



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Disseny i implementació d'un amplificador per a guitarra elèctrica.

Document:

Memòria

Autor:

Pol Rovira Peris

Director /Co-director:

Victor Manuel Suñe Socias

Titulació:

Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i
Automàtica

Convocatòria:

Pròrroga Primavera, 22/06/21

TREBALL FINAL D'ESTUDIS



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



Resum

El següent projecte, mostra tot el procés de recerca i procediment realitzat per tal d'implementar un amplificador de guitarra elèctrica. Així doncs, començant fixant una metodologia de treball per posteriorment obtenir el coneixement necessari per entendre i realitzar un model virtual vàlid, per tal de finalment portar-lo a la pràctica amb les seves respectives fases:

- Implementació del circuit en una placa de proves per tal de detectar falles, i verificar el funcionament d'aquest, intentant sempre trobar millores i optimitzacions.
- Primer prototip del circuit implementat en un circuit imprès, per tal de guanyar experiència en aquest àmbit i evitar errors en futures versions.
- Implementació del circuit final en una PCB, amb la intenció d'arribar a la funcionalitat esperada, posant a prova els resultats obtinguts, comparant-los les simulacions per tal d'arribar a unes conclusions.



Abstract

The following project shows the whole research process and procedure carried out in order to implement an electric guitar amplifier. Thus, starting by setting a working methodology to later obtain the knowledge necessary to understand and make a valid virtual model, in order to finally put it into practice with their respective phases:

- First one, implementation of the circuit on a test board in order to detect faults, and verify its operation, always trying to find improvements and optimizations.
- First prototype of the circuit implemented in a printed circuit, in order to gain experience in this field and avoid errors in future versions.
- Finally, Implementation of the final circuit in a PCB, with the intention of reaching the expected functionality, testing the results obtained, comparing them with the simulations in order to reach some conclusions.



Agraïments:

En primer lloc i sense dubte a la meva família, que m'han donat suport incondicional i ha confiat sempre en mi davant de qualsevol obstacle, ja sigui a nivell acadèmic, com esportiu o emocional, sense ells seria impensable que hagués arribat a l'últim any de la carrera.

En segon lloc a tots els meus amics i amigues de dins i fora de la universitat que m'han acompanyat durant aquests últims anys, i que han influït en la manera que sóc a dia de avui, ja sabeu qui sou, i us ho agraeixo molt.

Al professor Víctor Suñe que per molt que es resisteixi a sortir als agraïments i digui que és la seva feina, la feina es pot fer sempre de moltes maneres i ell sempre ha tingut una excel·lent predisposició a ajudar-me en qualsevol problema que m'he trobat durant el projecte i a trobar un moment per a resoldre'm el que sigui.

Cap pàgina d'aquest projecte es imaginable sense vosaltres, només ús puc donar les gràcies.

ÍNDEX

ÍNDEX DE FIGURES.....	7
ÍNDEX DE TAULES	7
1. Introducció i Motivació	1
2. Mètode de treball:.....	1
2.1 Recerca bàsica:.....	1
2.2 Divisió.....	2
2.3 Concertació	2
3. Decisions de disseny generals.....	2
3.1 Tipus d'amplificador:.....	2
3.1.1 Combo	3
3.1.2 Tipus Capçal.....	3
3.1.3 Tipus digital.....	4
3.1.4 Tria	4
3.2 Tecnologia d'amplificació	5
3.2.1 Transistors	5
3.2.2 Vàlvules	6
3.2.3 Decisió.....	6
3.2.4 Amplificadors transistoritzats versus amplificadors integrats.....	7
4. Etapes generals de l' amplificador dissenyat.....	9
4.1 Etapa preamplificadora:	9
4.2 Etapa de potència:	9
4.3 Etapa de sortida:	10
5. Disseny i especificacions del nostre Circuit:	10
5.1 Consideracions inicials.....	10
5.1.1 Potència:	10
5.1.2 Altaveu.....	10
5.1.3 Voltatge de pic.....	11
5.1.4 Senyal de la guitarra.....	11
5.1.5 Guany	14
5.1.6 Tria del amplificador integrat d'àudio.....	14
5.1.7 Alimentació Lm3886 i Lm4562	14
5.2 Alimentació simètrica o asimètrica	16
5.2.1 Circuit elemental	17
5.2.2 Regulació del Guany de l'amplificador	18
5.2.3 Evitem el corrent de Bias amb R _{bies}	18
5.2.4 Filtre passa alts	20



5.2.5 Filtre passa alts realimentació	21
5.2.6 Filtre passa baixos d'entrada	22
5.2.7 Filtre passa baixos de la realimentació i estabilitat	23
5.2.8 Xarxa Zóbel.....	24
5.2.9 Xarxa Thiele.....	24
5.2.10 Condensadors de desacoblament d'alimentació	25
5.2.11 Esquema circuit funcional bàsic	26
6. Decisió i justificació freqüència i guany	27
6.1 Cas $\omega \simeq \omega_L$	29
6.2 Cas $\omega \simeq \omega_H$	30
6.3 Exemple per a la justificació	31
6.4 Conclusions.....	35
7. Valors i components Proposats	36
7.1 Justificació freqüencial	36
7.1.1 Filtre Passa alts:.....	36
7.1.2 Filtre Passa baixos:	37
7.2 Càlcul i Valors.....	38
7.2.1 Taula de valors.....	40
8. Equalitzador	44
8.1 Funcionament	44
8.2 Filtre passa baixos:	46
8.3 Filtre passa Alts	46
8.4 Filtre passa Banda	47
8.5 Potenciòmetres.....	48
8.6 Sumador	48
8.7 Tria Components.....	49
9. Distorsionador.....	51
9.1 Origen de la distorsió.....	51
9.2 Funcionament	51
9.3 Tipus de Distorsionadors a escollir:	51
9.3.1 Limitador de díodes	51
9.3.2 Limitador de díodes en la realimentació	53
9.3.3 Push Pull	54
9.4 Decisió i tria de components	54
10. Control de Guany i Volum.....	55
10.1 Guany	55
10.2 Volum.....	56

11 Simulacions LTSPICE	58
11.1 Circuit final complet	58
11.1.1 Etapa d'entrada.....	58
11.1.2 Etapa de treball.....	59
11.2.3 Etapa de potència.....	59
11.2 Resposta freqüencial.....	60
11.2.1 Preamplificador	60
11.2.2 Amplificador.....	61
11.3 Guany	62
11.3.1 Preamplificador	62
11.3.2 Amplificador.....	63
11.4 Equalitzador	64
11.4.1 Passa baixos	64
11.4.2 Passa banda.....	66
11.4.3 Passa alts	68
11.5 Distorsionador	70
12. Part experimental Protoboard	71
12.1 Muntatge.....	71
12.2 Problemàtiques	73
12.3 Dissipador LM3886.....	73
12.4 Conclusions	75
13. Disseny PCB.....	76
13.1 Reptes inicials	76
13.2 Versió 1.....	76
13.2.1 Problemàtica.....	78
13.2.2 Resultat, proves i conclusions.....	79
13.3 Versió Final	80
13.3.1 Esquemàtic.....	80
13.3.2 Distribució espacial dels components	82
14. Resultats experimentals.....	90
14.1 Guanys	90
14.1.1 Preamplificador	90
14.1.2 Amplificador.....	91
14.1.3 Oscil·lacions	93
14.1.4 Experiments.....	94
14.2 Ample de banda freqüencial.....	97
14.2.1. Preamplificador	97



14.2.2 Amplificador.....	100
14.3 Equalitzador.....	103
14.3.1. Passa Baixos.....	103
14.3.2 Passa Banda.....	104
14.3.3 Passa Alts:.....	106
14.4 Distorsionador.....	107
15. Conclusions experimentals.....	108
15.1 Propostes de millora del projecte.....	112
16. Bibliografia.....	115

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 2:Foto amplificador tipus capçal.	4
Figura 3:Foto Amplificador Digital.....	4
Figura 4:Transistor del tipus NPN.....	5
Figura 5:Vàlvula electrònica.....	6
Figura 6:Transistors respecte vàlvules.	7
Figura 7:Circuit amplificador AB	8
Figura 8:Esquema general del circuit.	10
Figura 9:Mi sisena corda trast zero.....	12
Figura 10: Mi primera corda, trast zero.	13
Figura 11:Mi primera corda, trast 24.	13
Figura 12: Clipping Voltage vs Supply Voltage Lm3886.	15
Figura 13:Output Voltage vs Supply Voltage Lm4562.	15
Figura 14:Circuit amb alimentació Asimètrica.	16
Figura 15:Circuit elemental alimentat simètricament.	17
Figura 16:Elements que intervenen en guany de l'Opam.	18
Figura 17:Corrent de bias.	19
Figura 18:Circuit amb I _{bias}	19
Figura 19:Circuit càlcul filtre passa alts.....	20
Figura 20:Filtre passa alts a la realimentació.....	21
Figura 21:Filtre passa baixos d' entrada.	22
Figura 22:Filtre passa baixos de la realimentació.....	23
Figura 23:Xarxa Zóbel.	24
Figura 24:Esquemàtic xarxa Thiele.	25
Figura 25:Condensadors de desacoblament d'alimentació	25
Figura 26:Esquema general del circuit esquelètic bàsic funcional.....	26
Figura 27:Esquema general etapes.	27
Figura 28:Forma freqüencial etapes amplificadores que intervenen en els pols.	27
Figura 29:Esquema individual d'una etapa.	28
Figura 30:Recordatori del circuit elemental.....	31
Figura 31:Opam en llaç obert.	32
Figura 32: Resposta freqüencial típica.....	33
Figura 34: Producte de guanys i freqüència de tall superior.	34
Figura 33: Representació dels respectius guanys.	34
Figura 35: Recordatori del circuit elemental bàsic.	40
Figura 36:Circuit condensadors de desacoblament Lm4562.....	42

Figura 37: Circuit amb els components recomanats per al fabricant Lm3886.	43
Figura 38: Rang de freqüències.....	45
Figura 39: Esquema circuit equalitzador.....	45
Figura 41: Banda de pas filtre passa baixos.	46
Figura 40: Esquema filtre passa baixos.	46
Figura 42: Esquema filtre passa alts.....	46
Figura 43: Banda de pas filtre passa alts.....	46
Figura 45: Banda de pas filtre passa banda.	47
Figura 44: Esquema filtre passa banda.	47
Figura 46: Conexió i esquema dels potenciòmetres de l'equalitzador.	48
Figura 47: Circuit sumador.....	48
Figura 48: Circuit limitador de díodes.	52
Figura 49: Variació del senyal de sortida en funció del voltatge senyal d'entrada.	52
Figura 50: Circuit distorsionador amb limitador de díodes en la realimentació.	53
Figura 51: Circuit Push Pull.	54
Figura 52: Circuit control guany.	56
Figura 53: Circuit controlador de volum.	57
Figura 54: Circuit etapa d'entrada.....	58
Figura 55: Circuit etapa de treball.....	59
Figura 56: Circuit etapa final o de sortida.	59
Figura 57: Espectre freqüencial simulat del preamplificador.....	60
Figura 58: Espectre freqüencial simulat del amplificador.....	61
Figura 59: Forma d'ona sortida del preamplificador respecte l'entrada.....	62
Figura 60: Forma d'ona sortida del preamplificador respecte l'entrada	63
Figura 61: Efecte de la branca de baixos de l'equalitzador respecte l'altaveu.	64
Figura 62: Efecte de la branca de baixos de l'equalitzador respecte la sortida del sumador..	65
Figura 63: Efecte de la branca de banda de l'equalitzador respecte l'altaveu.	66
Figura 65: Mesures freqüència superior passa banda respecte l'altaveu.	66
Figura 64: Mesures freqüència inferior passa banda respecte l'altaveu.	66
Figura 66: Efecte de la branca de mitjos de l'equalitzador respecte la sortida del sumador.	67
Figura 68: Mesures freqüència superior passa banda respecte el sumador.....	67
Figura 67: Mesures freqüència inferior passa banda respecte el sumador.....	67
Figura 69: Efecte de la branca d'alts de l'equalitzador respecte l'altaveu.	68
Figura 70: Efecte de la branca d'alts de l'equalitzador respecte la sortida del sumador....	69
Figura 71: Efecte distorsionador simulat.....	70

Figura 72: Prototip placa de proves.	72
Figura 73: Potència dissipada respecte potència de sortida.	74
Figura 74: Esquema i elements refrigerador.	74
Figura 75: Exemple etapa d'entrada.	75
Figura 76: Exemple preamplificador, amb un guany de 39.	75
Figura 77: Exemple funcionament distorsionador.	76
Figura 78: Primer prototip muntat.	77
Figura 79: Arxiu gerber part superior PCB.	79
Figura 80: Esquemàtic del circuit a KiCad.	81
Figura 81: Part superior de la PCB, amb els plans d'alimentació desactivats.	83
Figura 82: Part superior de la PCB, amb els plans d'alimentació activats.	84
Figura 83: Part inferior de la PCB, amb els plans d'alimentació activats.	85
Figura 84: Vista superior model 3D del circuit imprès.	87
Figura 85: Vista frontal model 3D del circuit imprès.	88
Figura 86: Vista inferior model 3D del circuit imprès.	89
Figura 87: Senyal sortida del preamplificador respecte el senyal d'entrada.	90
Figura 88: Senyal sortida del amplificador respecte el senyal de sortida del preamplificador.	91
Figura 89: Senyal de sortida del amplificador respecte el senyal d'entrada.	92
Figura 90: Oscil·lacions senyal de sortida.	93
Figura 91: Bateries emprades per a la font d'alimentació.	94
Figura 92: C ₁ curtcircuitat.	95
Figura 93: Esquema elèctric del circuit RC.	95
Figura 94: Circuit RC real.	95
Figura 95: Valor de referència màxim preamplificador.	97
Figura 96: Freqüència de tall inferior preamplificador.	98
Figura 97: Freqüència de tall superior preamplificador.	99
Figura 98: Valor de referència màxim amplificador.	100
Figura 99: Freqüència de tall inferior amplificador.	101
Figura 100: Freqüència de tall superior amplificador.	102
Figura 101: Freqüència de tall branca baixos.	103
Figura 102: Freqüència de tall inferior branca mitjos.	104
Figura 103: Freqüència de tall superior branca mitjos.	105
Figura 104: Freqüència de tall alts.	106
Figura 105: Senyal de sortida respecte el d'entrada amb el volum al màxim amb el distorsionador actiu.	107
Figura 106: Mi sisena corda trast zero.	109

Figura 107:Re obert de la quarta corda,(trast zero).....	110
Figura 108: Mi de la primera corda, trast 24.	111
Figura 109:Efecte distorsionador respecte el senyal d'entrada a diferent escala	112
Figura 110: Vista superior del circuit físic.	113
Figura 111: Vista lateral del circuit físic.....	114
Figura 112: Vista inferior del circuit físic.	115
Figura 113:Red de zóbel errada	116
Figura 114:Red de zóbel correctament connectada.	116
Figura 116:Part superior PCB, on es veu l'extracció de coure.....	116
Figura 115:Part inferior PCB, via externa.	116

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1:Característiques altaveu.	11
Taula 2: Output Dropout Voltage Lm3886.	14
Taula 3:Característiques Lm4562.....	33
Taula 4:Característiques Lm3886.....	34
Taula 5:Freqüències i guany de tall preamplificador.....	40
Taula 6:Valors preamplificador.	41
Taula 7:Freqüències amplificador.....	41
Taula 8: Valors dels components de l'amplificador.	41
Taula 9:Valors Condensadors desacoblament Lm4562.	42
Taula 10:Valors components recomanats per el fabricant Lm3886.	43
Taula 11:Valors passa baixos.....	49
Taula 12:Valors passa banda.	49
Taula 13:Valors passa alts.....	49
Taula 14:Valors potenciòmetres i etapa sumadora.....	50
Taula 15:Valors controladors de guany i volum.	57
Taula 16: Valors freqüències límits del preamplificador.....	60
Taula 17:Valors freqüències límits del amplificador.....	61
Taula 18:Freqüències límits branca baixos obtingudes amb el Ltspice.	65
Taula 19:Taula de valors simulats de la branca de mitjos.	68
Taula 20:Freqüències límits branca alts.	69
Taula 21: Detalls de fabricació i acabats PCB.	86
Taula 22:Valors de tall preamplificador.....	99
Taula 23:Valors de tall amplificador.....	102



Taula 24: Valors freqüències baixos.....	104
Taula 25: Valors freqüències inferiors simulades mitjos.....	105
Taula 26: Valors freqüències superiors simulades mitjos.....	105
Taula 27: Valors freqüències simulades alts.....	106
Taula 28: Taula comparativa dels valors de guany i freqüències de tall entre els valors teòrics, simulats i reals.....	108



1. Introducció i motivació.

Com la majoria d'estudiants a l'hora d'escollir el TFG no sabia molt bé que triar, per sort vaig anar a veure el Víctor, ja que tenia disponibilitat per acceptar nous projectes i li vaig plantejar algunes idees, la majoria inviables o poc sucoses, així que el Víctor em va proposar la viabilitat d'un amplificador d'àudio. Ràpidament ho vaig trobar una idea brillant i vaig afegir en què fos un amplificador d'àudio per a guitarra elèctrica, ja que jo la toco. Vaig pensar que seria personalment interessant i sobretot més amè de treballar.

Des de la ignorància absoluta, però amb certa prudència vaig pensar que no seria tan complicat, que hi hauria molta informació i moltes persones a les quals podria demanar ajuda cosa en la qual no estava equivocat. Estava segur, però, que estava en bones mans i que d'alguna manera o altre acabaríem aconseguint quelcom interessant.

Aleshores en aquest TFG hem intentat plasmar tot el coneixement que hem anat aprenent a mesura que hem fet recerca sobre amplificadors de guitarra. Des de tota la funcionalitat dels circuits, a tot el que s'ha de tenir en compte a l'hora de fer simulacions digitals, proves en plaques de proves i disseny de PCB. Amb l'objectiu de mostrar tota l'experiència acumulada durant aquest temps.

2. Mètode de treball:

Abans d'explicar com es fa o com funciona un amplificador d'àudio cal situar el coneixement previ que tenia sobre amplificadors d'àudio abans de començar el projecte, el qual era pràcticament nul. Res de termes com les etapes d'amplificació, sensibilitat, guany, potència i un llarguíssim etcètera que s' intentarà explicar en aquest treball de la manera més entenedora possible.

De totes maneres, s'ha de començar el treball per algun punt, i per molt desconeixement que hi hagi, la improvisació i la recerca sempre ajuden.

Per a definir el nostre mètode de treball d'una manera més formal definirem uns passos que involuntàriament hem anat seguint que ens han portat a on som ara:

2.1 Recerca bàsica:

Investigació a trets generals per a saber a què t'enfrontes, que necessites, una mena de creació de llista de la compra. Aquest pas és dona per sobreentès, però és bàsic per a traçar el full de ruta, fonamental per a posteriorment poder utilitzar la gran llei universal en l'enginyeria com és el "divideix i venceràs", venceràs si saps a què t'enfrontes primer i després ja dividiràs i aniràs concretant a mesura que avancis.

Investigar és bàsic, però és recomanat demanar ajuda per tal de no perdre el temps inicialment formant-te amb coses que encara no necessites. Recordo el principi fullejar llibres sobre amplificadors sobre com funcionaven, però jo encara no sabia què necessitava



saber. Així doncs per tal de no perdre una eternitat és molt recomanable demanar ajuda a l'experiència.

Aquest tipus de recerca serveix en qualsevol punt del projecte ja sigui a l'hora de buscar quins tipus d'amplificadors hi ha com més endavant per exemple quan fas recerca de distorsionadors, equalitzadors, etcètera.

2.2 Divisió

Un cop saps més o menys el que necessites, dic més o menys perquè poques vegades sabràs al 100% a què t'encares, però per tal d'avançar has de fer veure una mica que saps el que estàs fent. Si més endavant trobes que falta alguna cosa ja tornaràs endarrere, però inicialment la idea és fer-se un mapa mental el més gran possible.

Un cop has fet recerca i tens un temari que saps què has d'investigar, doncs el més recomanable és fer una llista de les coses en les quals hauràs de profunditzar. Divideix, com més, millor, ja que des del meu punt de vista com més subapartat queda un temari més ben entès queda.

2.3 Concertació

Concertació ho definim, com a indagar amb tot el què pots arribar a necessitar d'un tema en particular. En tot el que necessites, res més si pot ser, per posar un exemple: a l'hora d'escollir un component, doncs saber què fa, com utilitzar-lo i quatre característiques principals ja és suficient però inicialment no cal profunditzar molt detalladament, ja amb la "inèrcia" del conjunt del treball descobriràs si necessites estudiar més o no.

3. Decisions de disseny generals

És el moment de dissenyar un amplificador però sense saber-ho encara se't planteja una sèrie enorme de decisions per prendre. Sumat amb el desconeixement general és una mica fatigant però s'ha d'avançar. Així doncs, vaig decidir començar informant-me de quins tipus d'amplificadors hi ha, d'aquesta manera veuria quin és el més adequat per mi per aquest treball.

Cal puntualitzar quan dic adequat hem refereixo que tingui un estudi relativament assequible i una implementació no massa difícil i que al mateix moment ofereixi una qualitat d'audio suficient, mantenint un cost baix i que sigui transportable.

3.1 Tipus d'amplificador:

Bàsicament, des del punt de vista del consumidor, hi ha tres estructures, que són: el de tipus combo, el capçal i el digital. Cadascun d'aquests té els seus avantatges i inconvenients i cap és millor que la resta, simplement s'ha d'escollir el que s'adapti millor a l'ús que se li dona, no són les mateixes les necessitats d'un principiant a les de un músic que fa concerts cada setmana, o la de una persona amb experiència però que no té gaire pressupost, tot depèn de les necessitats de cada un i les possibilitats són enormes.

3.1.1 Combo

És el més ergonòmic per a músics de principiants, ja que acostumen a ser de mides portables i integren tots les etapes del amplificador: preamplificació, amplificació i etapa de sortida, les quals, posteriorment es descriuran amb detall.

L'únic inconvenient, és que el so és més restringit ja que el fet de que integri totes les etapes, fa que la qualitat de so sol ser inferior, o l'amplificació insuficient.

Tenim doncs que aquest tipus d'amplificadors ofereixen bones prestacions en relació qualitat preu, so i versatilitat. La figura 1, mostra un exemple d'amplificador tipus combo.



Figura 1: Foto amplificador combo.

3.1.2 Tipus Capçal

Aquest tipus d'amplificador, no disposa d'altaveus, només s'encarrega de la preamplificació i de l'etapa de potència del senyal així com els afectes. Aquesta característica però, no és un defecte, ja que aquests amplificadors estan pensats per a guitarristes més experimentats i per tant, la possibilitat de combinar lliurement diferents altaveus és per molts, una característica clau.

El so resulta, és en general més bo ja que aquest altaveu ofereix moltes possibilitats en les seves etapes per a configurar el to i efectes de manera més minuciosa, però a segons quin nivell de músic o pressupost, el fet de tenir l'altaveu separat de l'amplificador és un inconvenient, tal com s'ha comentat, no hi ha cap amplificador millor que l'altre.

És un amplificació més utilitzada en l'àmbit professional. La figura 2, mostra un exemple d'amplificador tipus capçal de vàlvules.



Figura 2:Foto amplificador tipus capçal.

3.1.3 Tipus digital

Se'n diu digital o de modelat i simulen digitalment el so i efectes digitalment. És un tipus d'amplificador relativament recent que ofereix una ampla gama de possibilitats ja que amb prémer pocs botons o mitjançant una interfície visual canvies la configuració de l'amplificador.

Són cada vegada més populars ja que ofereixen les tres etapes principals d'un amplificador juntament amb l'altaveu, i una gamma immensa de sons amb una qualitat que a mesura que augmenta la tecnologia i la popularitat d'aquests, cada vegada és millor. La figura 3, mostra un exemple d'amplificador tipus digital.



Figura 3:Foto Amplificador Digital.

3.1.4 Tria

Finalment en aquell moment vàrem pensar en la meua pròpia experiència sobre amplificadors ja que en tenia dos, un del tipus combo, el Aria ag-10, el qual és un model molt bàsic, totalment per a principiants, i un del tipus digital, el Fender Gt40 el qual és força

més car i de força millor qualitat, a més te una infinitat de possibilitats per a descobrir en quan a la pròpia configuració i creació de sons.

Així doncs vaig descartar directament el de tipus capçal perquè no en tenia cap referència i vaig pensar que seria menys atractiu per un treball de fi de grau, ja que el fet d'utilitzar altaveus externs i seria menys vistós i car. Aleshores s'havia d'escollir entre el digital i el de tipus combo.

El digital tot i estar molt bé i ser molt atractiu, la part de software seria massa complicada i cara.

Així que ens vàrem decantar pel tipus combo, perquè creiem que tot i ser més senzill potser aconseguiria crear quelcom que sonés decentment i servís per aprendre el funcionament d'un amplificador d'audio de la manera més bàsica.

3.2 Tecnologia d'amplificació

Un cop decidit el tipus d'amplificador a realitzar, s'ha d'escollir la tecnologia d'amplificació i n'hi ha dos tipus: basat en vàlvules o en transistors.

3.2.1 Transistors

Un transistor és un dispositiu semiconductor que s'utilitza per amplificar o canviar senyals electrònics i energia elèctrica. Aquests estan composts de material semiconductor normalment amb almenys tres terminals per a la connexió a un circuit extern. Un voltatge o corrent aplicat a un parell de terminals del transistor controla el corrent a través d'un altre parell de terminals. Com que la potència controlada (de sortida) pot ser superior a la potència de control (d'entrada), un transistor pot amplificar un senyal. Figura 4 mostra com és un transistor del tipus NPN.

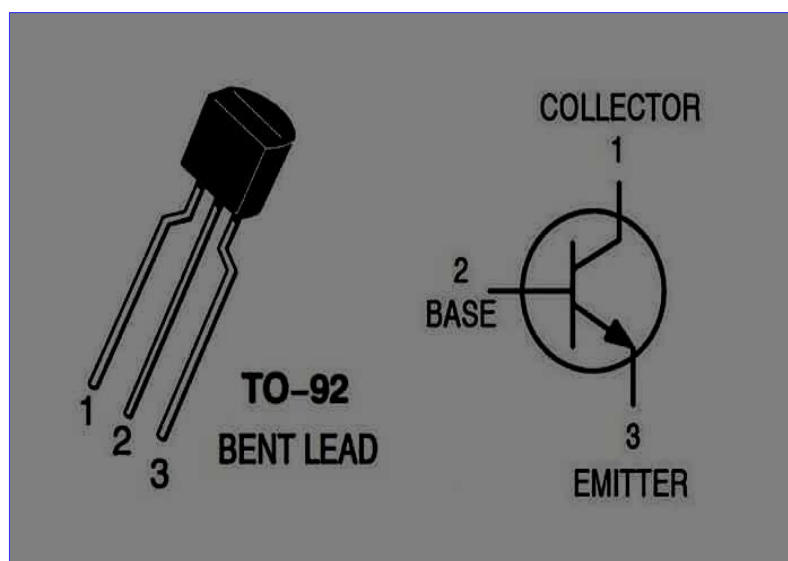


Figura 4: Transistor del tipus NPN.

3.2.2 Vàlvules

Una vàlvula o dispositiu de buit, és un dispositiu electrònic que controla el flux de corrent elèctric en un elevat buit.

El tub termoiònic o vàlvula termoiònica utilitza el fenomen de l'anomenat efecte Edison o efecte termoiònic d'electrons d' un càtode calent, i s'utilitza per a diverses funcions electròniques fonamentals, com ara l'amplificació del senyal i la rectificació de corrent.

L'efecte Edison o efecte termoiònic consisteix en l'augment del flux d'electrons que surten d'un metall o d'un òxid metàl·lic, a causa de les vibracions dels àtoms motivada per l'augment de la temperatura. En augmentar la temperatura del metall o l'òxid metàl·lic per sobre del zero absolut, hi ha una més gran facilitat perquè surtin els electrons. Les partícules carregades s'anomenen termions. Figura 5 mostra com és un vàlvula de buit.



Figura 5: Vàlvula electrònica.

3.2.3 Decisió

Un amplificador basat en vàlvules és considera de major qualitat ja que aquestes ofereixen una millor sensibilitat i al ser components no tant perfectes com els transistors es diu que produeixen més harmònics, la qual cosa és tradueix en un major sensació acústica i un so més embolcallant.

L'inconvenient d'aquestes és que resulten en un amplificador més pesat i de més mida ja que aquestes vàlvules són força grans, són molt cares en comparació als transistors i requereixen de manteniment a la llarga.

A més per tal que puguin funcionar correctament s'han d'escalfar durant una estona prèviament.

Per un altre costat, els transistors tot i no oferir una qualitat de so tant bona, són tot el contrari en quan a preu, mida, i manteniment.

Per tant, tot i que seria molt interessant estudiar el funcionament de les vàlvules, o realitzar una comparació entre transistors i vàlvules (Fig.6), degut a la nostre inexperiència i a que estem parlant d'un treball de fi de grau, la decisió va ser evident, s'utilitzarà amplificació basada en transistors.

Així doncs de moment tenim a realitzar un amplificador de guitarra del tipus combo basat en transistors.



Figura 6: Transistors respecte vàlvules.

3.2.4 Amplificadors transistoritzats versus amplificadors integrats

Arribats en aquest moment calia fer una investigació sobre circuits amplificadors basats en transistors, el problema que apareixia és que hi havia una diversitat immensa de circuits amb un gran ventall d'avantatges i inconvenients els quals si preteníem ser molt específics ens aniria molt bé, però partint de la inexperiència, el que més ens interessava és per sobre de tot els circuits que fossin senzills.

Per tant en lloc de discutir si implementàriem un circuit A, B, AB, C o D, així fins a la T, vàrem optar per utilitzar amplificadors d'àudio integrats pels grandíssimes avantatges que ens oferien respecte a fer el l'estudi i disseny d'un circuit complet, aquestes avantatges són els següents:

- Tot i que els amplificadors d'àudio integrats són interiorment circuits molt complexos, aquests venen encapsulats, acompanyats d'un full de característiques que et guia amb tot el relacionat amb el seu funcionament.

- Un avantatge que tenen els amplificadors d'àudio integrats és que si es fan malbé o fallen, són molt fàcils de substituir, sobretot en Protoboards o en sòcols per a les PCB. Això ha de comparar-se amb trobar l'error en un circuit, on els circuits amplificadors d'àudio transistoritzats poden arribar a ser extensos. La figura 7, mostra un exemple d'un circuit amplificador AB, per tal de mostrar la quantitat de components que en formen part i a quantitat de possibles falles que podria tenir.

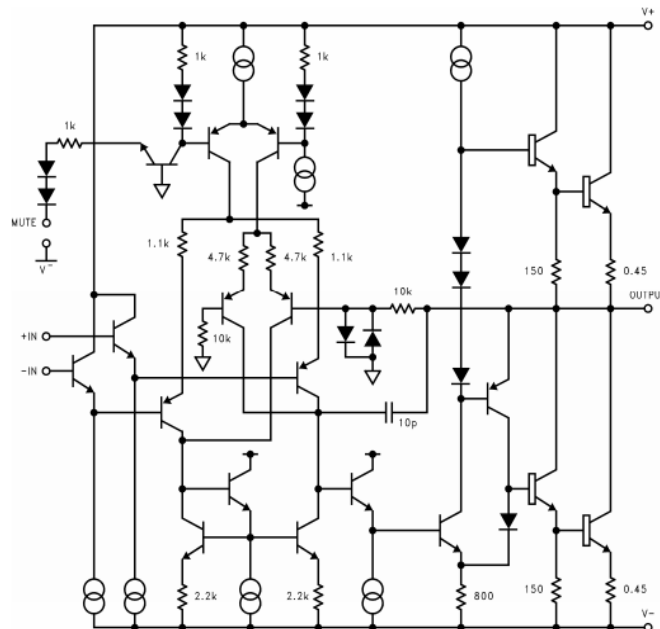


Figura 7: Circuit amplificador AB

- Els encapsulats ocupen poc espai.
- Són relativament barats respecte la seva funcionalitat i les nostres necessitats.

Així doncs, per aquestes avantatges, vàrem decidir utilitzar amplificadors d'àudio integrats. Val a dir, que aquesta decisió també estava dictada pel desig de, no només facilitar el disseny i la implementació, sinó també per intentar fer un circuit el màxim de modular possible, que tant permeti detectar els errors que pugui tenir fàcilment, sinó que també permeti una fàcil justificació del seu funcionament ben didàctica.



4. Etapes generals de l' amplificador dissenyat

Abans de seguir amb l'explicació de com vam prendre les primeres decisions sobre el disseny del circuit amplificador i quines van ser, cal explicar la petita recerca que vam fer sobre les etapes d'un amplificador de potència.

Aquesta recerca és important perquè a partir d'allà, vam fer-nos un esquema mental general del que necessitàvem per al funcionament de l'amplificador a trets generals, i que per tant, també pot servir per a ubicar el lector.

Com s'ha esmentat anteriorment en un amplificador de tipus combo tenim tres etapes: una etapa preamplificadora, una etapa d'amplificació o de potència i l'etapa de sortida.

Es fa aquesta diferenciació en etapes perquè en moltes aplicacions l'ús d'una sola etapa amplificadora no és suficient per a elevar el senyal d'entrada al nivell desitjat, ja que si intentem elevar un senyal per sobre del límit de l'amplificador operacional, aquest produirà distorsió. A més, hem d'intentat mantenir el circuit el més bàsic possible, ja que els elements passius i la realimentació a altes freqüències entre altres factor, acaben condicionant la qualitat del amplificador.

Per aquesta motiu s'utilitzen diferents etapes amplificadores acoblades adequadament amb el fi de originar la mínima distorsió obtenint el màxim rendiment de cada amplificador, mantenint sempre el soroll al mínim.

4.1 Etapa preamplificadora

És la primera etapa amb la que topa el senyal d'entrada de la guitarra; és caracteritzada per ser on es fa la primera amplificació cap a el senyal de treball, és a dir partim d'un senyal de l'ordre de milivolts d'amplitud mitjana, i l'amplifiquem per tal de poder-hi treballar posteriorment, és a dir, per poder controlar el to del senyal, afegir-hi distorsions, equalitzacions i qualsevol tipus de variació del senyal original.

En aquesta etapa podem realitzar el control de guany, que és la quantitat de senyal que s'envia a l'etapa preamplificadora inicial.

4.2 Etapa de potència:

En aquesta etapa és on s'aconsegueix elevar el nivell del senyal suficientment, com per excitar l'altaveu de sortida. Hem de tenir en compte que ens arriba un senyal on s'han aplicat diverses modificacions, algunes de les quals fins i tot, redueixen la mida d'aquest senyal, i per tant aquest és insuficient per a entregar una potència raonable a l'altaveu. Per tant el que es fa en aquesta etapa, és elevar el senyal per tal d'enviar la quantitat de potencia total desitjada a l'altaveu. Aquesta quantitat, depèn de dos factors, de l'amplificador de potència, i del control de volum.

4.3 Etapa de sortida:

L'etapa de sortida és l'etapa final en la que s'entrega el senyal resultant a l'altaveu. Aquesta etapa té l'objectiu de transferir aquesta potència a l'altaveu amb una pèrdua mínima, protegint l'equip de les càrregues inductives de l'altaveu. La figura 8, mostra l'esquema general del nostre circuit.

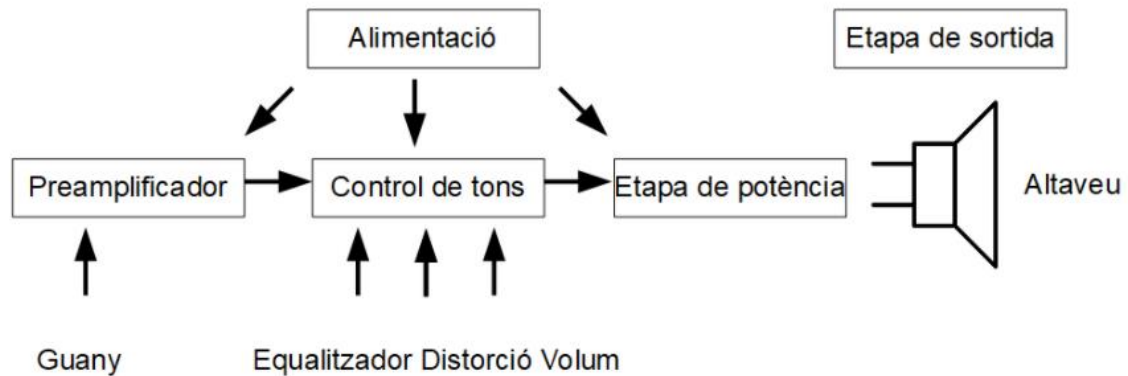


Figura 8: Esquema general del circuit.

5. Disseny i especificacions del nostre Circuit

5.1 Consideracions inicials

En aquest apartat es tractaran les consideracions més importants prèvies a tenir en compte a tenir en compte a l'hora de fer el disseny d'un amplificador.

5.1.1 Potència

El factor més important a l'hora d'escollir o dissenyar un amplificador de guitarra elèctrica, és l'ús que se li donarà. A partir d'aquí podrem saber la potència que necessitarem, ja que no s'utilitza la mateixa potència per un amplificador domèstic (3-15W) a el d' una sala de concerts (20-50W) o la d' un estadi (+50W).

En el nostre projecte vàrem fixar inicialment una potència de 30W per tal de tenir un amplificador que s'ajustés a diferents necessitats, sense que aquesta potencia fóra insuficient. Pel que fa a potència, si després en un futur necessitéssim ajustar els valors per tal de reduir o augmentar aquesta ho considerariem.

5.1.2 Altaveu

En quan al altaveu, aquest com a mínim haurà de ser capaç de reproduir amb fidelitat freqüències de entre 82Hz i 1344Hz que són els dos extrems de freqüències que es poden reproduir en la majoria de guitarres (vegeu apartat. 5.1.4). De totes maneres però, per tal

de reproduir música provinent de telèfons o qualsevol dispositiu, seria convenient que fóra capaç de reproduir satisfactòriament freqüències de tot l'espectre audible, és a dir de 20Hz a 20000Hz.

La grandària de l'altaveu, té a veure amb el rang de freqüències el qual va destinat a reproduir: Un altaveu de gran diàmetre, tindrà més facilitat en reproduir freqüències baixes, i un altaveu més petit, reproduirà millor les freqüències elevades. La taula 1, mostra les característiques de l'altaveu escollit.

Sistema de reproducció:	Mono
Impedància nominal:	4Ω
Potència màxima:	50W
Potència nominal:	30W
Sensibilitat	90dB
Freqüència de resposta	20-20 kHz
Diàmetre	8"

Taula 1: Característiques altaveu.

La sensibilitat de l'altaveu es mesura en dB, i significa com de bé un altaveu converteix la potència de l'amplificador en energia acústica i per tant és una característica important a tenir en compte a l'hora d'escollir un altaveu.

5.1.3 Voltatge de pic

Cal clarificar que tot i tenir dos etapes que aniran alimentades a diferents tensions, la tensió que hem de tenir present a l'hora de fer el disseny inicial de l'amplificador, és l'alimentació que sortirà de l'etapa de potència que és la que excitarà l'altaveu.

Suposant una tensió sinusoidal en borns de l'altaveu de 4Ω d'impedància, per tal que la potència elèctrica mitjana sigui de 30W cal que l'amplitud o valor de pic del senyal valgui 15,5 V aproximadament.

$$P_O = \frac{V_{O_{PIC}}^2}{2R_L} \rightarrow V_{O_{PIC}} = \sqrt{30W \cdot 2 \cdot 4\Omega} = 15.49V$$

5.1.4 Senyal de la guitarra

En quan a freqüència, si tan sols atenem a les seves notes fonamentals de la guitarra aquestes van des del mi2 de 82,4 Hz (Fig.9), tot i que en molts estils de música és baixa l'afinació varis semitons, fins a la nota més aguda de la guitarra elèctrica, el RE6 de 1.174,7Hz per les guitarres de 22 trasts i un MI6 de 1.318,5 Hz, (Fig. 11) per la de 24 trasts en l'afinació estàndard per ambdues guitarres de sis cordes. La figura 10 mostra el Mi del trast zero, primera corda per tal de mostrar una nota d'entremig.

Quan parlem de trast de la guitarra ens referíem a cada una de les divisions que hi ha en el diapasó de la guitarra, és a dir, cada possible nota, les quals consecutivament suposen una variació d'un semitò.

Prenent la nota més greu possible i el segon harmònic de la nota més aguda hauríem de tenir una ample de banda de 70Hz fins a 1350Hz minuciosament, la resta de senyal provinent de la guitarra serà de soroll electromagnètic, soroll tèrmic o de ressonàncies pròpies de la fusta que és capaç de produir subharmònics. Aquestes senyals haurien de ser filtrades en les diferents etapes de l'amplificador.

Per tal de no perdre qualitat en l'àudio però, i garantir una bona qualitat en cas que s'utilitzi com entrada d'àudio, el senyal provinent d'un dispositiu diferent a una guitarra, augmentarem l'ample de banda, per tal de no perdre qualitat en els harmònics.

En quan a l'amplitud del senyal, aquest depèn de nombrosos factors, tals com, el model i tipus de guitarra, la posició i el tipus de pastilla seleccionada, l'alçada i gruix de les cordes, la posició dels potenciòmetre de la guitarra, i de la força, així com la tècnica utilitzada per interpretar al tocar entre molts altres factors.

Per al nostre projecte però, el que ens interessa és saber de mitjana en quins rangs es mou el senyal de la guitarra per tal de determinar quin voltatge de pic de sortida tindrem i quin guany necessitarem.

Fent probes amb la guitarra connectada a un voltímetre, hem observat, que l'amplitud de la senyal pren valors mitjans d'entre 30mV fins als 250mV d'amplitud de pic a pic, amb pics esporàdics de 400mV i 500mV aproximadament.

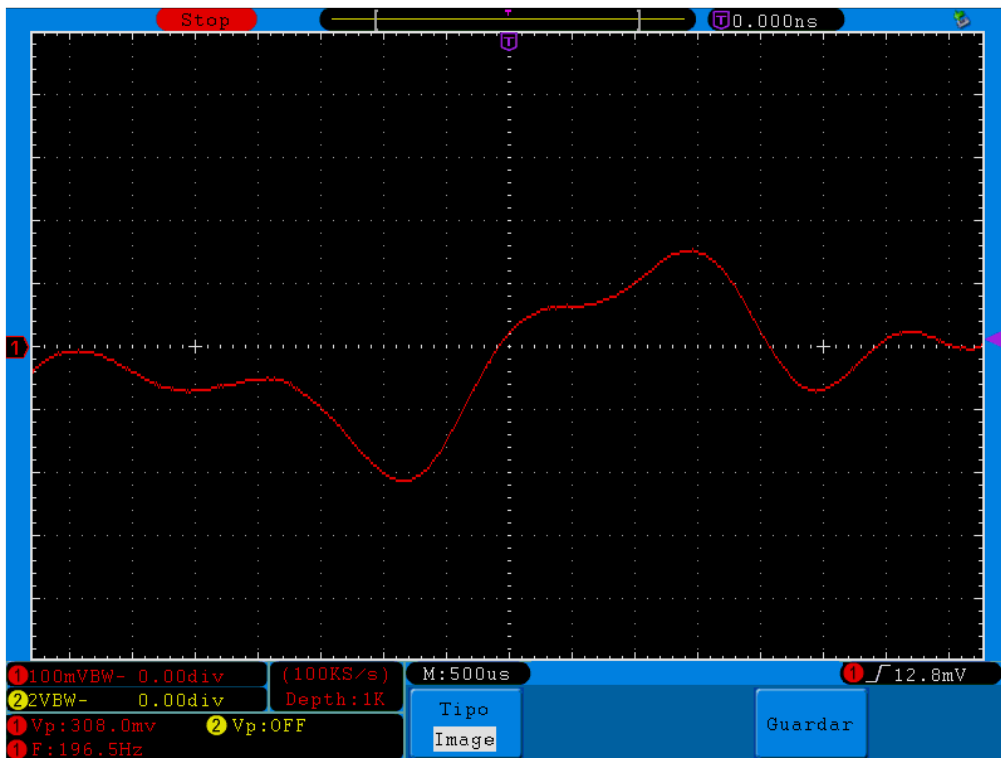


Figura 9:Mi sisena corda trast zero.

