la superposició dels tres canals amb els potenciòmetres en posició central. En ella s'observa un filtre passalt amb freqüència de tall de 45 Hz, aproximadament.

## 4.6. Disseny i construcció de la caixa

Una vegada s'han analitzat els diferents elements que componen un altaveu i el seu funcionament, així com exemples de monitors actuals, hem de donar pas a una fase creativa en la qual es dissenyarà la caixa de l'altaveu.

En esta fase del projecte es dissenyarà un sistema de caixa tancada que permeta albergar tota l'electrònica d'amplificació, recepció, equalització i representació freqüencial del so.

En la Figura 28 podem observar l'esbós i el dibuix que es va crear en la primera fase del disseny:

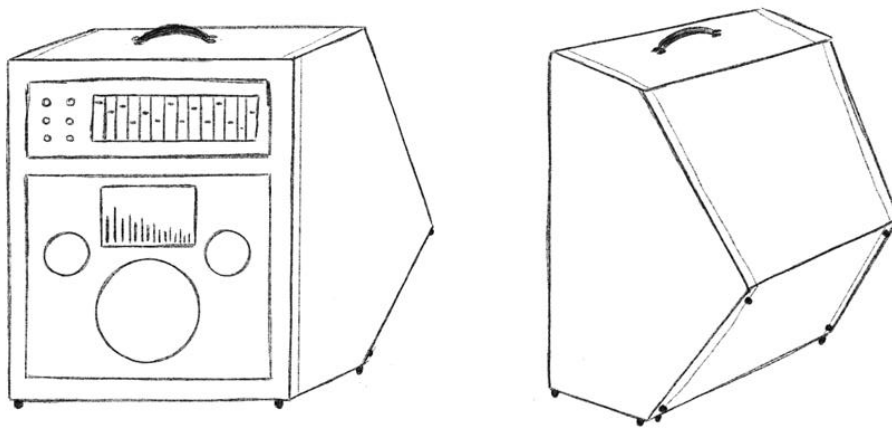


Figura 28: Esbós realitzat en la primera fase del disseny

Com s'observa en la Figura 28, la idea inicial de la caixa és que complira els següents requisits:

- La caixa seria convenient que tinguera el menor nombre de parets paral·leles entre sí, ja que, tal com es va demostrar en les corbes d'Olson [8], les caixes amb parets paral·leles tenen una resposta en freqüència menys plana.
- Atenent al punt anterior, es va crear un disseny que permetia utilitzar l'altaveu en format "de peu" (col·locant-lo a 90°) i en format "monitor de terra" (col·locant-lo a 45°).
- En la part frontal de la caixa hi haurien dues parts separades per un xicotet desnivell. La primera part, a la part de baix i amb una major superfície, seria l'encarregada de subjectar els transductors i l'equalitzador gràfic. La segona part, a la part de dalt, seria on es trobaria tot allò relacionat amb el tractament del senyal (equalitzador, filtres, guany, etc.), la inserció d'àudio per Jack 3.5 mm i diversos botons per al control del RTA.

- La base i la llargària de l'altaveu havien de tindre una longitud en concret, de forma que es poguera col·locar correctament en una tauleta de la meua habitació.

Una vegada es té clar com s'ha de construir l'altaveu i les seues característiques, es procedeix al disseny per a la seua posterior fabricació. Per a això, s'ha fet ús del *software* SketchUp, un programa de disseny 3D i amplament utilitzat per al modelatge d'entorns de planificació urbana, arquitectura, enginyeria civil, disseny industrial, videojocs, etc.

El primer prototip de disseny es pot observar a la Figura 29:

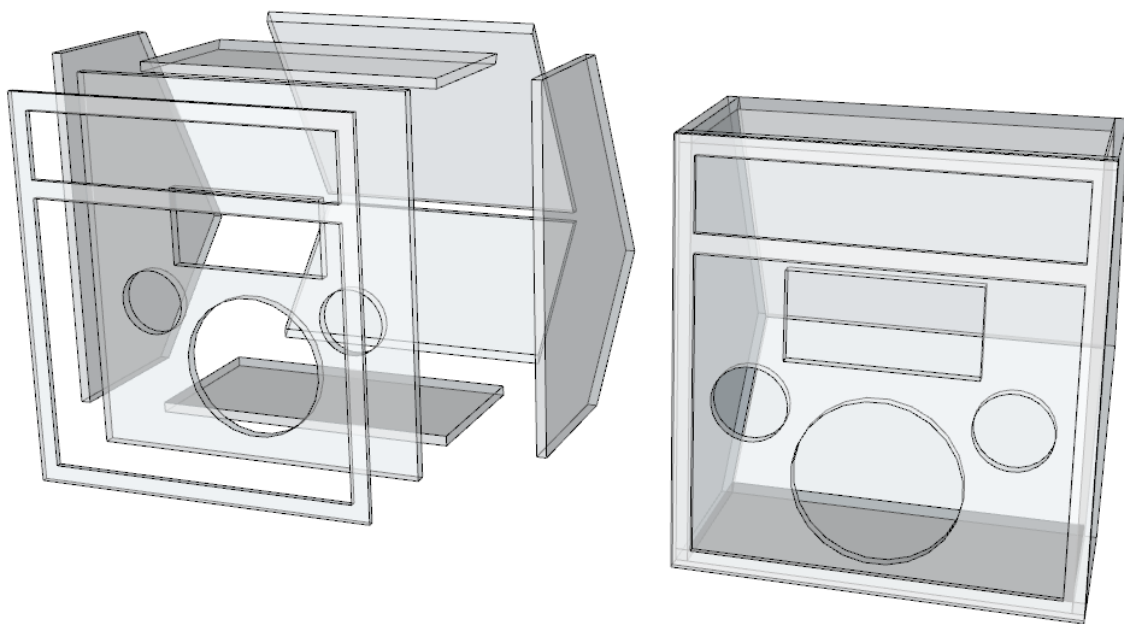


Figura 29: Disseny preliminar de la caixa

La caixa que s'ha dissenyat és de tipus "caixa tancada". Açò és degut a que es busca un disseny simple a la vegada que una bona resposta en freqüència front a unes mides moderades de caixa. A més, no es busca un increment en l'eficiència de les baixes freqüències, tal com ho aconseguiria un disseny de *bass reflex* o radiador passiu [9].

Mitjançant el *software* VituixCAD2 [10] s'ha obtingut un volum recomanat de 35,24 litres per a un disseny de caixa tancada. No obstant, segons les mides proporcionades pel *software* de disseny s'ha obtingut un valor de 43,18 litres.

En la Figura 29 es pot observar una comparativa de les respostes de la caixa, on la gràfica roja representa la resposta amb el volum recomanat i la blava representa la resposta amb el volum calculat.

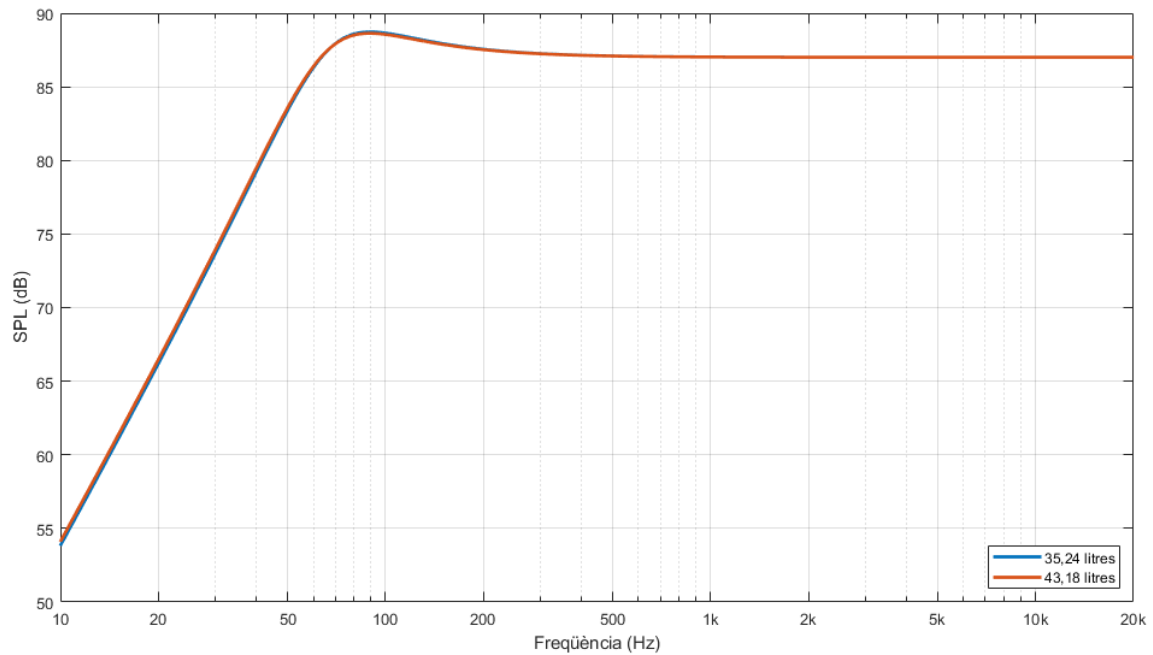


Figura 30: Comparativa de les respostes de la caixa en funció del volum

Com que no s'observen diferències significatives, i el disseny de la caixa actual s'ajusta a les expectatives inicials tant en funcionalitat com en estètica, s'ha decidit mantindre les dimensions inicials.

Per a la mecanització de la caixa de l'altaveu, s'ha barallat la possibilitat d'encarregar construir la caixa a una empresa especialitzada. No obstant, esta opció presentava un cost molt elevat i un temps de construcció que no es podia assumir. Consegüentment, tant per proximitat com per la possibilitat d'involucrar-me en el procés de construcció, s'ha decidit construir la caixa al laboratori de la universitat. Tant les mides de la caixa com els taulers que la conformen es poden vore als esquemàtics de l'annex 6.2.

Per a la mecanització de les peces que conformen l'altaveu, s'han utilitzat taulers de fusta contraxapada de 2 cm d'espessor. Este tipus de fusta, composta per diverses xapes apegades amb cola, destaca pel seu preu econòmic i és àmpliament utilitzada en la construcció de caixes degut a la baixa ressonància que es produeix a l'interior.

Respecte a la maquinària utilitzada, s'ha utilitzat una serra circular de banc, concretament el model DWE7492-QS de la marca DeWalt. Esta màquina, que es pot observar a la Figura 31 junt amb el procés del tall d'una de les parts de la caixa, també té la funcionalitat de fer talls en angle. Esta característica ens ha sigut de gran utilitat a l'hora de fer bisellats.