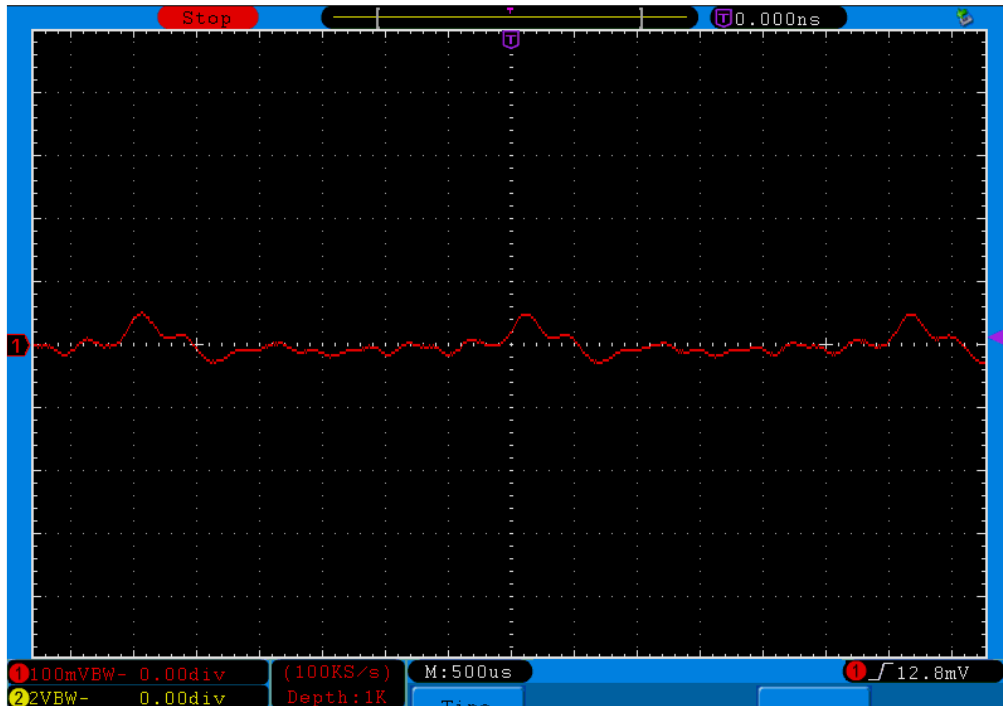


Figura 10: Mi primera corda, trast zero.

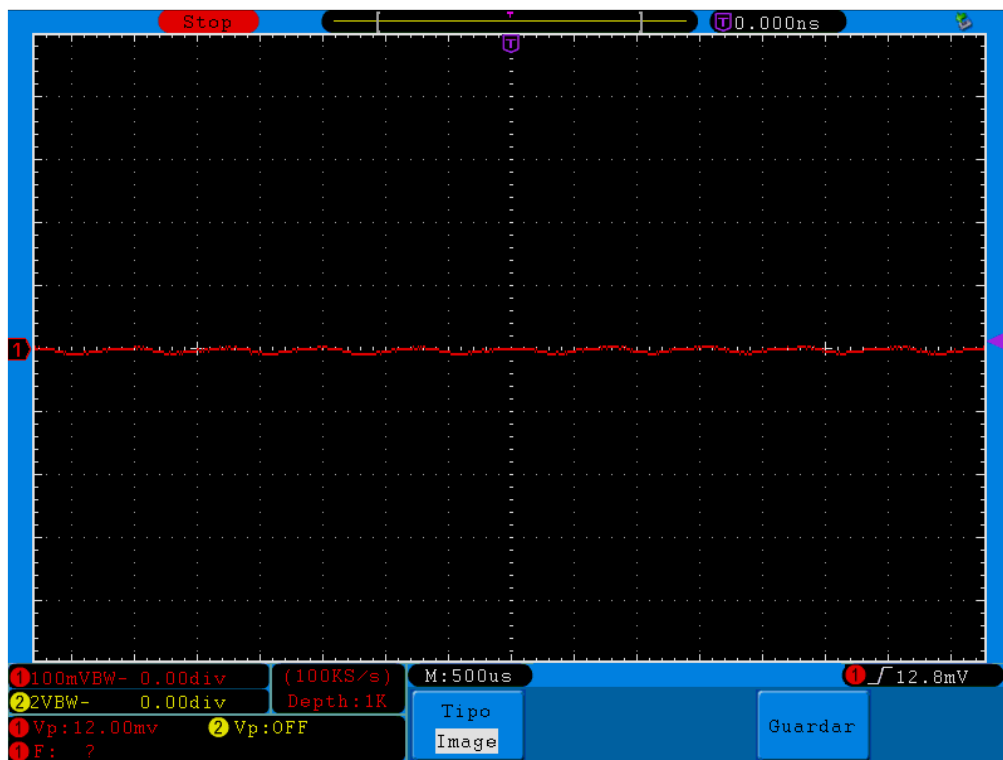


Figura 11:Mi primera corda, trast 24.

5.1.5 Guany

Amb el guany, és a dir la relació entre la sortida i la entrada, partim de que el voltatge del senyal provinent de la guitarra és de l'ordre de milivolts, d'entre 100mV a 200mV de mitja amb pics esporàdics de 400mV, i que a la sortida de potència esperàvem tenir un valor de pic de 15.49V. Com es mostrarà posteriorment (Apartat.5.1.7) però, degut a l'alimentació dels amplificadors operacionals, requerim un voltatge de sortida màxim de 20V, així doncs requeríem un guany total de aproximadament:

$$G = \frac{20V}{0.1V} = 200$$

Caldria ara, trobar un amplificador d' àudio integrat que fóra capaç de dur correctament aquesta amplificació.

5.1.6 Tria del amplificador integrat d'àudio

En quan a la tria del amplificador integrat d'àudio, ens vam imposar com a consigna, que fos disponible a través dels proveïdors de la UPC, que no estigues obsolet, fora barat i tingués bones prestacions i que a més a més, era important que aquest tingués un model Ltspice per tal de poder començar a treballar amb les simulacions virtuals. Finalment després de fer recerca, vam acabar escollint el Lm3886.

Sobre el Lm3886, és un amplificador operacional que porta molts anys al mercat, que ha anat evolucionant i per tant és molt recomanat, ja que ofereix una gran qualitat de so, a un nivell de soroll molt baix i gran fidelitat entre altres.

Tanmateix, el circuit integrat del Lm3886 no pot configurar-se perquè tingui un guany de de 200. Això ens va dur a recercar un amplificador operacional de baixa distorsió amb el què implementar l'etapa preamplificadora. Vam seleccionar Lm4562.

En quan al Lm4562, és també un amplificador operacional de molta alta fidelitat, aïlla molt be els sorolls i és força barat i utilitzat per àudio. A més, que per la fase preamplificadora, no requerim tanta capacitat d'amplificació. També que el Lm4562, té un encapsulat dual, el qual ens podria ser útil per altres usos en el circuit no estrictament amplificadors. Com veurem més endavant tal com a sumadors, seguidors i reguladors de guany entre altres.

5.1.7 Alimentació Lm3886 i Lm4562

Com s'ha comentat anteriorment, tenim un voltatge de pic a la sortida de uns 15,5V. Hem de tenir en conte però, el drop-out voltatge del Lm3886, D'acord amb la taula 2 i Fig.12 obtingudes del full de dades del Lm3886 tenim:

$V_{od}^{(B)}$	Output Dropout Voltage ⁽⁹⁾	$ V^+ - V_O , V^+ = 28V, I_o = +100 \text{ mA}$ $ V_O - V^- , V^- = -28V, I_o = -100 \text{ mA}$	1.6 2.5	2.0 3.0	V (max) V (max)
----------------	---------------------------------------	---	------------	------------	--------------------

Taula 2: Output Dropout Voltage Lm3886.

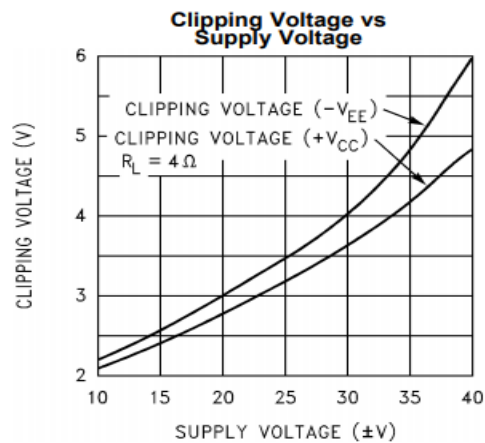


Figura 12: Clipping Voltage vs Supply Voltage Lm3886.

Aleshores la tensió de caiguda de sortida (drop-out voltatge), és la tensió d'alimentació menys la tensió de retallada

Per a l'etapa preamplificadora, com ja s'ha comentat, en la que utilitzarem el Lm4562, utilitzarem un voltatge de $\pm 15V$, valor el qual s'ha escollit partint de que la alimentació màxima del Lm4562 és de $\pm 17V$, i el fabricant en el full de dades recomana, alimentar-lo a ± 15 . Valor que per al moment prevèiem que seria suficient per alimentar l'etapa preamplificadora ja que pensàvem repartir el guany amb 10 per a l'etapa preamplificadora i 20 per la de potència.

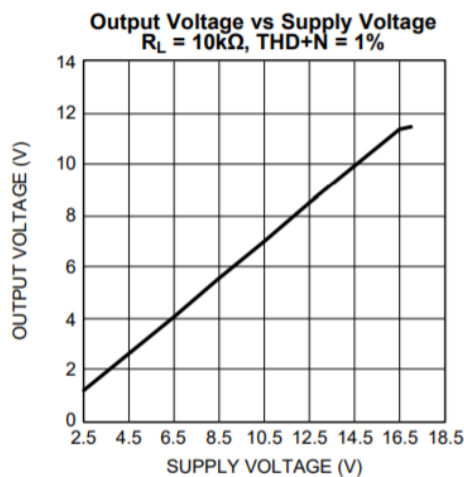


Figura 13: Output Voltage vs Supply Voltage Lm4562.

Posteriorment però, ens vam trobar amb el problema de que els propis amplificadors operacionals actuaven com a filtres passa baixos, i que per tant havíem d'ajustar el guany de manera adequada per tal d'obtenir l'espectre freqüencial desitjat (Apartat.6).

5.2 Alimentació simètrica o asimètrica

En aquest punt de recerca, érem conscients que necessitàvem trobar un circuit basat en amplificadors operacionals que ens permetés amplificar el senyal d'audio provinent de la guitarra en almenys dues etapes, així que ens vam posar a buscar i vàrem trobar un patró comú.

Hi havia dos tipus de circuits, un alimentat amb tensió simètrica i una altre tipus amb asimètrica. Tot i semblar un petit detall, la manera d'alimentar un circuit obliga a fer diferents modificacions en el disseny.

Així doncs vam decidir trobar les equacions de cada circuit per tal de veure matemàticament quin ens semblaria més assequible de dissenyar i de profunditzar-hi.

Un cop vista la justificació de cada circuit, ens va semblar que el circuit amb alimentació simètrica tenia una matemàtica més evident i senzilla, que ens permetria obtenir les expressions del circuit més fàcilment. A més, i de motiu de més rellevància, a la pràctica, el circuit d'alimentació asimètrica, comporta l'ús d'un condensador d'acoblament força gran el qual és car. Per tot lo esmentat anteriorment doncs, vàrem escollir alimentar el nostre circuit amb **alimentació simètrica**.

La figura 14 mostra un exemple d'un amplificador alimentat amb alimentació asimètrica.

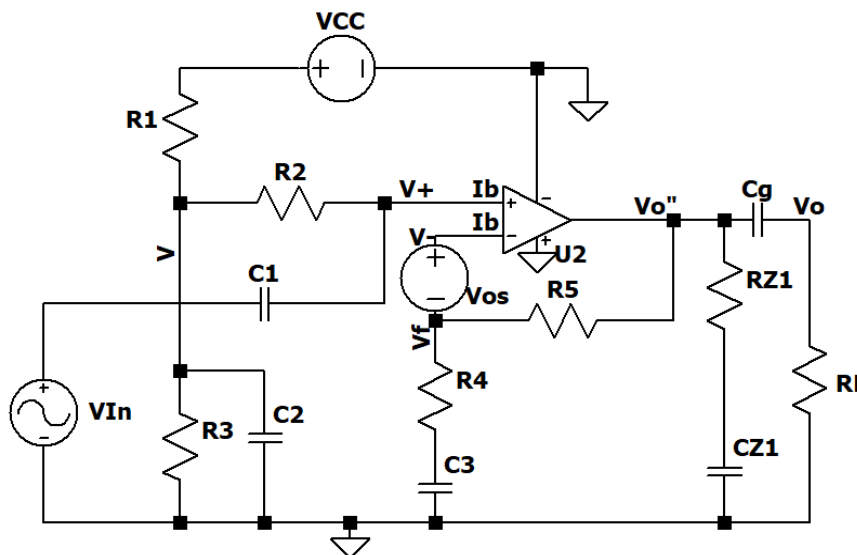


Figura 14: Circuit amb alimentació Asimètrica.

5.2.1 Circuit elemental

La diferència d'aquest circuit amb el d'alimentació asimètrica, és que no hem de trobar cap mecanisme per tal de afegir-li un offset al senyal d'entrada.

Aquí simplement utilitzem l'amplificador operacional de manera convencional, l'acompanyem d'unes resistències per a graduar el guany d'aquest i uns filtres per regular l'amplada de banda freqüencial desitjat del circuit i així evitar sorolls, a més d'utilitzar elements de protecció i estabilitat.

Per a fer la justificació del circuit alimentat amb tensió simètrica ho farem tram per tram, explicant el funcionament de cada component.

La figura 15, mostra l'esquema bàsic funcional del circuit, (de fet, seria tan sols l'etapa de potència, amb el senyal de la guitarra com a V_{in}), el qual a certs nivells de potència podria funcionar però per al nostre cas real, hem d'utilitzar dues etapes iguals connectades en sèrie.

Per facilitar l'estudi i comprensió d'aquest però, de moment ho farem desgloçant una sola etapa.

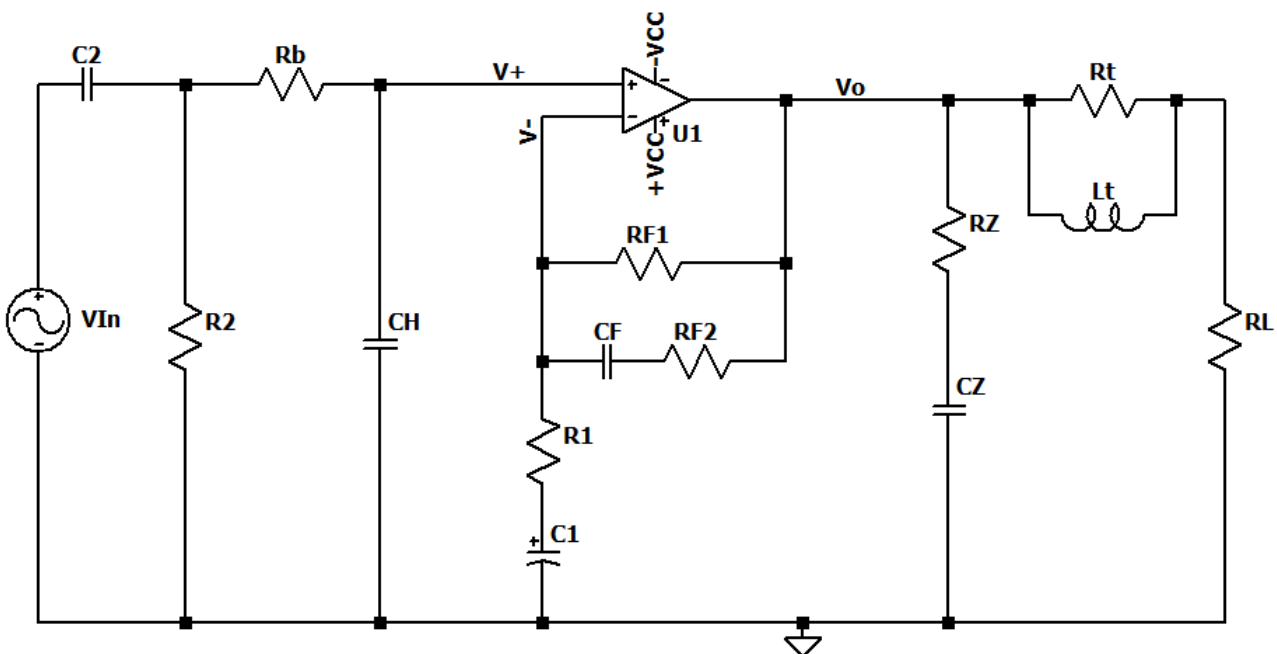


Figura 15: Circuit elemental alimentat simètricament.

5.2.2 Regulació del Guany de l'amplificador

Amb R_1 i R_{F1} podem canviar els valors del guany de l'amplificador. Aquestes dues resistències formen un divisor de voltatge entre V_{OUT} i massa, i per tant podem saber la tensió a l'entrada inversora de l'amplificador operacional (-), el qual pel curtcircuit virtual, és idèntic a l'entrada no inversora. A la figura 16, trobem el circuit desglossat que fa referència a la configuració del guany de l'amplificador operacional.

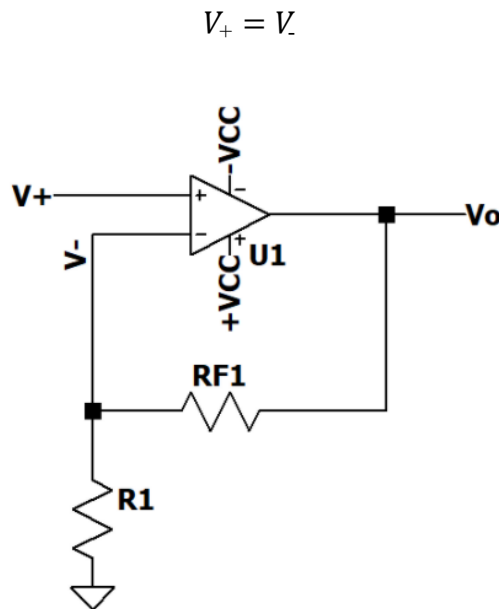


Figura 16: Elements que intervenen en guany de l'Opam.

$$\frac{0 - V_+}{R_1} = \frac{V_+ - V_{out}}{R_{F1}}$$

Aleshores el guany de l'amplificador és:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_{F1}}{R_1}$$

5.2.3 Evitem el corrent de Bias amb R_bies

Un cop tenim el guany, determinem el corrent d'entrada bias. Això ho determinem amb el valor de R_2 i R_b .

Quan en les entrades del amplificador hi ha diferents intensitats, és produeix una diferencia de voltatge que aquest s' amplificarà com a soroll. En l'amplificador ideal aquest valor és de 0, però en el món real hem d'intentar que aquest valor sigui el més petit possible.

Aleshores el que s'ha de fer és posar una altre resistència a l'entrada de V_+ que juntament amb R_2 en sèrie equivalguin al valor de R_{f1} . No ha de ser el valor exacte però si que pròxim per tal d'evitar IBIAS. La figura 17, mostra on tenim el corrent de bias.

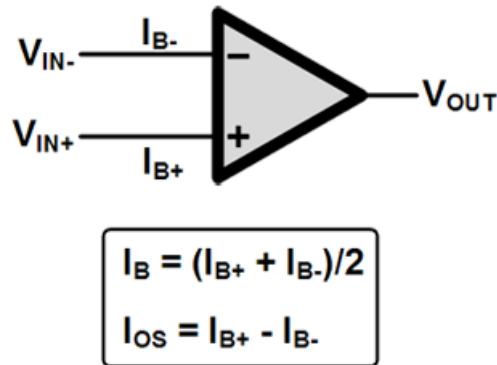


Figura 17: Corrent de bias.

Com a recordatori, el corrent de bias, és la mitjana dels corrents que entren pels terminals inversor i no inversor de l'Opam. La figura 18, mostra el circuit explicatiu del càlcul del corrent de bias.

I_{OS} , "input offset current", és la diferència entre els dos corrents de Bias de cada terminal, aquest només és significant quan el valor de dels corrents de Bias són raonables. Tenim doncs:

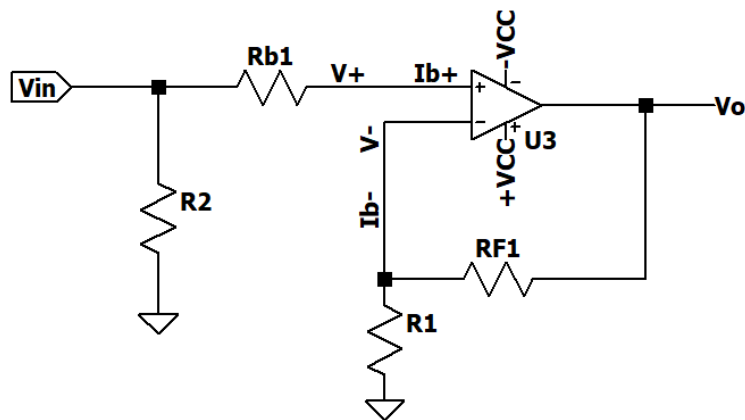


Figura 18: Circuit amb Ibias.

$$V_+ = V_-$$

$$(R_2 + R_b) \cdot I_b = R_{F1} \cdot I_b$$

Per tant tenim que la suma de de les dos resistències en sèrie ha de ser igual a R_f .

$$R_2 + R_b = R_{F1}$$

5.2.4 Filtre passa alts

La seva funció principal és bloquejar qualsevol corrent continu present a la font d'àudio, alhora que permeti passar el senyal d'àudio. Cal bloquejar el corrent continu a la font emissora d'àudio o bé s'amplificarà juntament amb el senyal d'àudio i crearà un offset continu als altaveus. Aquest fet, distorsiona i embruta el senyal d'àudio resultant, cosa que no volem per raons òbvies, D'aquesta manera doncs, configurarem l'ample de banda del nostre amplificador i mantindrem l'estabilitat així com bloquejarem també els sorolls externs. Aquest filtre l'aconsegüim afegint un condensador a l'entrada, amb R_2 . La figura 19, mostra el circuit amb el filtre passa alts d'entrada format per C_2 i R_2 .

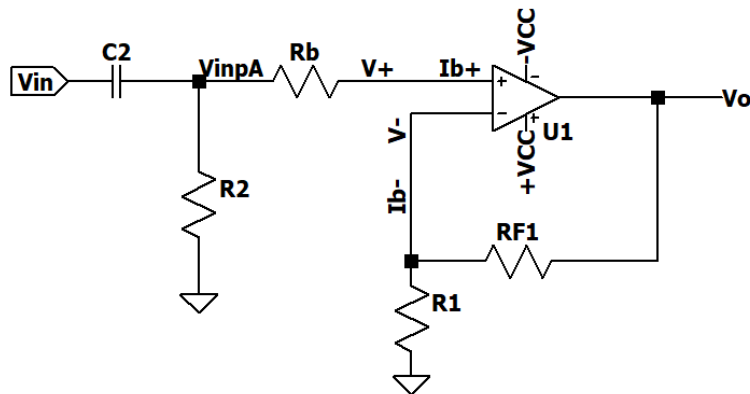


Figura 19: Circuit càlcul filtre passa alts.

Tenim:

$$\frac{V_{inpA}}{V_{in}} = \frac{R_2}{Z_{C_2+R_2}} = 0$$

$$\frac{1}{sC_2} + R_2 = 0$$

Per tant la freqüència de tall inferior és:

$$F_L = \frac{1}{2\pi C_2 R_2} \rightarrow \in [5 \sim 10] Hz$$

5.2.5 Filtre passa alts realimentació

Existeix un altre possible lloc per a posar un filtre passa alts, i és a la realimentació. La freqüència de tall d'aquest filtre ha de ser de 2 a 5 vegades inferior a la f_L (freqüència de tall) del filtre passa alts C_2 i R_2 a l'entrada. Si la f_t d'aquest filtre és superior a f_L , l'amplificador

passarà les freqüències baixes al bucle de retroalimentació que no ha pogut atenuar. Això crearà una tensió a través de C_1 i farà que aparegui tensió DC a l'entrada d'inversió, que s'amplificarà i provocarà distorsió. Per tant, el filtre d'entrada (C_2 i R_2) ha de determinar la freqüència d'amplada de banda inferior dominant de l'amplificador, no pas el filtre de bucle de retroalimentació (C_1 i R_1).

El filtre d'entrada defineix l'extrem inferior de l'amplada de banda del circuit, però C_1 encara té un efecte sobre la resposta dels greus. Amb valors més petits de C_1 , el baix serà més suau i tindrà menys impacte, però amb valors més grans de C_1 , el baix serà més sec i tindrà més impacte. La figura 20, mostra el filtre passa alts a la realimentació de l'amplificador operacional.

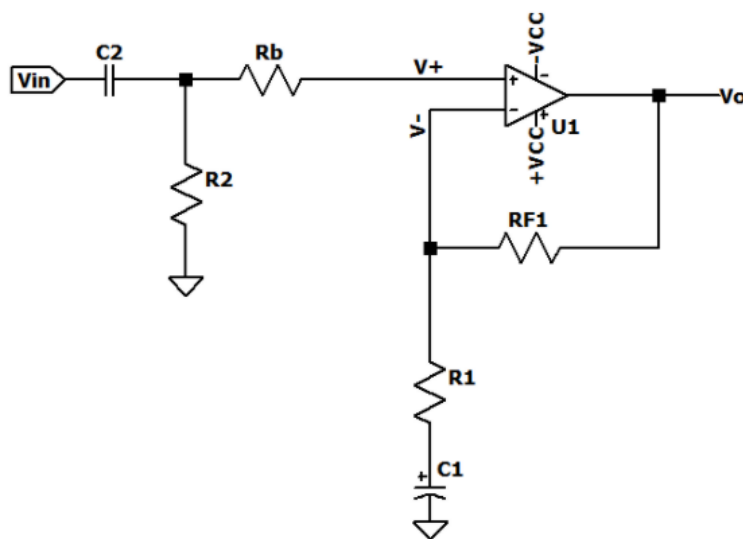


Figura 20: Filtre passa alts a la realimentació

Tenim:

$$V_+ = V_-$$

$$\frac{V_+ - 0}{R_1 + Z_{C1}} = \frac{V_+ - V_{out}}{R_{F1}}$$

Per tant la freqüència de tall inferior del filtre de la realimentació serà:

$$F_{LF} = \frac{1}{(2\pi C_1 R_1)} \rightarrow F_{LF} = \frac{F_L}{X}, X \in [3 \sim 5]$$

5.2.6 Filtre passa baixos d'entrada

Amb aquest filtre, eliminem les interferències electromagnètiques captades pels cables d'entrada i filtra les freqüències de ràdio, també però, establirà el límit superior de l'amplada de banda del circuit. Aquest filtre l'obtidrem afegint a un condensador connectat a massa posterior a R_b .

Per tant aquesta freqüència ha d'estar situada molt per sota de la freqüència més baixa del tipus FM, és a dir, per sota dels 88MHz aproximadament i per sobre dels 20kHz que pot sentir l'orella humana. En el nostre cas escollim estarem entre els 80 i 90kHz. La figura 21 mostra el circuit amb elements que es fan referència.

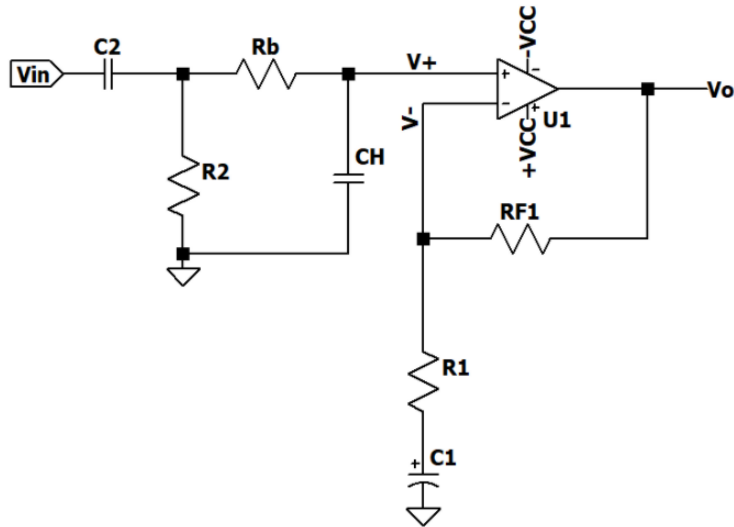


Figura 21: Filtre passa baixos d' entrada.

La freqüència de tall del filtre passa baixos a l'entrada serà:

$$F_H = \frac{1}{2\pi R_b C_H}$$

5.2.7 Filtre passa baixos de la realimentació i estabilitat

R_{F2} i C_F s'utilitzen per reduir el guany de CA a altes freqüències, és a dir es comporten com a filtre passa baixos. La figura 22 mostra l'esquema elèctric dels elements els quals es fan referència.

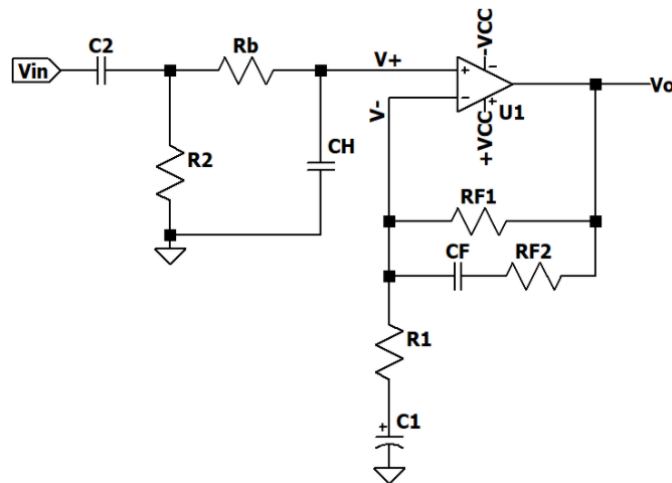


Figura 22: Filtre passa baixos de la realimentació.

$$V_{in} = V_+ = V_-$$

$$\frac{0 - V_{in}}{R_1 + Z_{C2}} = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_{F1} \parallel (R_{F2} + Z_{CF})}$$

$$V_{in} * R_{F1} \parallel (R_{F2} + Z_{CF}) = (V_{in} - V_{out})(R_1 + Z_{C2})$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + R_{F1} \parallel (R_{F2} + Z_{CF})$$

Finalment tenim, del denominador obtenim:

$$F_{HF} = \frac{1}{2\pi C_F (R_{F1} + R_{F2})}$$

5.2.8 Xarxa Zóbel

La xarxa Zóbel (Fig.23) s'utilitza per evitar oscil·lacions causades per càrregues inductives. També impedeix que les freqüències de ràdio captades pels cables que van cap als altaveus tornin a l'entrada inversora de l'amplificador a través del bucle de retroalimentació.

A altes freqüències, la impedància de C_z és molt baixa, de manera que el corrent d'alta freqüència queda curtcircuitat a terra. R_z limita el corrent d'alta freqüència, de manera que no hi ha un curtcircuit directe a terra, que podria superar el límit de l'amplificador operacional.

Es poden escollir valors més petits de R_{zn} que fan que la xarxa Zóbel sigui més eficient en el filtrat de freqüències de ràdio, però també augmenta la freqüència de tall que es tradueix com una reducció de l'efectivitat. Els valors d'aquests components venen donats segons les recomanacions del fabricant en el full de característiques, en l'apartat d'aplicacions típiques.

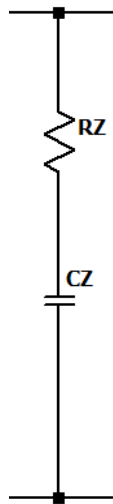


Figura 23: Xarxa Zóbel.

5.2.9 Xarxa Thiele

Mentre que la xarxa Zóbel redueix les oscil·lacions causades per càrregues inductives, la xarxa Thiele (Fig.24) redueix les oscil·lacions causades per càrregues capacitives, generalment a causa de la llargada dels cables que connecten a l'altaveu. També impedeix que les freqüències de ràdio captades pels cables dels altaveus tornin a l'entrada inversora de l'amplificador a través del bucle de retroalimentació.

Els inductors tenen una baixa impedància al corrent de baixa freqüència i una alta impedància al corrent d'alta freqüència. Els senyals d'àudio són de freqüència relativament baixa, de manera que fluïran a través de l'inductor lliurement. El corrent d'oscil·lació d'alta freqüència serà impedit per l'inductor i es veurà obligat a fluir a través de la resistència, que l'esmoreix.

Aquests, s'han de situar allunyats dels circuits d'entrada de l'amplificador per evitar interferències dels camps magnètics generats per l'inductor. Una bona ubicació és a prop dels terminals de sortida dels altaveus, separats una mica o en angle de 90° entre si per evitar que el camp magnètic s'acobli entre ells. Igual que amb la xarxa de Zóbel, els valors d'aquests components, també vénen donats segons les recomanacions del fabricant en el full de característiques.

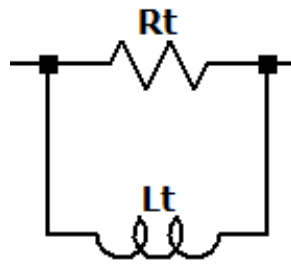


Figura 24: Esquemàtic xarxa Thiele.

5.2.10 Condensadors de desacoblament d'alimentació

Proporcionen una font de corrent de reserva quan la sortida de baixa freqüència de l'amplificador és alta. Valors més grans milloraran la resposta dels baixos. Els valors petits dels condensadors donaran corrent a l'amplificador per ajudar amb les freqüències més altes. També funcionen com a filtre de soroll de les radio-freqüències a la font d'alimentació.

Els condensadors de desacoblament també compensen la inductància i la resistència paràsites dels cables i traces d'alimentació que condueixen als pins del xip.

La inductància i la resistència inhibeixen el flux de corrent, que aquesta, augmenta amb cables i traces més llargues. Com que l'alimentació està relativament lluny del xip, la inductància i la resistència són un problema. Per maximitzar el flux de corrent cap al xip, els condensadors de desacoblament han de situar-se el més a prop possible de les clavilles de xip.

Aquest element el vam eludir per error durant la implementació física, i sense ells, la inestabilitat del senyal és altíssima. La figura 25 mostra l'esquemàtic dels condensadors de desacoblament, els quals els valors d'aquests depenen de les recomanacions dels respectius fulls de característiques.

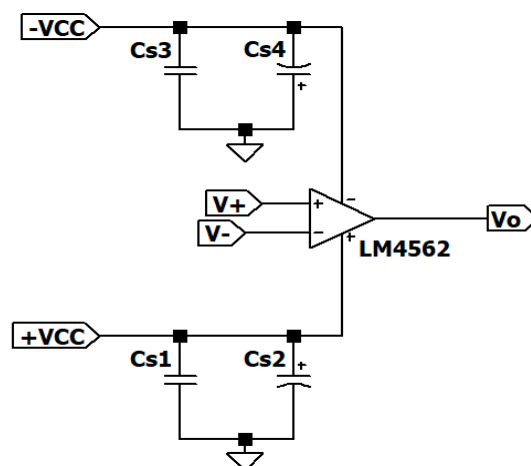


Figura 25: Condensadors de desacoblament d'alimentació.

5.2.11 Esquema circuit funcional bàsic

La figura 26, mostra l'esquema elemental del circuit, en la que es poden observar les diferents etapes d'aquest.

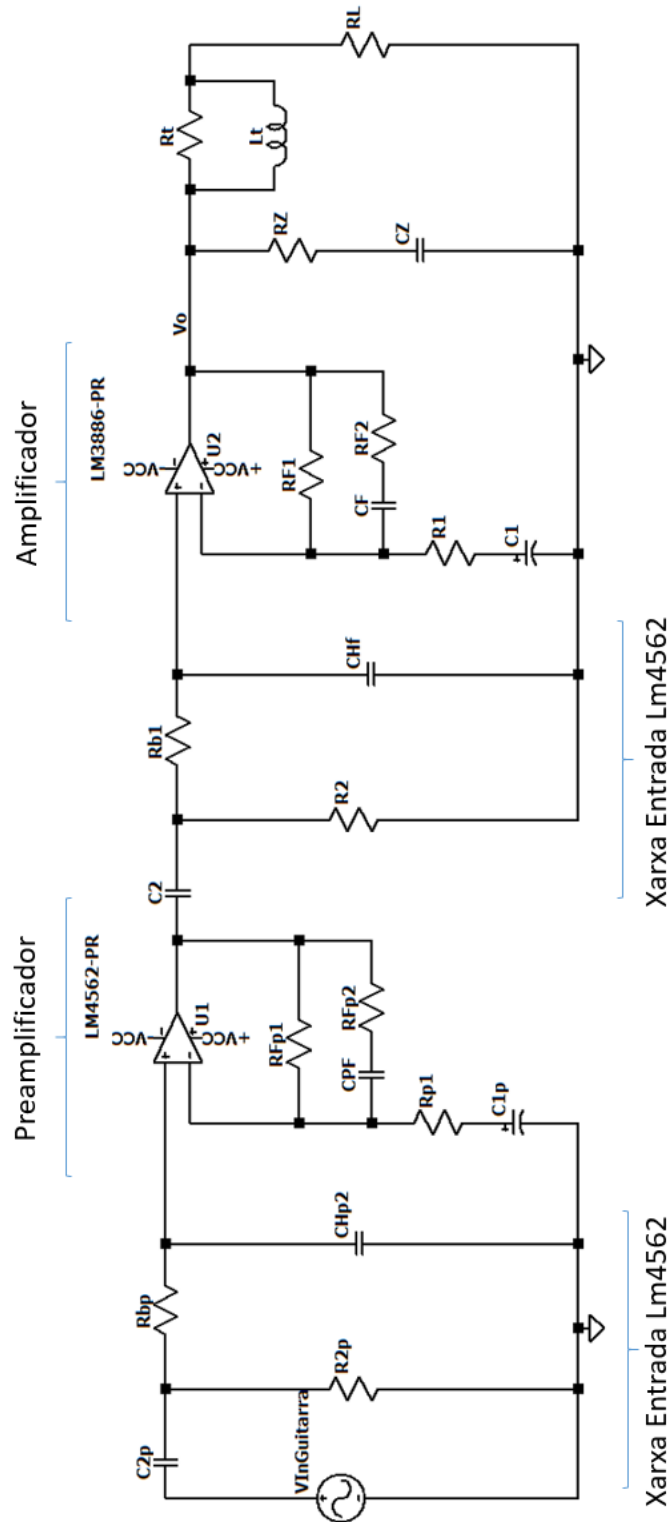


Figura 26: Esquema general del circuit esquelètic bàsic funcional.

6. Decisió i justificació freqüència i guany

Tenim distribuït l'altaveu en diferents etapes (Fig.27 i 28). Per dubtes de relació sobre quins elements fem referència, consultar la figura 26.



Figura 27: Esquema general etapes.

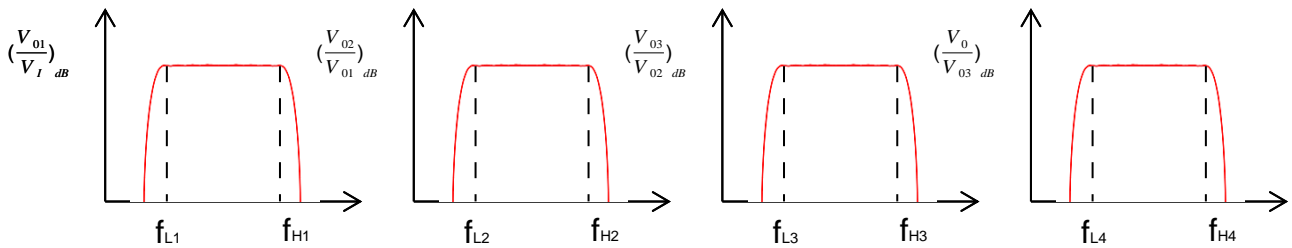


Figura 28: Forma freqüencial etapes amplificadores que intervenen en els pols.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{o1}}{V_i} \frac{V_{o2}}{V_{o1}} \frac{V_{o3}}{V_{o2}} \frac{V_o}{V_{o3}}$$

Individualment a cada bloc tindrem un filtre passa banda amb les mateixes freqüències (Fig.29):

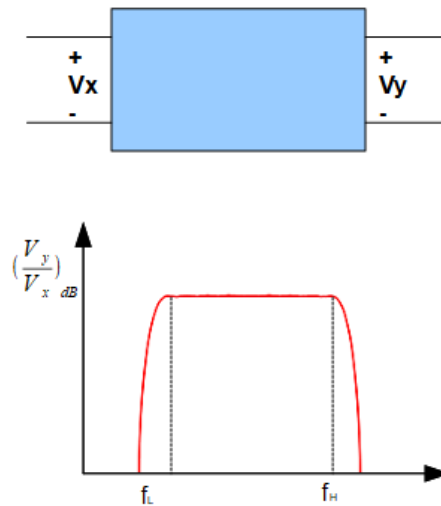


Figura 29: Esquema individual d'una etapa.

$$\frac{V_y}{V_x} \approx \frac{G}{\omega_L} \frac{S}{1 + \frac{S}{\omega_L}} \frac{1}{1 + \frac{S}{\omega_H}}$$

Això es una bona aproximació si: $f_h \gg f_L$. Nosaltres suposem que és així. El fet de que els pols estiguin tan separats ens permetrà aproximar-los com a pols de primer ordre, i per tant, estudiar-los separatament.

En el nostre cas, si imposem que cada filtre passa-banda de cada xarxa presenta idèntiques f_L i f_H :

G_P : Guany del preamp, on utilitzem el Lm4562.

G_a : Guany amplificador, on utilitzem el Lm3886.

$$\frac{V_o}{V_i}(s) \approx \frac{G_P G_a}{\omega_L^4} \left(\frac{S}{1 + \frac{S}{\omega_L}} \right)^4 \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{\omega_H}} \right)^4$$

6.1 Cas $\omega \approx \omega_L$

Donat que $\omega_L \in (5 \rightarrow 10) \text{Hz} \ll \omega_H \in (150 \rightarrow 200) \text{kHz}$ podem pendre els pols per separat.

$$\frac{V_o}{V_i}(s) \approx \frac{G_p G_a}{\omega_L^4} \cdot \left(\frac{s}{1 + \frac{s}{\omega_L}} \right)^4$$

Si $s = j\omega_L$

$$\left| \frac{V_o}{V_i}(j\omega_L) \right| = G_p G_a \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^4 = \frac{G_p G_a}{2^2}$$

Per tant:

$$\left| \frac{V_o}{V_i}(j\omega_L)_{dB} \right| \approx (G_p G_a)_{dB} - 12.04 \rightarrow > 3\text{dB}$$

Imposem $\omega = \alpha \cdot \omega_L, 1 < \alpha$ i que α compleixi:

$$\left| \frac{V_o}{V_i}(j\alpha\omega_L)_{dB} \right| \approx (G_p G_a)_{dB} - 3$$

Tenim:

$$\left| \frac{V_o}{V_i}(j\alpha\omega_L)_{dB} \right| \approx (G_p G_a) \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right)^4$$

Una reducció de -3dB equival a que: $\left(\frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right)^4 = \frac{1}{\sqrt{2}}$, doncs:

$$\left(\frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right)^4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \alpha = \sqrt{\frac{1}{2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}-1} \right)}} \approx 2,3$$

Per tant si volem que la freqüència baixa, f_L -3dB, valgui com a màxim 5Hz, el qual és un valor raonable ja que és de l'ordre d'una dècada per sota dels 20Hz mínims que pot percebre l'oïda humana, haurem de ajustar condensadors i resistències per tal d'obtenir:

$$f_L = \frac{F_{Escollida}}{2,3}$$

6.2 Cas $\omega \approx \omega_H$

Donat que $\omega_L \ll \omega_H$,

$$\frac{V_o}{V_i}(s) \approx G_p G_a \left(\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_H}} \right)^4$$

Si $s = j\omega_H$

$$\left| \frac{V_o}{V_i}(j\omega_H)_{dB} \right| \approx G_p G_a \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^4$$

Que suposa una reducció de 12 dB. Aleshores, imposant de nou $s = j\alpha\omega_H$,

$$\left| \frac{V_o}{V_i}(j\alpha\omega_H)_{dB} \right| \approx G_p G_a \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right)^4$$

Si impossem que $\left(\frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right)^4 = \frac{1}{\sqrt{2}}$, obtenim que $\alpha = \sqrt{\left(\frac{1}{2^y} \right)} \approx 0,43$

Per tant, si volguéssim, per exemple, que la freqüència -3dB valgui 200kHz, valor prou raonable ja que està una dècada per sobre dels valor màxim que permet sentir l'oïda humana, doncs haurem d'ajustar condensadors i resistències per tal de que:

$$0,43 \cdot \omega_H = 2\pi 200\text{kH}$$

$$F_H = \frac{200\text{k}}{0,43} = 460\text{kHz}$$

6.3 Exemple per a la justificació

Fixem $f_L = 5\text{Hz}$, i partint de les formules justificades anteriorment (Justificació simètrica, 5.2) i ajustant els valors de resistències i els condensadors dels filtres passa alts, és a dir, C_{1P} , C_{2P} , C_1 , C_2 , per tal d'obtenir:

$$f_L = \frac{5}{2,3} \approx 2,2\text{Hz}$$

Per tant, per a l'exemple, amb un guany total de 95, repartit en $G_{PA} = 10$ i $G_A = 9.57$, i $R_{2P} = 19\text{k}\Omega$, $R_{P1} = 2222.2\Omega$, $R_2 = 49\text{k}\Omega$ i $R_1 = 2632\Omega$, tenim, seguint la Fig.30:

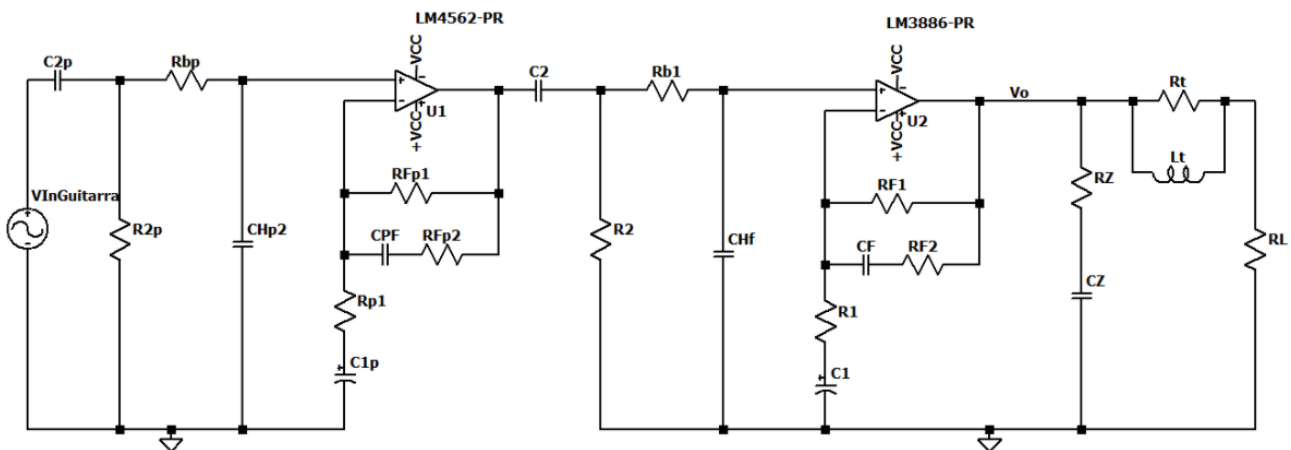


Figura 30: Recordatori del circuit elemental.

$$\frac{1}{2\pi C_{2P} R_{2P}} = 2,2\text{Hz} \rightarrow C_{2P} = 3,85\mu\text{F}$$

$$\frac{1}{2\pi C_{1P} R_{P1}} = 2,2\text{Hz} \rightarrow C_{1P} = 32,9\mu\text{F}$$

$$\frac{1}{2\pi C_2 R_2} = 2,2\text{Hz} \rightarrow C_2 = 1,49\mu\text{F}$$

$$\frac{1}{2\pi C_1 R_1} = 2,2\text{Hz} \rightarrow C_1 = 27,8\mu\text{F}$$

Usant les formules anteriors ajustem els condensadors dels filtres passa baixos, C_{HP} , C_{PF} , C_{HF} , C_f i amb $f_L = 5,1\text{Hz}$ i $f_H = 90\text{kHz}$, tenim:

$$f_H = \frac{250\text{k}}{0,53} = 575\text{kHz}$$

$$\frac{1}{2\pi C_{HP} R_{bP}} = 575\text{kHz} \rightarrow C_{HP} = 277\text{pF}$$

$$\frac{1}{2\pi(R_{FP2} + R_{FP1})C_{PF}} = 575\text{kHz} \rightarrow C_{PF} = 6,92\text{pF}$$

$$\frac{1}{2\pi R_{B1}C_{HF}} = 575\text{kHz} \rightarrow C_{HF} = 277\text{pF}$$

$$\frac{1}{2\pi(R_{F1} + R_{F2})C_F} = 575\text{kHz} \rightarrow C_{PF} = 3,96\text{pF}$$

El resultat de les simulacions Ltspice situen f_L i f_H a:

$f_L \approx 5,1\text{Hz}$ Valor considerablement acurat.

$f_H \approx 90\text{kHz}$ Lluny dels 250kHz que preveiem.

La raó rau en la resposta freqüencial dels propis amplificadors, els quals per ells mateixos, ja es comporten com un filtre passa baixos.

En llaç obert, (Fig.31) tenim:

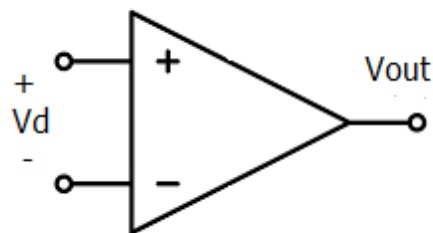


Figura 31: Opam en llaç obert.

$$\frac{V_o}{V_d} = A_{OL} \cdot \frac{1}{\left(1 + S \frac{A_{OL}}{GB\omega P}\right)}$$

A_{OL} : Guany en llaç obert, el del Lm4562 és de uns 140 dB i el del Lm3886 de uns 115 dB.

GBWP (Gain Bandwidth Product): És el producte entre el guany i l'amplada de banda, uns 55MHz, (Taula.3) per al Lm4562 i de uns 8MHz per al Lm3886 (Taula.4), extret dels fulls de dades respectius, (Fig.32), mostra la resposta freqüencial típica.

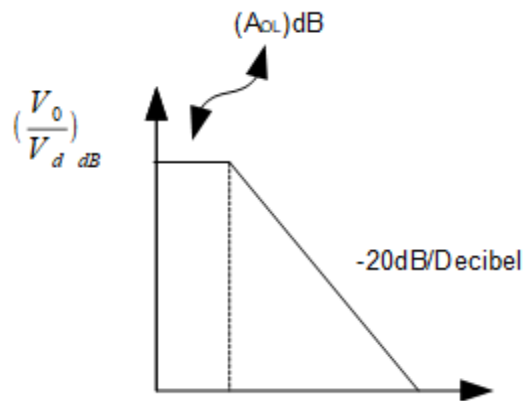


Figura 32: Resposta freqüencial típica

Symbol	Parameter	Conditions	LM4562		Units (Limits)
			Typical ⁽³⁾	Limit ⁽⁴⁾	
THD+N	Total Harmonic Distortion + Noise	$A_V = 1, V_{OUT} = 3V_{rms}$ $R_L = 2k\Omega$ $R_L = 600\Omega$	0.00003 0.00003	0.00009	% (max)
IMD	Intermodulation Distortion	$A_V = 1, V_{OUT} = 3V_{RMS}$ Two-tone, 60Hz & 7kHz 4:1	0.00005		%
GBWP	Gain Bandwidth Product		55	45	MHz (min)
SR	Slew Rate		± 20	± 15	V/ μ s (min)
FPBW	Full Power Bandwidth	$V_{OUT} = 1V_{P-P}, -3dB$ referenced to output magnitude at $f = 1kHz$	10		MHz
t_s	Settling time	$A_V = -1, 10V$ step, $C_L = 100pF$ 0.1% error range	1.2		μ s
e_n	Equivalent Input Noise Voltage	$f_{BW} = 20Hz$ to $20kHz$	0.34	0.65	μV_{RMS} (max)
	Equivalent Input Noise Density	$f = 1kHz$ $f = 10Hz$	2.7 6.4	4.7	nV/ \sqrt{Hz} (max)
i_n	Current Noise Density	$f = 1kHz$	1.6		pA/ \sqrt{Hz}
		$f = 10Hz$	3.1		
V_{OS}	Offset Voltage		± 0.1	± 0.7	mV (max)
$\Delta V_{OS}/\Delta Temp$	Average Input Offset Voltage Drift vs Temperature	$-40^\circ C \leq T_A \leq 85^\circ C$	0.2		$\mu V/^\circ C$

Taula 3: Característiques Lm4562.

I_{OS}	Input Offset Current	$V_{CM} = 0V, I_o = 0 \text{ mA}$	0.01	0.2	$\mu\text{A (max)}$
I_o	Output Current Limit	$ V^+ = V^- = 20V, t_{ON} = 10 \text{ ms}, V_O = 0V$	11.5	7	A (min)
$V_{od}^{(8)}$	Output Dropout Voltage ⁽⁹⁾	$ V^+ - V_O , V^+ = 28V, I_o = +100 \text{ mA}$ $ V_O - V^- , V^- = -28V, I_o = -100 \text{ mA}$	1.6 2.5	2.0 3.0	V (max) V (max)
$PSRR^{(8)}$	Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 40V \text{ to } 20V, V^- = -40V,$ $V_{CM} = 0V, I_o = 0 \text{ mA}$	120	85	dB (min)
		$V^+ = 40V, V^- = -40V \text{ to } -20V,$ $V_{CM} = 0V, I_o = 0 \text{ mA}$	105	85	dB (min)
$CMRR^{(8)}$	Common Mode Rejection Ratio	$V^+ = 60V \text{ to } 20V, V^- = -20V \text{ to } -60V,$ $V_{CM} = 20V \text{ to } -20V, I_o = 0 \text{ mA}$	110	85	dB (min)
$A_{VOL}^{(8)}$	Open Loop Voltage Gain	$ V^+ = V^- = 28V, R_L = 2 \text{ k}\Omega, \Delta V_O = 40V$	115	90	dB (min)
GBWP	Gain-Bandwidth Product	$ V^+ = V^- = 30V$ $f_O = 100 \text{ kHz}, V_{IN} = 50 \text{ mVrms}$	8	2	MHz (min)
$e_{IN}^{(6)}$	Input Noise	IHF—A Weighting Filter $R_{IN} = 600\Omega$ (Input Referred)	2.0	10	$\mu\text{V (max)}$
SNR	Signal-to-Noise Ratio	$P_O = 1W, \text{A-Weighted},$ Measured at 1 kHz, $R_S = 25\Omega$	92.5		dB
		$P_O = 60W, \text{A-Weighted},$ Measured at 1 kHz, $R_S = 25\Omega$	110		dB
IMD	Intermodulation Distortion Test	60 Hz, 7 kHz, 4:1 (SMPTE)	0.004		%
		60 Hz, 7 kHz, 1:1 (SMPTE)	0.009		%

Taula 4: Característiques Lm3886.

Aleshores el fet que $GBWP < \alpha$ implica que sense afegir condensadors per a obtenir un comportament de filtre passà alt, l'amplificador de dues etapes ja es comporta com un filtre d'aquest tipus, (Fig.34):

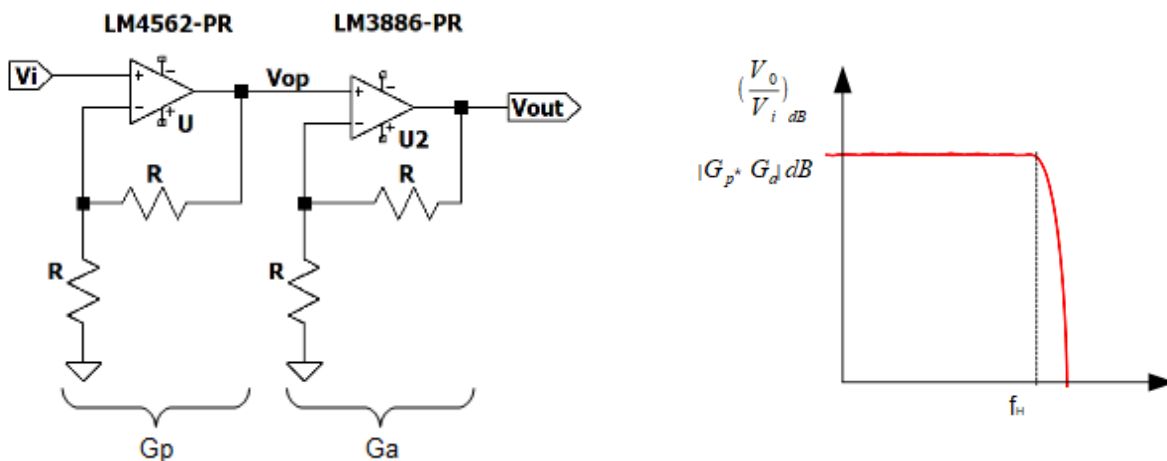


Figura 33: Representació dels respectius guanys.

Figura 34: Producte de guanys i freqüència de tall superior.

$$\left(\frac{V_{OP}}{V_i}\right)(s) \simeq \frac{G_P}{\left(1 + s \frac{G_P}{GBWP_P} 2\pi\right)} \frac{G_a}{\left(1 + s \frac{G_a}{GBWP_a} 2\pi\right)}$$

On recordem que $GBWP_P = 55\text{MHz}$ i $GBWP_a = 8\text{MHz}$.

Quant val doncs f_H ?

$$\left| \frac{V_O}{V_i} \right| (s = j2\pi f_H) = \frac{G_P}{\sqrt{1 + \left(f_H \frac{G_P}{GBWP_P} 2\pi \right)^2}} \frac{G_a}{\sqrt{1 + \left(f_H \frac{G_a}{GBWP_a} 2\pi \right)^2}} = \frac{(G_P G_a)}{\sqrt{2}}$$

f_H és la solució de:

$$\left(1 + \left(f_H \frac{G_P}{GBWP_P} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \left(f_H \frac{G_a}{GBWP_a} \right)^2 \right) = 2$$

Hem de tenir en compte, que el valor d' f_H depèn de com es distribueixi el guany ($G = 200$) entre G_P i G_a . Aleshores em de trobar la distribució òptima que mantingui la proporcionalitat amb els GBWP.

$$\frac{G_P}{G_A} = \frac{GBWP_P}{GBWP_a}$$

Aleshores, usant $GBWP_P = 55\text{MHz}$, $GBWP_a = 8\text{MHz}$, $G = 200$, resulta:

$G_P = \frac{55}{8} \cdot G_A$ i $G_P \cdot G_A = 200$ tenim que:

$$\frac{55}{8} \cdot G_A^2 = 200 \rightarrow G_A = \sqrt{\frac{200 \cdot 8}{55}} = 5,4 \text{ i per tant } G_P = 37,01$$

Amb aquests valors obtenim que $f_H \approx 954,6 \text{ kHz}$ valor massa gran pel nostre ample de banda desitjat.

6.4 Conclusions

Cal que el guany de 200 és distribueixi en 37 per a la fase preamplificadora i 5,4 per a la fase de potencia. Això ho fem ja que els amplificadors es comporten com a filtres passa baixos, aleshores aquest fet, comporta que sigui molt difícil situar la freqüència superior del conjunt, ja que aquesta passa molt ràpidament de 200kHz desitjats, a 1MHz, el qual no ens interessa ja que pot comportar el pas de soroll, per tant escollim com a freqüència superior un valor força més inferior que els 200kHz inicialment desitjats.

A l'apartat 7.1 es justificarà amb detall la tria dels límits freqüencials exactes per al disseny del circuit.



7. Valors i components Proposats

A continuació, s'intentarà justificar la tria del valor dels nostres components de la estructura bàsica del nostre circuit, és a dir de la part de l'etapa de preamplificació amb la seva xarxa d'entrada i l'etapa de potència amb la seva respectiva etapa d'entrada.

Cal afegir que el valor dels components, rau en el compliment del guany proposat, i de l'espectre freqüencial del nostre circuit, a continuació justificarem els valors escollits de freqüència i posteriorment donarem valor als components.

7.1 Justificació freqüencial

En primer lloc cal recordar que és la freqüència de tall, coneguda també com el punt de -3dB, la qual, és la freqüència a partir de la qual les freqüències s'atenuen al 70,7% del valor total. Com ja sabem en un filtre passa alts, s'atenuaran les freqüències inferiors a la freqüència de tall, i en un filtre passa baixos s'atenuaran les freqüències per sobre de la freqüència de tall.

Utilitzarem combinacions de filtres passa alts i passa baixos per tal de establir l'ample de banda del nostre circuit i millorar-ne l'estabilitat. Amb el guany, intentarem compensar l'efecte que fan els amplificadors operacionals que actuen com a filtres passa baixos, per tal d'aconseguir l'ample de banda desitjat.

En quan a freqüències no només hem de tenir en compte l'espectre audible, (20Hz a 20kHz aproximadament), sinó com ja hem comentat, hem de tenir en compte les freqüències de radio entre altres que puguin comportar sorolls. A continuació és justificarà la pressa de valors del nostre espectre freqüencial.

7.1.1 Filtre Passa alts

Començant pel llinar inferior, el que volem és que la freqüència estigui força per sota de l'audible possible de l'orella humana, és a dir força per sota dels 20Hz, ja que d'aquesta manera evitarem atenuar els harmònics baixos del nostre amplificador.

En el nostre cas, tant per les xarxes d'entrada, i les dos etapes d'amplificació, (preamplificador i amplificador), varem escollir una freqüència de 5Hz, però per tal de que aquesta sigui la nostre freqüència de tall, com em demostrat anteriorment a l'apartat 6.2 aquesta l'hem dividit entre $\alpha = 2,3$, donant així, un valor de uns 2,17Hz. Cal afegir que s'ha de tenir cert marge d'error admissible, ja que al final acabarem normalitzant els components, i per tant, haurem de decidir comparant amb les simulacions i les proves físiques si els resultats ens semblen admissibles o no.

En l'apartat 5.2.5, s'explica el perquè usem un filtre a la realimentació, però no perquè la freqüència d'aquest pol ha de ser de dos a tres vegades inferior a l'escollida al filtre passa alts de la xarxa d'entrada.

El cas és que el fet de distanciar els pols, ens permet avaluar-los de manera separada, ja que l'efecte que causaran entre ells serà reduït. En el nostre cas és proposa posar el pol de la realimentació tres vegades més lluny, és a dir, $2,17 / 3 = 0,72$ Hz.

Els components que determinen aquests pols són: per al cas del preamplificador, R_{1p} , C_{1p} , R_{2p} i C_{2p} , i per l'amplificador, R_1, C_1, R_2 i C_2 . Les fórmules per tal de determinar aquests pols són:

Per a la xarxa d'entrada, tanmateix per al preamplificador i amplificador:

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_2 R_2}$$

Per a la realimentació:

$$f_{LF} = \frac{1}{2\pi C_1 R_1}$$

7.1.2 Filtre Passa baixos

Amb els pols dels filtres passa baixos, escollirem les mateixes freqüències per a totes les etapes. Tal com s'ha comentat ja, els amplificadors operacionals, per si mateixos actuen com a filtres passa baixos, i per tant hem hagut de determinar la manera de mantenir-ho estable, és a dir, inicialment volíem posar una freqüència de tall superior d'almenys 200kHz, però el que succeïa, era que resultava difícil col·locar aquesta freqüència superior ja que ràpidament passava a 1Mhz aproximadament.

Aleshores la freqüència del filtre passa baixos, l'hem de situar força per sobre dels 20kHz audibles per tal de no atenuar cap harmònic, i molt per sota de les freqüències de ràdio AM o FM que hi puguin haver en la nostra zona. D'aquesta manera evitarem en la mesura de lo possible evitar interferències electromagnètiques.

Per tant en el nostre cas l'ample de banda AM va des de 153 kHz a 30 MHz, i les FM van des de 87,5 MHz - 108 MHz, aleshores per tal d'escollir una freqüència que estigui força per sobre de les freqüències audibles i força per sota de les quals poden ocasionar interferències, escollirem uns 85kHz.

Aleshores per tal de col·locar la freqüència a 85kHz, tenint en compte l'efecte dels amplificadors operacionals, l'hem de col·locar seguint la fórmula següent:

$$f_H = \frac{f_{ESCOLLIDA}}{0,43}$$

Així doncs, per a 85kHz, haurem d'ubicar la freqüència de tall a 197674 kHz, tant per el preamplificador com per l'amplificador i les seves respectives xarxes d'entrada.

Els components que determinen aquests pols són: per al cas del preamplificador, R_{F1p} , R_{F2p} , C_{Hp} , R_{Bp} i per l'amplificador, R_{F1} , R_{F2} , C_H , R_B .

Les fórmules que determinen aquests pols són:

Per la xarxa d'entrada:

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_b C_H}$$

Per la realimentació:

$$f_{HF} = \frac{1}{2\pi C F (R_{F1} + R_{F2})}$$

Posteriorment a l'apartat de 11.2, es mostrarà amb detall el nostre espectre de freqüències simulades amb Ltspice.

7.2 Càlcul i Valors

Seguint el mateix ordre que en la justificació del circuit de simètrica en l' apartat 5.2. Cal afegir, ja que podria ocasionar confusió, que els càlculs és fan amb els valors dels components normalitzats per tal d'obtenir un càlcul el més real possible. Posteriorment s'adjuntaran les taules de tots els valors dels components, tant reals com normalitzats. Fet aquest incís tenim:

Per al preamplificador tenim la consigna de que el guany ha de ser de 37. Els pols inferiors els hem de trobar a 2,17Hz i el del filtre de la realimentació, a 0.72Hz, i els superiors a 197674Hz cada un.

Aleshores començant pel guany, i prenen $R_{FP1} = 39k\Omega$ tenim :

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_{FP1}}{R_{1P}}$$

$$37 = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{39k\Omega}{R_{1P}} \rightarrow R_{1P} = 1083,3\Omega$$

Aleshores per evitar el corrent de Bias, imposem $R_{bP} = 1,8k\Omega$, i trobem el valor de R_{2P} :

$$R_{2P} + R_{bP} = R_{FP1}$$

$$R_{2P} = 39k - 1,8k \rightarrow R_{2P} = 37,2k\Omega$$

Un cop determinada la resistència de Bias, podem trobar el valor de C_2 per tal d'implementar el filtre passa alts de la xarxa d'entrada. Amb $F_L = 2.17Hz$ i $R_{2P} = 37k\Omega$, tenim:

$$F_L = \frac{1}{2\pi C_{2P} R_{2P}} \rightarrow C_{2P} = \frac{1}{(2\pi \cdot 2,1737k)} = 1,98\mu F$$

I consegüentment ja que sabem el valor de F_{LF} (0,72Hz), podem determinar el valor de C_{1P} .

$$F_{LF} = \frac{1}{(2\pi C_{1P} R_{1P})} \rightarrow C_{1P} = \frac{1}{(2\pi * 0,72 * 1k)} = 221,048\mu F$$

Definit C_{1P} , passarem a determinar el filtre passa baixos de la xarxa d'entrada, el qual només requerim trobar el valor de C_{HP} ja que $F_{HP} = 197674$ Hz.

$$F_H = \frac{1}{2\pi R_{bP} C_{HP}} \rightarrow C_{HP} = \frac{1}{(2\pi 1,8k * 197674)} = 447,3pF$$

Per últim queda determinar el valor del filtre passa baixos situat a la realimentació de l'amplificador operacional, per fer-ho simplement fixarem el valor de R_{F2} , en el nostre cas el fixarem a uns 18k Ω , ja que és un valor de la magnitud dels seus components pròxims lo qual el fa raonable. Així doncs, igual que amb F_H ,

$$F_{HF} = \frac{1}{2\pi C_{FP} (R_{F1P} + R_{F2P})} \rightarrow C_{FP} = \frac{1}{(2\pi * 19764 * (39k + 18k))} = 14,8pF$$

Fet el raonament de l'origen dels valors per al preamplificador i la seva xarxa prèvia, procedim, sense tanta explicació, a fer el mateix per al amplificador i el seu filtre passa banda previ:

$$5,4 = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{18k}{R_1} \rightarrow R_1 = 4090\Omega$$

$$R_2 + R_b = R_F \rightarrow R_2 = 18k - 2,7k = 15300\Omega$$

$$F_L = \frac{1}{2\pi C_2 R_2} \rightarrow C_2 = \frac{1}{(2\pi 2,17 * 15k)} = 4,88\mu F$$

$$F_{LF} = \frac{1}{(2\pi C_1 R_1)} \rightarrow C_1 = \frac{1}{(2\pi * 0,72 * 3,9k)} = 56,67\mu F$$

$$F_H = \frac{1}{2\pi R_b C_H} \rightarrow C_H = \frac{1}{(2\pi 2,7k * 197674)} = 298pF$$

El valor 218319,53Hz, surt d'actualitzar el valor del pol d'alta freqüència utilitzant valors normalitzats.

$$F_{HF} = \frac{1}{2\pi C_F (R_{F1} + R_{F2})} \rightarrow C_F = \frac{1}{(2\pi * 218319,53 * (18k + 22k))} = 18,25pF$$

7.2.1 Taula de valors

En aquest apartat mostrarà tots els components que intervinguin en el funcionament dels encapsulats. Per tal de tenir present a quins components fem referència, s'adjunta de nou, l'esquema del circuit (Fig.35), per tal de facilitar la ubicació d'aquests components.

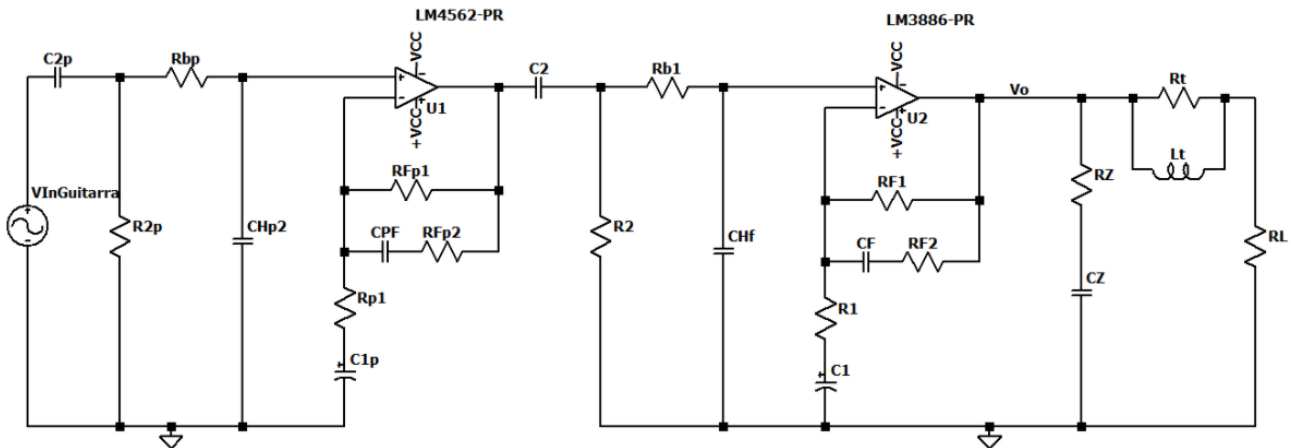


Figura 35: Recordatori del circuit elemental bàsic.

El resultat del valor final, ve donat de normalitzar el component i posteriorment fer el càlcul amb el valor actualitzat real, d'aquesta manera, a mesura que es fan càlculs teòrics ens aproximem a el que tindrem a la realitat.

Així doncs, per al **preamplificador** tenim com a valors de pols i guany, (taula.5):

Guany i pols	Valors escollit	Valor final
Guany	37	38
f_{L1}	2,17 Hz	2,38 Hz
f_{L2}	0,72 Hz	0,72 Hz
f_{H1}	197674 Hz	188126,41 Hz
f_{H2}	197674 Hz	199442 Hz

Taula 5: Freqüències i guany de tall preamplificador.

Per ordre en la tria i càlcul tenim els valors dels components a la taula 6:

Component	Valor Calculat	Valor normalitzat.
R_{F1}	39k Ω	39k Ω
R_1	1083,3 Ω	1k Ω
R_B	1,8k Ω	1,8k Ω
R_2	37,2k Ω	37k Ω
C_2	1,98 μ F	1,8 μ F
C_1	221,05 μ F	220 μ F
C_H	447,3pF	470pF

R_{F2}	18k Ω	18k Ω
C_F	18,4pF	15pF

Taula 6: Valors preamplificador.

Per l'**amplificador** tenim els valors de guany i pols a la taula 7, i el dels components a la taula 8:

Guany i pols	Valors escollit	Valor final
Guany	5,4	5,61
f_{L1}	2,17 Hz	2,25 Hz
f_{L2}	0,72 Hz	0,73 Hz
f_{H1}	197674 Hz	218319,53 Hz
f_{H2}	197674 Hz	221048 Hz

Taula 7: Freqüències amplificador.

Component	Valor Calculat	Valor normalitzat.
R_{F1}	18k Ω	18k Ω
R_1	4090,91 Ω	3,9k Ω
R_B	2.7k Ω	2.7k Ω
R_2	15300 Ω	15k Ω
C_2	4,88 μ F	4,7 μ F
C_1	56,67 μ F	56 μ F
C_H	298pF	270pF
R_{F2}	22k Ω	22k Ω
C_F	18,25pF	18pF

Taula 8: Valors dels components de l'amplificador.

Hi ha components els quals el seu valor ve donat per la recomanació fabricant en el datasheet, així doncs, per cada encapsulat del Lm4562 tindrem (Fig.36) amb els seus respectius valors a la taula 9, i per al Lm3886 la (Fig.37) mostra el circuit al qual fem referència i la taula 10, els valors d'aquests.

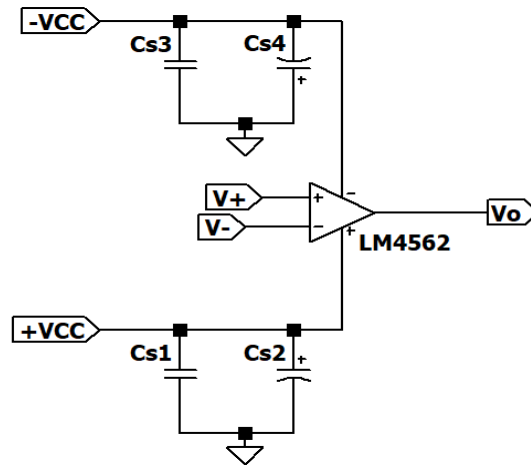


Figura 36: Circuit condensadors de desacoblament Lm4562.

Component	Valor
C _{s1}	0,1µF
C _{s2}	10µF
C _{s3}	0,1µF
C _{s4}	10 µF

Taula 9: Valors Condensadors desacoblament Lm4562.

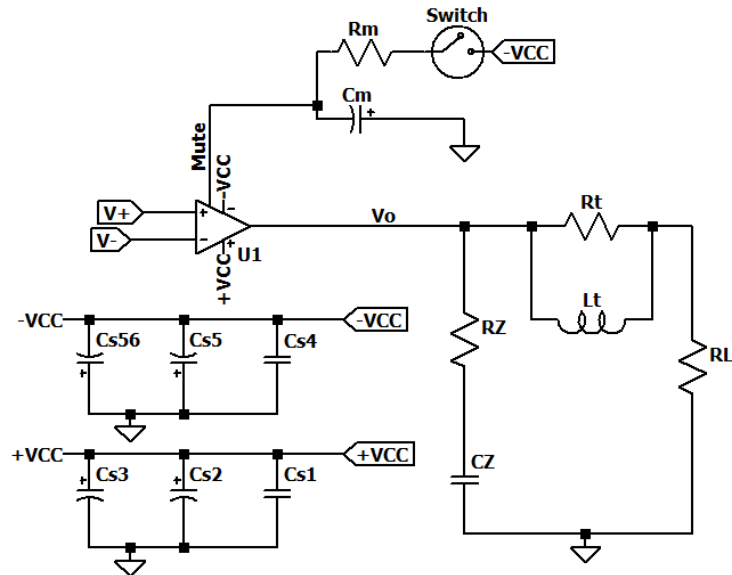


Figura 37: Circuit amb els components recomanats per al fabricant Lm3886.

Component	Valor
C _{s1}	0,1μF
C _{s2}	10μF
C _{s3}	1000μF
C _{s4}	0,1μF
C _{s5}	10μF
C _{s6}	1000μF
R _Z	1Ω
C _Z	0,22μF
R _m	10kΩ
C _m	100μF
R _t	10Ω
L _t	0,7μH
R _L	4Ω

Taula 10: Valors components recomanats per el fabricant Lm3886.



8. Equalitzador

Arribat el moment vam decidir implementar un equalitzador ja que aquest, seria d'interès per al nostre projecte, i a més, aquest podria millorar el resultat del nostre so en algun moment donat.

Per sobre de tot, vam decidir que aquest havia de ser el més senzill possible, ja que en prou feines sabíem si la resta de fases resultarien, perquè a sobre invertíssim temps en un equalitzador, que no intervé en el funcionament principal del amplificador, sinó que és un afegit.

8.1 Funcionament

La equalització és el recurs indispensable per aconseguir una resposta real d'un sistema d'amplificació, sense profunditzar en la història, direm que es van crear per a resoldre la falta de resposta plana dels equips amplificadors, ja que no existeix un equip que reproduïxi amb total fidelitat totes les freqüències, sense potenciar ni depreciant cap rang.

Aleshores un equalitzador està dividit per bandes de freqüències, depenent de l'instrument pel qual és dissenyat i de la qualitat de l'aparell. De totes maneres, quan més gran sigui el nombre de bandes, més precís serà, ja que actuarà en rangs de freqüència més fins, i el que fan és, potencien o atenuen les diferents bandes de freqüències, per tal d'aconseguir un to personalitzat. Per al nostre disseny, després de fer recerca vam distingir en tres bandes diferents, (Fig.38), baixes, que van des dels 20Hz als 300Hz, mitjos dels 300Hz als 5kHz, i altes, dels 5kHz als 20kHz.

Dic personalitzat ja que tot i que van ser creats per tal d'obtenir una resposta simètrica al llarg de l'espectre freqüencial a la sortida, ràpidament després de la seva invenció, es van adonar que en funció del gènere musical o peça que tocaves, la variació de l'espectre podia afavorir positivament en el so.

Així doncs mentre un equalitzador professional activa i atenua els diferents rangs de freqüència, el nostre, regint-nos en la consigna de mantenir-lo simple, només atenua, és a dir és un equalitzador passiu.

L'equalitzador escollit té una estructura molt senzilla, consisteix en tres filtres passius, passa-alts, passabanda i passa baixos, que per cada qual passen freqüències determinades, seguits d'un potenciòmetre que atenua els diferents intervals de freqüències, que es sumen en un amplificador sumador. La figura 38 de la pàgina següent, mostra l'esquema que hem seguit per tal de distingir les tres bandes.

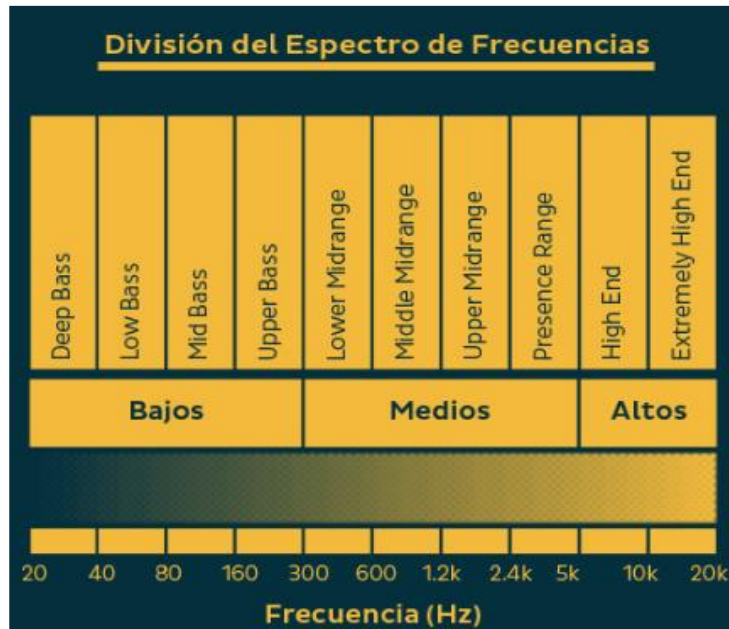


Figura 38: Rang de freqüències.

Sabiem que no tindria el mateix resultat que utilitzant filtres actius però volíem experimentar i afegir un al·licient al projecte. La figura 39 mostra l'esquema elèctric del equalitzador dissenyat.

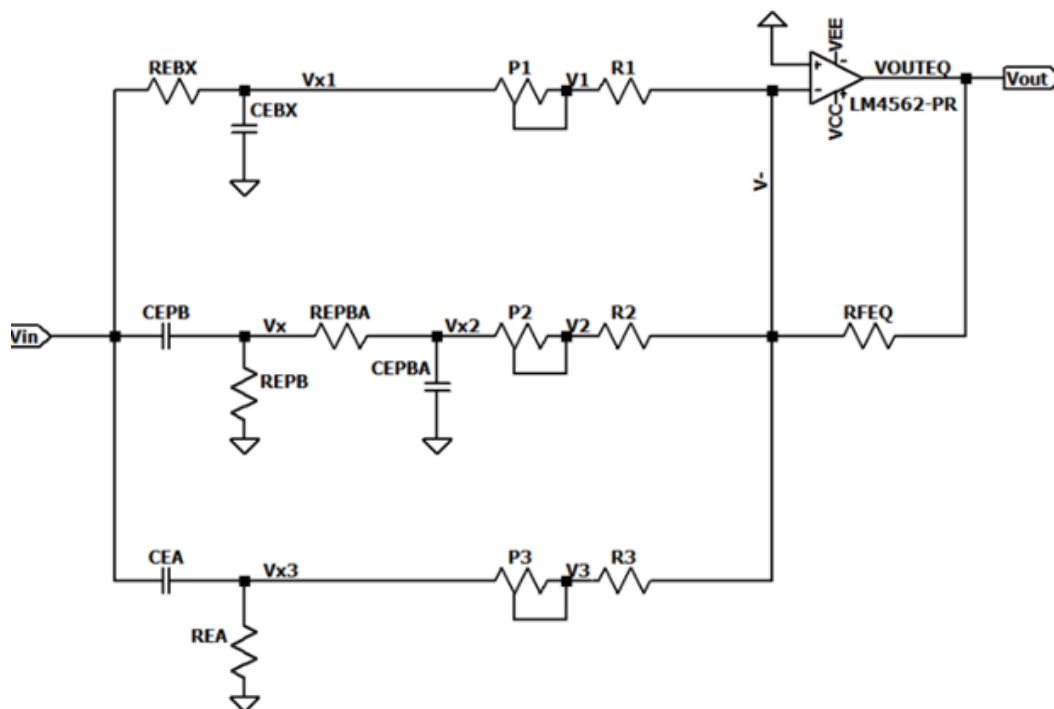


Figura 39: Esquema circuit equalitzador.

8.2 Filtre passa baixos:

La figura 40, mostra l'esquema elèctric de la banda de pas de freqüències baixes, i la figura 41 la resposta freqüencial del respectiu circuit.

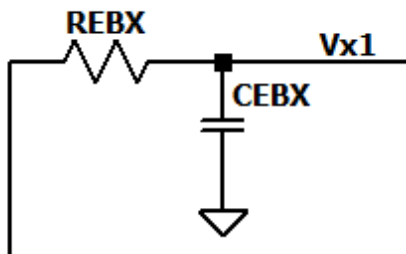


Figura 40: Esquema filtre passa baixos.

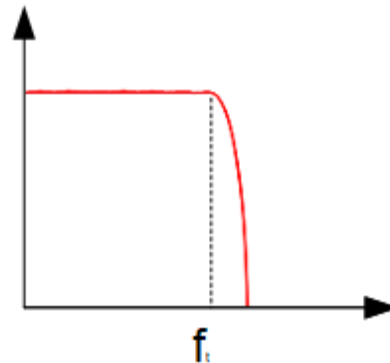


Figura 41: Banda de pas filtre passa baixos.

Aleshores matemàticament tenim:

$$V_{X1} = V_i \frac{Z_{CEBX}}{(R_{EBX} + Z_{CEBX})}$$

Observem els pols:

$$\frac{1}{SC_{EBX}} + R_{EBX} = 0 \rightarrow f_T = \frac{1}{(2\pi R_{EBX} C_{EBX})}$$

8.3 Filtre passa Alts

La figura 42, mostra l'esquema elèctric de la banda de pas de freqüències altes, i la figura 43 la resposta freqüencial del respectiu circuit

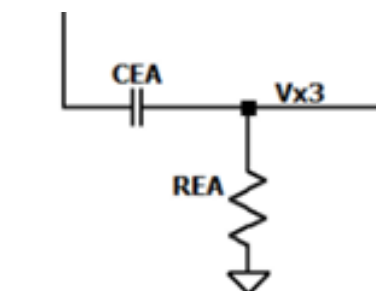


Figura 42: Esquema filtre passa alts.

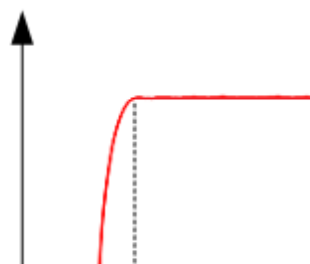


Figura 43: Banda de pas filtre passa alts.

Matemàticament tenim:

$$V_{X3} = V_i \frac{R_{EA}}{(R_{EA} + ZC_{EA})}$$

$$\frac{1}{SC_{EA}} + R_{EA} = 0 \rightarrow f_T = \frac{1}{(2\pi R_{EA} C_{EA})}$$

8.4 Filtre passa Banda

La figura 44, mostra l'esquema elèctric de la banda de pas de freqüències intermèdies, i la figura 45 la resposta freqüencial del respectiu circuit

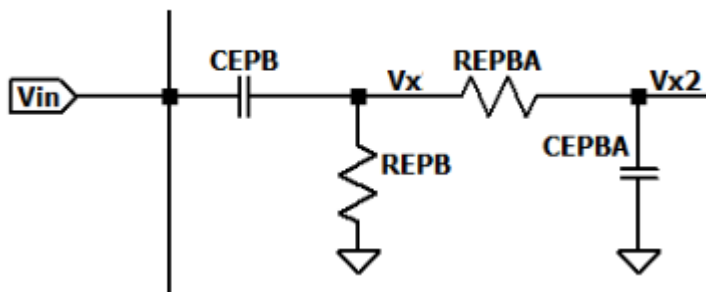


Figura 44: Esquema filtre passa banda.

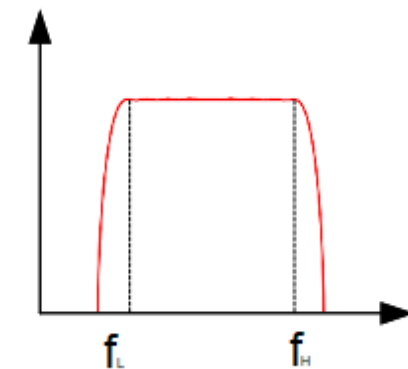


Figura 45: Banda de pas filtre passa banda.

Com a resultat, tenim la combinació d'un filtre passa alts amb un filtre passa baixos:

Freqüència inferior:

$$V_X = V_i \frac{R_{EPB}}{(R_{EPB} + ZC_{EPB})} \frac{1}{SC_{EPB}} + R_{EPB} = 0 \rightarrow f_T = \frac{1}{(2\pi R_{EPB} SC_{EPB})}$$

Freqüència superior:

$$V_{X2} = V_X \frac{ZC_{EPBA}}{(R_{EPBA} + ZC_{EPBA})} \frac{1}{SC_{EPBA}} + R_{EPBA} = 0 \rightarrow f_T = \frac{1}{(2\pi R_{EPBA} SC_{EPBA})}$$

8.5 Potenciòmetres

El funcionament dels potenciòmetres tal com els fem (Fig.46), consisteix en atenuar el senyal d'audio que passa per a cada banda del equalitzador, així doncs actuen com a clau de pas de les bandes. Seguint la llei d'ohm, quan més resistència hi hagi, més s'atenuarà el senyal.

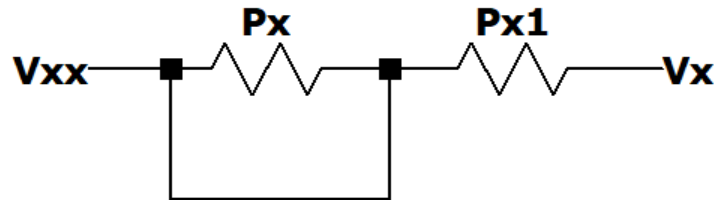


Figura 46: Conexió i esquema dels potenciòmetres de l'equalitzador.

8.6 Sumador

El sumador té la funció de sumar els tres senyals i la de separar el circuit per tal de que la funció del circuit equalitzador estigui aïllada de la resta del circuit. La figura 47, mostra el circuit sumador al qual es fa referència.

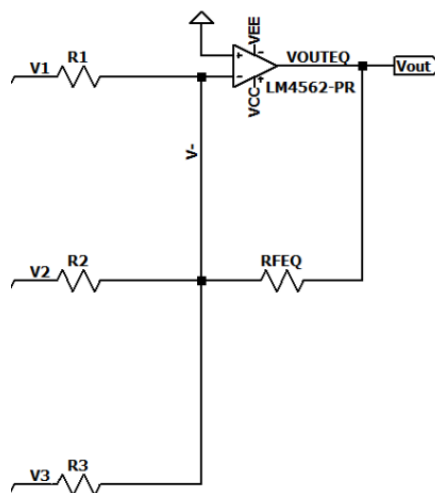


Figura 47: Circuit sumador.

$$\frac{(V_1 - 0)}{R_1} + \frac{(V_2 - 0)}{R_2} + \frac{(V_3 - 0)}{R_3} = \frac{(0 - V_{OUT})}{R_{FEQ}}$$

$$V_{OUT} = -R_{FEQ} \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

On el signe -, significa que s'ha invertit la fase i $\frac{-R_{FEQ}}{R_n}$ el guany de cada senyal.

8.7 Tria Components

A continuació s'adjuntarà el valor dels components que permeten el control de les diferents freqüències.

Per a les freqüències baixes, és a dir, fins a 300Hz, tenim el filtre passa baix i tenim (taula. 11):

Component	Valor Final
R _{EBX}	1kΩ
C _{EBX}	470nF
f _t	338.62Hz Teòric*

Taula 11: Valors passa baixos.