Figura 31: Procés del tall d'una de les parts que conformen l'altaveu

Una vegada realitzat tot el procés anterior, s'han encaixat totes les peces per a culminar el prototip. Les primeres quatre peces que s'han apegat han sigut la base, el sostre i els dos laterals, de forma que s'ha creat una estructura en què, posteriorment, s'han apegat les peces restants. Per a fer-ho, s'ha fet ús de cola blanca, la qual s'ha deixat assecat durant 24 hores en les quals s'exercia una pressió mitjançant dues corretges de subjecció. En la Figura 32 es pot observar una part d'este procés.

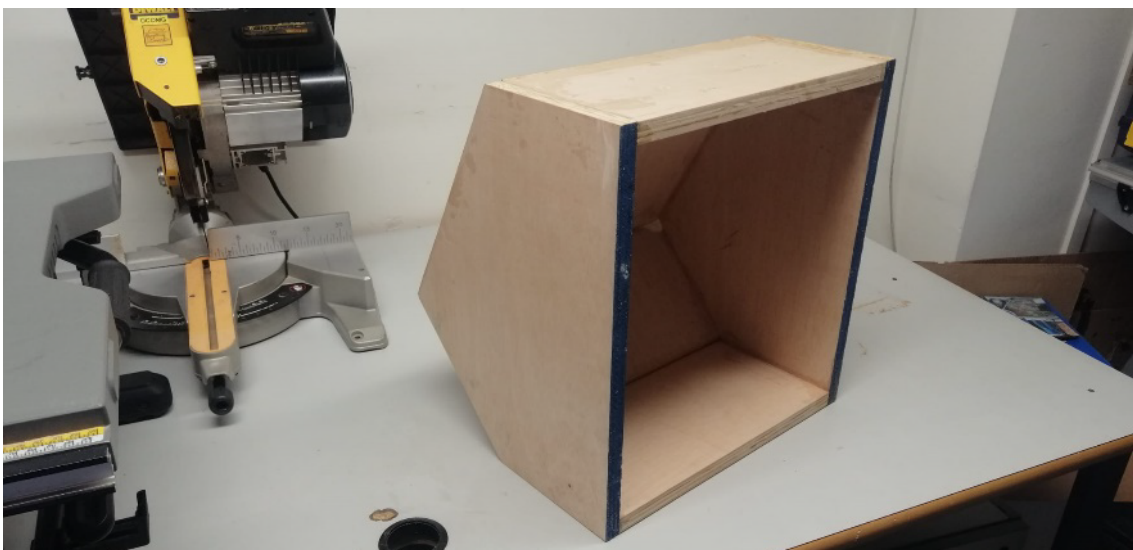


Figura 32: Procés d'encolat de l'altaveu

No obstant, degut a la gran gruix de la fusta i a la escassetat de ferramentes al laboratori, no ha sigut possible la instal·lació de l'equalitzador gràfic i demás aparells, tal com el Jack femella, botons, etc. a la part frontal de l'altaveu. Per a solucionar-ho, s'ha utilitzat de nou el *software* SketchUp per a dissenyar tres embellidors que posteriorment s'han imprès en una impressora 3D i encolat a la part frontal de l'altaveu. D'esta forma i, controlant el gruix i la profunditat d'este, s'ha aconseguit resoldre el problema. En la Figura 33 es pot observar el disseny de dos dels embellidors, concretament, l'encarregat de subjectar l'equalitzador gràfic i l'encarregat de subjectar els potenciòmetres, botons i demás components.

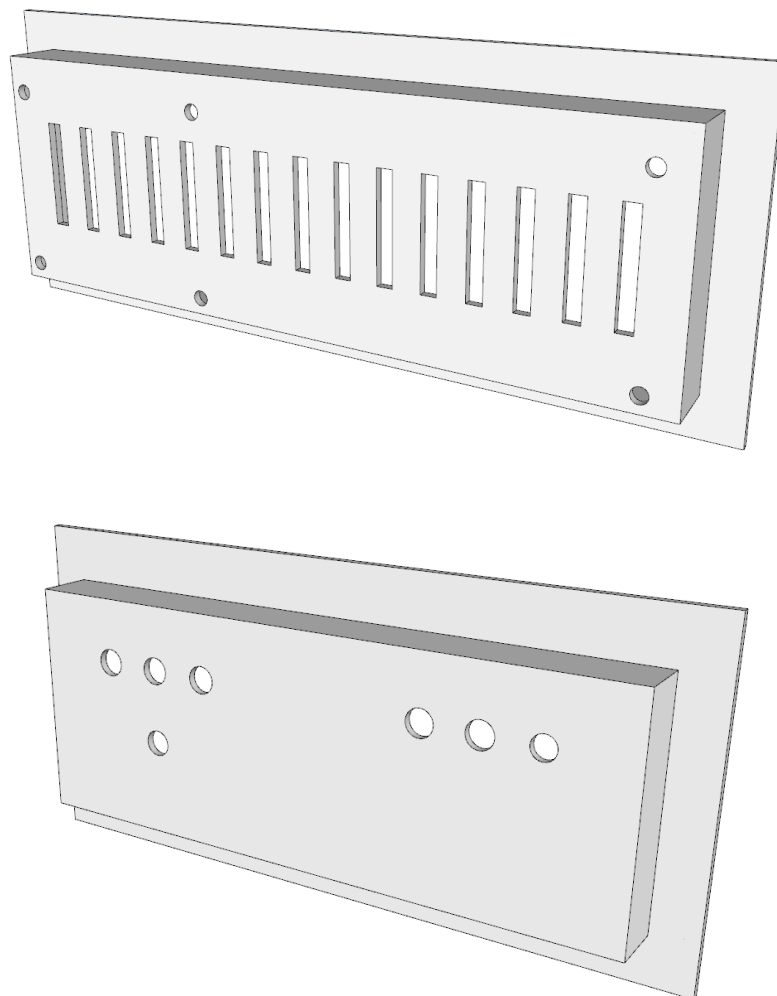


Figura 33: Embellidor per a l'equalitzador gràfic (dalt) i per al panel de control (baix)

Posteriorment, s'ha llimat, pintat i caragolat els diversos circuits impresos a la caixa i part frontal de l'altaveu. En la Figura 34 es pot observar el connexionat a l'interior de la caixa per la part de darrere.

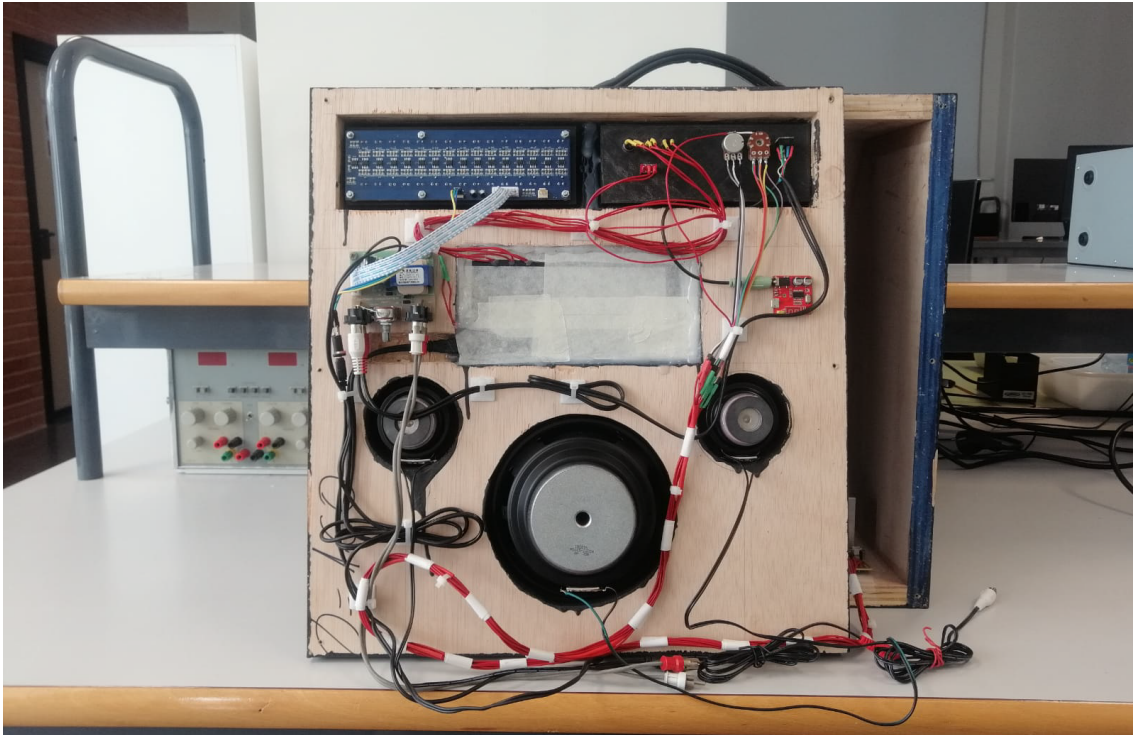


Figura 34: Connexionat a la part frontal (part del darrere)

Finalment, s'ha caragolat la part frontal a la resta de la caixa, deixant el producte finalitzat per a les primeres mesures en càmera anecoica. El prototip final es pot observar a la Figura 35.



Figura 35: Prototip final

## 4.7. Mesures a la càmera anecoica

Una vegada s'ha realitzat la construcció del prototip es procedeix a verificar el comportament d'este mitjançant les mesures corresponents. Primer de tot, estudiarem la resposta en freqüència del prototipat sense cap material al seu interior. En segon lloc, s'instal·larà un absorbent acústic amb la finalitat d'estudiar el comportament de la seua resposta en freqüència. Finalment, es realitzarà l'estudi de la directivitat de l'altaveu amb l'absorbent acústic.

El primer pas d'este procés no segueix exactament la mateixa metodologia explicada al apartat 4.2, ja que la sensibilitat no es calcula en un sistema ja muntat. Per açò, el primer pas ha sigut directament la mesura de la resposta en freqüència sense necessitat de normalitzar-la.