Per al passa banda tenim el valor dels seus components a la taula 12:

Component	Valor Final
C _{EPB}	1kΩ
R _{EPB}	470nF
f _{LPB}	338.62Hz Teòric*
R _{EPBA}	1kΩ
C _{EPBA}	47nF
f _{HPB}	3386,27 Hz Teòric*

Taula 12: Valors passa banda.

Per al passa alts tenim el valor dels seus components a la taula 13:

Component	Valor Final
C _{EA}	33nF
R _{EA}	1kΩ
f _t	4822,87Hz Teòric*

Taula 13: Valors passa alts.



Per als potenciómetres i etapa sumadora tenim el valor dels seus components a la taula 14:

Component	Valor
P ₁	100kΩ, Logarítmic
P ₂	100kΩ, Logarítmic
P ₃	100kΩ, Logarítmic
R ₁	10kΩ
R ₂	9kΩ
R ₃	11kΩ
R _{FEQ}	11kΩ

Taula 14: Valors potenciómetres i etapa sumadora.

El tipus de potenciómetre utilitzat, és del tipus logarítmic per tal d'evitar haver de fer moltes voltes per tal de canviar el valor de la resistència.



9. Distorsionador

9.1 Origen de la distorsió

Tot i que amplificar els senyals de la guitarra per tal d'aconseguir un major volum, va ser el primer objectiu pel qual es van pensar les guitarres elèctriques, aquesta manera d'amplificar els senyals va comportar molta creativitat i maneres en les que l'instrument es podia tocar i fer sonar.

Mentre que inicialment, la distorsió es va descobrir a partir d'amplificadors trencats, aviat es va convertir en un so desitjat. Alguns primers pioners de la guitarra elèctrica tallarien els altaveus o modificarien les vàlvules dels seus amplificadors per crear sons distorsionats, per exemple el que feien era trencar la membrana del altaveu o canviar les vàlvules per altres de molt mala qualitat o deteriorades.

Als anys 60, es van començar a vendre circuits electrònics que es col·locaven entre la guitarra i els amplificadors dissenyats per tal que es poguessin obtenir sons distorsionats sense la necessitat d'alterar o danyar un amplificador. Aquests circuits s'anomenen pedals d'efecte. De vegades, aquests efectes són incorporats a amplificadors de guitarra, però encara és habitual que els guitarristes tinguin efectes separats al davant del seu amplificador al davant de la cadena de senyal, mitjançant l'ús de pedals entre altres.

Tot que hi ha molts tipus diferents de pedals d'efectes, el de distorsió, és el més pioner i senzill.

9.2 Funcionament

En la seva implementació més bàsica, la distorsió opera retallant el senyal de guitarra per sota dels límits d'alimentació.

També es pot crear distorsió utilitzant elements del circuit que introdueixen no linealitats al senyal. Les no linealitats afegeixen harmònics i *distorsió d'intermodulació* a components de freqüència de senyals.

La intermodulació (IM) o distorsió d'intermodulació (IMD) és la modulació d'amplitud de senyals que contenen dues o més freqüències diferents, causada per no linealitats o per variància temporal en un sistema. La intermodulació entre components de freqüència formarà components addicionals a freqüències que no només es troben en freqüències harmòniques (múltiples enters), com la distorsió harmònica, sinó també en la suma i diferència de freqüències de les freqüències originals i en sumes i diferències de múltiples d'aquests freqüències.

9.3 Tipus de Distorsionadors a escollir

9.3.1 Limitador de díodes

Els limitador de díodes són un dels elements de no-linealitat més comuns als circuits de guitarra per la seva simplicitat.

Els díodes, són elements de circuits simples que només permeten que el corrent flueixi en una direcció, i també tenen una caiguda de tensió cap a la direcció que es permet el pas de corrent.

És una tensió a través dels seus dos terminals, que s'ha d'assolir perquè flueixi qualsevol corrent. En un limitador de díodes, dos díodes es col·loquen en antiparal·lel, per tal de limitar el límit de tensió màxima superior i inferior a el nivell de la tensió de caiguda directa d'aquests díodes. La figura 48 mostra l'esquema del circuit limitador de díodes.

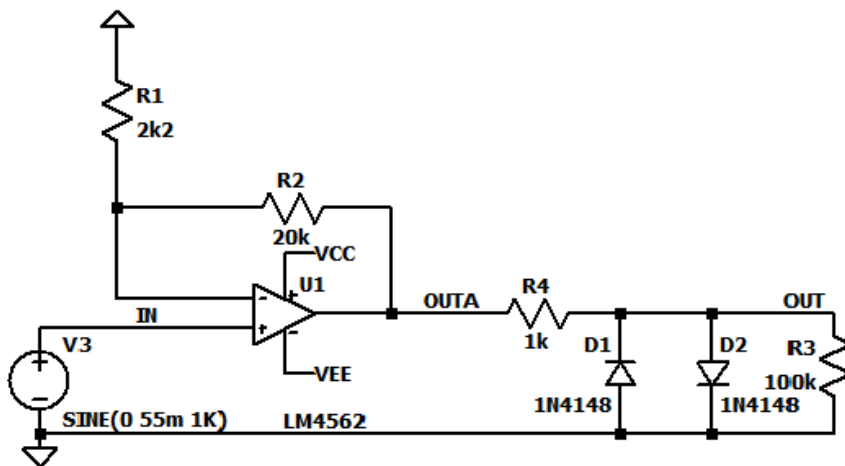


Figura 48: Circuit limitador de díodes.

El limitador de díodes té diferents efectes a la sortida en funció de l'amplitud del voltatge d'entrada. La figura 49 mostra la variació del senyal de sortida en funció del voltatge del senyal sinusoidal d'entrada aplicada en el circuit de la figura 48. En verd tenim el senyal la sortida en aplicar 0,5V a l'entrada, amb blau en aplicar 1V, i en vermell en aplicar 10V a la entrada.

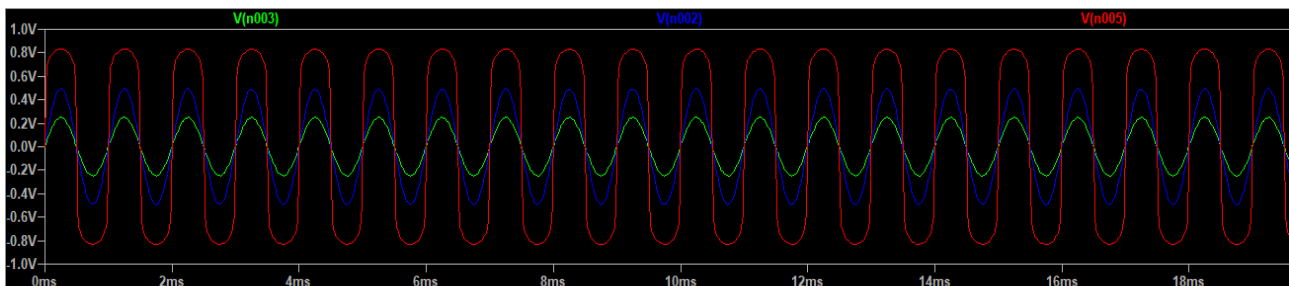


Figura 49: Variació del senyal de sortida en funció del voltatge senyal d'entrada.

Una altra manera d'obtenir resultats interessants del limitador de díodes és canviant el material semiconductor del qual està format el díode. Els diferents semiconductors tenen propietats diferents. El silici és el díode més comú disponible i té una caiguda de voltatge

cap al voltant de 0,7V.

Un altre material molt popular, sobretot en circuits d'àudio, és el germani. Els díodes de germani tenen una caiguda de voltatge més petita d'uns 0,3 V, però la caiguda és menys estàtica i pot ser major si hi ha voltatges més grans. Això es tradueix en un retall de la ona de sortida menys extrem.

Aleshores el que és pot fer és aconseguir una distorsió simètrica, és a dir utilitzant dos díodes de silici o dos de germani, o asimètrica, que es considera millor i és utilitzant els dos tipus, o del mateix tipus amb valors diferents.

9.3.2 Limitador de díodes en la realimentació

Funciona de manera semblant al limitador de díodes descrit anteriorment però a diferència de l'anterior, el qual es trobava després d'un amplificador operacional, aquest és troba en paral·lel a la resistència de la realimentació. La figura 50, mostra el circuit amb limitador de díodes en la realimentació.

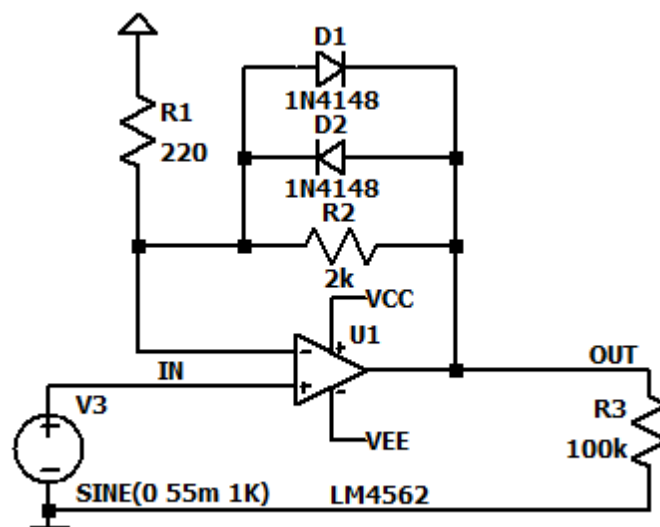


Figura 50: Circuit distorsionador amb limitador de díodes en la realimentació.

9.3.3 Push Pull

Distorsió introduïda en activar-se transistors, els quals "retallen" a 0,7V la tensió en borns de la resistència de "feedback" (R_2) Distorsió només s'activa si $V_i > 0,7/(R_2/R_1)$ i aleshores, la tensió de sortida queda retallat a $V_i(p)+0,7$ La figura 51 mostra el circuit referent al push pull.

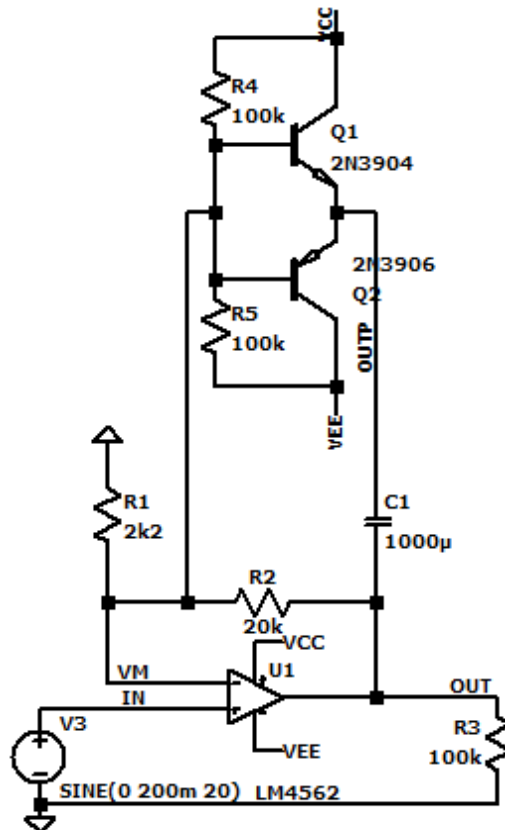


Figura 51: Circuit Push Pull.

9.4 Decisió i tria de components

Comparant les diverses opinions dels que han estudiat les diferents topologies de distorsió arribem a la conclusió que la distorsió push pull és la que ofereix uns millors resultats, però que la del limitador de díodes en comparació també, i que per les seva simplicitat és una molt bona opció.

Així doncs, seguint el mateix raonament utilitzat en la tria de la tecnologia d'equalització, aquest projecte no té l'objectiu d'estudiar les diferents maneres de distorsionar el senyal, sinó que vol estudiar la manera d'implementar un amplificador de guitarra. I que per tant aquest element del circuit és un al·licient del projecte.

Per aquest motiu vam decidir mantenir el circuit el més senzill possible i escollir el limitador de díodes, (Fig.48) ja que a més amb l'ús d'un simple interruptor ens per permet mantenir-lo actiu o apagat.

Els components q s'utilitzen per al nostre distorsionador són dos díodes **1N4148**, els quals tenen una caiguda de voltatge de 0,7V.

10. Control de Guany i Volum

Hi ha una gran confusió general de que és el guany i que és el volum, ja que en moltes ocasions, augmentant el guany de l'amplificador, augmenta el "volum", però existeix una diferenciació entre aquests controladors. En aquest apartat intentarem fer entendre la diferència que existeix entre aquests dos conceptes, i el disseny que hem implementat per a cada un en el nostre circuit.

10.1 Guany

Tal com hem descrit en l'apartat número quatre, els amplificadors i en concret els de guitarra, tenen diferents etapes d'amplificació, (almenys dos), en el nostre cas tenim, una primera etapa preamplificadora i posteriorment una etapa de potència.

Aleshores en els amplificadors, normalment es permet controlar el "nivell" o la "intensitat" o "grandària" del senyal enviat, a través d'aquesta primera etapa; aquest control de la mida del senyal que s'envia a aquesta primera etapa preamplificadora, s'anomena control de guany.

El guany es pot considerar com el volum d'entrada a l'etapa de preamplificació (els ajustos en el control de guany poden produir canvis en el volum global, ja que al final estem regulant la quantitat de senyal d'entrada, cosa que pot explicar una part de la confusió entre els termes), tot i que realment, és més un control de **to** que un control de volum. La configuració del control guany, per tant, determina el nivell de distorsió del to, independentment del controlador de volum.

El motiu per al qual el guany afecta al to, sobretot amb la distorsió, és degut a l'*overdrive*, és a dir, la sobre amplificació. El fet d'amplificar un senyal de manera massa abrupte en una sola etapa, ocasiona distorsió. Cal afegir que al fet d'augmentar abruptament el senyal d'entrada no filtrat, amplifica també el **soroll** d'aquest senyal, i per tant l' "embruta". Com s'ha comentat anteriorment però, en molts estils musicals, la distorsió és un efecte molt buscat, però sempre s'ha de "jugar" amb el control de volum i guany per tal d'obtenir el so desitjat.

Soroll: El soroll, pot definir-se com un so indesitjable o aliè als sons d'interès, és un so complex en què es barregen diferents freqüències o notes sense cap relació harmònica. Els sons d'una sola freqüència es designen com tons purs.

To: El to és la manera de distingir entre si un so és agut o greu, i aquest depèn de la freqüència, quan més elevada més agut, i quan més baixa més greu.

Aleshores per al nostre circuit, per tal de controlar la quantitat de senyal que s'enviarà al preamplificador, es proposa el següent circuit, que consisteix en un amplificador inversor on la resistència (Pguany), és un potenciòmetre logarítmic amb dos terminals curtcircuitats, que regula la quantitat de senyal. La figura 52 de la pàgina següent mostra el circuit emprat.

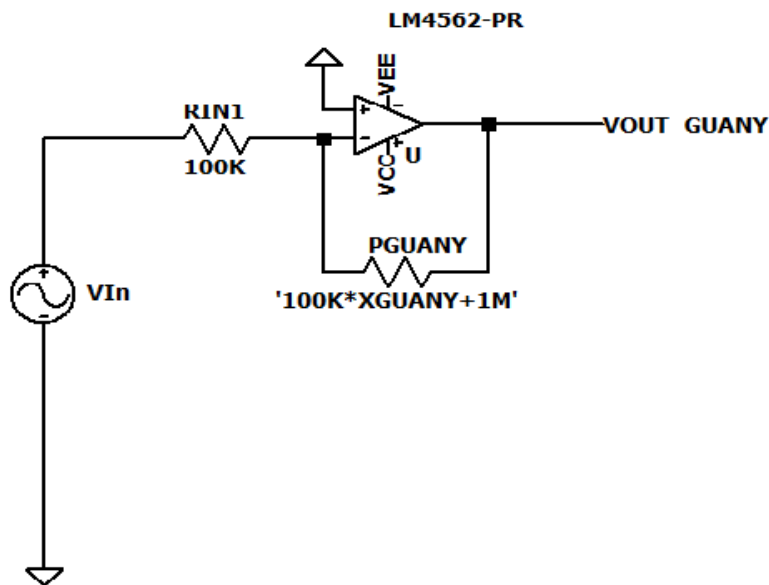


Figura 52: Circuit control guany.

Partint del curtcircuit virtual de l'amplificador operacional tenim:

$$V_+ = V_- = 0$$

$$\frac{(V_{in} - V_-)}{R_{IN1}} = \frac{(V_- - V_{outGuany})}{P_{Guany}}$$

$$V_{outGuany} = -V_{in} \frac{P_{Guany}}{R_{IN1}}$$

Més endavant es justificarà l'elecció de cada component però en el nostre cas hem fet servir potenciómetres de 100kΩ, i per tant si volem limitar el senyal d'entrada utilitzarem una recència R_{IN1} per tal de que el guany màxim no sigui de 1.

10.2 Volum

En quant a definició referida al so, el terme volum es defineix com la magnitud d'una sensació auditiva que depèn principalment de l'amplitud de l'ona sonora i per al cas de sons constants, es pensa que és proporcional a la taxa amb què arriben a el cervell els polsos nerviosos que s'originen en la membrana basilar.

El volum d'un amplificador, és però, definit com la quantitat de senyal que s'envia a l'etapa de potència i a diferència del guany, el seu control no afecta al to, sinó a la intensitat del so.

El disseny proposat per al nostre circuit, consta d'un potenciómetre de 100kΩ previ a un amplificador seguidor. Aquest potenciómetre, té un terminal connectat a massa i un a la

entrada no inversora de l'amplificador operacional. D'aquesta manera la quantitat de senyal que s'envia és limitada per les resistències que el formen de manera que hi haurà un guany màxim de 1. La figura 53 mostra el circuit proposat.

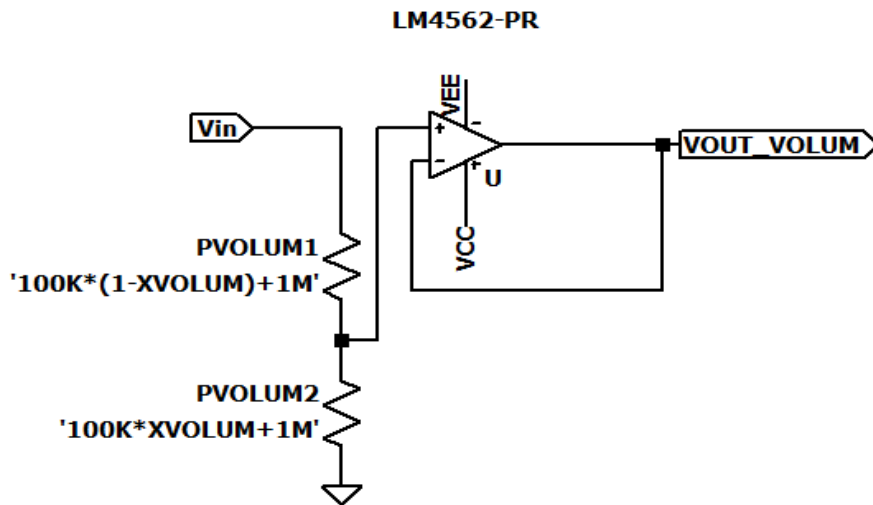


Figura 53: Circuit controlador de volum.

Matemàticament tenim:

$$V_+ = V_- = V_{OUTVOLUM}$$

$$P_{VOLUM1} + P_{VOLUM2} = P_{VOLUM}$$

$$\frac{(V_{in} - V_{OUTVOLUM})}{P_{VOLUM1}} = \frac{(V_{OUTVOLUM} - 0)}{P_{VOLUM2}}$$

$$V_{OUTVOLUM} = \frac{P_{VOLUM2}}{(P_{VOLUM1} + P_{VOLUM2})}$$

Els components emprats per aquestes etapes són (Taula.15):

Component	Valor
R_{in}	100K Ω
P_{guany}	100K Ω , Logarítmic
P_{Volum}	100K Ω , Logarítmic

Taula 15: Valors controladors de guany i volum.

11 Simulacions LTSPICE

Per tal de poder comparar els nostres càlculs, hem utilitzat el software lliure Ltspice, el qual ens ha sigut de gran ajuda per tal de modelar i ajustar el nostre circuit. A continuació es presentaran les simulacions d'interès que posteriorment compararem amb mesures reals.

11.1 Circuit final complet

Per tal de mostrar el circuit complet utilitzat, es presentarà per trams per tal de facilitar-ne la seva comprensió.

11.1.1 Etapa d'entrada

L'etapa d'entrada, tal com es mostra a la figura 54, formada per el control de guany, la xarxa prèvia al preamplificador, i el preamplificador, aquí passem d'un senyal de 0,1V a un de 4V filtrat, en la qual es permet regular la quantitat de senyal que enviem al preamplificador.

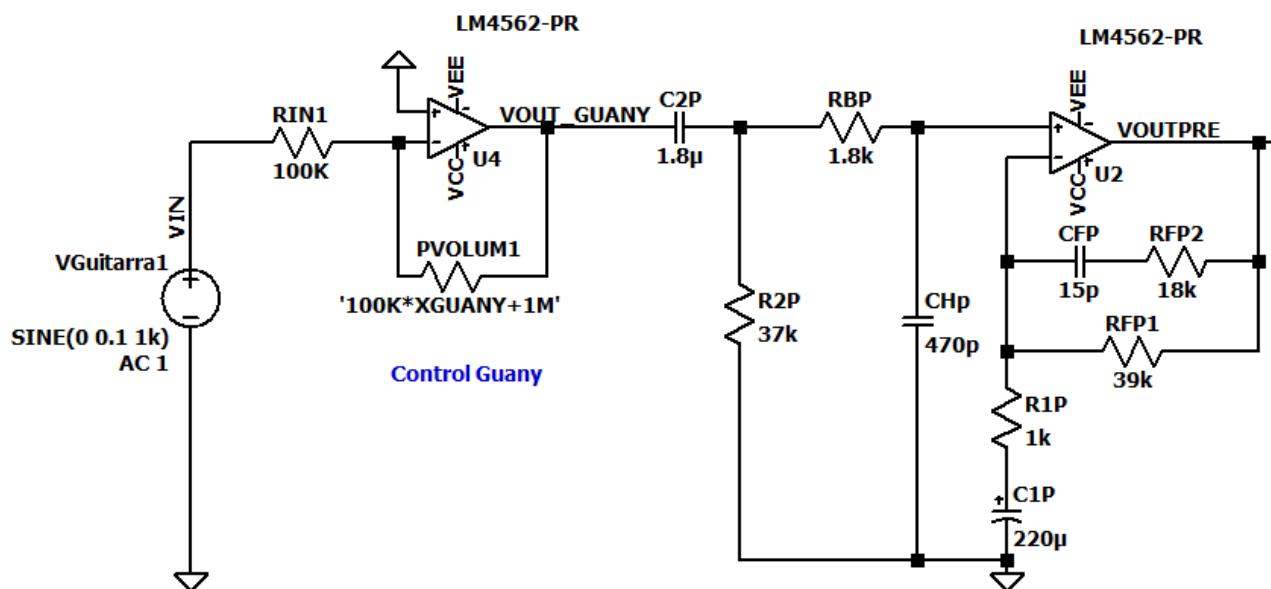


Figura 54: Circuit etapa d'entrada.

11.1.2 Etapa de treball

L'etapa de treball, que és on s'hi afegeixen efectes al senyal, està format per l'equalitzador i el distorsionador. Mostrada a la figura 55.

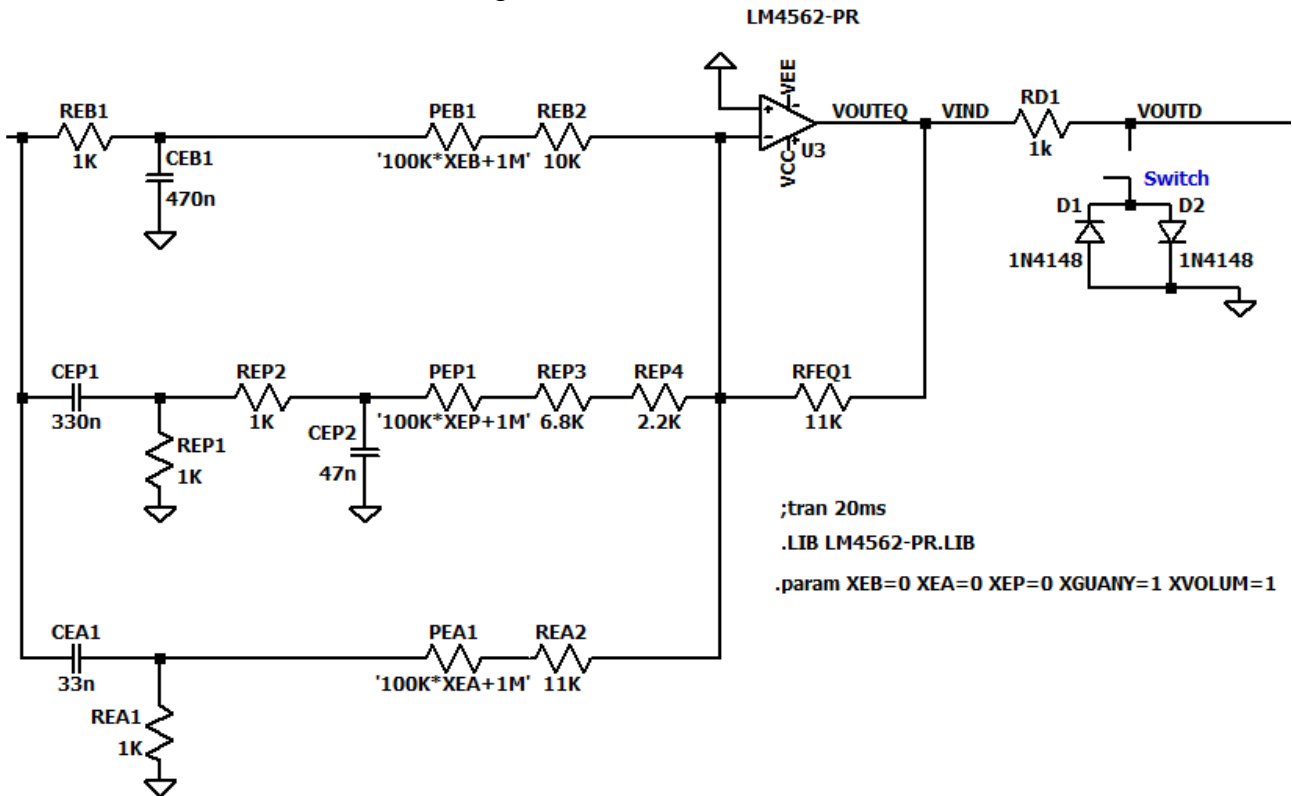


Figura 55: Circuit etapa de treball.

11.2.3 Etapa de potència

Etapa final, mostrada a la figura 56, formada per el controlador de volum, la xarxa d'entrada a l'amplificador, i l'amplificador, en el qual el senyal surt a 20V.

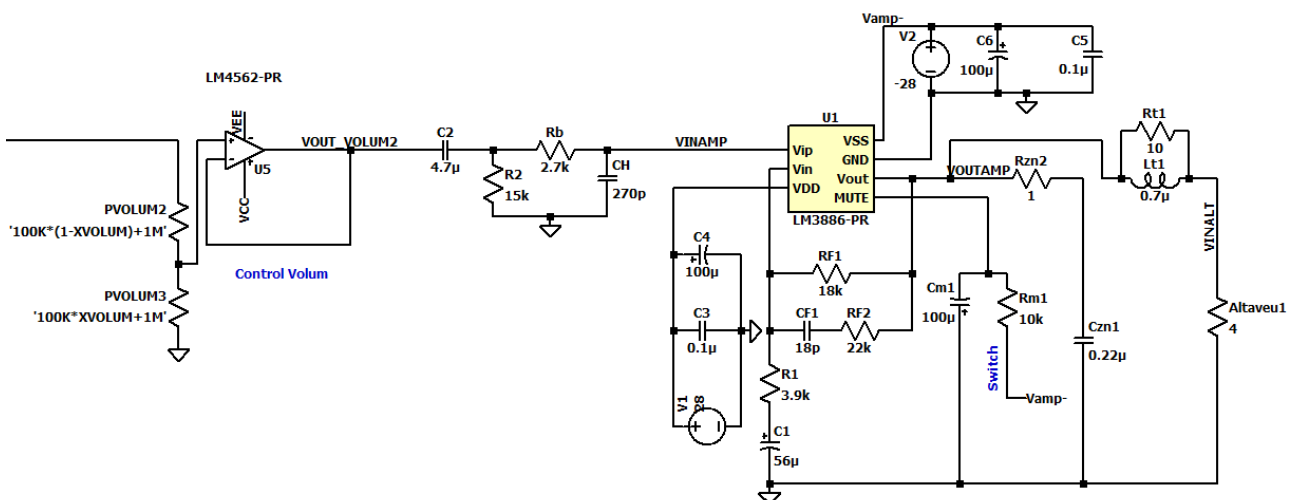


Figura 56: Circuit etapa final o de sortida.

11.2 Resposta freqüencial

En quan a l'ample de banda del nostre circuit, volíem la forma coneguda com a banyera invertida, és a dir un ample de banda limitat, per tal de no atenuar les freqüències audibles, i evitar així l'entrada de qualsevol soroll.

11.2.1 Preamplificador

Tenint en compte, que es van ajustar els guanys dels amplificadors per tal de mantenir les freqüències límits tenim a la figura 57 la resposta freqüencial del preamplificador i a la taula 16, els valors claus:

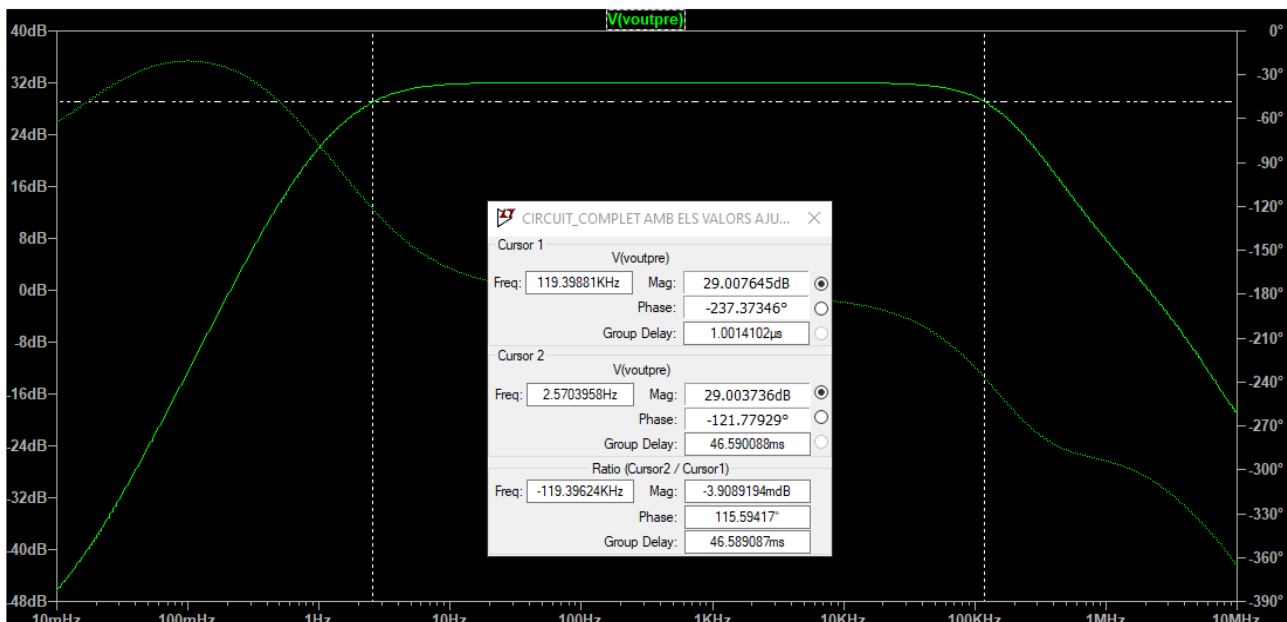


Figura 57: Espectre freqüencial simulat del preamplificador.

Mesura	Valor Desitjat	Valors Simulat a -3dB
f_L	2,17Hz	2,5 Hz
f_s	85kHz	119 kHz

Taula 16: Valors freqüències límits del preamplificador.

11.2.2 Amplificador

En la següent captura, (Fig.58) s'observa l'anàlisi AC a la **sortida de l'amplificador** a -3dB, és a dir l'espectre freqüencial que avarca el nostre circuit sencer, i a la taula 17 els valors límit importants.

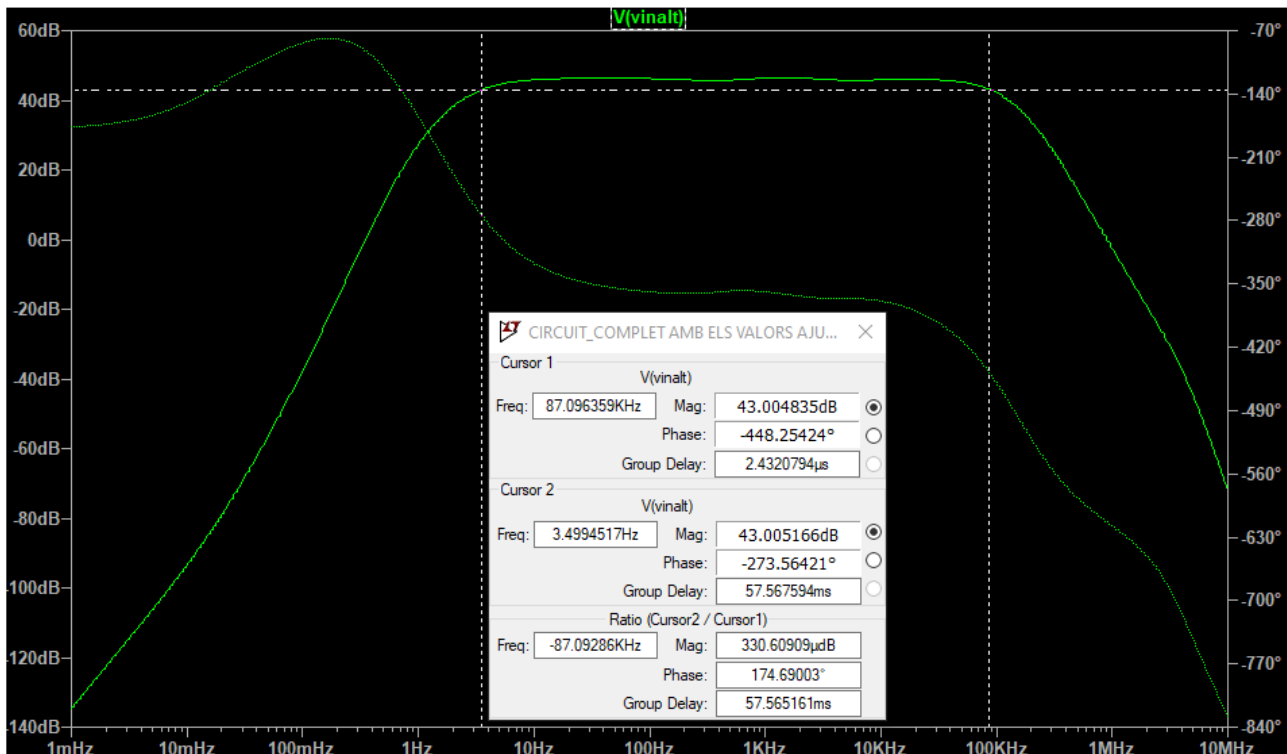


Figura 58: Espectre freqüencial simulat del amplificador.

Mesura	Valor Desitjat	Valors Simulat a -3dB
f_L	2,17Hz	3,5 kHz
f_s	85kHz	87kHz

Taula 17: Valors freqüències límits del amplificador.

Els valors tot i no coincidir al 100%, són prou raonables, cal afegir que els valors del simulador ja és amb valors normalitzats, i que queda per veure quan dista la realitat degut a les toleràncies dels components dels càlculs i simulacions.

11.3 Guany

Tenint els controls del guany, volum i equalitzador al màxim par tal de no intervenir amb el guany teòric màxim de les diferents etapes, i aplicant el mateix senyal sinusoidal de 0,1V de pic a l'entrada, tenim:

11.3.1 Preamplificador

A la figura 59, tenim la forma d'ona respectiva a la sortida respecte l'entrada del senyal del preamplificador.

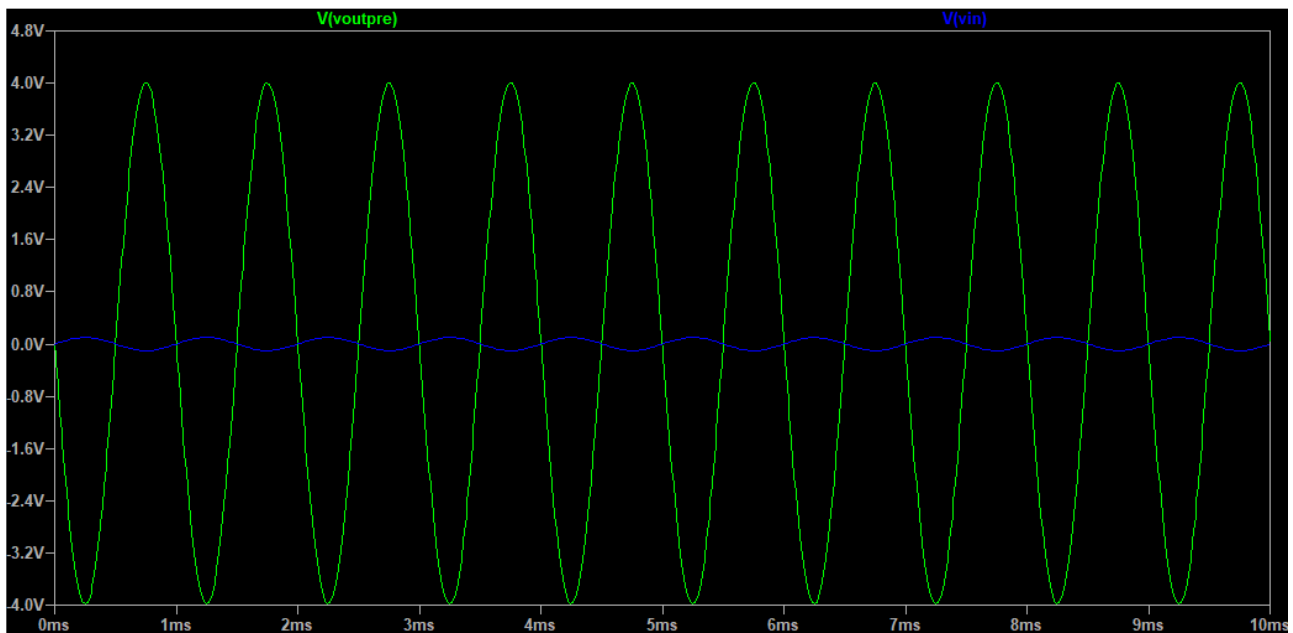


Figura 59: Forma d'ona sortida del preamplificador respecte l'entrada.

$$Guany_{preamp} = \frac{V_{OUTPREAMPpp}}{V_{in_{pp}}} = \frac{4}{0,1} = 40$$

Un guany de 40 respecte els 37 que esperàvem ens permet considerar-ho com a un resultat correcte, ja que tan sols ens allunyem un 7.5% del valor desitjat.

11.3.2 Amplificador

A la figura 60, tenim la forma d'ona respectiva a la sortida respecte l'entrada del senyal del preamplificador.

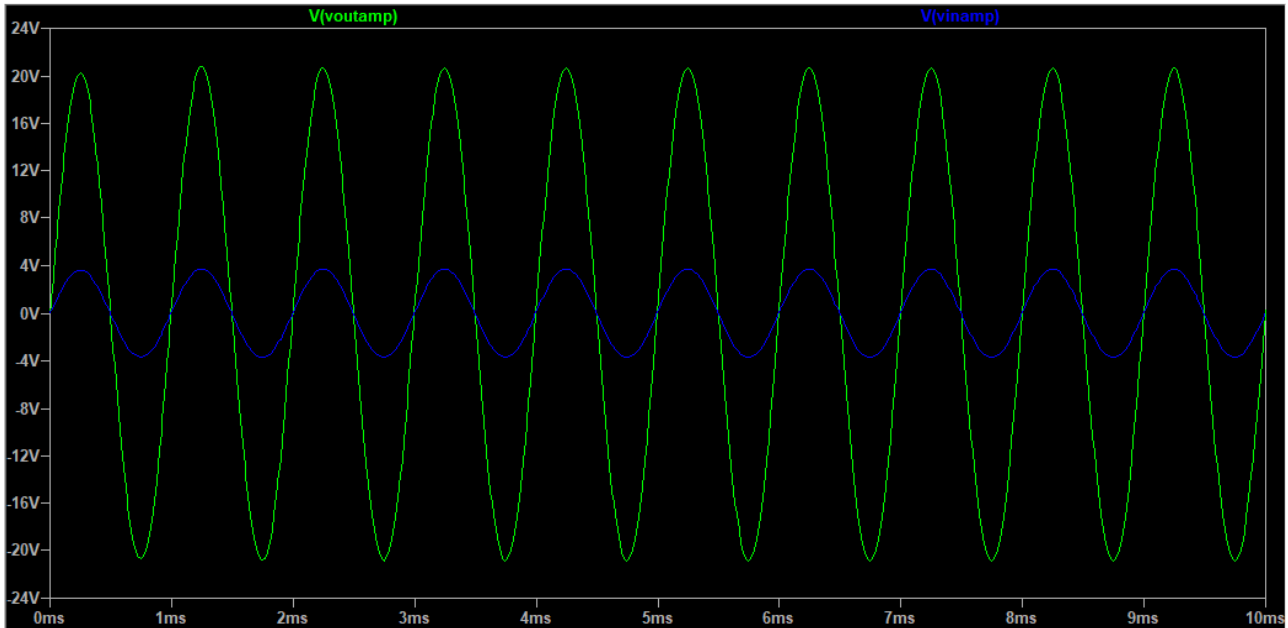


Figura 60: Forma d'ona sortida del preamplificador respecte l'entrada

$$Guany_{Amp} = \frac{V_{OUTLM3886}}{V_{INLM3886}} = \frac{20,57}{3,66} V = 5,620$$

Tenint en compte que s'esperava un guany de 5,4, és dona el resultat com a bo ja que representa un allunyament del% respecte el valor esperat.

11.4 Equalitzador

A continuació és presentat l'espectre freqüencial de cada una de les branques de l'equalitzador, actuant individualment, per tal de determinar quina freqüència de tall tenim i com atenua les freqüències de cada interval respecte la sortida de l'amplificador de potència i respecte la sortida del sumador de l'equalitzador, d'aquesta manera es pot comparar l'impacte que té real a la resta del circuit.

Per tal de determinar quina és la freqüència de tall en el simulador Ltspice, el que s'ha fet ha sigut agafar un valor màxim representatiu de l'ample de banda freqüencial, i restar-li 3 dB. Aquest nou punt representarà la freqüència de -3dB.

11.4.1 Passa baixos

Per a la branca dels baixos, la resposta freqüencial a l'entrada de l'altaveu és (Fig.61):

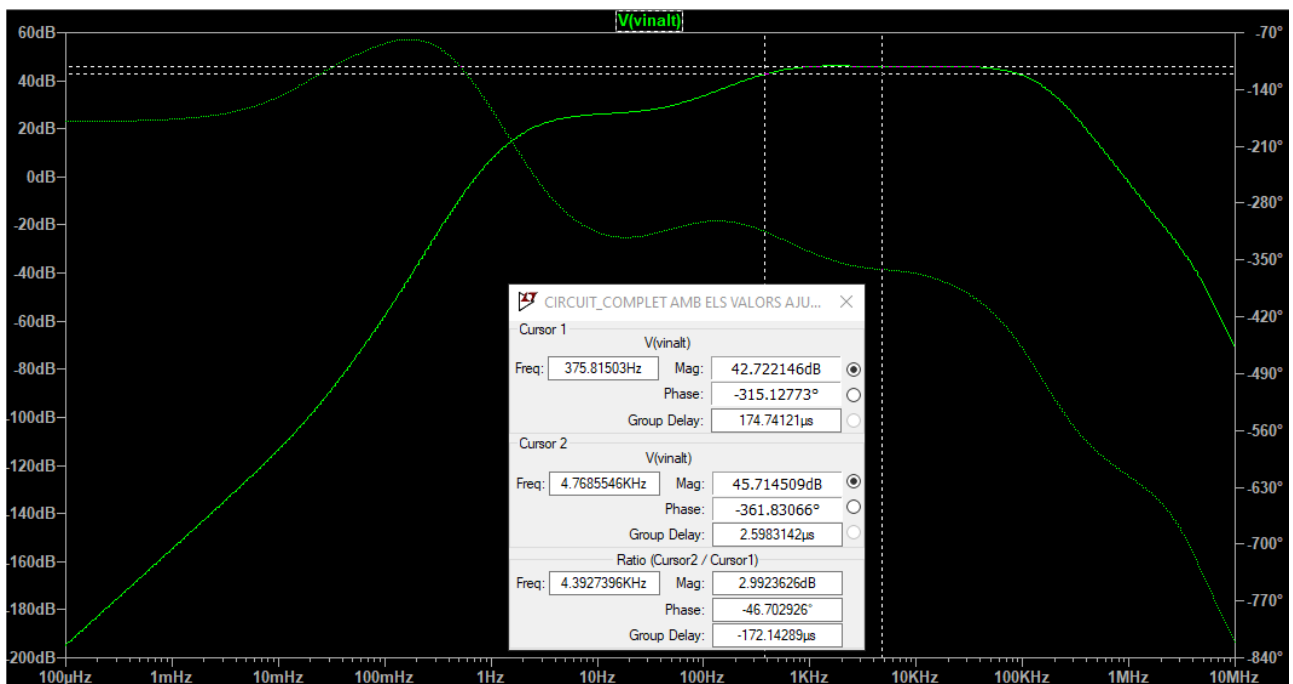


Figura 61: Efecte de la branca de baixos de l'equalitzador respecte l'altaveu.