D'esta forma, s'han iniciat les mesures de la resposta en freqüència, el procediment del qual segueix la mateixa metodologia explicada al apartat 4.3. Per a açò, s'han realitzat dues mesures amb el sonòmetre enviant un soroll rosa a través de l'entrada auxiliar i un altra a través de radiofreqüència. Amb açò, es podran comparar les anomalies que presenten les dos formes de transmissió d'àudio. A la Figura 36 es pot observar la gràfica comparativa:

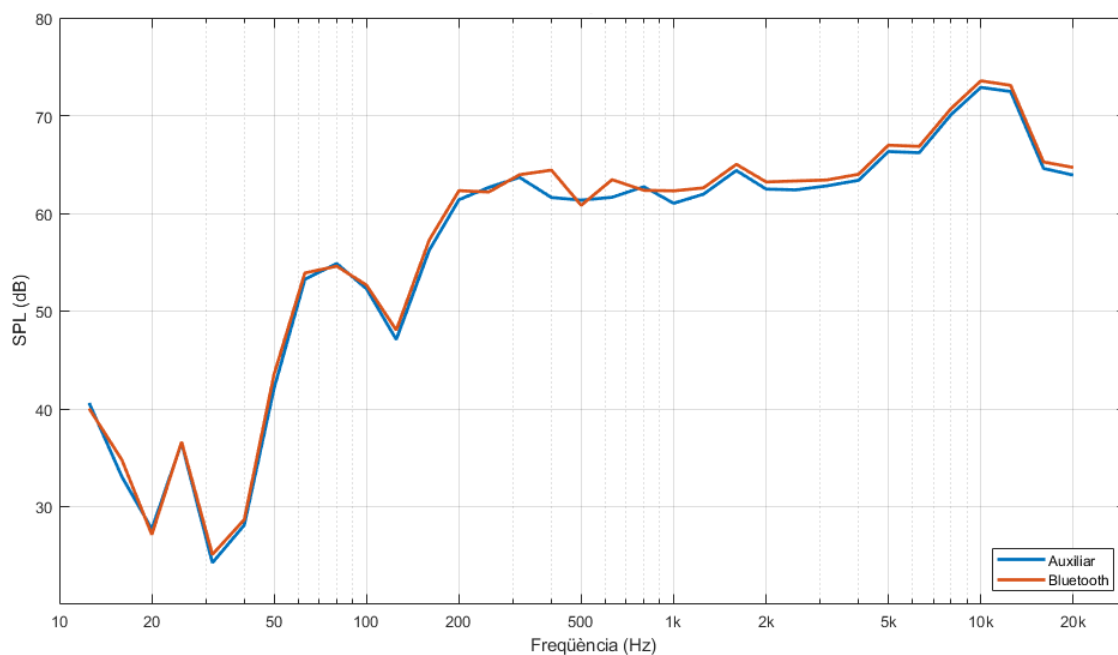


Figura 36: Resposta en freqüència del prototip amb senyal enviada per l'entrada AUX i senyal enviada per Bluetooth

Tal com es pot vore a la gràfica comparativa mostrada a la Figura 36, s'observen dues gràfiques bastant similars.



No obstant s'ha de considerar que, en la majoria dels casos, el so auxiliar és més capaç de reproduir un so de major qualitat en comparació al Bluetooth, ja que aquest sistema presenta pèrdues de fidelitat, tal com distorsions o pèrdues en la sincronització d'àudio.

Amb l'anàlisi feta anteriorment, s'ha procedit a instal·lar absorbent acústic a l'interior de la caixa per a fer la resta de mesures per entrada auxiliar, la qual té una major fidelitat. El material absorbent instal·lat a l'interior de l'altaveu ha sigut un reciclat de residus tèxtils, també conegut com a borra tèxtil.

Després de les corresponents medicions, s'ha obtingut la resposta en freqüència que s'observa a la Figura 37.

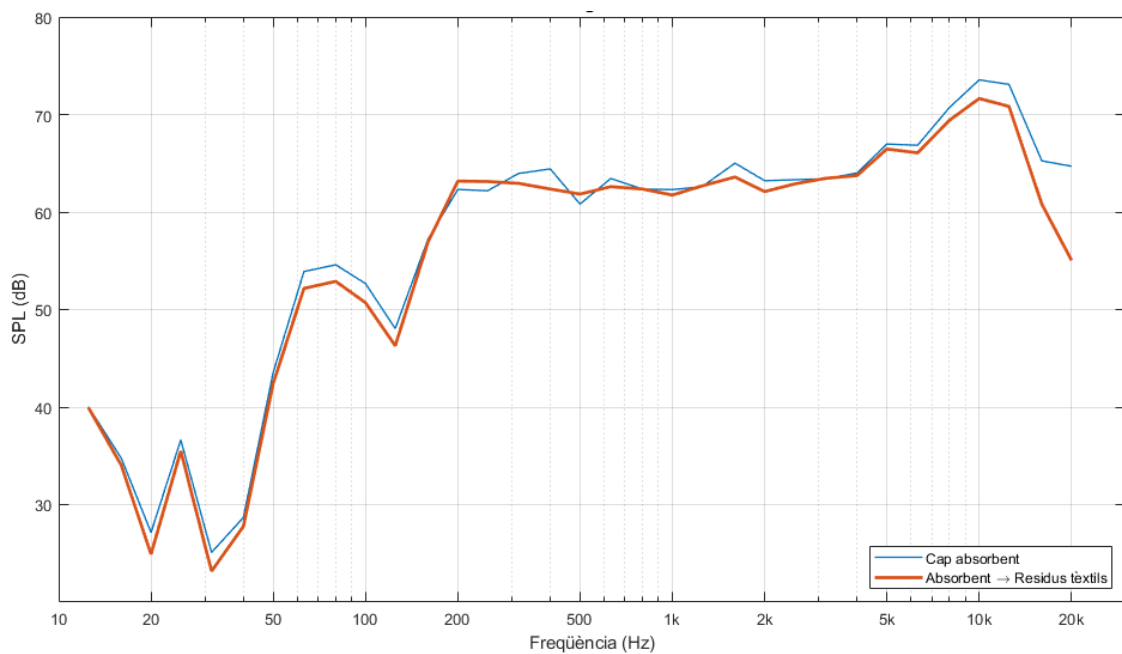


Figura 37: Resposta en freqüència del prototip amb absorbent acústic

Tal com es pot observar en la Figura 37, s'observen lleugeres diferències. Això pot ser degut a que, al estar treballat en un volum de caixa bastant gran, l'efecte de l'absorbent no té un canvi tan abrupte com el poguera tindre en volums més menuts. No obstant, s'observen algunes diferències insignificants, com les que s'observen en el rang de 200 Hz i 10 kHz, les quals aconseguen aplanar un poc més la corba de la resposta en freqüència.

No obstant, gràcies a la incorporació de l'equalitzador gràfic al sistema, es pot retocar la resposta en freqüència al nostre gust. D'aquesta forma, s'ha procedit a pujar el guany de les freqüències compreses entre els 10 Hz i els 500 Hz amb la finalitat d'aconseguir una resposta en freqüència més plana. A la Figura 38 es pot observar una comparació de la resposta en freqüència.

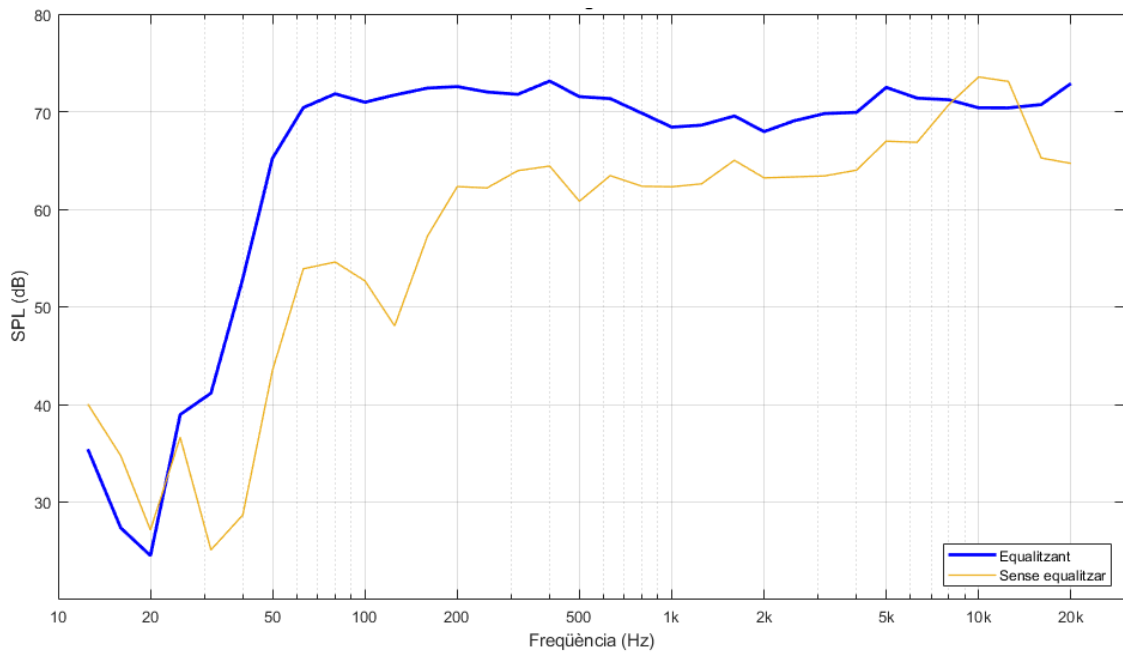


Figura 38: Resposta en freqüència del prototip amb equalització i sense equalització

Tal com s'observa a la Figura 38, amb l'equalització s'ha aconseguit modificar la resposta en freqüència a una millor, tal com s'esperava.

Finalment s'ha mesurat la directivitat de l'altaveu. Este paràmetre és convenient conèixer-lo ja que ens pot ajudar a l'hora de tractar acústicament la sala en què ens trobem. Per a aquesta mesura s'ha utilitzat la base rotatòria LT360, la qual ens permet rotar el nostre altaveu per a la posterior mesura amb el sonòmetre. Una vegada configurat el sistema i situat el sonòmetre a 1 metre de distància de l'altaveu, s'han realitzat 24 mesures cada 15°, obtenint el diagrama mostrat a la Figura 39.