La resposta dels baixos a la sortida del sumador de l'equalitzador (Fig.62):

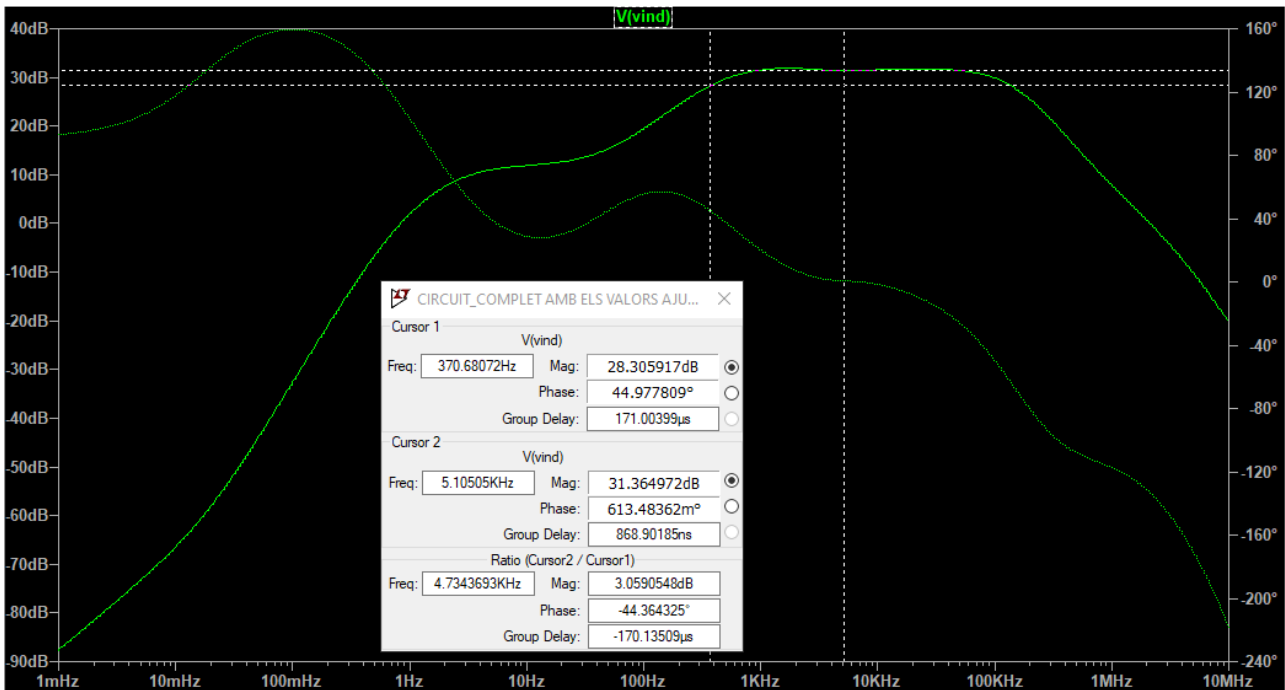


Figura 62: Efecte de la branca de baixos de l'equalitzador respecte la sortida del sumador.

El resultat dels valors teòrics i simulats els podem trobar a la taula 18.

Freqüència	Valor Simulat
$F_{LTeoric}$	338,62Hz
$F_{LSimulatAltaveu}$	375,81 Hz
$F_{LSimulatEQ}$	370,69Hz

Taula 18: Freqüències límits branca baixos obtingudes amb el Ltspice.

11.4.2 Passa banda

L'efecte del passa banda respecte a la sortida és (Fig.63):

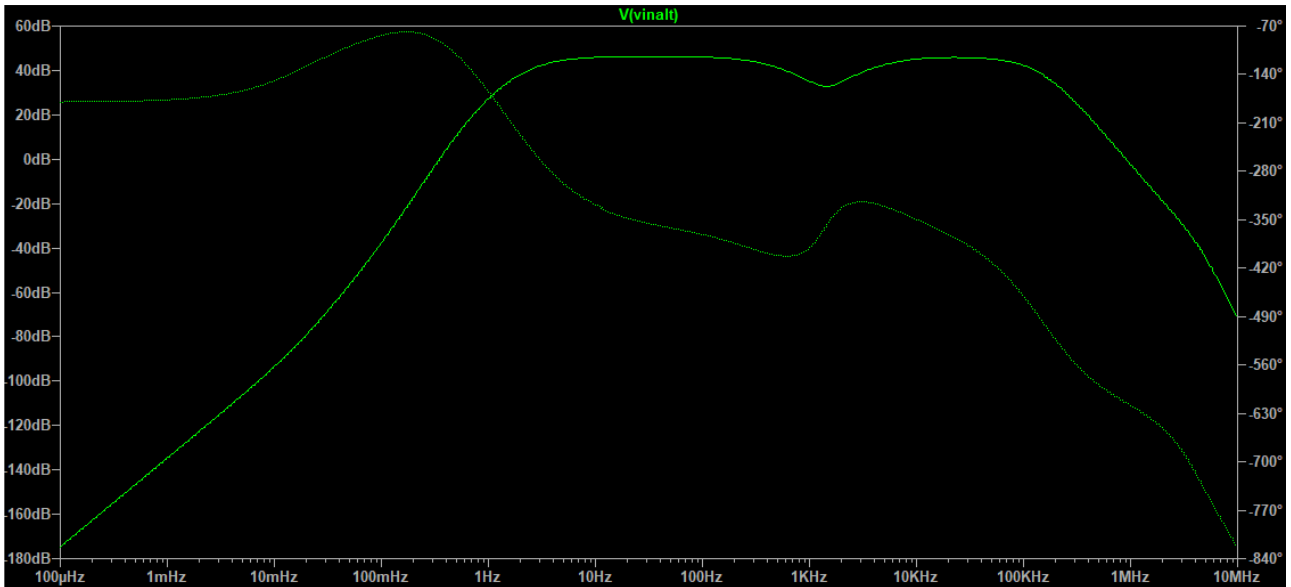


Figura 63: Efecte de la branca de banda de l'equalitzador respecte l'altaveu.

Els valors de les freqüències de tall són (Fig.64 i 65):

Freqüència inferior :

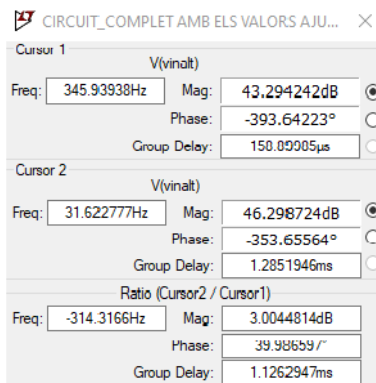


Figura 64: Mesures freqüència inferior passa banda respecte l'altaveu.

Freqüència Superior :

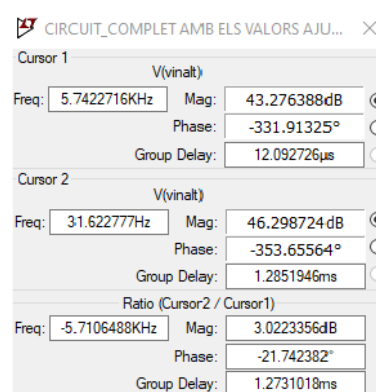


Figura 65: Mesures freqüència superior passa banda respecte l'altaveu.

Respecte a la sortida del sumador és (Fig.66):

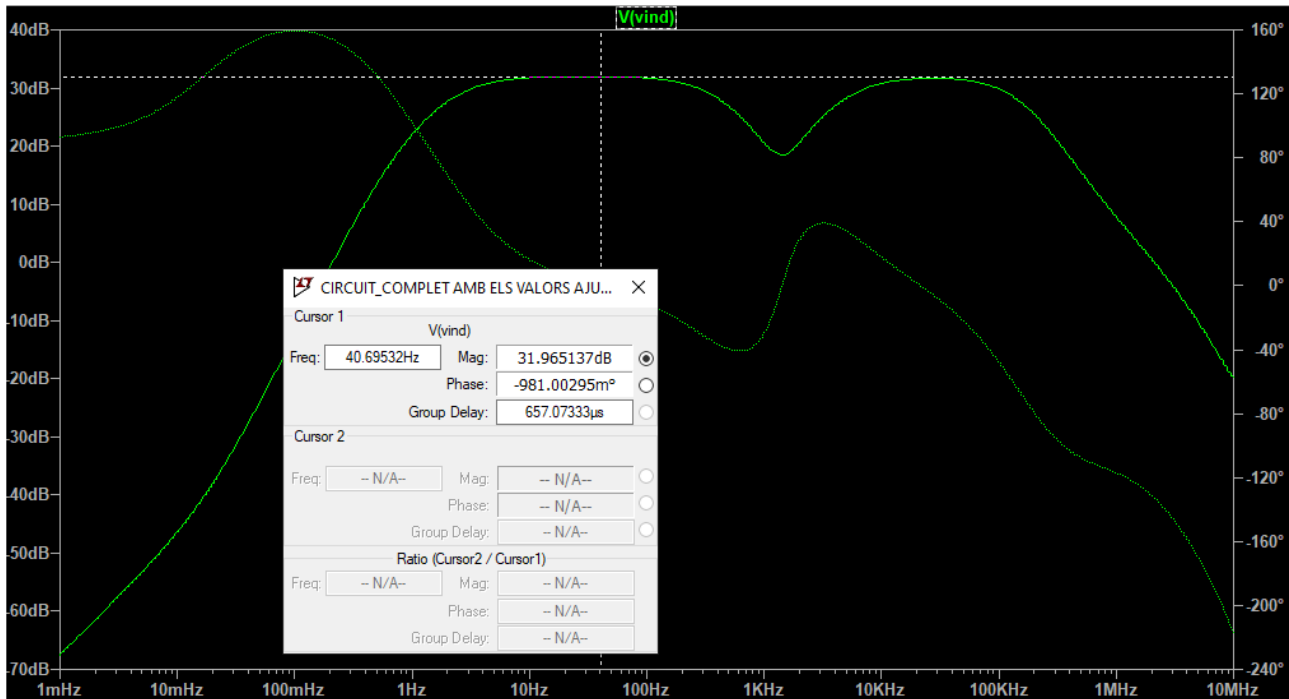


Figura 66: Efecte de la branca de mitjos de l'equalitzador respecte la sortida del sumador.

Els valors de les freqüències de tall dels mitjos són (Fig. 67 i 68):

Freqüència inferior:

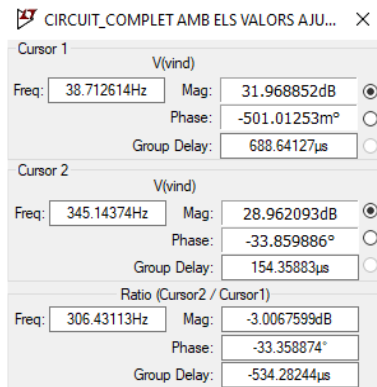


Figura 67: Mesures freqüència inferior passa banda respecte el sumador.

Freqüència Superior:

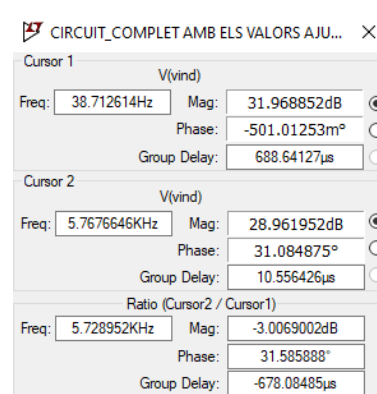


Figura 68: Mesures freqüència superior passa banda respecte el sumador.

Agafant com a valor màxim de referència la freqüència de 31,62 Hz, en la qual ens trobem a 46,29 dB, a -3dB tenim dos límits, que es mostren a la taula 19.

Freqüència	Valor Simulat
F _{LPB} Teoric	338,62Hz

$f_{LPBSimulatAltaveu}$	345,93 Hz
$f_{LPBSimulatEQ}$	345,14 Hz
$F_{HPBTeoric}$	3386,27 Hz
$f_{HPBSimulatAltaveu}$	5,74 kHz
$f_{HPBSimulatEQ}$	5,76kHz

Taula 19: Taula de valors simulats de la branca de mitjos.

11.4.3 Passa alts

Per últim, per al control de freqüències altes tenim:

A l'entrada de l'altaveu (Fig.69):

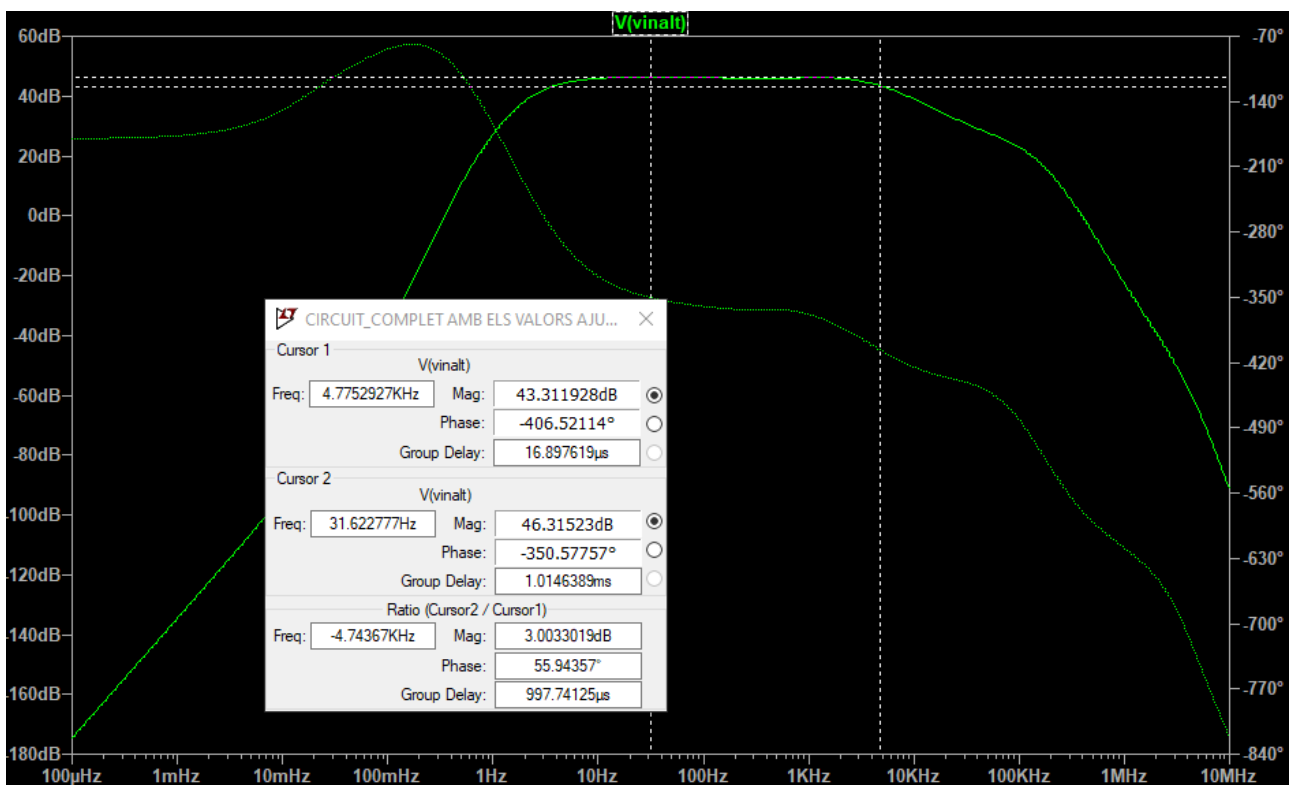


Figura 69: Efecte de la branca d'alts de l'equalitzador respecte l'altaveu.

A la sortida del sumador, la resposta freqüencial es (Fig.70):

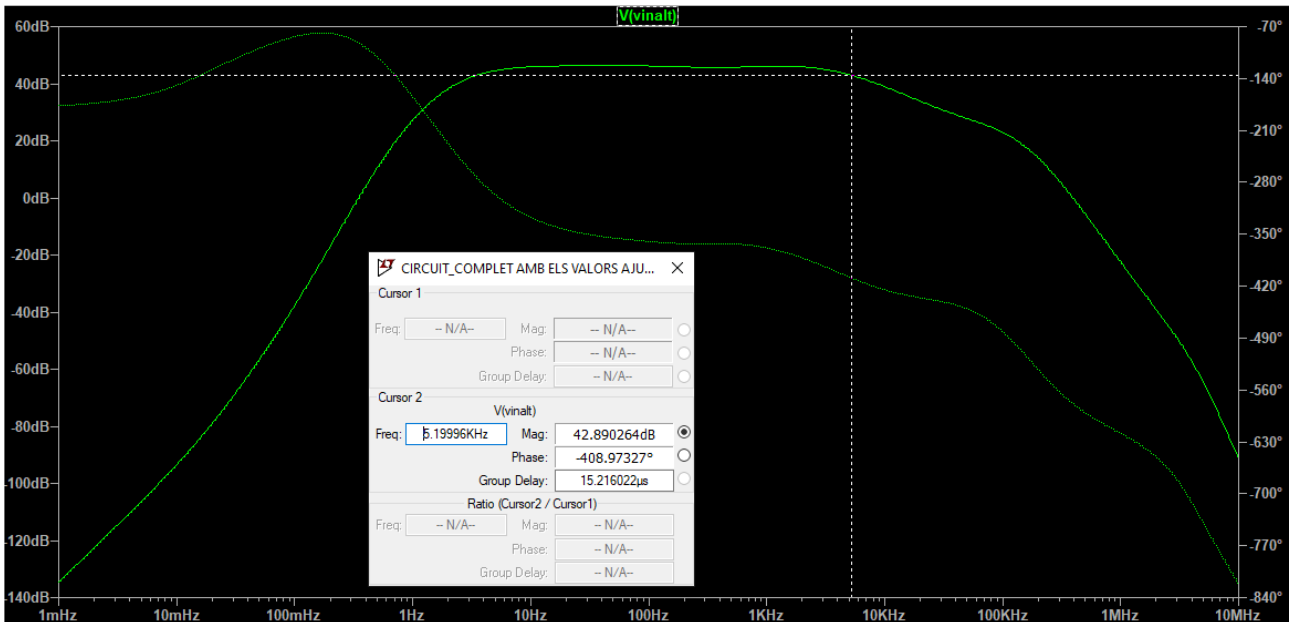


Figura 70: Efecte de la branca d'alts de l'equalitzador respecte la sortida del sumador..

En resum tenim els resultats a la taula 20.

Freqüència	Valor Simulat
$F_{H\text{Teoric}}$	4822,87 Hz
$F_{H\text{SimulatAltaveu}}$	4,77 kHz
$F_{H\text{SimulatEQ}}$	5,19kHz

Taula 20: Freqüències límits branca alts.

Com a conclusió, podem afirmar que tot i que els valors no són exactament els mateixos que els calculats teòricament, cal tenir en compte la resta d'etapes del circuit, i tot i així, tenen uns valors que es poden considerar correctes, ja que els límits de les fases no es toquen entre ells i estan correctament ordenats, a més a més, les diferents branques tenen un efecte visible i considerable en el senyal de la guitarra.

Per lo tant, tenint en compte la idea principal per la qual es va dissenyar l'equalitzador, es pot donar per satisfactori. Caldrà veure però, el seu funcionament com afecte en el muntatge real.

11.5 Distorsionador

Amb el distorsionador que hem dissenyat, tal com s'ha esmentat anteriorment, cal tenir dos factors a tenir en compte, un la tensió d'entrada, i la tensió dels díodes, en el nostre cas amb una entrada de 0,1V del senyal de la guitarra, tenim al distorsionador, 4V de pic, i com a díodes utilitzem els 1N4148 de 0,7 V de caiguda.

Així doncs tenim la resposta simulada que es mostra a la figura 71:

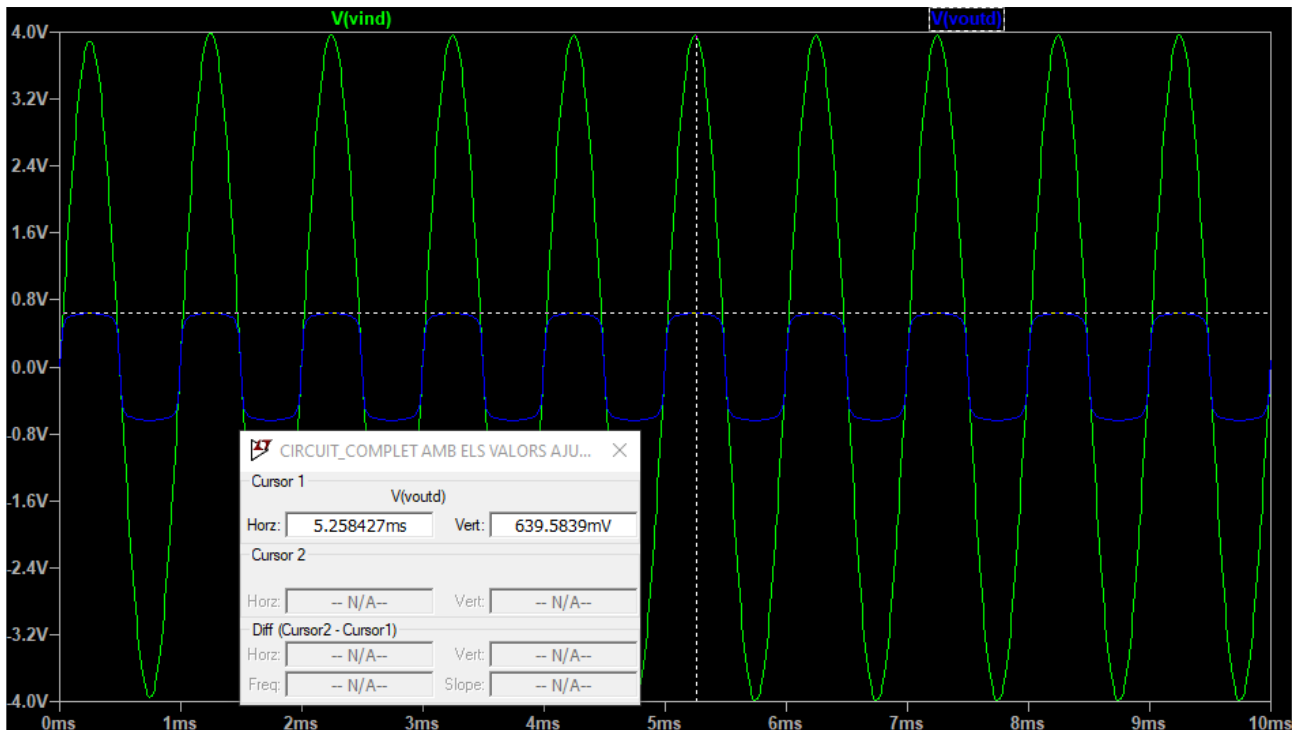


Figura 71: Efecte distorsionador simulat.

La forma d'ona que es presenta, és exactament la que s'esperava, per tant es pot donar el disseny del distorsionador, de moment, satisfactori.



12. Part experimental Protoboard

El principal objectiu d'aquest pas, era evidentment, posar en pràctica tot el que havíem simulat, per tal de veure si el nostre disseny era funcional, i en cas contrari, veure quines falles té i que podríem fer per solucionar-ho.

A més de guanyar experiència pel que a fa a la distribució dels components, ús dels components i l'ús dels instruments del laboratori.

12.1 Muntatge

El muntatge és va efectuar en una placa de proves, de la manera més modular possible, separant així les diferents parts del circuit, control de guany, preamplificador, equalitzador, distorsionador, i amplificador, per tal de que sigui més fàcil la detecció d'un error.

No es va posar un gran èmfasi en que la distribució fos excel·lent, però sí en el cablejat, en el què la consigna, era d'utilitzar el mínim de cable, això va comportar una gran quantitat de temps, però era el que havíem de fer ja que en aquest punt no sabíem del cert si faríem una PCB o no, a la figura 72, a la pàgina següent, es mostra una captura del muntatge esmentat.



Figura 72: Prototip placa de proves.

12.2 Problemàtiques

Al llarg de tot aquest procés hi ha hagut molts problemes i dubtes degut a la meva falta d'experiència.

També hi hagut certs moments en que el que ens ocasionava falles, era el material del propi laboratori.

Per tal de ajudar possibles lectors, descriuré algun dels problemes i o coneixement après que he tingut amb la seva solució o consell.

- Escriure malament l'esquemàtic del Lm4562, sembla una error molt obvi, però per culpa de no revisar bé l'esquemàtic de l'encapsulat quan el copiava a la meva llibreta per tal de fer mesures de distribució, vaig perdre força temps buscant el problema. Per tant, revisar sempre varies vegades els esquemàtics.
- Obviar l'ús dels condensadors de desacoblament, els quals donen una estabilitat immensa als circuits. De lo contrari s'obté una forma d'ona sense sentit.
- No posar el GND de la font d'alimentació quan s'alimentava de manera simètrica.
- Com a coneixement après, esmentar el funcionament dels potenciòmetres, les normes bàsiques de connexió sèrie/paral·lel dels components, l'ús del material del laboratori tals com la font d'alimentació, així com aprendre quina configuració s'ha d'utilitzar per tenir una font paral·lela, l'ús del generador de funcions i sobretot de l'oscil·loscopi, que caldria esmentar que s'haurien de renovar.
- L'ús correcte de les pinces per a mesurar i tria de components i un llarguíssim etcètera, però amb el que em quedo com a més valuós que après, és l'habilitat de detectar un problema i el procediment per tal de solventar-ho.

12.3 Dissipador LM3886

El fet de començar a provar el Lm3886, va evidenciar encara més la idea d'utilitzar un dissipador, ja que l'amplificador s'escalfava molt i deixava de funcionar. Per tant a continuació és descriu el càlcul efectuat per al nostre refrigerador, partint de l'esquema de la figura 73 i de la figura 74, tenim:

$$T_J = T_A + (\theta_{SA} + \theta_{CS} + \theta_{TC}) * P_D$$

On $\theta_{CS} = 0,4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ de la pasta aïllant més $0,2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ de la pasta tèrmica. $\theta_{TC} = 1^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

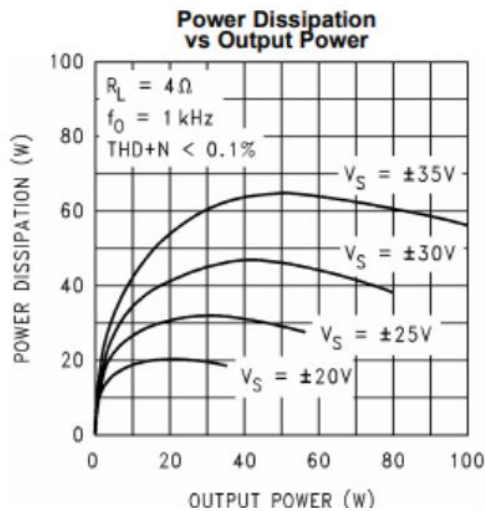


Figura 73: Potència dissipada respecte potència de sortida.

Tenim:

$$T_J \leq 125^\circ\text{C}$$

$$V_{CC} = -V_{EE} = 20\text{V}$$

$$P_{out} = 30\text{W}$$

Tret de la figura 75 tenim que $P_D = 20\text{W}$.

$$\theta_{SA} \leq \frac{(T_J - T_A)}{P_D} - (\theta_{CS} + \theta_{TC})$$

$$\theta_{SA} \leq \frac{(125 - 30)}{20} - (0,6 + 1)$$

Tenim:

$$\theta_{SA} \leq \frac{95}{20} - 1,6 \approx 3^\circ\text{C/W}$$

Necessitem per tant, un dissipador de almenys 3°C/W .

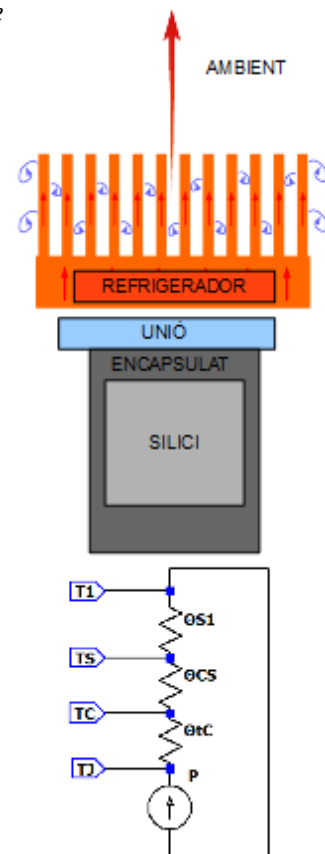


Figura 74: Esquema i elements refrigerador.

12.4 Conclusions

El fet de provar en el circuit en una placa de prova, ens va permetre veure, que el sistema funcionava, tot i que era molt poc pràctic, ja que tenia molts problemes de contactes electrònics i de distribució de components. Finalment vam decidir explorar la idea de fer una PCB.

Com que més endavant s'explicarà la comparativa entre les simulacions i el resultat final de la PCB amb detall, tan sols es mostraran exemples de quines gràfiques es van obtenir fent proves amb el circuit de proves: (Fig.75) resposta etapa d'entrada, resposta preamplificador amb $G = 39$, (Fig.76) i resposta del distorsionador (Fig.77).

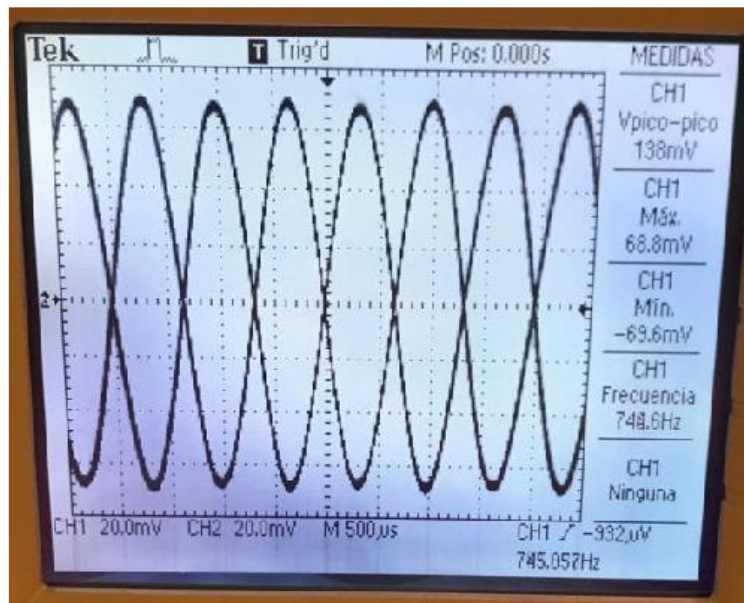


Figura 75: Exemple etapa d'entrada.

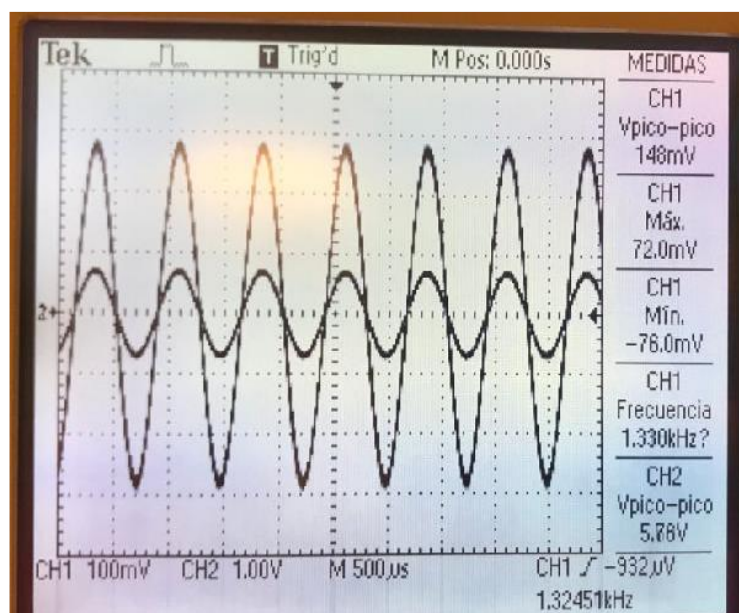


Figura 76: Exemple preamplificador, amb un guany de 39.

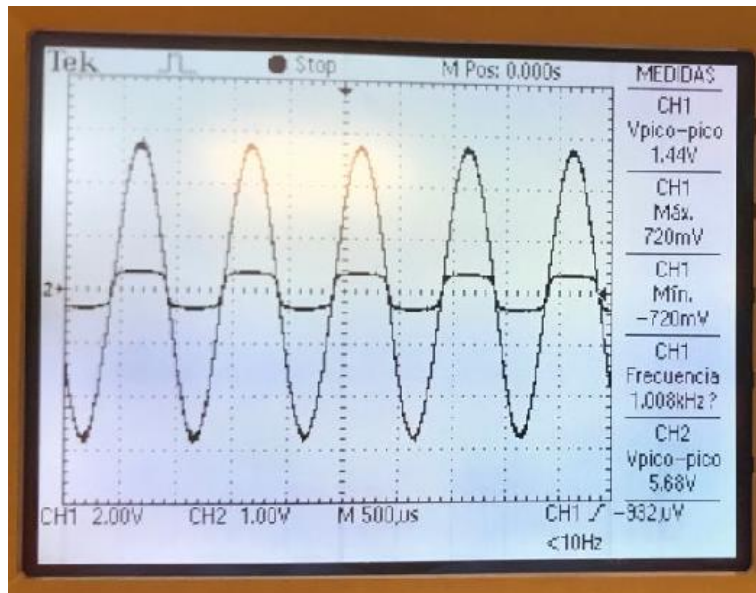


Figura 77: Exemple funcionament distorsionador.

13. Disseny PCB

Els resultats de les proves fetes a la placa de proves apuntaven que estàvem anant en la bona direcció, però també evidenciaven que hi havia molt marge de millora. Per tant, vam començar a investigar la possibilitat de fer el circuit imprès.

13.1 Reptes inicials

Partint d'una experiència pràcticament nul·la en l'àmbit de fer PCBs, va ser un inici molt dur ja que en prou feines sabia quins softwares hi havia per tal de fer-ne. Però tal com es porta fent durant tot el treball, s'ha de començar per algun lloc, preguntar i investigar. Així que em vaig disposar a descarregar-me el software lliure anomenat Kicad, i a aprendre el seu funcionament.

Tot i no haver provat cap altre software del per al disseny de PCBs, el recomano obertament, ja que es força intuïtiu i entenedor, i és disponible en diferents idiomes, a més a més, que hi ha molt contingut d'usuari a internet.

13.2 Versió 1

Tal com s'ha comentat, es va haver de començar per algun lloc, i per tant vaig decidir a fer pel meu propi compte un primer disseny. Vist amb perspectiva aquest disseny no té cap mena de sentit ni valor funcional ja que és un disseny horrorós, però si que és cert, que aquesta versió de la PCB, em va servir moltíssim per aprendre què no fer quan es fa un circuit imprès, i es pot veure com una pèrdua de temps, però estic segur que sense aquest disseny, no hauria arribat al producte final que posteriorment es descriurà en detall. La figura 78 de la pàgina següent, mostra el primer disseny de la PCB, pràcticament enllestit.

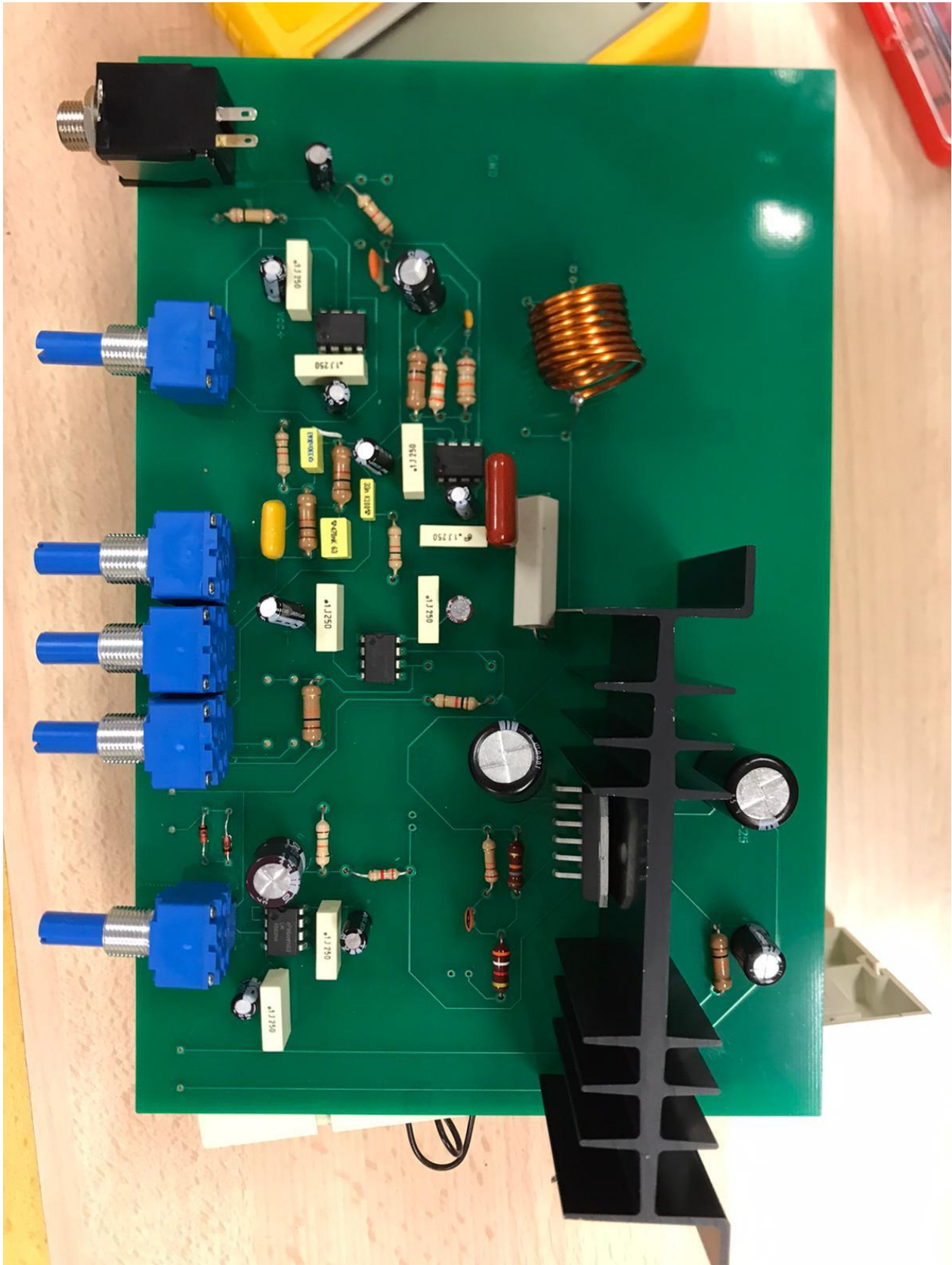


Figura 78:Primer prototip muntat.



13.2.1 Problemàtica

Tot i que no es descriurà amb detall aquí el procés de fabricació d'aquest prototip, ja que està carregat d'errors fins el punt que perd el sentit d'esmentar, es pot deixar constància de tot els problemes que té aquesta placa, els quals s'han utilitzat per a fer un millor prototip, que tot i tal com veurem té el seu marge de millora, és força millor que aquesta primera versió.

- Per començar, disposició poc optimitzada, el més fàcilment visible d'aquest disseny d'aquesta PCB a primeres, és la mida desmesurat que té, (210 mm d'amplada respecte 138mm d'alçada) amb la meitat de la PCB buida.
- La mida de les pistes està escollida sense cap criteri, és igual per a totes elles i no es té en compte els corrents amb els què.
- Espai pel dissipador ("el ferro"), ja que aquest queda sobre de la pròpia PCB i hauria de quedar a l'exterior, sense cap component darrera.
- Emprems dels components mal mesurades; tal com s'observa els potenciòmetres es toquen.
- Mal ús de les pistes, ja que no s'utilitzen els dos plans de la pcb ja que inicialment creia que anaven exteriorment, amb cables empalmats.
- No utilització de regletes, tant per les alimentacions com el propi altaveu.
- No utilització de sòcols per als CI, per lo qual, quan fallava un lm4562 no era fàcil canviar-lo.
- No utilització de plans ni entrades d'alimentació.
- Disseny de l'esquemàtic erroni en alguns punts.
- Utilització de màscara de soldadura, la qual cosa dificulta molt la soldadura i la pressa de mesures.
- Falta de suports per a la PCB.
- Valors obtinguts de posar components en paral·lel en vers de comprar el valor adequat.
- Cap mena de simetria estètica.

13.2.2 Resultat, proves i conclusions

Tot i que des d'un inici aquesta placa va donar problemes, ja sigui per possibles curtcircuits, masses mal connectades i un llarg etcètera, si que va permetre provar alguns mòduls del circuit.

Aquests valors experimentals de les proves realitzades, coincidien de manera fidel amb el els valors simulats, i ens va reconfortar saber que anàvem en la bona direcció.

Aquests mòduls que es van poder provar van ser, guany, equalitzador, distorsionador i etapa amplificadora i juntament amb els valors extrets de la placa de proves, es va decidir implementar una nova versió de la PCB, la figura 79, mostra el pla superior dels arxius de fabricació del primer prototip.

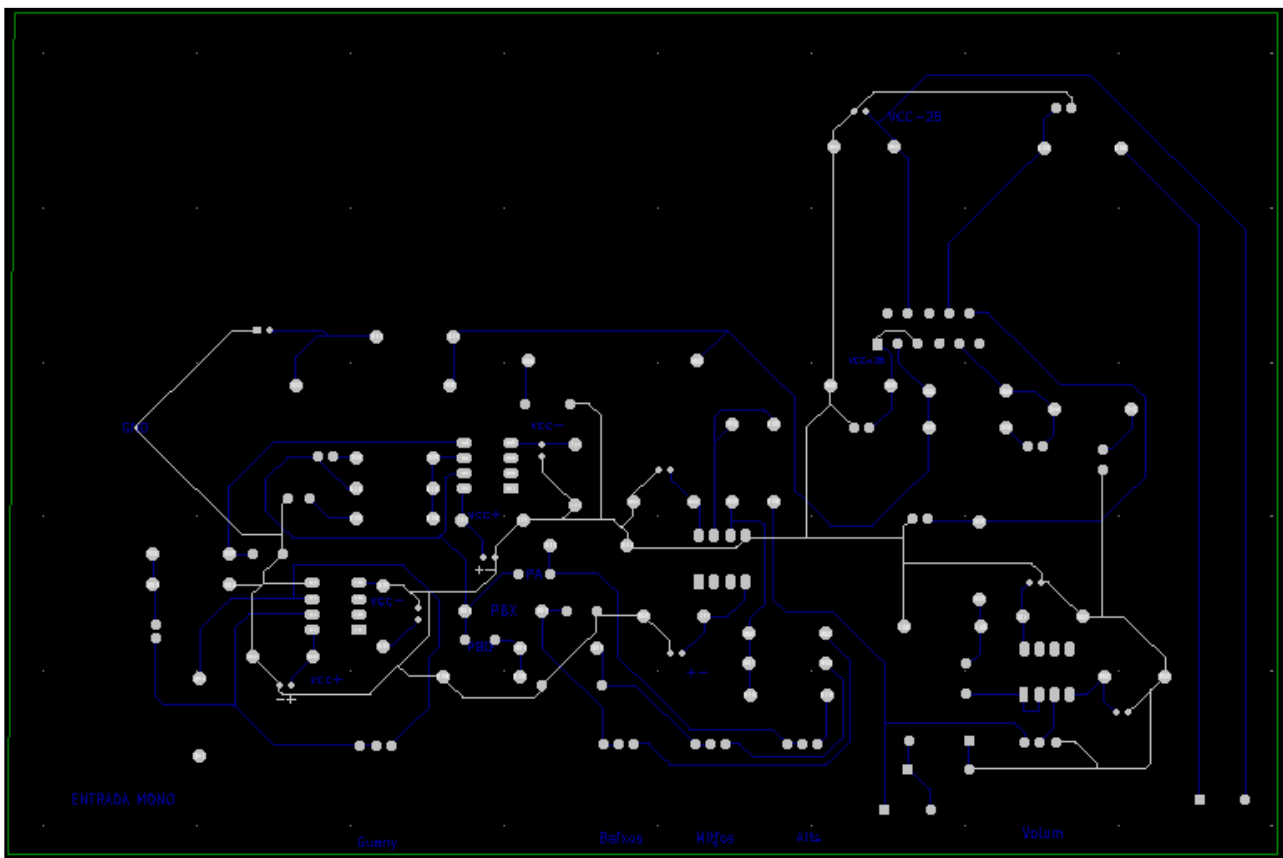


Figura 79: Arxiu gerber part superior PCB.