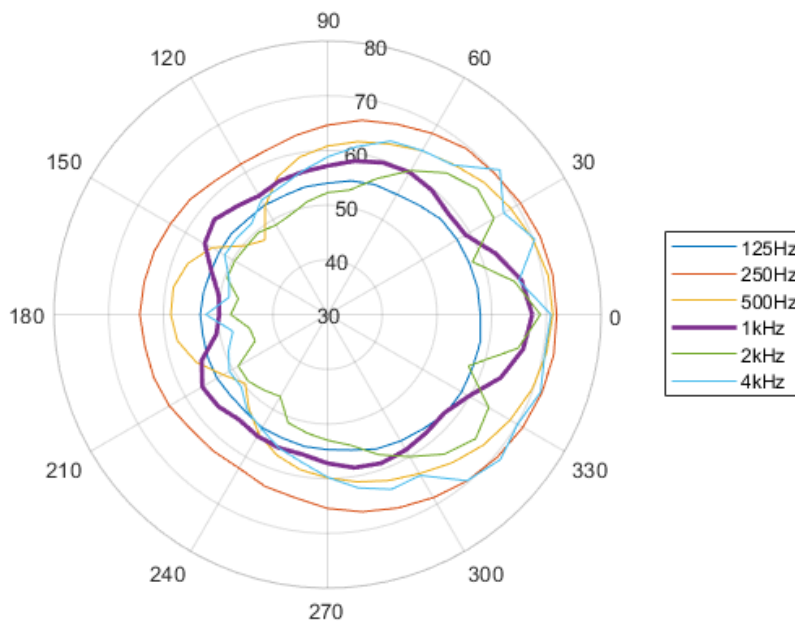


Figura 39: Diagrama polar de directivitat de 125 Hz a 4 kHz amb equalització

## 5. Conclusions

---

El propòsit principal d'aquest estudi era crear un altaveu amb la capacitat d'interactuar amb l'usuari a través de diversos equips de so integrats amb la finalitat d'aconseguir un altaveu amb les condicions òptimes a partir d'uns materials reutilitzats.

Després d'analitzar amb deteniment tots els resultats obtinguts al llarg d'este estudi, es pot afirmar que s'han aconseguit uns resultats millors dels esperats. Això es degut a que, a pesar de que els transductors no presentaven uns resultats massa esperançadors, una vegada muntat el sistema i posteriorment equalitzat, s'ha aconseguit millorar la resposta en freqüència en gran mesura.

No obstant, cal destacar alguns punts en els quals es podrien aconseguir uns millors resultats en l'altaveu.

Primer de tot, s'observa en l'apartat 4.3 que la  $F_s$  del woofer és de 60 Hz. No obstant, es pot observar en l'apartat 4.5 que el filtre "Bass" consisteix en un pas banda amb una banda de pas compresa entre els 45 Hz i 150 Hz. Donada la poca utilitat d'este transductor a freqüències inferiors a la seua  $F_s$ , l'augment de la banda de pas a 60 Hz fins a 200 Hz suposaria una millor resposta en freqüència de l'altaveu. Per a aconseguir aquest propòsit i, al tractar-se d'un filtre passiu, caldria fer un estudi del valor de les resistències i els condensadors amb la finalitat d'aconseguir millorar aquest filtre.

En segon lloc, tal com s'observa a la Figura 30, amb una reducció de 9 litres del volum total de la caixa es podria aconseguir una funció de transferència igual a la desitjada. Amb açò, també s'aconseguiria una reducció del pes de l'altaveu, que tindria com a avantatge una major portabilitat.

Finalment, com a proposta experimental, suggeriria la creació d'un "bass reflex" mitjançant tècniques de disseny i impressió 3D amb la capacitat d'obrir/tancar una finestra en l'altaveu. Amb açò, aconseguiríem un augment del volum que tindria com a conseqüència una resposta més extensa en la reproducció de baixes freqüències.

## 6. Annex

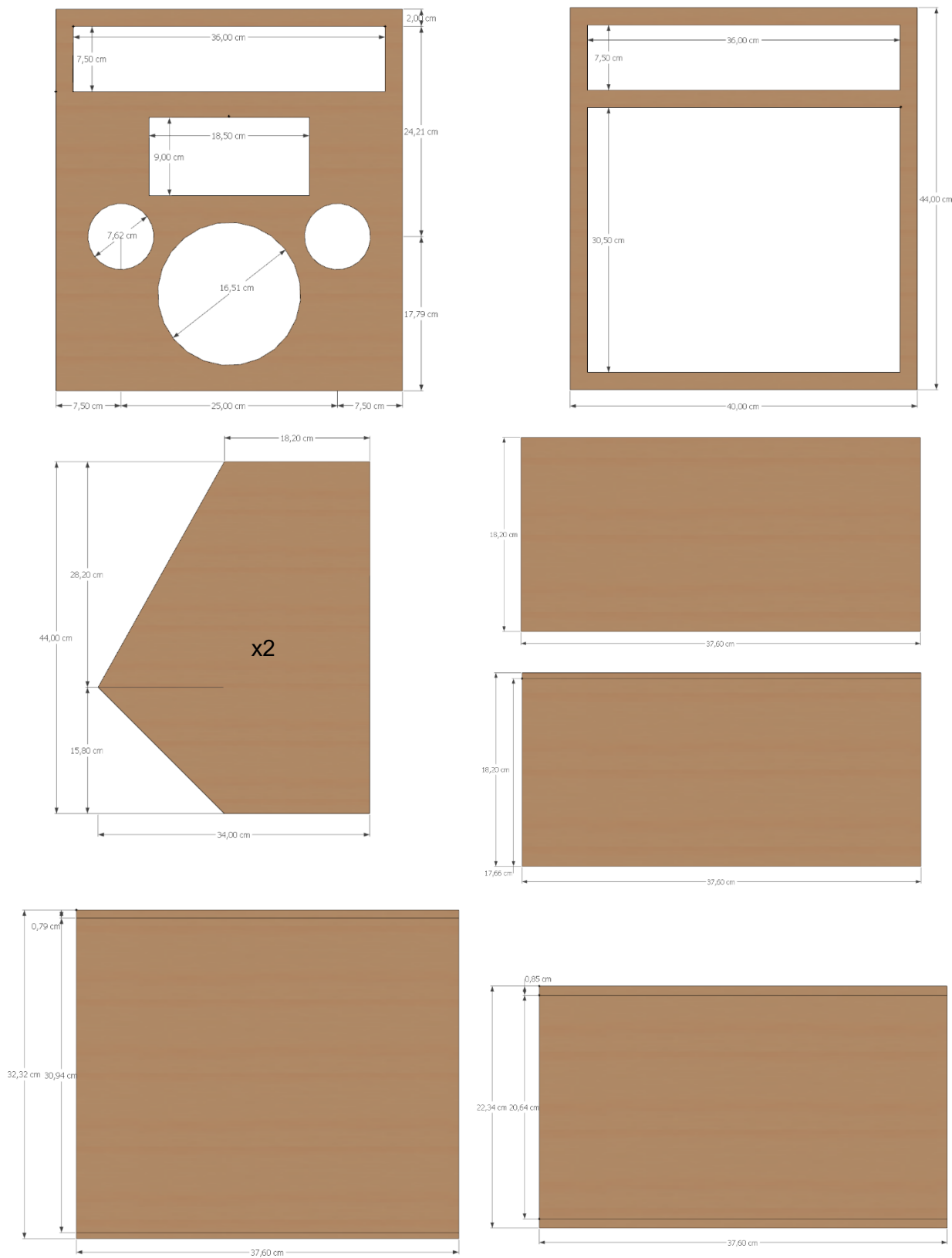
---

### 6.1. Pressupost

DESCRIPCIÓ	UNITATS	PREU	TOTAL
Analitzador d'espectres RTA AS1424	1	81.88 €	81.88 €
Font d'alimentació de l'equalitzador	1	9.86 €	9.86 €
Placa equalitzador gràfic AIYIMA	1	15.92 €	15.92 €
Placa receptora Bluetooth	1	1.67 €	1.67 €
Amplificador Woxter	1	2.50 €	2.50 €
Transformador 230V - 5V	1	1.78 €	1.78 €
Transductor "Woofer"	1	28.55 €	28.55 €
Transductor "Mid"	2	14.93 €	29.86 €
Cables RCA 1,5m	6	0.68 €	4.08 €
Connector conmutador Jack 3,5 mm	1	0.20 €	0.20 €
Interruptor altaveu	1	0.50 €	0.50 €
Tabla de fusta contraxapada 20 mm	1	41.99 €	41.99 €
Cola de fuster	1	4.96 €	4.96 €
Soport autoadhesiu per a subjectar cables	50	0.05 €	2.72 €
Cable USB a micro-USB	1	1.72 €	1.72 €
Cable USB a mini-USB	1	2.95 €	2.95 €
Pintura negra per a fusta	1	7.99 €	7.99 €
Goma Eva Negra	1	1.99 €	1.99 €
Peces impreses 3D personalitzades	3	2.00 €	6.00 €
Regleta elèctrica	1	1.50 €	1.50 €
Bobina cable flexible 0.5mm roig (25m)	1	4.85 €	4.85 €

**TOTAL PRESUPOSTAT 257.47 €**

## 6.2. Peces



Nota: Totes les peces tenen un gruix d'1,2 cm

## 7. Bibliografía

---

- [1] Resnick, R. y Halliday, D. Física para estudiantes de Ciencias e Ingeniería, Vol II, edición, (Compañía Editorial Continental, México, 1982).
- [2] Newell, P.; Holland, K. Loudspeakers For Music Recording and Reproduction.
- [3] Beranek, Leo L.; Mellow, Tim J. (2012). Acoustics. Academic Press.
- [4] Thiele, A.N., "Loudspeakers in Vented Boxes, Parts I and II", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 19, pp. 382–392 (May 1971); pp. 471–483 (June 1971).
- [5] Small, R.H., "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, pp. 383–395 (June 1972).
- [6] Small, R.H., "Closed-Box Loudspeaker Systems", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, pp. 798–808 (Dec. 1972); vol. 21, pp. 11–18 (Jan./Feb. 1973).
- [7] Small, R.H., "Vented-Box Loudspeaker Systems", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 21, pp. 363–372 (June 1973); pp. 438–444 (July/Aug. 1973); pp. 549–554 (Sept. 1973); pp. 635–639 (Oct. 1973).
- [8] Olson, H. (1950). Direct Radiator Loudspeaker Enclosures. AES, 34-64.
- [9] García Puertas, Carlos. Diseño de cajas acústicas. Recuperado el 6 de junio de 2022, de <https://aholab.ehu.eus/users/imanol/akustika/ikasleLanak/Dise%20de%20cajas%20acusticas.pdf>
- [10] VituixCAD Loudspeaker simulator. Última volta vista el 9 de juliol de 2022, de <https://kimmosaunisto.net/>