13.3 Versió Final

Un cop vam acabar d'analitzar tots els errors comesos en la versió inicial, vam decidir-nos a fer una nova placa dissenyada amb raonament, i tot i que tindrà algun error, aquesta s'intentarà fer seguint pautes lògiques.

Seguint el procés de disseny del Kicad, tenim:

13.3.1 Esquemàtic

El primer pas, alhora de fer un circuit imprès, és el de dissenyar l'esquemàtic, per tal de que el programa sàpiga quins components utilitzes, i per verificar les regles elèctriques.

D'aquesta manera el programa t'avisa de si hi ha algun problema, i així et pot facilitar la vida a l'hora de fer la disposició dels components sobre la placa, pot semblar no molt important si tens pocs components, però és essencial per a plaques amb molts components.

Si que és cert que es poden afegir i treure components en qualsevol moment, de fet en el nostre cas, vàrem oblidar els condensadors acobladors dels encapsulats, i els vàrem afegir posteriorment, però la manera més recomanable, és fent un bon esquemàtic des del principi ja que així després, cada "empremta", s'identifica amb el seu component real del circuit.

En el nostre cas l'esquemàtic que teníem, era el de la pàgina següent, la figura 80.

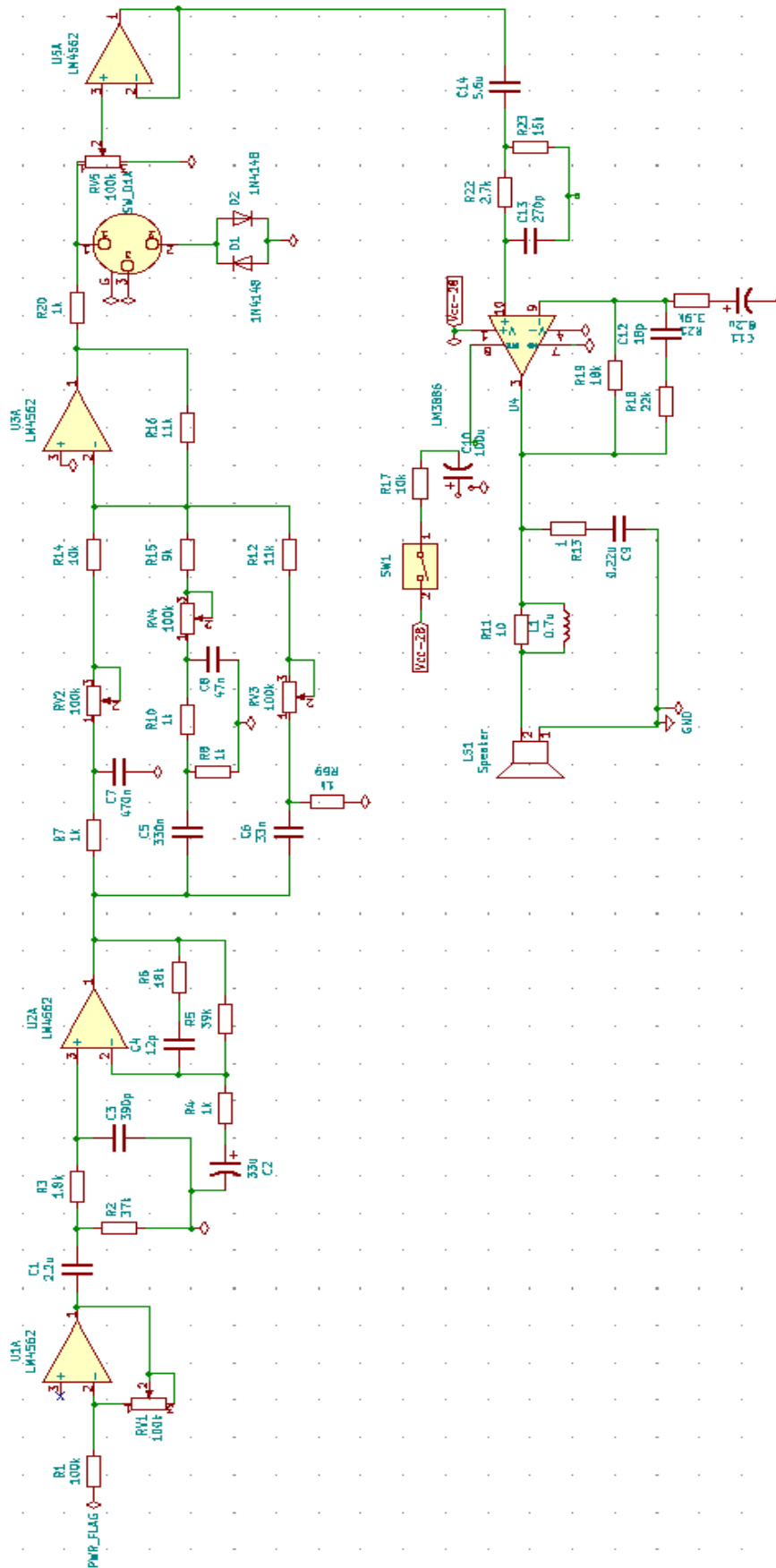


Figura 80: Esquematic del circuit a KiCad.

13.3.2 Distribució espacial dels components

Un cop verificades les regles elèctriques, haver donat valor a cada component, i sobretot haver aconseguit esquivar qualsevol tipus de missatge d'error, és el moment de fer el "layout", en el que es transporten tots els components de l'esquemàtic al programa de creació de la PCB, per tal de dissenyar el que serà la disposició espacial dels components a la PCB i les característiques d'aquesta.

En aquest pas, s'assigna las característiques de cada component, és a dir per exemple, si és un condensador, doncs assignar quina empremta té: si és electrolític, quin diàmetre i alçada té, o si és ceràmic quin espai ocupa, o assignar l'empremta dels encapsulats, la posició que cada component tindrà a la placa i les variables d'aquesta, com per exemple: la mida de la placa, la grossor, la mida de les vies...

Així doncs, en el nostre cas tot i tenir un petit error de disposició que més endavant vam solucionar i s'explicarà com, les figures 81, 82, i 83 mostren el nostre disseny.

En la figura 83, podem observar la disposició 2D dels components de la PCB, juntament amb les vies. És una PCB de dos cares, i en algun moment ha calgut utilitzar vies per la part inferior (color verd), per tal de connectar els components.

Amb diferència a l'anterior model, s'ha optimitzat més bé l'espai i s'utilitzen els dos amplificadors operacionals de cada encapsulat Lm4562, s'ha canviat la posició del Lm3886 de manera que el ferro dissipador estigui fora de la placa, s'utilitzen regletes per a les preses de tensió i senyal, i s'ha cuidat l'espai entre potenciòmetres.

També s'han actualitzat les empremtes d'alguns components, i s'ha tingut en compte les mides de les pistes.

Aquesta PCB havia de ser inicialment fresada a la fresadora de la universitat, i es va recomanar una mida mínima de vies de 0,6 mm de grossor, el qual va ser el que vam escollir excepte per la etapa de potència, que allà les vies serien de 1,5mm.

A més, com a canvi principal respecte a l'anterior disseny, és l'ús de plans de tensió i massa. A la imatge següent es pot veure la perspectiva superior de la PCB mostrant les àrees d'alimentació.

En la figura 84, es poden observar quatre àrees, la inferior i la superior esquerra, per tal d'alimentar els Lm4562 a +-15V, i les de la cantonada superior dreta que serveixen per alimentar el Lm3886 a +-20V. Es va dissenyar de manera independent per tal de si s'han de realitzar ajustaments en les alimentacions dels encapsulats, i evitar problemes d'abastiment i soroll.

La figura 85, és de la perspectiva inferior de la pcb, que és on tenim GND. Es va decidir dividir-ho amb dos grans àrees unides per una petita unió per tal d'evitar possibles oscil·lacions per diferència de massa.

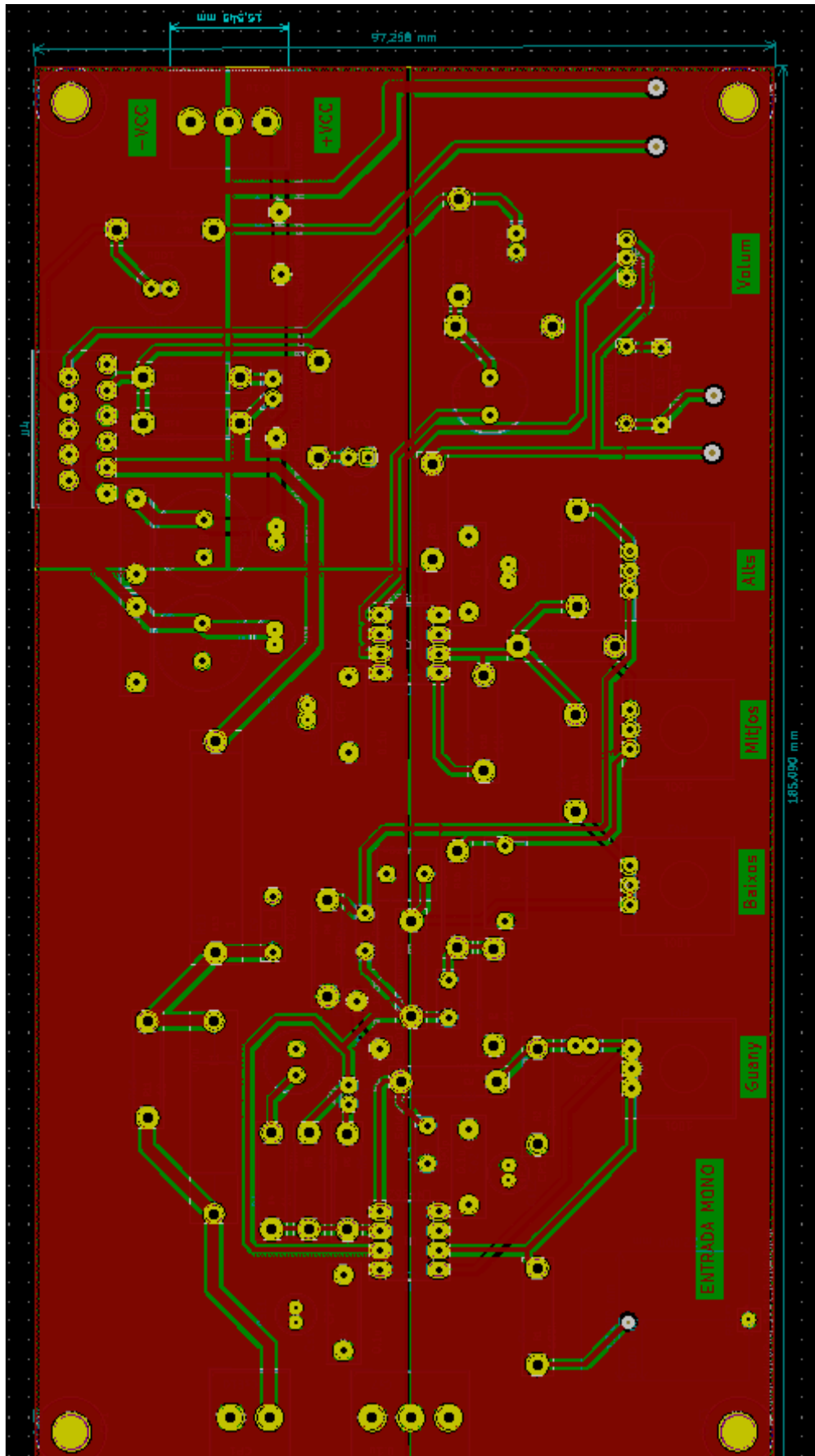


Figura 82: Part superior de la PCB, amb els plans d'alimentació activats.

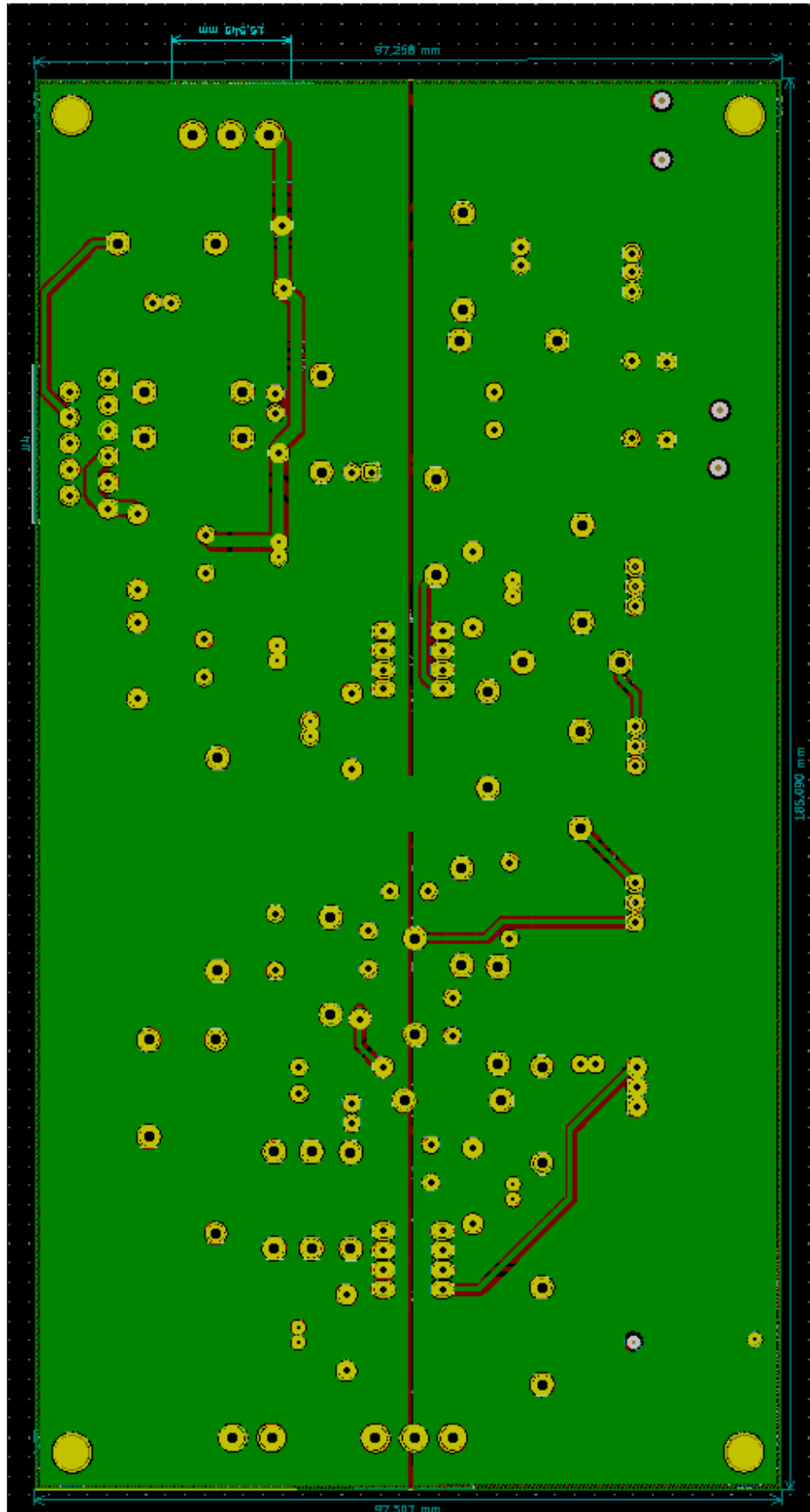


Figura 83: Part inferior de la PCB, amb els plans d'alimentació activats.

L'últim pas a l'hora de fer una PCB, és enviar els arxius Gerber a manufacturar, finalment però, degut a diferències amb el tècnic encarregat del departament, és va decidir encarregar la PCB a <https://jlcpcb.com/>, els quals van oferir un gran servei de qualitat i preu, a la taula 21, s'adjunten les característiques més rellevants de la PCB.

Capes	2
Color PCB	Verd
Silkscreen	Blanc
Surface Finish:	LeadFree HASL-RoHS
Pes capa externa Co	1 oz
Tipus de material	FR4-Standard Tg 130-140C
Dimensions	185 mm * 97.2 mm
PCB Grossor	1.6mm
Unitats	5
Preu total	28,22€

Taula 21: Detalls de fabricació i acabats PCB.

Per últim per tenir una idea del que esperàvem, s'adjuntaran a les següents pàgines, les figures 84, 85 i 86, que formen les diferents visions 3D virtuals del nostre prototip, el resultat físic del projecte el podem trobar a l'apartat 15 de conclusions, (Fig.110,111,112).

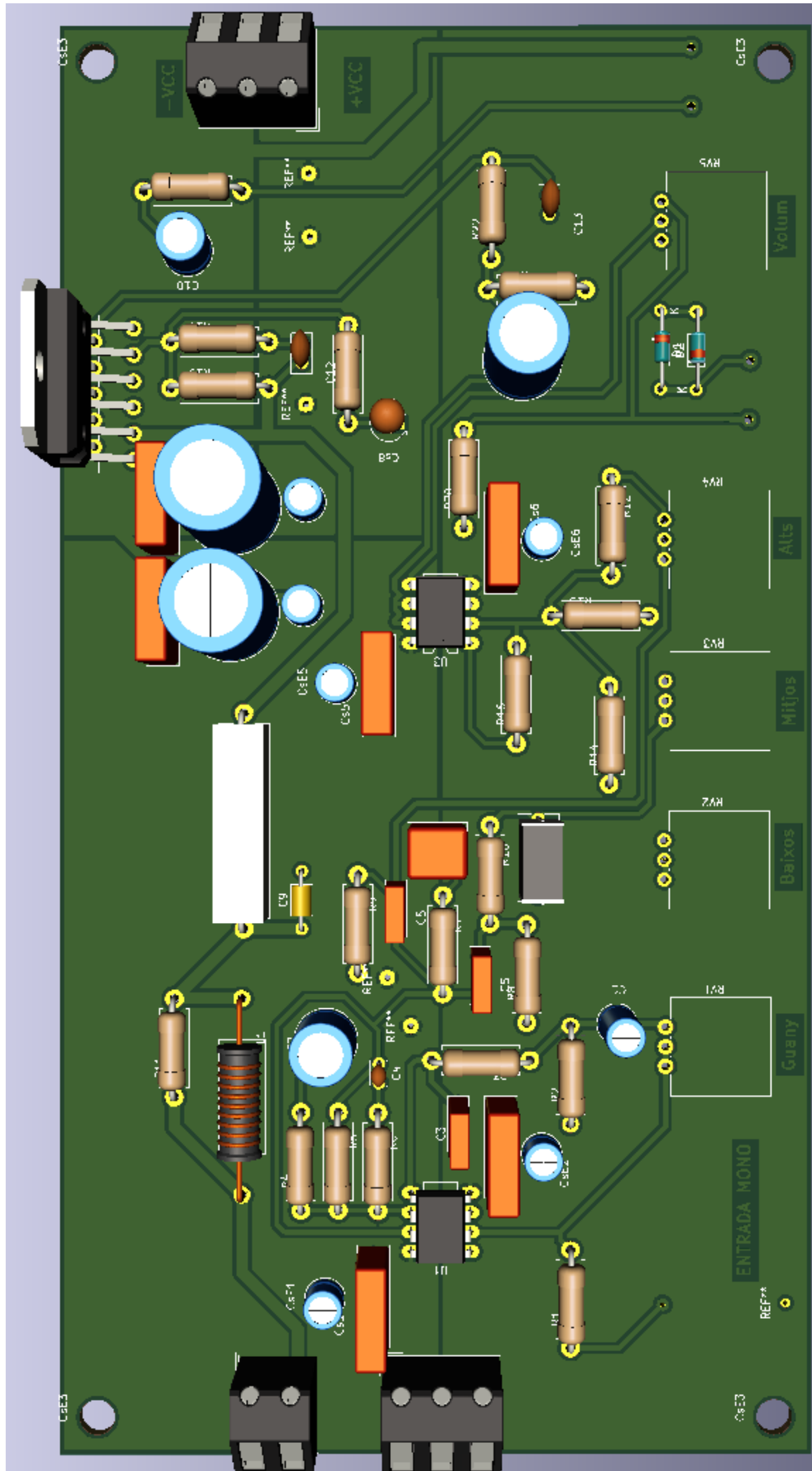


Figura 84: Vista superior model 3D del circuit imprès.

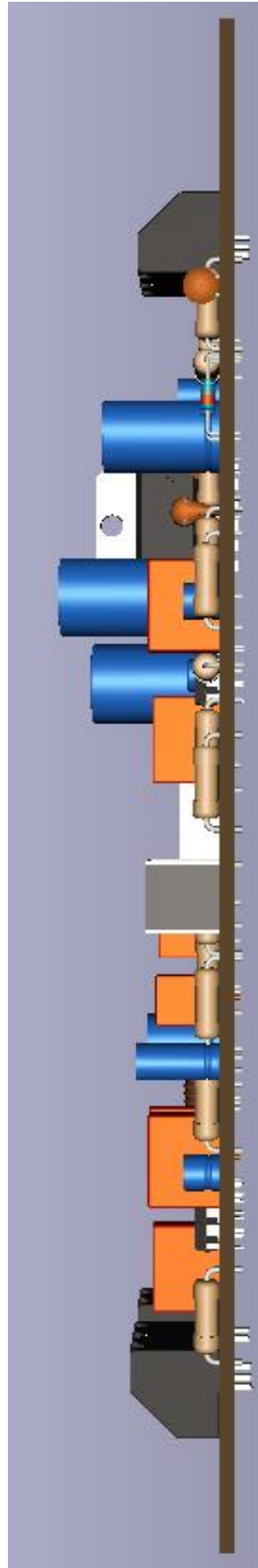


Figura 85: Vista frontal model 3D del circuit imprès.

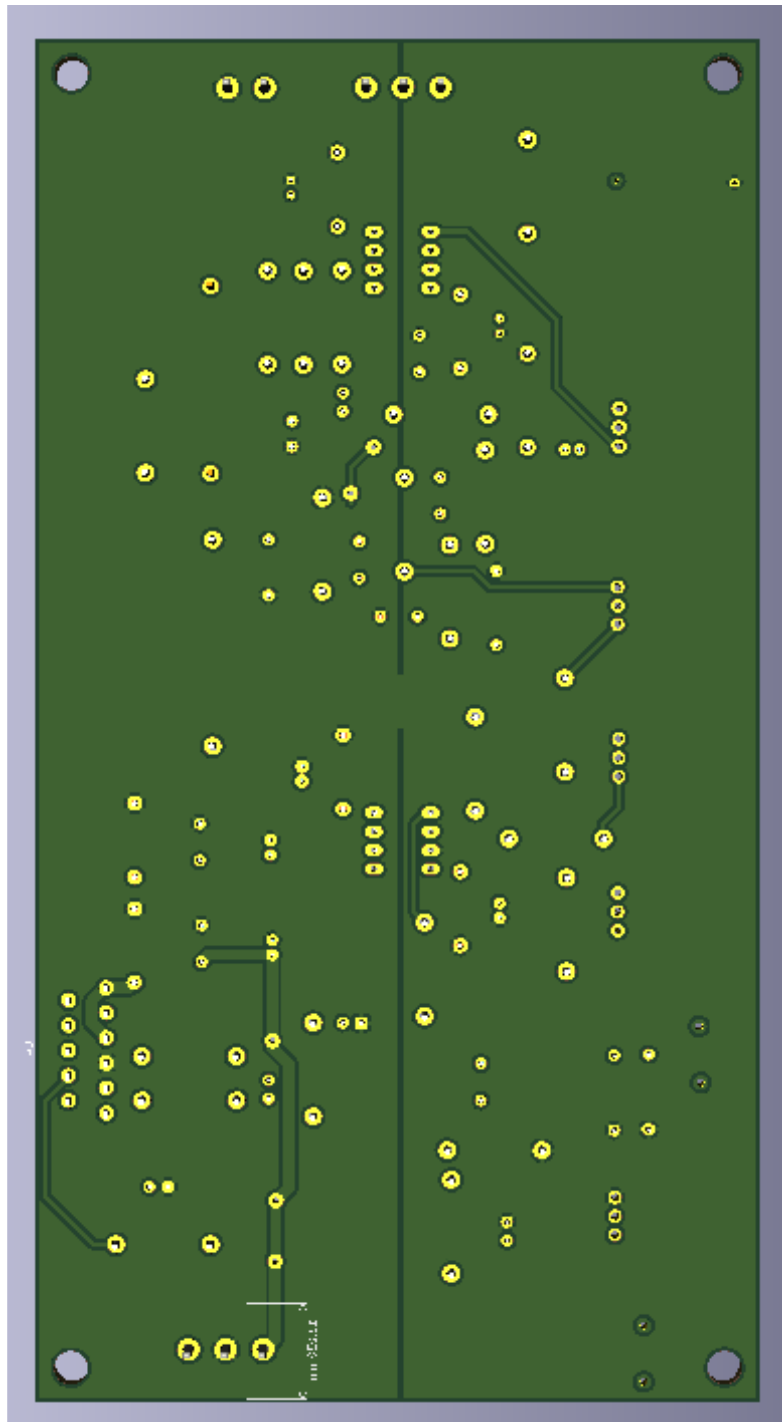


Figura 86: Vista inferior model 3D del circuit imprès.

14. Resultats experimentals

A continuació, s'adjuntaran els diferents resultats experimentals, avaluats modularment, comparant amb els valors teòrics i simulats.

14.1 Guanys

14.1.1 Preamplificador

La figura 87, s'il·lustra la resposta del preamplificador amb una entrada sinusoidal de 100mV_{PP}, a 1kHz.

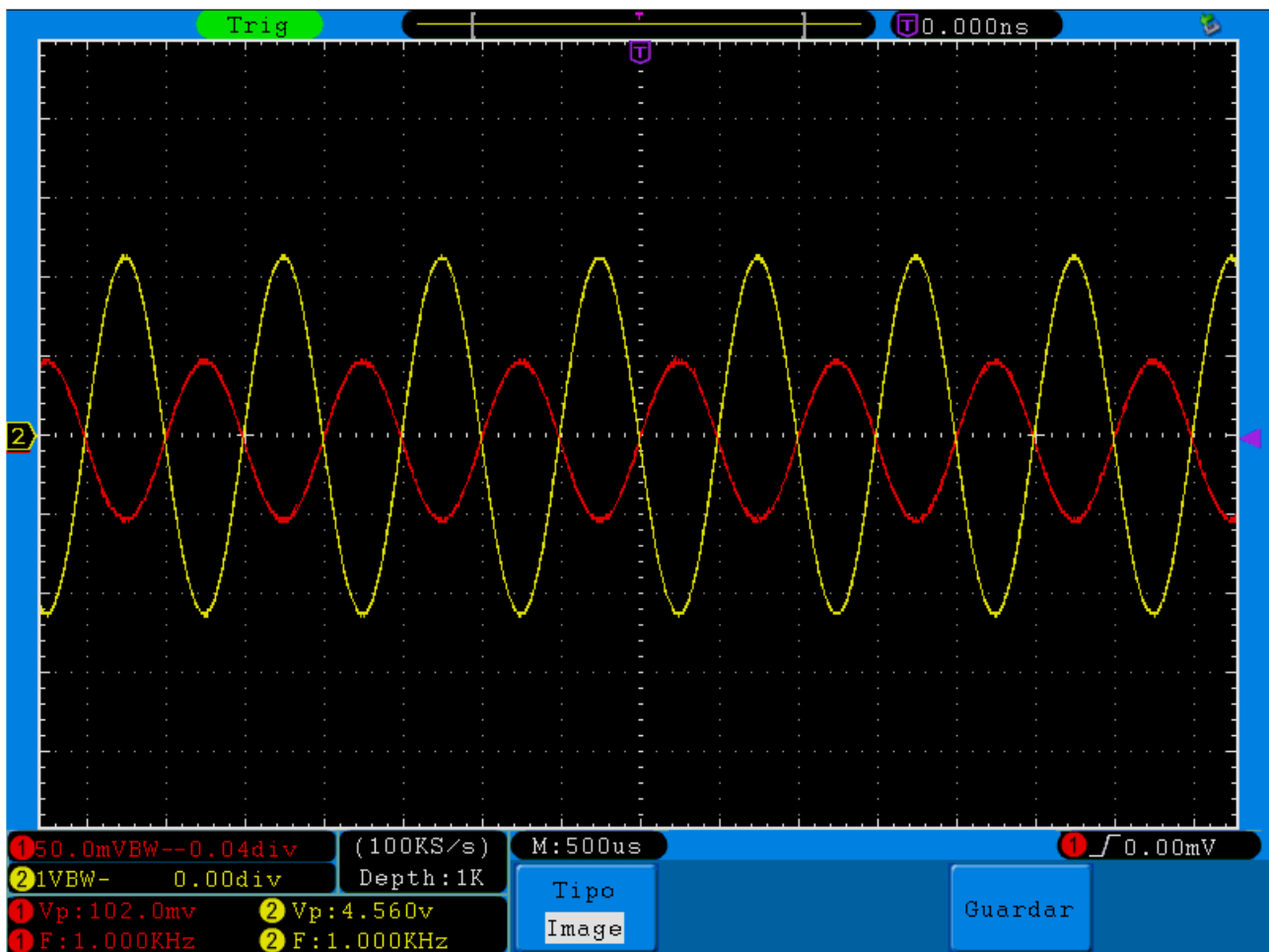


Figura 87: Senyal sortida del preamplificador respecte el senyal d'entrada.

$$Guany_{preamp} = \frac{V_{out_{PREAMPpp}}}{V_{in_{pp}}} = \frac{4,5}{0,102} = 44,11$$

Cal comentar el valor d'aquest guany és degut a la tolerància del propi potenciòmetre, però el valor el prenem com a bo ja que al final és un valor ajustable. Teníem previst tenir un valor màxim de 38 i finalment és de 44,11, per tant, és pot donar per correcte, ja que representa un 16% més de guany respecte el guany esperat,

14.1.2 Amplificador

En quan a determinar el guany de l'amplificador, és una tasca feixuga, ja que el senyal de sortida presenta oscil·lacions en augmentar la potència de sortida. Per tant, s'agafarà com a valor de voltatge de sortida, el valor màxim que no presenti oscil·lacions, que és a aproximadament $10V_{PP}$

A la figura 88 es mostra la resposta de l'amplificador de manera aïllada tenint com a mesures V_{in} el senyal de sortida del preamplificador a 1kHz.

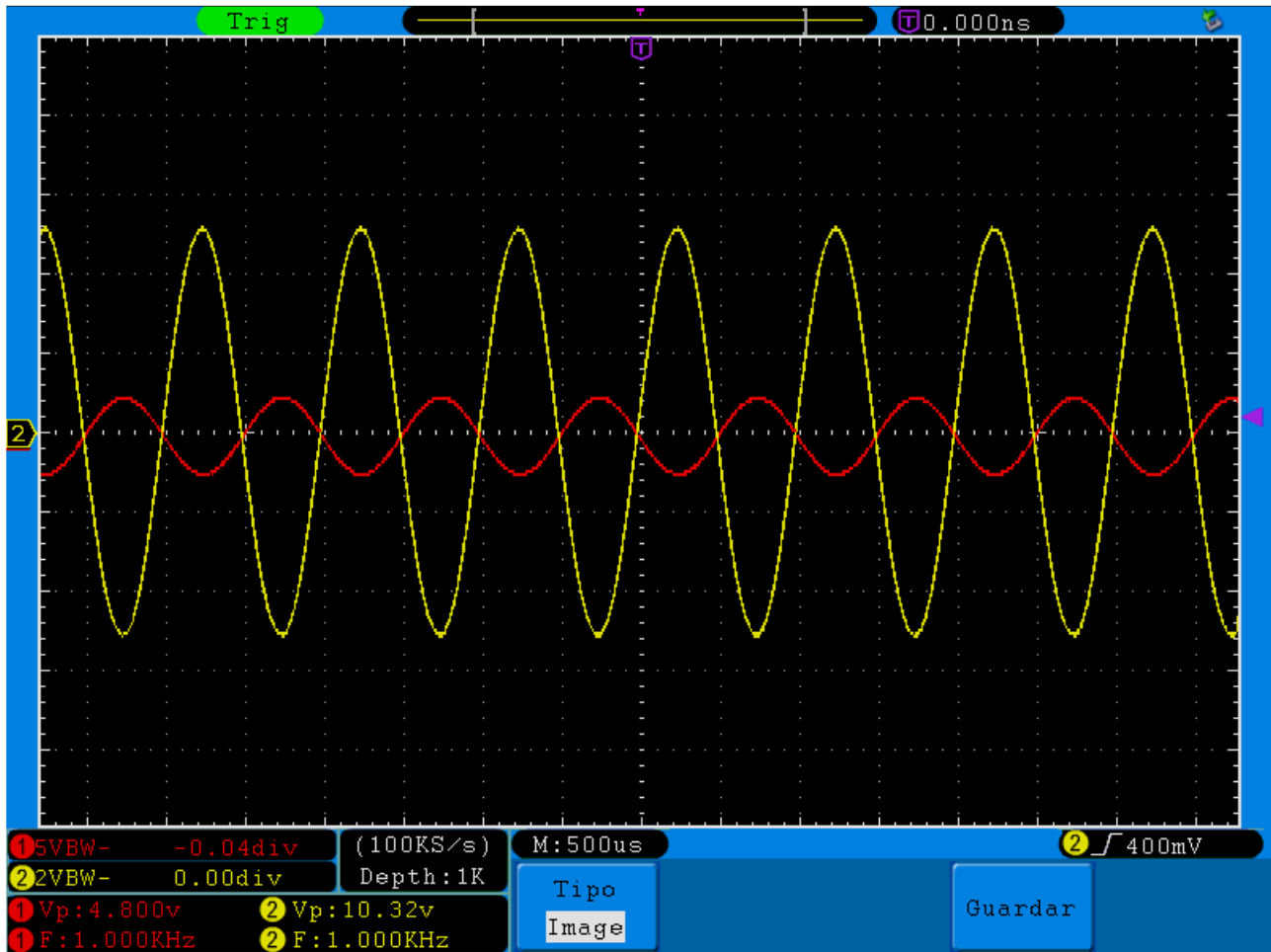


Figura 88: Senyal sortida del amplificador respecte el senyal de sortida del preamplificador.

$$Guany_{preamp} = \frac{V_{out_{AMPLIFICADORpp}}}{V_{IN_{PREAMPpp}}} = \frac{10,32}{4,8} = 2,145$$

La figura 89, es mostra la el senyal de sortida respecte el senyal d'entrada, amb $f=1\text{kHz}$ i $V_{in} = 0.1V_{pp}$

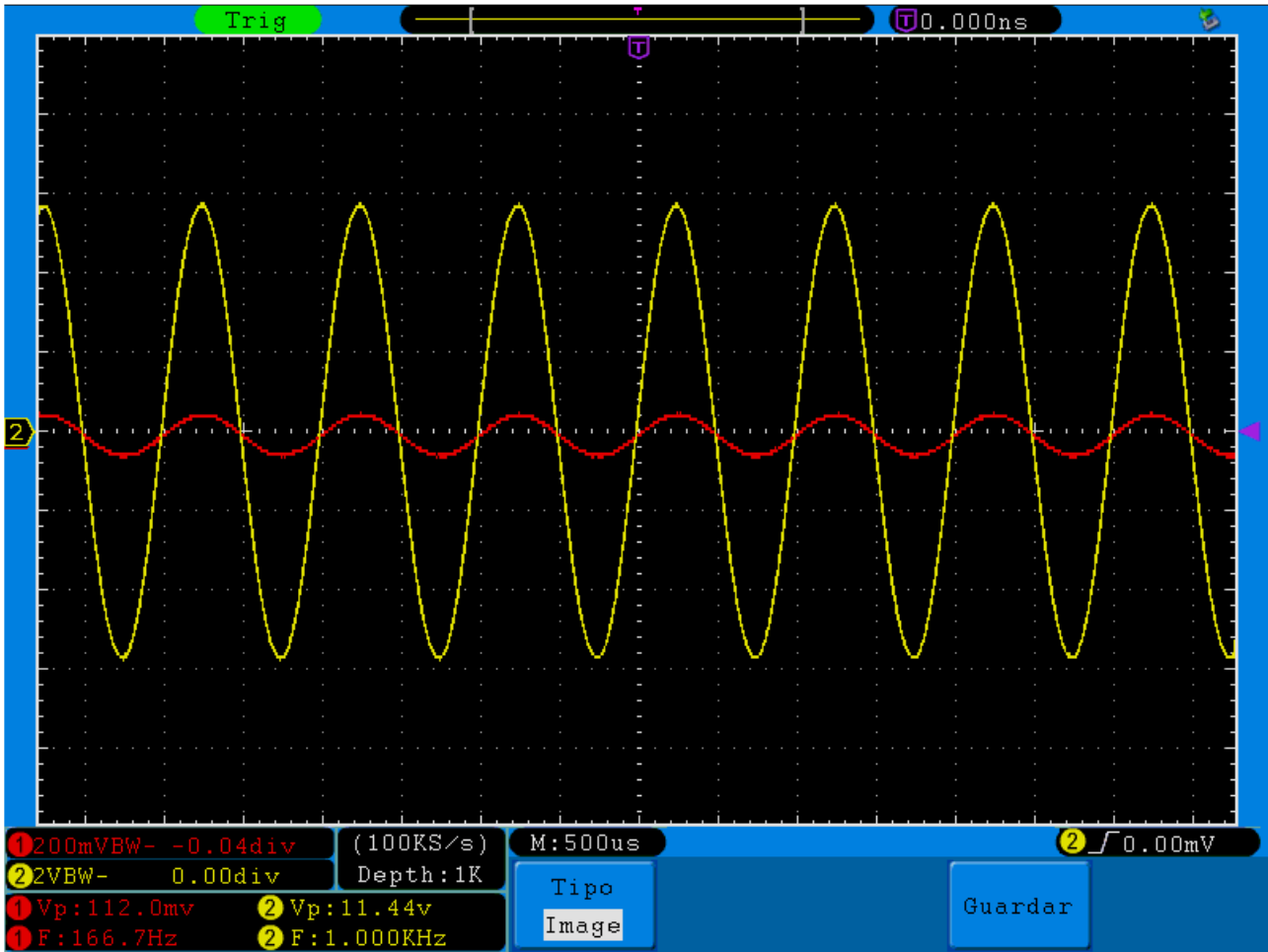


Figura 89: Senyal de sortida del amplificador respecte el senyal d'entrada.

$$Guany_{preamp} = \frac{V_{out_{AMPLIFICADORpp}}}{V_{IN_{pp}}} = \frac{11,44}{0,112} = 102,14$$

Ambdós valors obtinguts són pràcticament menys de la meitat dels valors que esperàvem obtenir, 5,6 i aproximadament 200, el qual llastimosament ens fa limitar la potència, però caldrà veure les proves de so per tal de considerar l'amplificador com a admissible o no.

14.1.3 Oscil·lacions

Tal com hem explicat anteriorment en augmentar la potència de sortida de l'amplificador, apareixien unes oscil·lacions desconegudes, les quals feien l'alimentació del Lm3886, variable. Aquestes tenien generalment la següent forma, i, o apareixien directament al augmentar la potència, o al cap d'una estona de forma força periòdica. Aquestes oscil·lacions s'il·lustren a la figura 90.

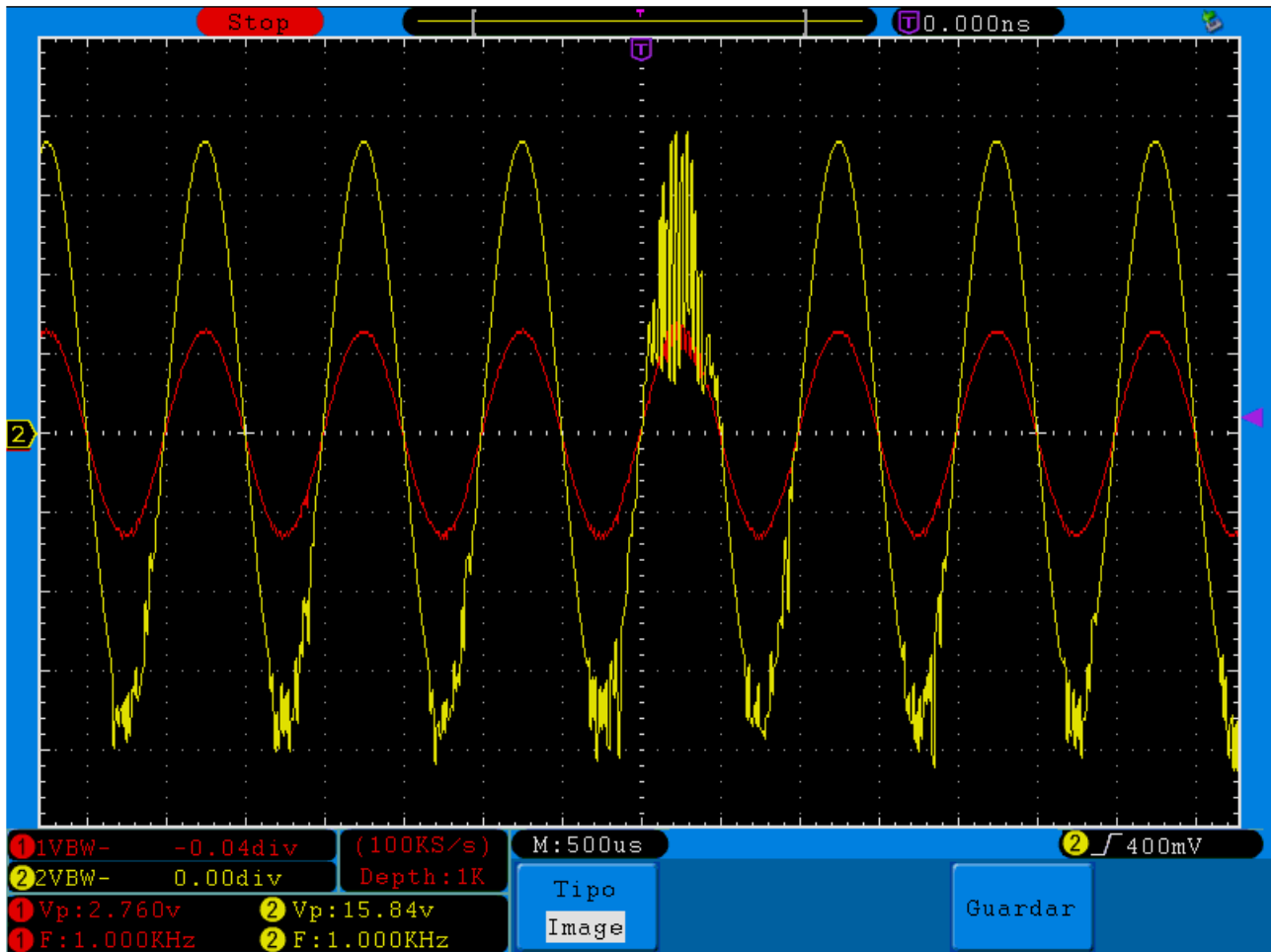


Figura 90: Oscil·lacions senyal de sortida.

Aquesta variació de l'alimentació, es traduïa a una variació del senyal i per tant afectava al so en forma de distorsió.

Aleshores vàrem realitzar una sèrie de proves per tal de detectar d'on venia el problema i veure si el podríem resoldre.

14.1.4 Experiments

- El primer que es va fer era veure si era un problema de l'instrument, i el que es va fer va ser provar les diferents fonts d'alimentació del laboratori, inclús models amb millors prestacions, però les oscil·lacions continuaven apareixent.
- Aleshores el que es va fer, va ser, utilitzar com a font d'alimentació, bateries de $\pm 20V$, ja que el que crèiem, era que el fet de que les fonts fossin regulables, feien l'alimentació inestable. A més, d'aquesta manera descartàvem la possibilitat de que les oscil·lacions fossin per la falta de corrent de sortida de les fonts d'alimentació PROMAX, les quals tenen un límit de 1A, per tant vàrem provar amb bateries ja que no tenen límit de corrent. No va ser la solució definitiva, però si que hi havia certa millora respecte l'ús de fonts regulables. La figura 91 mostra l'alimentació amb bateries.



Figura 91: Bateries emprades per a la font d'alimentació.

- A continuació el que es va fer, era veure si el circuit oscil·lava si s'aplicava alimentació però no senyal, i en aquest cas no oscil·lava.
- També es va provar de curtcircuitar el condensador C_1 de l'amplificador (Fig.92,pàgina.95), per tal de veure si era l'origen de les oscil·lacions, i no hi havia diferencia entre si hi era i finalment no implicava canvi, per tant el vàrem tornar a connectar.

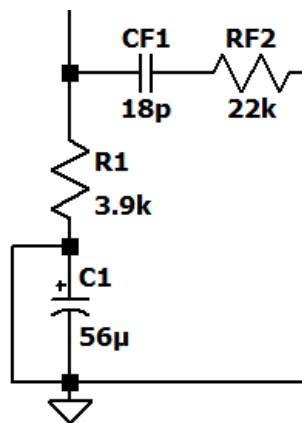


Figura 92: C_1 curtcircuitat.

- Per tal de millorar l'estabilitat del circuit d'alimentació, es va muntar un circuit RC, el qual va millorar una mica les oscil·lacions, però queda la incògnita de saber quants condensadors acobladors necessitaríem per mantenir estable l'alimentació. El circuit que vàrem provar és el següent. Muntatge a la figura 93 i 94.

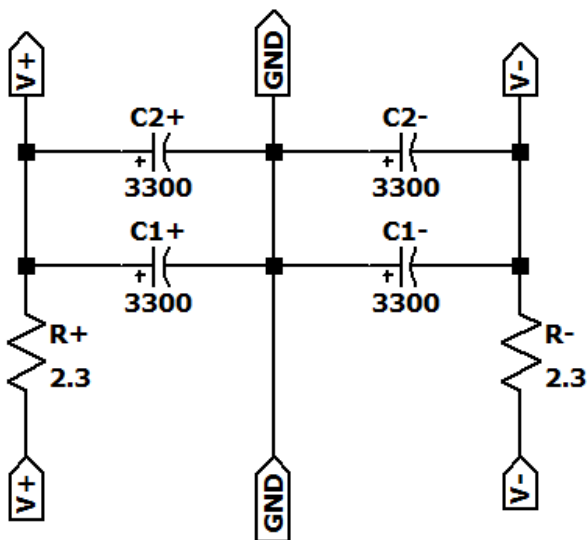


Figura 93: Esquema elèctric del circuit RC.

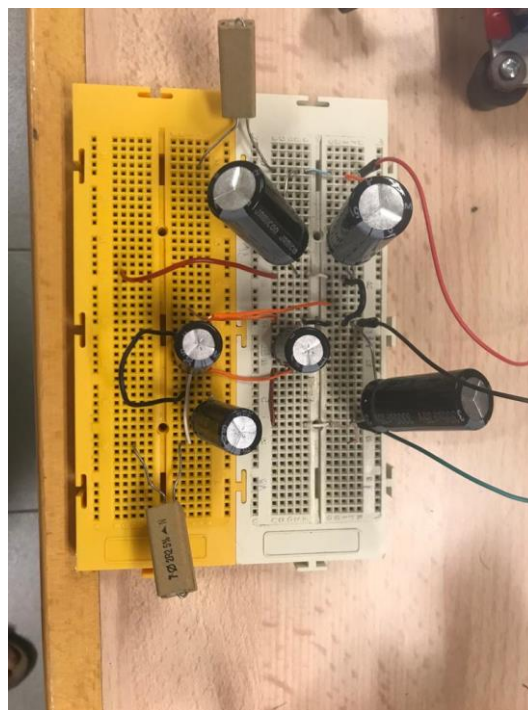


Figura 94: Circuit RC real.

- Una altre dels motius que havíem de descartar, era si les connexions a massa estaven ben fetes, i el que es va fer va ser revisar i afegir estany a totes les connexions relacionades amb el Lm3886.
- ...



Aleshores, com a **hipòtesi**, creiem que les oscil·lacions podrien disminuir si:

- És fes una cadena prou llarga de condensadors acobladors, ja que podria donar més estabilitat a la font.
- Es canviés la distribució dels components del circuit, i es possessin els condensadors acobladors encara més pròxims a els pins d'alimentació.
- Millorar l'acabat de les soldadures, i confeccionat a tota la placa.
- Una possible distribució diferent del guany dels amplificadors, potser podria millorar l'estabilitat.
- Com a observació, es va veure, que en aplicar el senyal real de la guitarra, el qual és menys constant que el sinusoidal del generador de funcions, les oscil·lacions disminuïen.

14.2 Ample de banda freqüencial

14.2.1. Preamplificador

Per al preamplificador per tal de mesurar els seus extrems freqüencials, hem mesurat quin voltatge teníem a una entrada de 100mV i 1kHz, i hem dividit el valor per arrel de 2, per tal de saber a quin voltatge pertany el límit.

A un 1kHz, valor dintre del màxim freqüencial simulat, tenim la resposta mostrada a la figura 95:

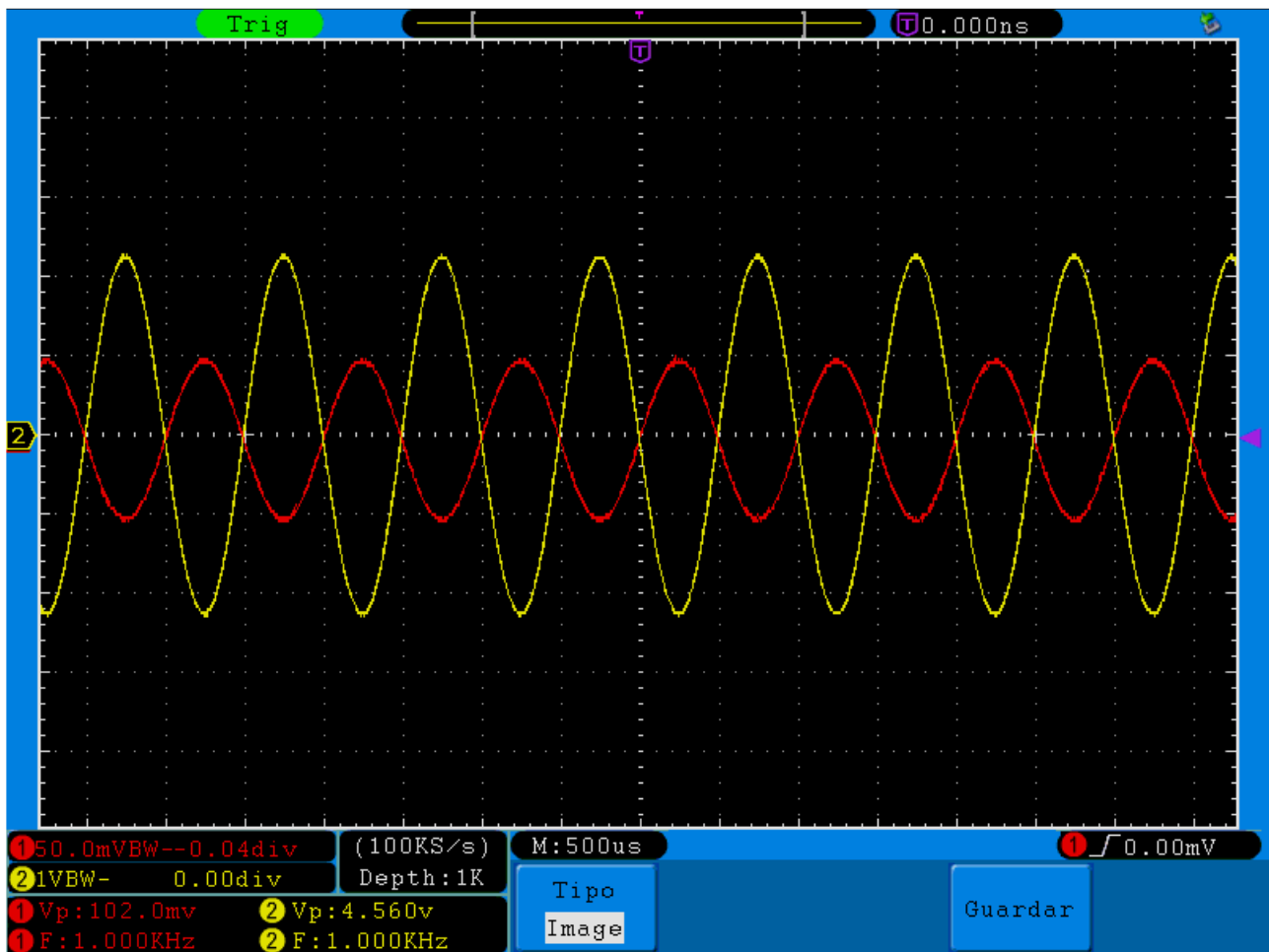


Figura 95: Valor de referencia màxim preamplificador.

Per tant el límit freqüencial el trobarem a $\frac{V_{out}}{\sqrt{2}} = \frac{4,560}{\sqrt{2}} = 3,22V$

Aproximadament el **límit inferior** el trobem a 2,299Hz, (Fig.96).

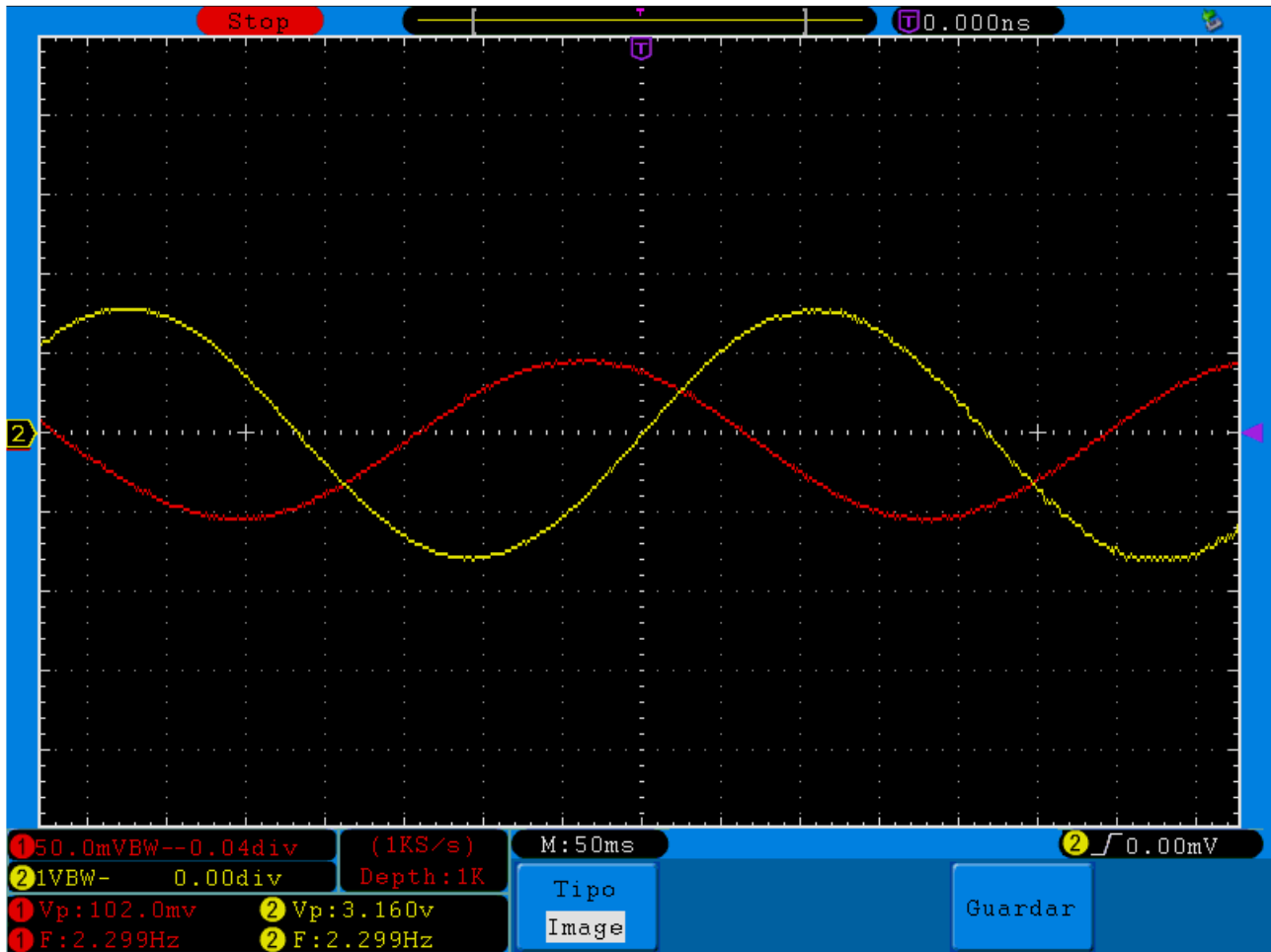


Figura 96: Freqüència de tall inferior preamplificador.

Valor força adequat ja que preveiem tenir un límit inferior a 2,17 Hz, és a dir, la diferència és d'un 5.61%.

Aproximadament el límit superior el trobem a 119,2 kHz, (Fig.97).

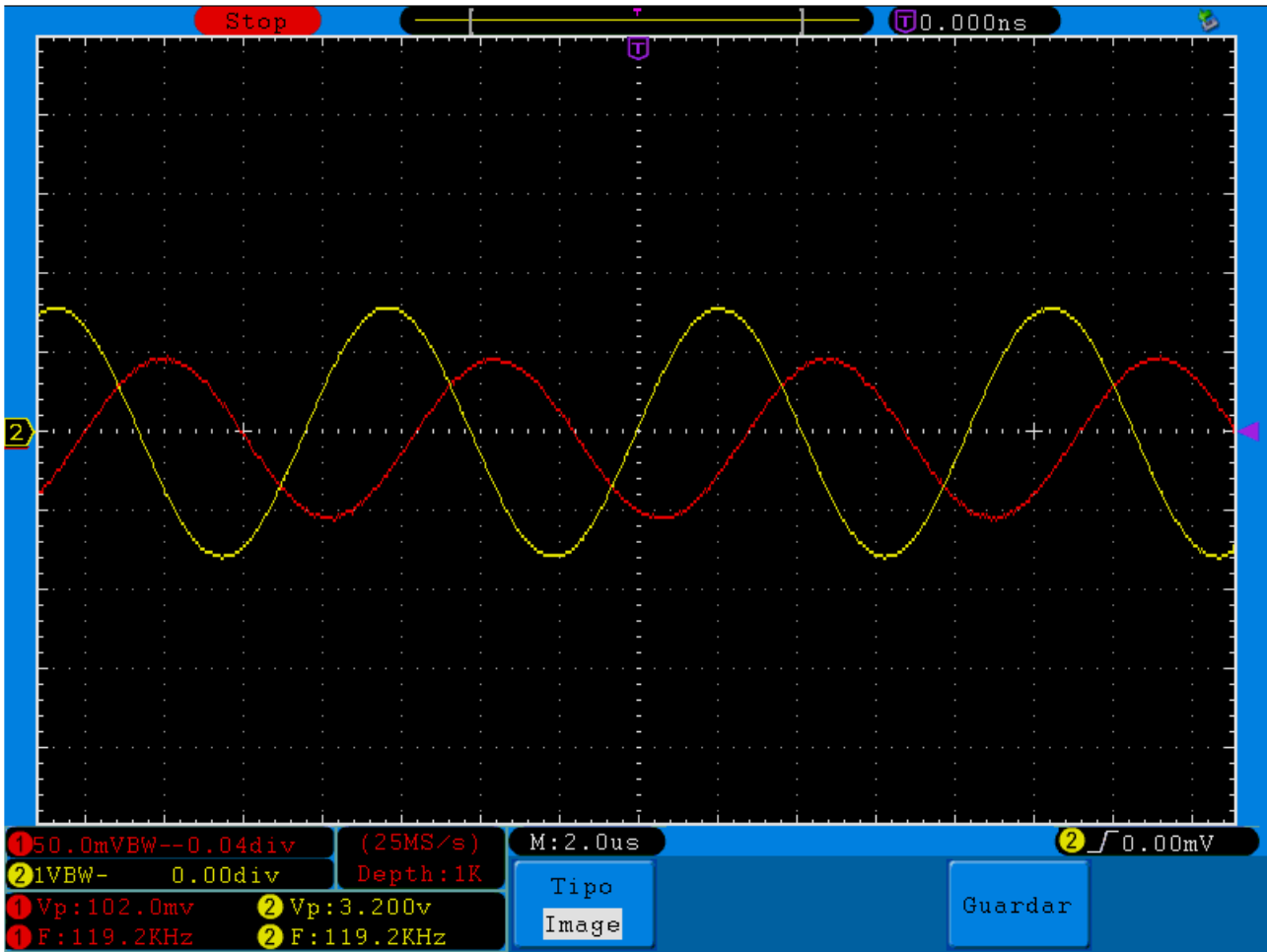


Figura 97: Freqüència de tall superior preamplificador.

Guany considerat com a correcte, ja que el sistema es comporta com a la simulació.

A la taula 22, tenim el **resum** de valors obtinguts del preamplificador.

Mesura	Valor Desitjat	Valors Simulat a - 3dB	Valor Experimental
f _L	2,17Hz	2,5 Hz	2.299Hz
f _s	85kHz	119 kHz	119,2kHz

Taula 22: Valors de tall preamplificador.

14.2.2 Amplificador

Respecte a l'amplificador, aquest a partir de cert guany genera oscil·lacions, aleshores el que hem fet, és trobar un punt de referència màxim estable que en els extrems freqüencials no generi oscil·lacions. Aleshores aquest valor el podem prendre com a bo i trobar l'ample de banda de tot el circuit.

Així doncs, aplicant un senyal sinusoidal de 0,1V_{PP}, a 1kHz, valor que es troba dintre del màxim en quan a decibels, tenim que a guany màxim el valor és de 8,720V_{PP}. (Fig.98).

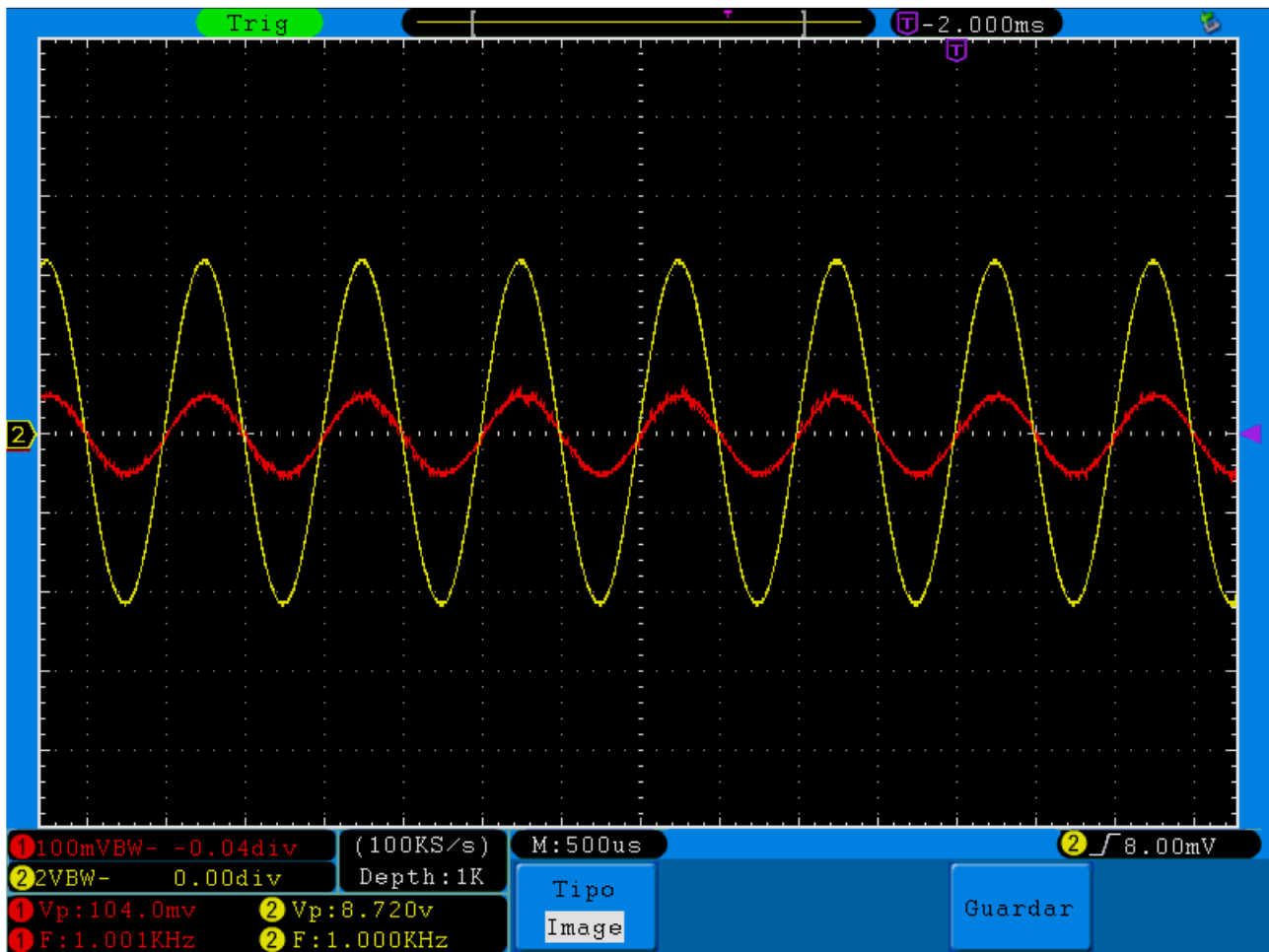


Figura 98: Valor de referència màxim amplificador.

Aleshores hem de buscar el límit a: $\frac{V_{out}}{\sqrt{2}} = \frac{8,720}{\sqrt{2}} = 6,16V$

El límit freqüencial inferior el trobem a 3,7Hz, (Fig.99).

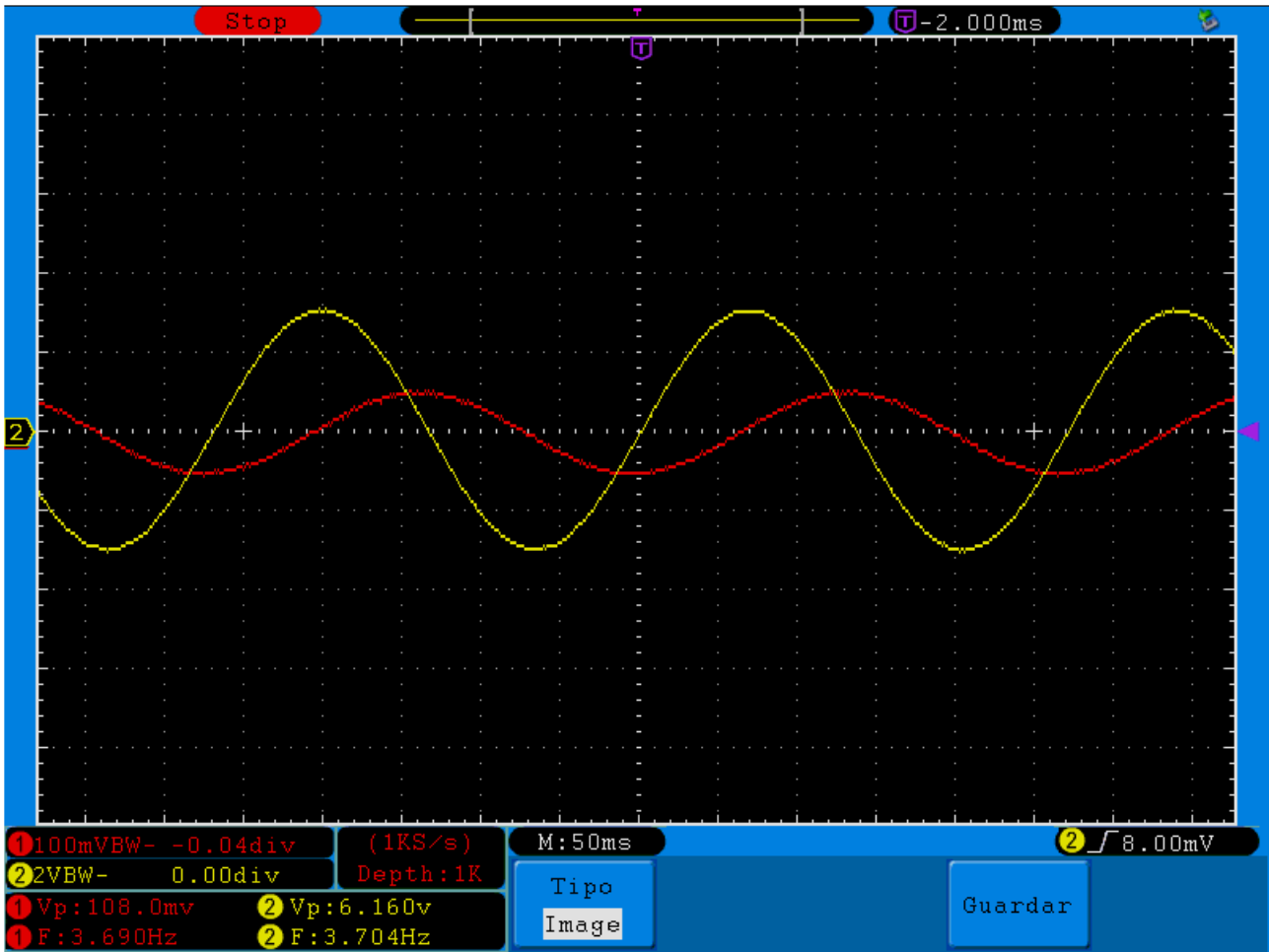


Figura 99: Freqüència de tall inferior amplificador.

Valor correcte, ja que de la simulació esperàvem obtenir 3,5Hz.

El límit superior el trobem a 94kHz (Fig.100).

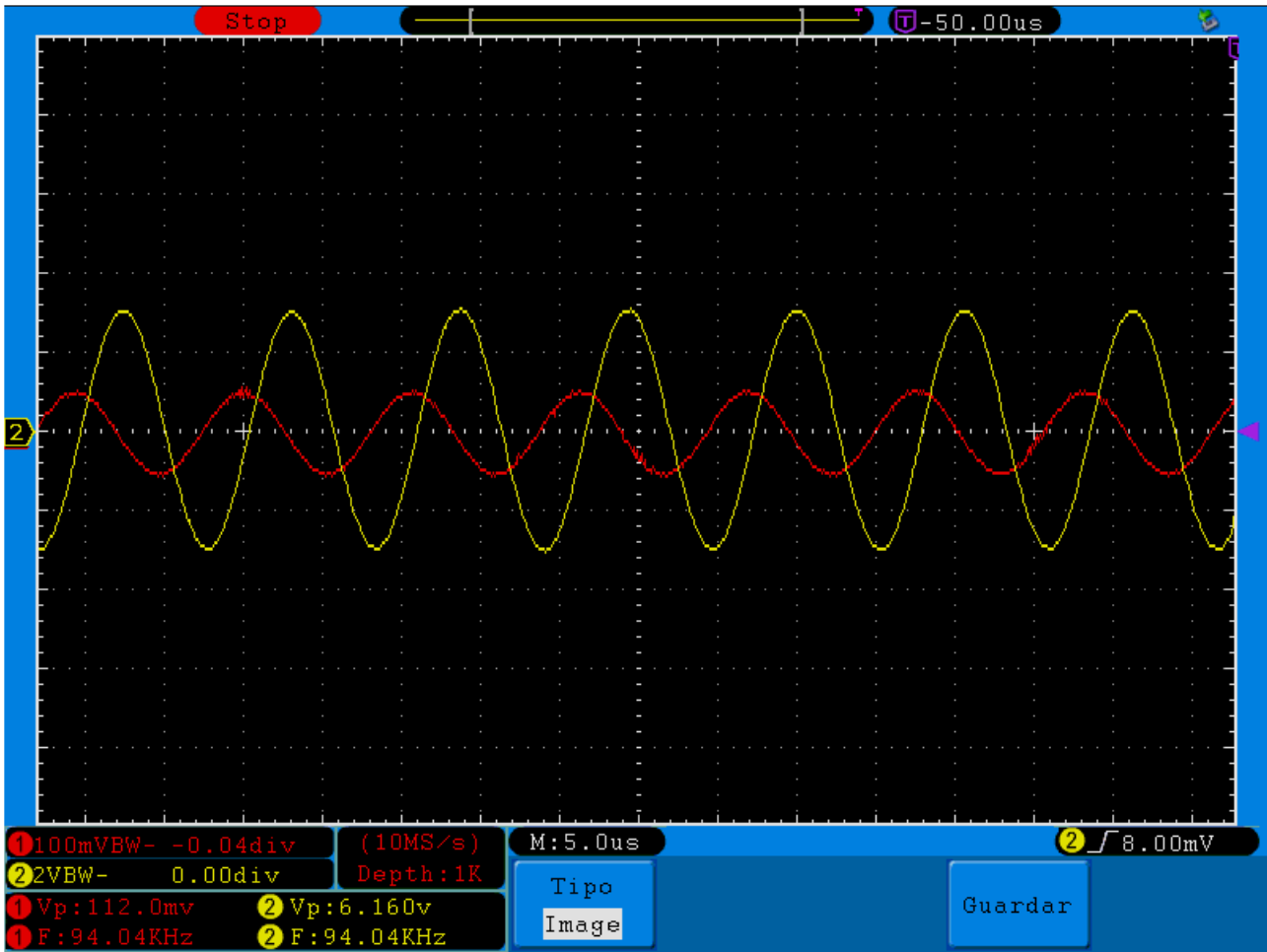


Figura 100: Freqüència de tall superior amplificador.

Valor considerable correcte, ja que és un valor pròxim als 87kHz predits de la simulació.

Els resultats obtinguts els podem consultar a la taula 23.

Mesura	Valor Desitjat	Valors Simulat a - 3dB	Valor Experimental
f _L	2,17 Hz	3,5 kHz	3,7Hz
f _s	85kHz	87kHz	94kHz

Taula 23: Valors de tall amplificador.

14.3 Equalitzador

Per tal de prendre les mesures corresponents dels límits de les bandes, hem agafat el valor d'entrada màxim de l'equalitzador, el qual és de 4V i l'hem dividit per l'arrel de 2, ja que si els potenciòmetres no actuessin, el valor a la sortida hauria de ser de pràcticament 4 volts. D'aquesta manera, en aquest punt, és a dir, 2,8V, ens trobem a la freqüència de -3dB, així sabem que ens trobem en el límit de la banda.

Cada mesura realitzada a cada banda, s'ha fet amb les altres dos no corresponents inactives, és a dir amb el potenciòmetre a 0Ω . Aleshores amb l'ajuda del simulador, ens situem més o menys a la freqüència adequada. Els resultats es comentaran més endavant amb la resta de conclusions.

14.3.1. Passa Baixos

A la sortida del sumador de l'equalitzador, la resposta del filtre **passa baixos** és (Fig.101):

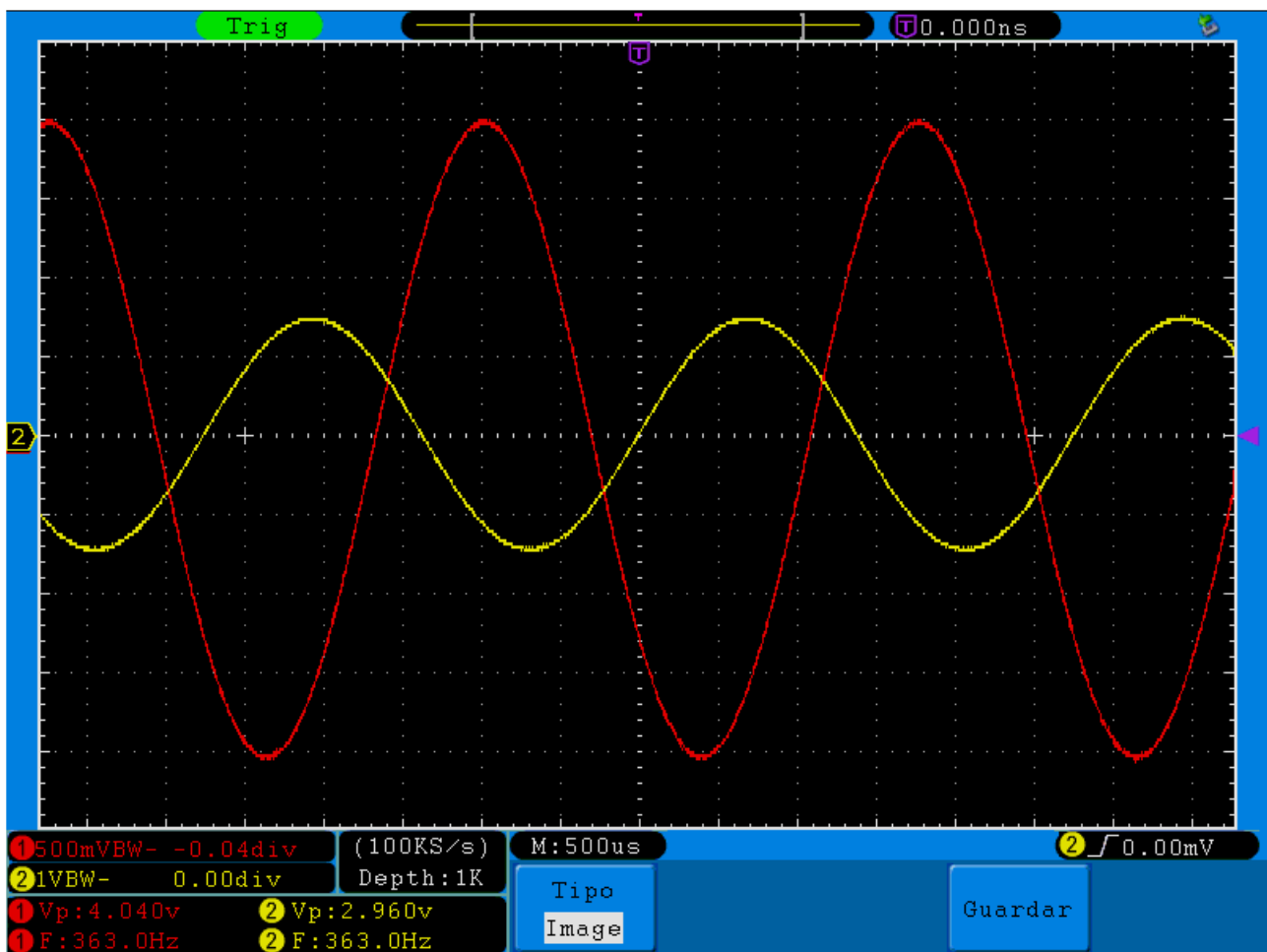


Figura 101: Freqüència de tall branca baixos.

La taula 24, mostra el valors obtinguts de les freqüències de tall del filtre passa baixos.

Freqüència	Valor Simulat
$F_{LTeoric}$	338,62Hz
$F_{LSimulatAltaveu}$	375,81Hz
$F_{LSimulatEQ}$	370,69Hz
$F_{LRealEQ}$	363,00Hz

Taula 24: Valors freqüències baixos.

14.3.2 Passa Banda

La resposta del filtre **passa banda** en l'extrem inferior a la sortida de l'equalitzador el trobem a la figura 102.

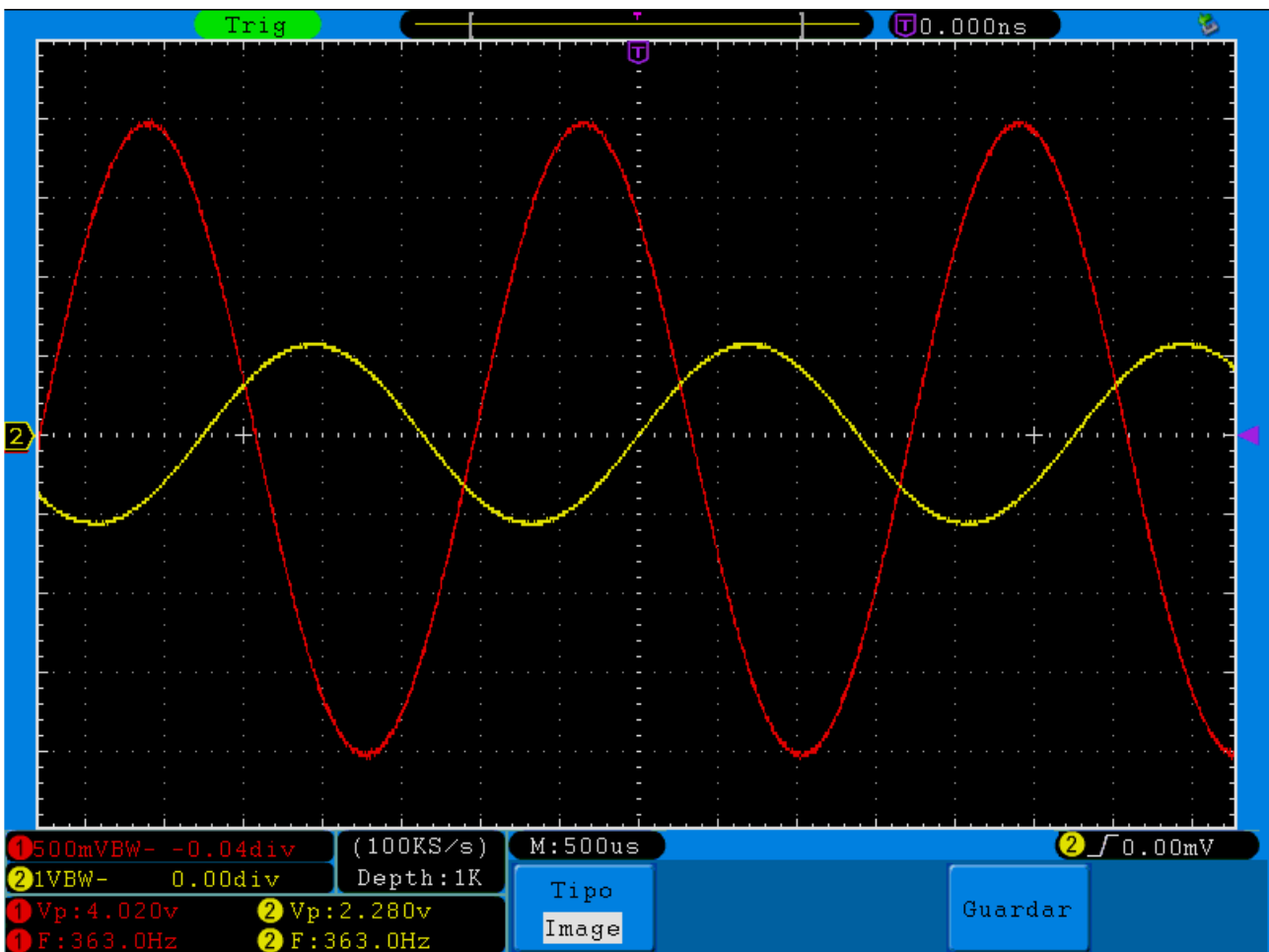


Figura 102: Freqüència de tall inferior branca mitjos.

La taula 25, mostra el valors obtinguts de les freqüències de tall inferiors del filtre passa banda.

Freqüència	Valor Simulat
$F_{LPBTeoric}$	338,62Hz

$f_{LPBSimulatAltaveu}$	345,93Hz
$f_{LPBSimulatEQ}$	345,14Hz
$F_{LRealEQ}$	363,00Hz

Taula 25: Valors freqüències inferiors simulades mitjos.

La resposta del filtre **passa banda** en l'extrem superior a la sortida de l'equalitzador el trobem a la figura 103.

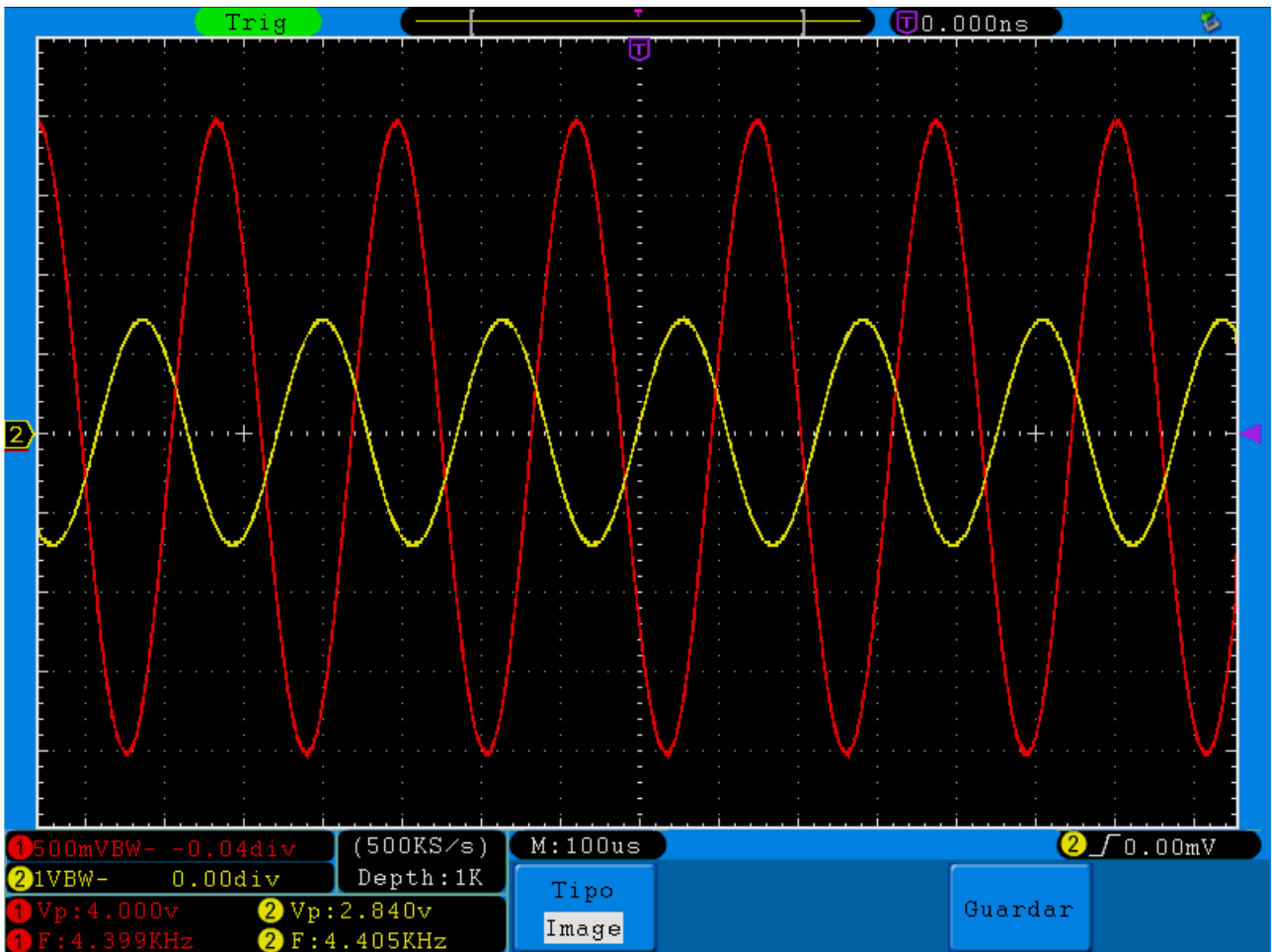


Figura 103: Freqüència de tall superior branca mitjos

La taula 26, mostra el valors obtinguts de les freqüències de tall superiors del filtre passa banda.

Freqüència	Valor Simulat
$F_{HPBTeoric}$	3,338kHz
$f_{HPBSimulatAltaveu}$	5,740kHz
$f_{HPBSimulatEQ}$	5,760kHz
$F_{HRealEQ}$	4,405kHz

Taula 26: Valors freqüències superiors simulades mitjos.

14.3.3 Passa Alts:

Mesurant a la sortida del sumador, la resposta del filtre **passa alts** és (Fig.104):

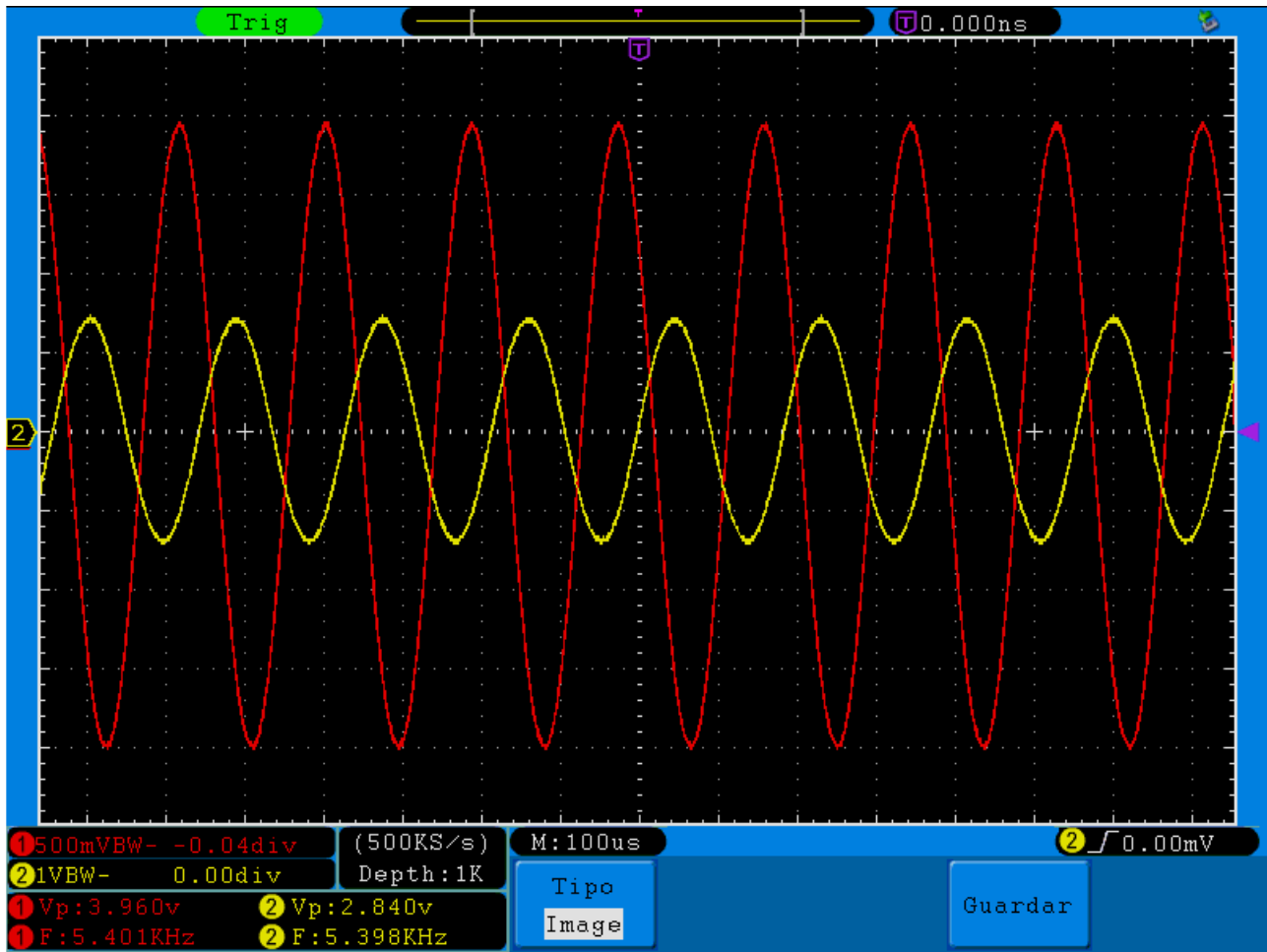


Figura 104: Freqüència de tall alts.

La taula 27, mostra el valors obtinguts de les freqüències de tall del filtre passa alts.

Freqüència	Valor Simulat
$F_{H\text{Teoric}}$	4,82kHz
$F_{H\text{SimulatAltaveu}}$	4,77 kHz
$F_{H\text{SimulatEQ}}$	5,19 kHz
$F_{H\text{RealEQ}}$	5,4 kHz

Taula 27: Valors freqüències simulades alts.

14.4 Distorsionador

El distorsionador és potser l'element més fiable del circuit ja que és el més simple, a més és el que permet augmentar més la potència de sortida sense que apareixen oscil·lacions. A la figura 105, és mostra la forma d'ona de sortida de l'amplificador amb tots els reguladors posicionats per tal de tenir un guany màxim. I tal com es pot observar, no hi ha oscil·lacions.

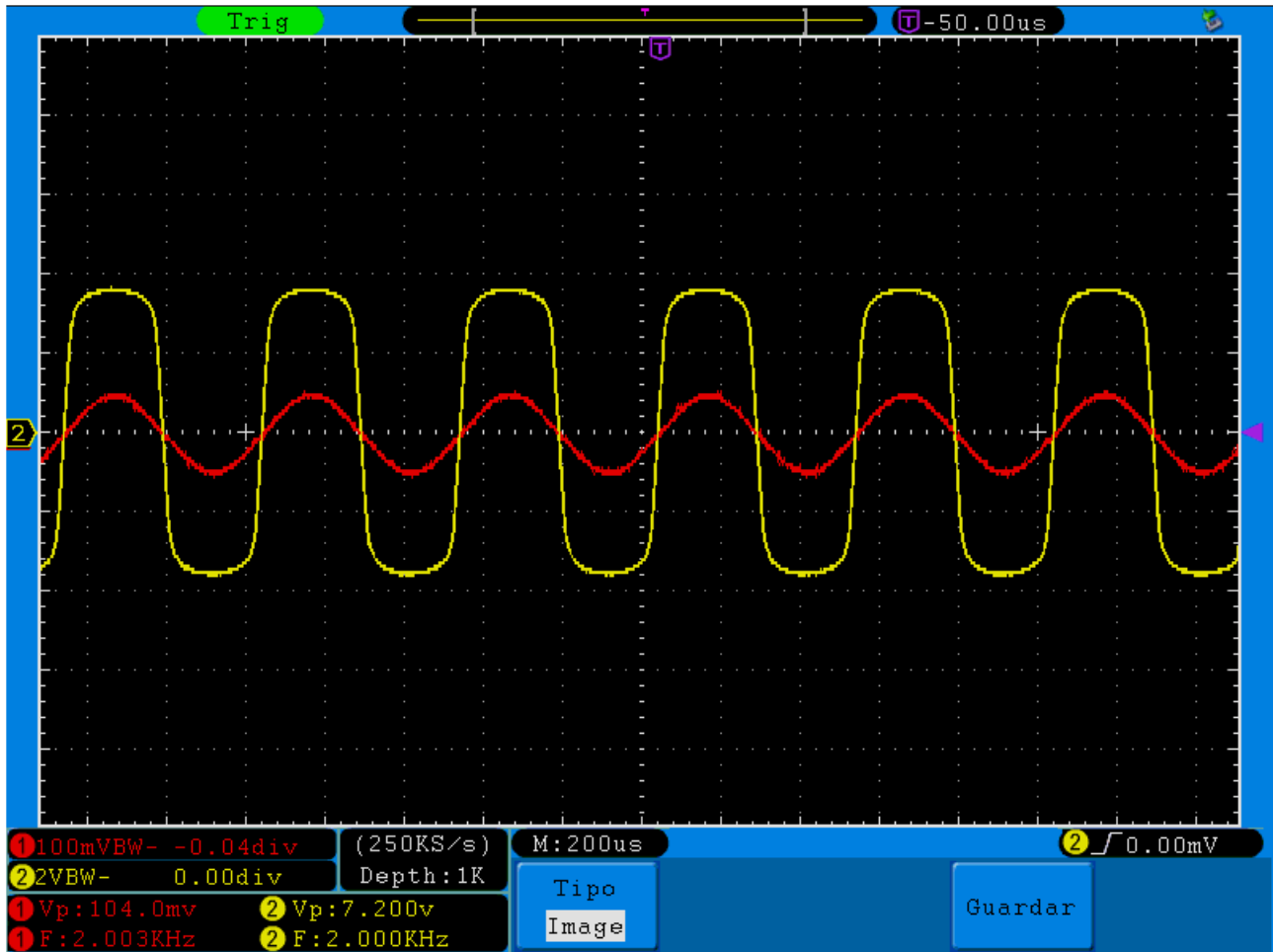


Figura 105: Senyal de sortida respecte el d'entrada amb el volum al màxim amb el distorsionador actiu.

15. Conclusions experimentals

A continuació (taula 28), s'adjuntarà una taula resum comparativa, entre els valors teòrics, simulats i experimentals, comentats amb les seves respectives observacions. En la diferència percentual entre el valor simulat i l'experimental, s'utilitza la lletra S i la lletra I per tal d'indicar si la diferència percentual és per sobre (s) o sota (l) el valor que s'esperava.

	Valor Teòric	Valor Simulat	Valor Experimental	Diferència % valor simulat/experimental
GuanyPreamplificador	37	40	44,11	9.29% S
GuanyAmplificador	5,4	5,62	2,145	61.83% l
GuanyTotal	199,8	224,8	94,594	57.9% l
f _T InferiorPreamplificador	2,17Hz	2,5 Hz	2.299Hz	8.04% l
f _T SuperiorPreamplificador	85kHz	119 kHz	119,2kHz	0.16% S
f _T InferiorAmplificador	2,17Hz	3,5 kHz	3,7Hz	5.40% S
f _T SuperiorAmplificador	85kHz	87kHz	94kHz	7.44% S
f _{TEQ} PassaBaixos	338,62Hz	370,69Hz	363,00Hz	2.07% l
f _{TEQ} PassaBandaInferior	338,62Hz	345,14 Hz	363,00Hz	4.92% S
f _{TEQ} PassaBandaSuperior	3386,27 Hz	5,76kHz	4,405kHz	23.52% l
f _{TEQ} PassaAlts	4822,87 Hz	5,19kHz	5,4 kHz	3.8% S
Distorsionador	0,7V	639,5mV	f(Volum)	f(Volum)

Taula 28: Taula comparativa dels valors de guany i freqüències de tall entre els valors teòrics, simulats i reals.

En primer lloc caldria comentar el guany total del sistema, ja que tot i que esperàvem un guany del voltant dels 200, al final arribem en aplicar una ona sinus constant, a menys de la meitat del valor esperat, en funció de la configuració. Podria ser millorable, ja que les oscil·lacions limiten la potència de sortida, però en utilitzar a l'entrada el senyal real de la guitarra, el rendiment és molt millor.

Sí que apareixen pics oscil·latoris i retalls en els pics del senyal, sobretot amb els acords o notes més greus, però és comú inclús en els aparells professionals. Podem veure en les següents imatges, que a mesura que anem augmentant de notes més greus a notes més agudes, apareixen menys oscil·lacions en el senyal.

El cas és que, gràcies als reguladors de guany, volum i equalitzador, es poden aconseguir sense gaires complicacions tons de qualitat i de volum més que suficient per una aula i sobretot, tons estables al llarg del temps.

En la següent captura, figura 106, tenim el Mi més greu en l'afinació estàndard (sisena corda, trast zero) on hi apareix un retall en la ona i certes variacions en els pics de la ona.

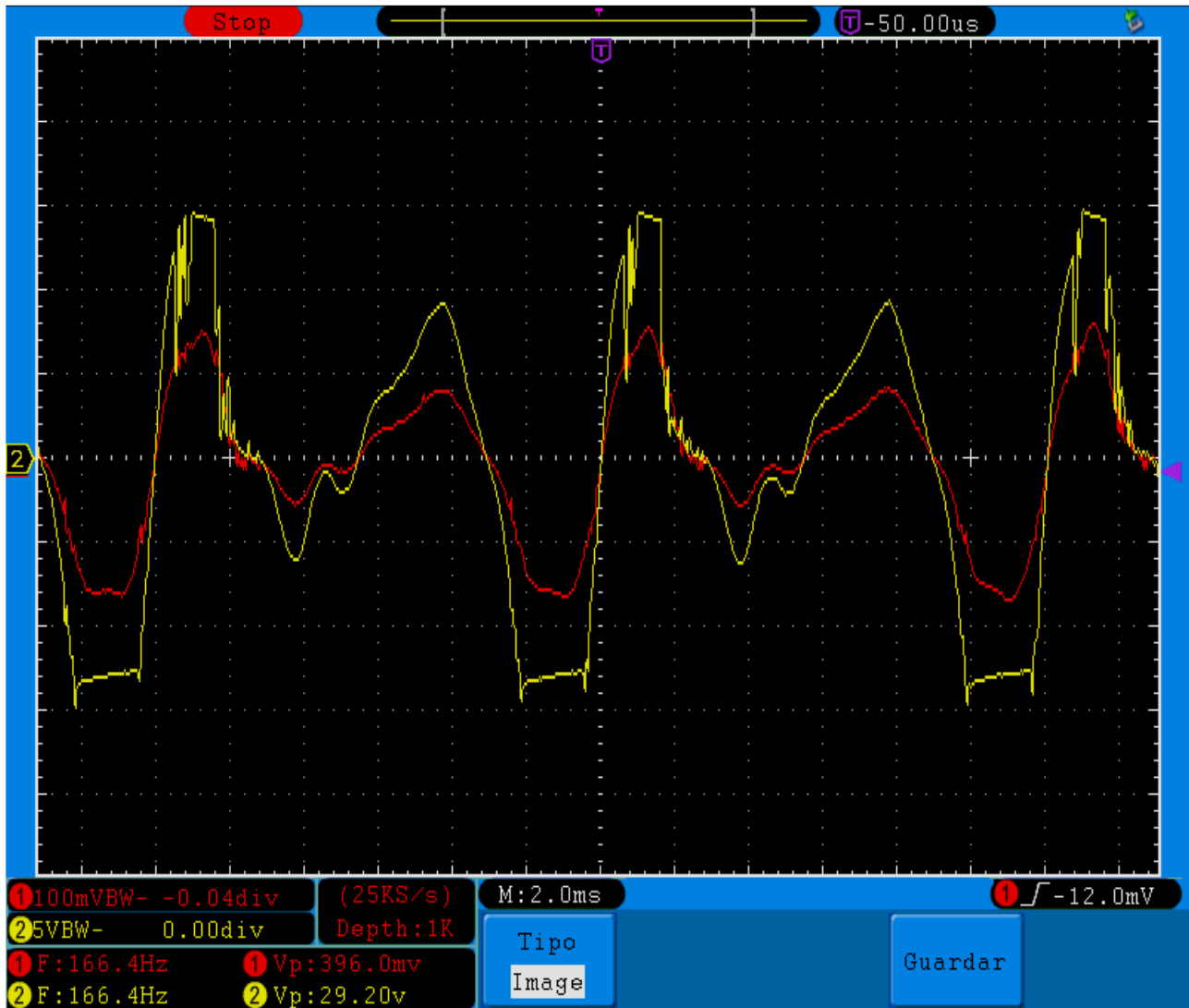


Figura 106: Mi sisena corda trast zero.

En la següents imatges, figura 107 i 108, hi tenim el Re obert de la quarta corda, (trast zero), on ja no apareixen pràcticament oscil·lacions i no hi ha retall en la ona, i la nota més aguda de l'afinació estàndard en una guitarra de 24 trasts, el Mi de la primera corda, trast 24, en què es pot observar com ja no hi apareixen oscil·lacions en excepció d'algun pic retallat típic de l'inici d'una nota o acord.

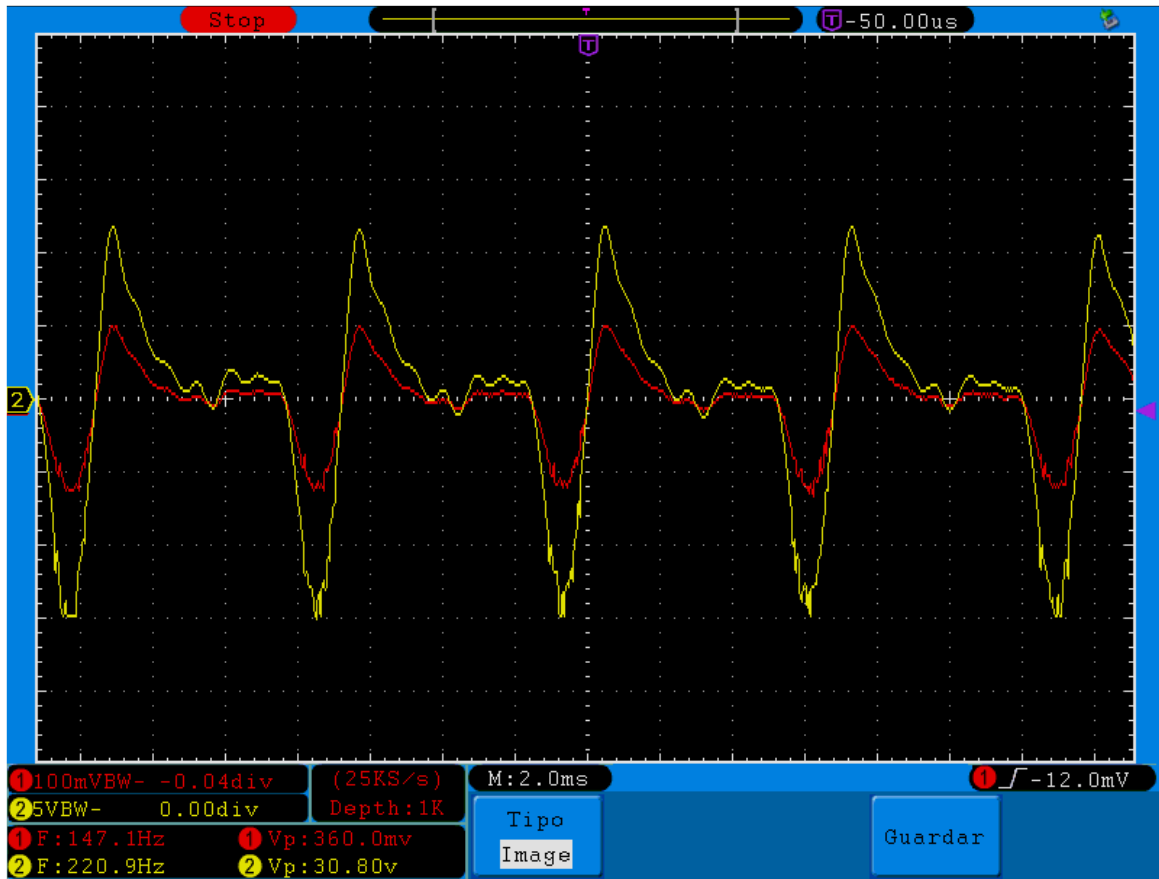


Figura 107: Re obert de la quarta corda, (trast zero).

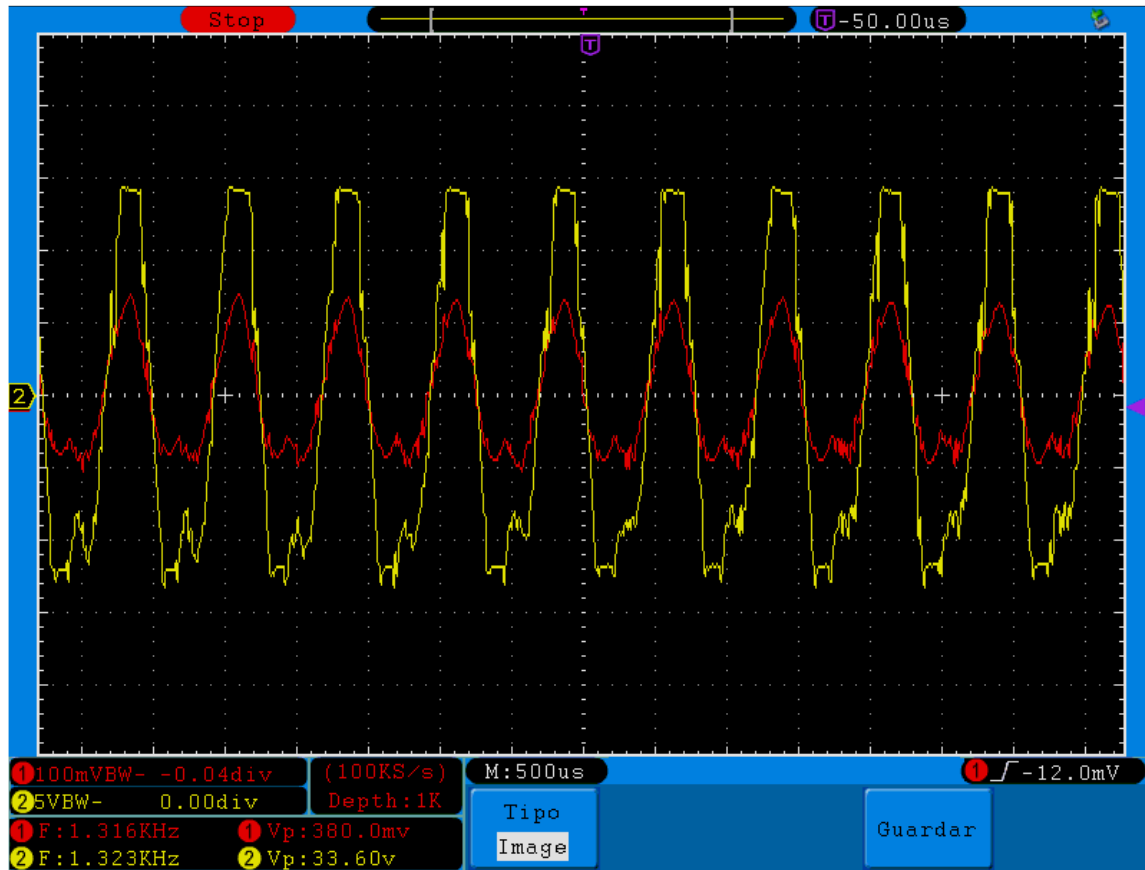


Figura 108: Mi de la primera corda, trast 24.

Aquestes formes d'ones no són tan constants com el sinus generat amb el generador de funcions i per tant comporten menys "feina" per a la font d'alimentació, amb el que es tradueix amb un senyal més pur i estable.

En quan els amples de banda, són difícils de valorar tenint en conte el so, però el que està clar és que no es perceben oscil·lacions ni sorolls externs induïts al senyal, lo qual és més que decent. Sobre els valors d'aquests, es poden prendre com a bons ja que són de l'ordre dels valors simulats, i per tant tenim un bon espectre de freqüències.

En quan a l'equalitzador, és difícil valorar objectivament la seva funció, ja que al final el so es percep de manera diferent segons l'oient, però segons el que s'ha experimentat és que, ajustant els potenciòmetres, pots aconseguir un so més sec i punyent, o un so més suau i evolvent. Això és gràcies als potenciòmetres, que atenuen els pics del senyal que segons el so desitjat, poden ser molestos. Seria molt interessant veure una comparativa entre un equalitzador actiu respecte un passiu, realment però, per al nostre cas, la seva funció es pot donar com a molt bona respecte a la intenció complementària que tenien.

Finalment, l'element més senzill i fiable de tot el circuit, el distorsionador, el qual en cap moment a presentat complicacions, i limita correctament el senyal. A la següent figura hi podem observar, com varia la forma del senyal amplificat, respecte el senyal d'entrada de la guitarra. A la figura 109, s'il·lustra el funcionament.

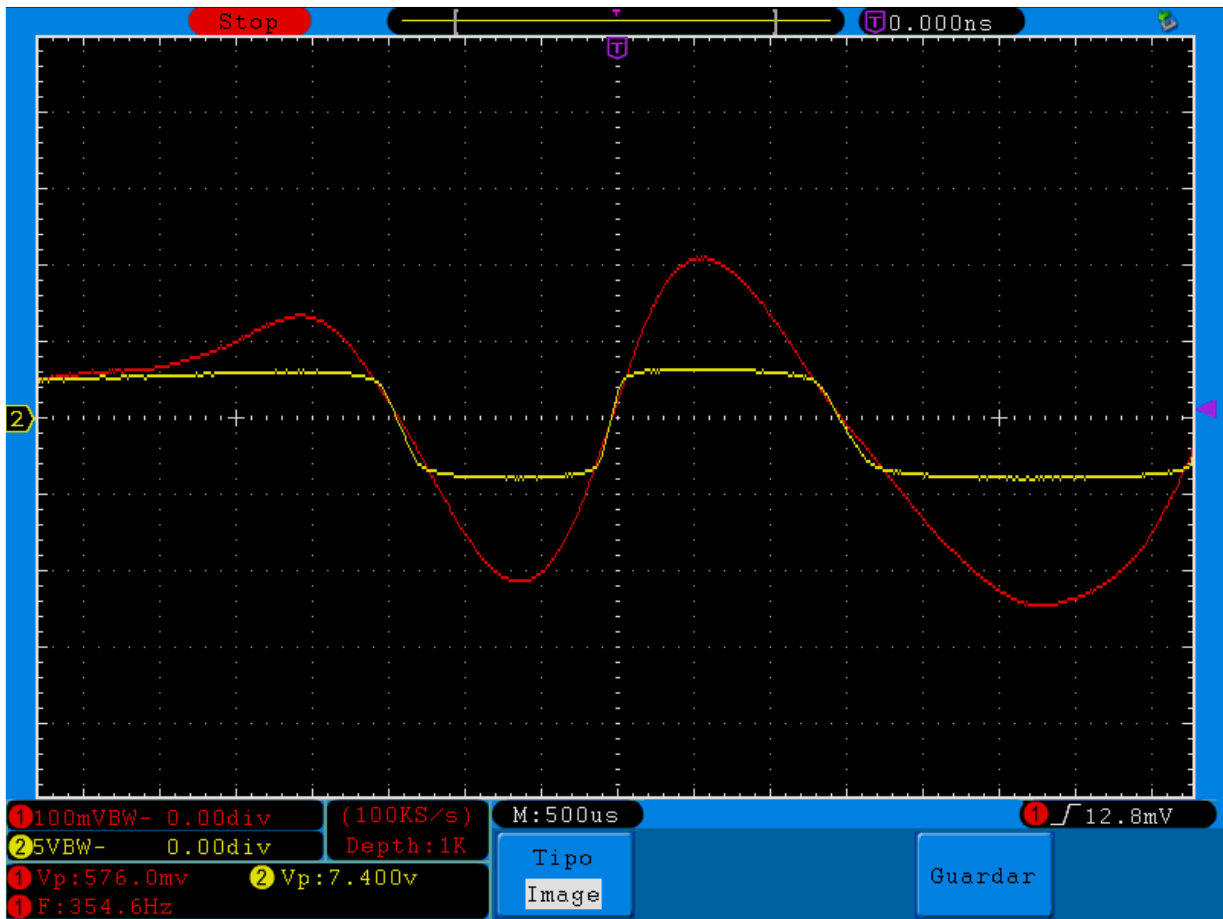


Figura 109: Efecte distorsionador respecte el senyal d'entrada a diferent escala

Per últim es mostraran les diferents il·lustracions del resultat final físic del projecte, (Fig.110,111,112).

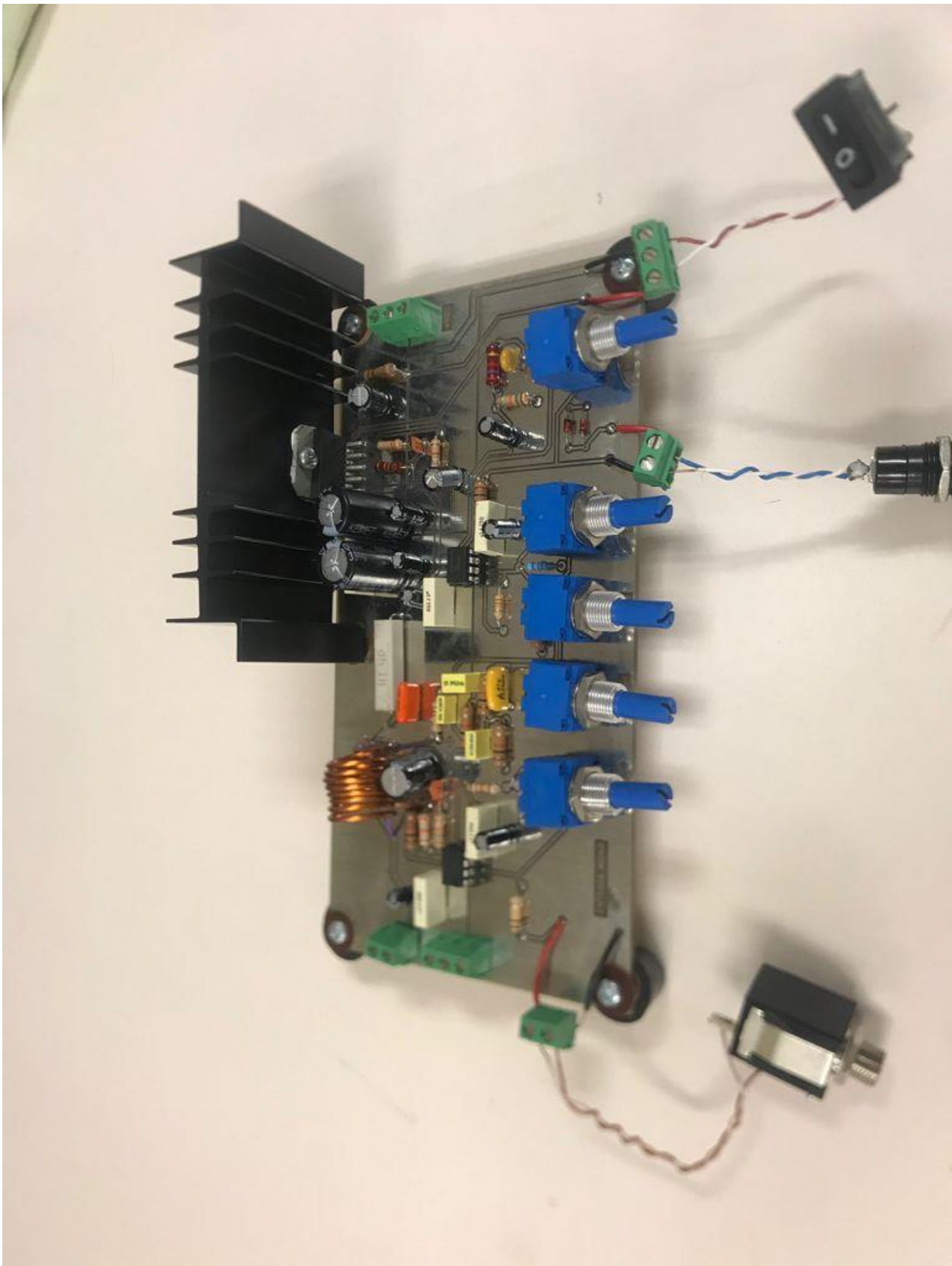


Figura 110: Vista superior del circuit físic.

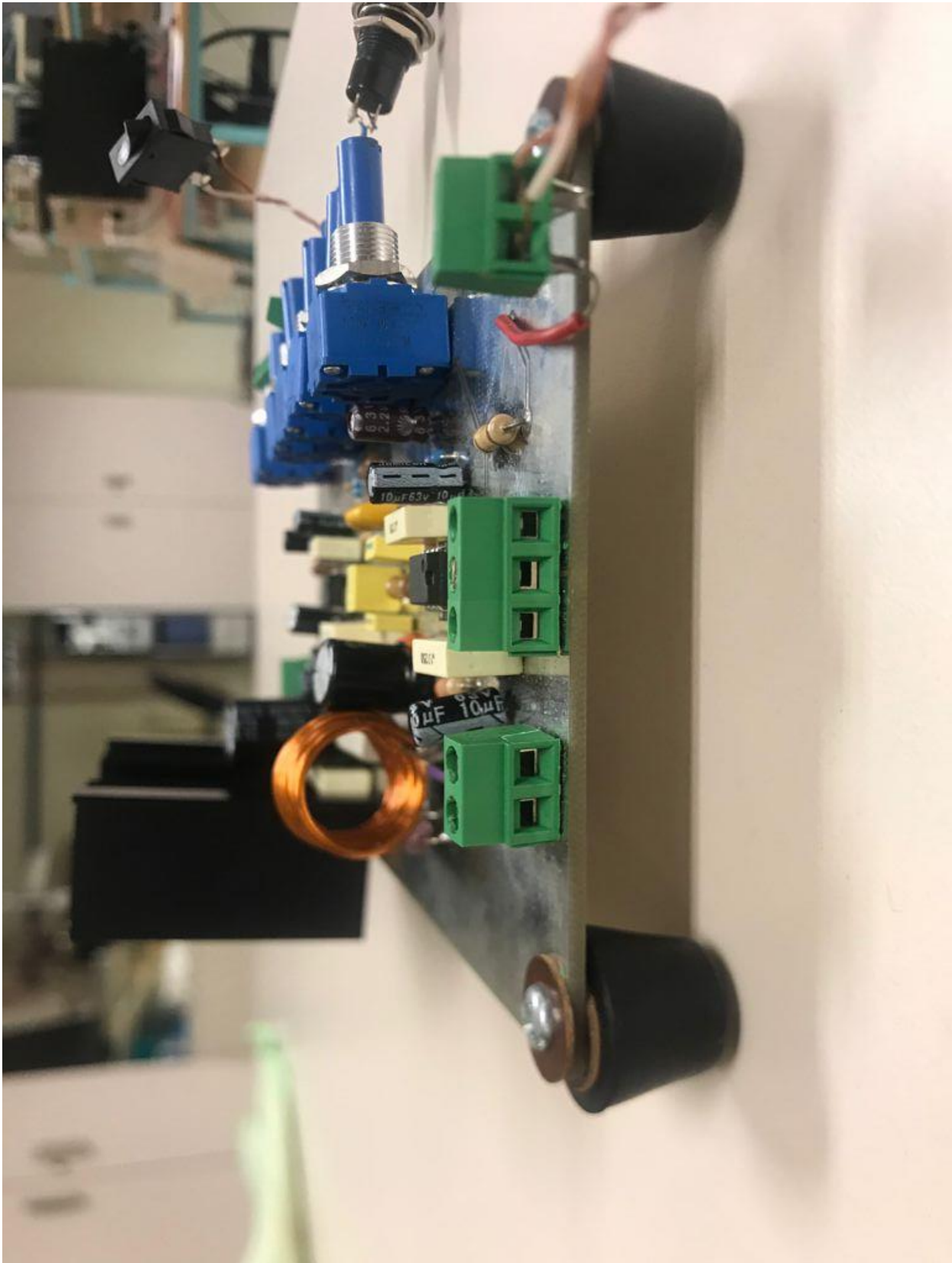


Figura 111: Vista lateral del circuit físic.

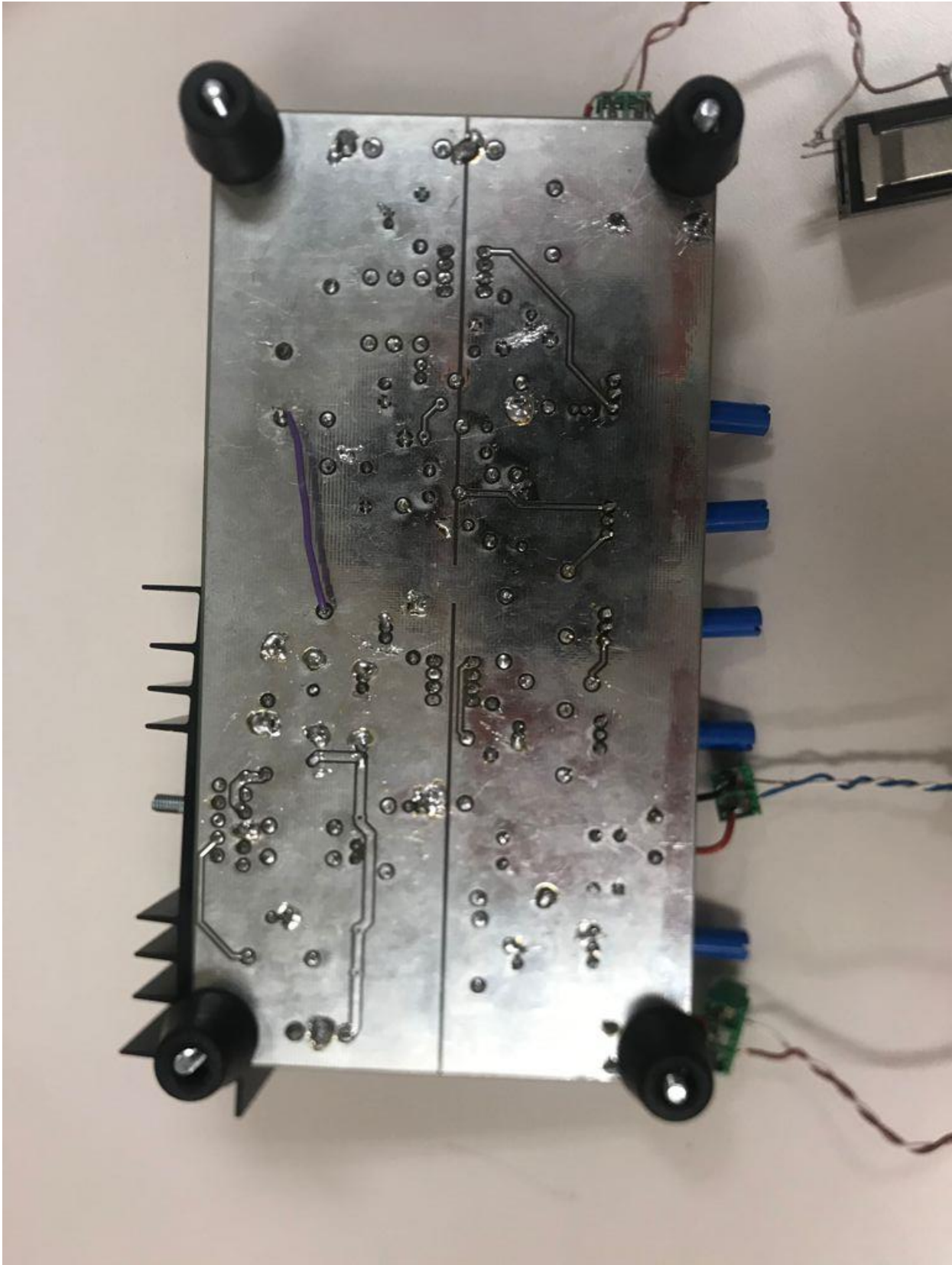


Figura 112: Vista inferior del circuit físic.

15.1 Propostes de millora del projecte

Tot i estar molt orgullós del resultat final d'aquest projecte, sobretot per l'esforç que hi ha al darrera, penso que aquest disseny es podria millorar moltíssim i em faria molt feliç que fóra objecte d'estudi per a nous projectes. Per tant a continuació llisto possibles millores per tal de si algú es vol animar a fer el seu tfg sobre aquest amplificador, a més tinc tota disponibilitat per tal de compartir arxius i dubtes.

- En primer lloc com a millora de projecta obligada i directe, es proposa arreglar l'error de disseny que hi ha a la placa en que la xarxa Zóbel està mal connectada i es comporta com un filtre passa baixos (Fig.113):

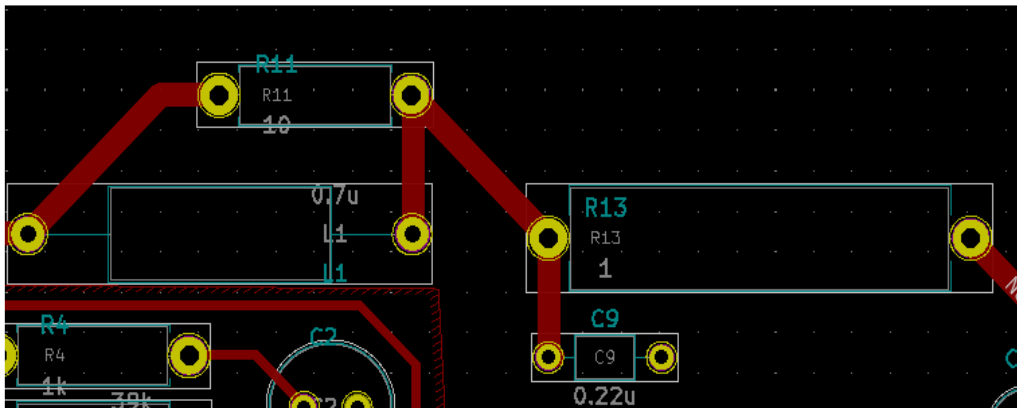


Figura 113: Red de zóbel errada

I hauria de ser tal com mostra la figura 114:

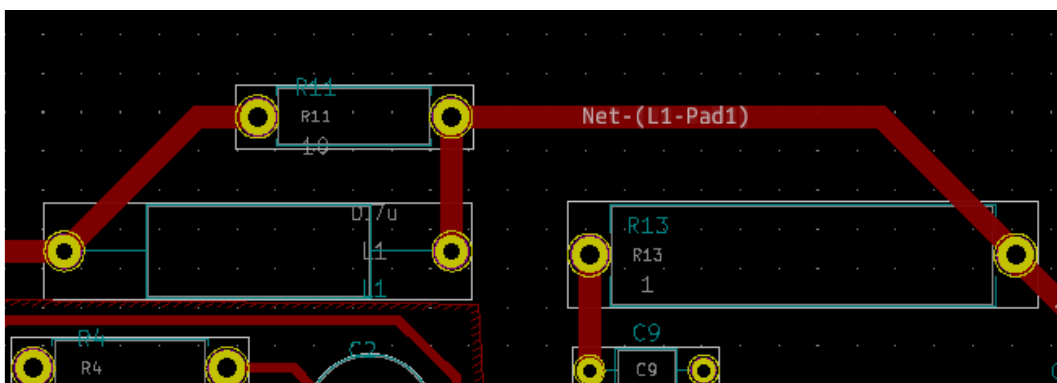


Figura 114: Red de zóbel correctament connectada.

En el muntatge, vam solucionar l'error extraient el coure de la connexió entre "R₁₁ i R₁₃" i connectant una via externa per sota la placa.

A la figura 115 es pot veure com vàrem connectar la via exterior per l'inferior de la placa i a

la figura 116, com vam rascar la PCB per tal de separar el node.



Figura 115: Part inferior PCB, via externa.

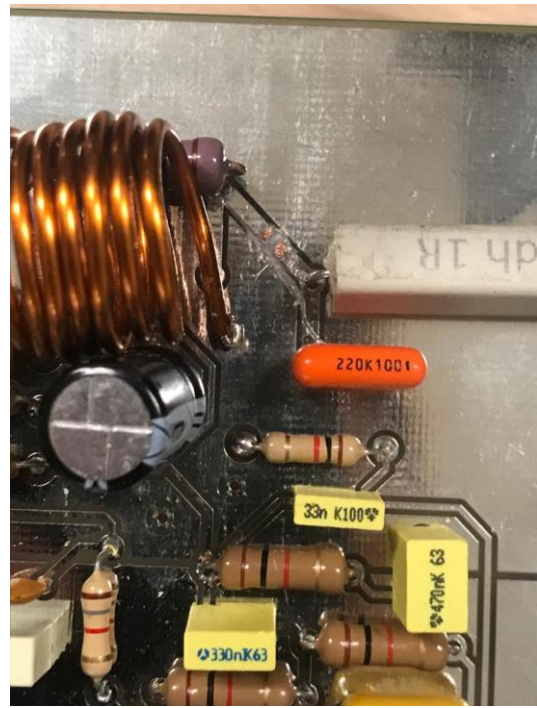


Figura 116: Part superior PCB, on es veu l'extracció de coure.

- Es pot proposar, millorar la distribució espacial del circuit, per tal de millorar el rendiment del circuit.
- Fer un equalitzador actiu.
- Millorar l'entrada de senyal, l'interruptor de mute i de distorsió, mitjançant l'ús de regletes.
- És podria plantejar convertir l'amplificador en un amplificador dual.
- Fer el disseny d'una font d'alimentació.
- Fer un distorsionador del tipus push pull.
- Disseny d'una caixa.
- Disseny d'un receptor Bluetooth per tal de poder enviar la música sense l'ús de fils.



16. Bibliografia

- <https://www.musicnexo.com/blog/es/como-elegir-mejor-amplificador-guitarra-electrica/>
- https://www.profusionplc.com/featured/njr.html?gclid=CjwKCAjwmv-DBhAMEiwA7xYrd5fzJXGYRt5MbujoXtTuG2la5QJBd_aHGK22UolhiXgMtabxbqNVOhoCq_QQAvD_BwE
- <http://tutorialesdeelectronica basica.blogspot.com/2018/06/clases-de-amplificador-y-la.html>
- http://gigatecno.blogspot.com/2013/02/ventajas-y-desventajas-de-los_23.html
- <https://www.norwegiancreations.com/2016/03/arduino-tutorial-simple-high-pass-band-pass-and-band-stop-filtering/>
- <https://www.aulaactual.com/el-ecualizador-que-es-y-como-funciona/>
- <https://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_\(music\)#Early_uses_of_amplified_distortion](https://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_(music)#Early_uses_of_amplified_distortion)
- <https://www.dropbox.com/s/jpqghpgw1wjf3mu/Analog%20Musical%20Distortion%200Circuits%20for%20Electric%20Guitars.pdf?dl=0>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Intermodulation>
- <https://stringjoy.com/guitar-distortion-speakers-stompboxes/>
- <https://www.fender.com/articles/tech-talk/amp-basics-gain-vs-volume>
- https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-28_11-42-31106021.pdf
- <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3886.pdf>
- <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4562.pdf?ts=1627719520836>
- <https://geoffthegreygeek.com/understanding-speaker-sensitivity/>
- <https://ca.wikipedia.org/wiki/Transistor>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Valve_amplifier
- https://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_amplificadores/design/ampdesign.php
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Altavoz>



- <https://www.coda-effects.com/2015/05/what-is-guitar-signal.html>
- https://www.google.com/search?q=audio+amplifier+circuit&rlz=1C1CHBF_esES956ES957&sxsrf=AOaemvIBj6ziAEjgpPJXoqP_k8v-G5a-Jg:1631630824041&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi1kK-92v7yAhUjR0EAHQPBWBJwQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1280&bih=520
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bias-input>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Gain%E2%80%93bandwidth_product
- <https://www.widex.cl/es-cl/blog/rango-auditivo-humano>
- <https://www.analfatecnicos.net/pregunta.php?id=4>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Equalization_\(audio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Equalization_(audio))
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Distortion>
- <https://www.superguitarra.com/blog/amplificadores/diferencia-entre-gain-volumen-master-y-power-level/>
- <https://ca.wikipedia.org/wiki/Guitarra>