

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Gabriel Antônio Pereira

MONITOR DE ÁUDIO PARA BATERIA ELETRÔNICA

Passo Fundo

2019

Gabriel Antônio Pereira

## MONITOR DE ÁUDIO PARA BATERIA ELETRÔNICA

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Joan Michel Levandoski.

Passo Fundo

2019

Gabriel Antônio Pereira

**Monitor de áudio para bateria eletrônica**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Joan Michel Levandoski.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. Joan Michel Levandoski - UPF

---

Prof. Me. Amauri Fagundes Balotin - UPF

---

Prof. Dr. Blanca Rosa Maquera Sosa – UPF

Este trabalho é dedicado a minha mãe Odete Teresinha Raimondi, pois é a pessoa que sempre acreditou que eu conseguiria.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado a vida, e também ter mantido ela até o fim desta jornada. Estes caminhos não foram nem de longe os mais simples ou fáceis, porém sempre tive anjos que fizeram muito por mim.

Agradeço a minha mãe Odete, que desde que eu tinha poucos anos e já sabia qual rumo iria tomar, sempre apoiou, incentivou e fez tudo para que se tornasse possível.

Agradeço a minha irmã Graciela, que incansavelmente me pedia se eu estava bem e que vibrava muito com cada pequena conquista minha.

Agradeço ao meu pai que sempre me incentivou na eletrônica e por mais que estivesse longe sempre esteve preocupado comigo.

Agradeço aos meus amigos que não estão mais entre nós, que fizeram muito por mim e que continuam fazendo mesmo que não neste plano, só tenho a agradecer por terem me ensinado sobre o que realmente importa na vida.

Agradeço a Thaís Betina Slaviero, minha amiga, namorada, futura esposa, não tenho como mensurar tudo que fez e faz em minha vida, pessoa que expressa o amor em tudo, nada disso seria possível sem ela, chegou na hora em que eu mais precisava e me tornou uma pessoa muito melhor do que já fui.

Não menos importante, devo muitos agradecimentos aos amigos da faculdade, em especial ao Matheus Wonsik Ross, pois se tornou um amigo no qual posso confiar de olhos fechados, aos componentes do Pilantras os quais sempre fomos e sempre seremos amigos, ao eterno chefe Rodrigo Batista Busato, por todos esses anos de parceria e também de muito conhecimento passado, também ao seu Erich que infelizmente nos deixou, mas que tive o prazer de aprender muito sobre eletrônica, da forma mais simples e honesta.

Nesta longa jornada, tive a felicidade de sofrer, pois quem sofre aprende, eu aprendi muito e devo isso a alguns professores, outros nem tanto, mas fica aqui o meu agradecimento aos professores que fizeram o possível para me preparar para ser Engenheiro e enfrentar desafios, alguns impossíveis que se tornam possíveis no final.

“A maioria das pessoas está tão absorta na contemplação do mundo exterior que está totalmente alheia ao que está acontecendo em si”.

**Nikola Tesla**

## RESUMO

A bateria eletrônica é um instrumento que necessita de um sistema externo para que seja possível ouvi-la. Para isto, é necessário utilizar um monitor de áudio. O monitor de áudio, nada mais é do que uma caixa de som na qual circuitos de equalização e amplificação estão inseridos e fazem com que o sinal de áudio gerado pela bateria consiga ser reproduzido. Os circuitos deste tipo de equipamento são na grande maioria analógicos, pois é onde consegue-se o melhor desempenho e fidelidade. Neste projeto foi desenvolvido a caixa acústica, o equalizador de 6 faixas, o amplificador e o efeito de reverberação para o monitor de áudio, tendo como foco principal o equalizador de 6 faixas, uma vez que o método utilizado para ajuste das frequências não é comum nos equipamentos atualmente encontrados. Este método consiste do uso de potenciômetros digitais, controlados por um microcontrolador e que assumem um valor de resistência a partir de comandos de um display *touchscreen*. Este valor afeta diretamente o comportamento dos filtros, seja em relação a atenuação ou ao ganho do sinal de áudio que passa por eles.

Palavras-Chave: bateria eletrônica, monitor de áudio, equalização, amplificação, sinal de áudio.

## **ABSTRACT**

The electronic drums is an instrument that needs an external system to be able to hear it. For this, you need to use an audio monitor. The audio monitor is nothing more than a sound box in which equalizer, amplifier circuits are inserted, and the drums audio signal can be reproduced. The circuits of this type of equipment are mostly analog, as this is where the best performance and fidelity is achieved. In this project was developed the sound box, equalizer, amplifier and reverberation effect for the audio monitor, having as main focus the equalizer, since the method used for frequency adjustment is not common in the equipment currently found. This method consists of the use of digital potentiometers, controlled by a microcontroller and which assume a resistance value from commands of a touchscreen display. This value directly affects the behavior of the filters, with respect to either attenuation or gain of the audio signal passing through them.

Keywords: electronic drums, audio monitor, equalizer, amplifier, audio signal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bateria eletrônica em sua configuração padrão	18
Figura 2 – <i>Pad</i>	19
Figura 3 – Cristal piezoelétrico	20
Figura 4 – Equalizador gráfico	21
Figura 5 – Equalizador paramétrico	21
Figura 6 – Resposta Butterworth	23
Figura 7 – Resposta Bessel	24
Figura 8 – Resposta Linkwitz-Riley	25
Figura 9 – Curva de resposta em frequência dos filtros para filtro passa-baixas	26
Figura 10 – Classe A	27
Figura 11 – Classe B com distorção de <i>crossover</i> destacada em vermelho	28
Figura 12 – Classe AB	28
Figura 13 – Princípio do amplificador classe D	29
Figura 14 – Vista explodida de um alto-falante	31
Figura 15 – Caixa selada	35
Figura 16 – Caixa dutada	36
Figura 17 – Caixa passa-banda	37
Figura 18 – Caixa linha de transmissão	37
Figura 19 – Diagrama do <i>hardware</i> do projeto	39
Figura 20 – Transmissor e receptor VHF	40
Figura 21 – Bateria transmitindo e monitor recebendo	41
Figura 22 – Condicionamento do receptor	41
Figura 23 – Circuito de condicionamento do sinal	42
Figura 24 – Circuito somador	44
Figura 25 – Filtro Linkwitz-Riley Passa-baixas	44
Figura 26 – Filtro Linkwitz-Riley Passa-banda	45
Figura 27 – Filtro Linkwitz-Riley Passa-altas	45
Figura 28 – Um dos 6 canais do equalizador	46
Figura 29 – Circuito de Reverberação	49
Figura 30 – Acionamento da Reverberação	49
Figura 31 – Circuito de ativação dos Amplificadores	50

Figura 32 – Amplificador de Graves	51
Figura 33 – Amplificador de Médios e Agudos	52
Figura 34 – ARLEN 12/102	53
Figura 35 – HINOR 6HBF1160DI	54
Figura 36 – ETM ET2-51	54
Figura 37 – Software e parâmetros do alto-falante	55
Figura 38 – Software definição da caixa	56
Figura 39 – Software resposta esperada das caixas	56
Figura 40 – Projeto da caixa acústica	57
Figura 41 – Fonte linear e conversor DC-DC	58
Figura 42 – Circuito da fonte linear	58
Figura 43 – Fonte Chaveada	59
Figura 44 – Potenciômetro Digital	60
Figura 45 – Tiva™ EK-TM4C123GXL Launchpad	60
Figura 46 – NEXTION NX4827K043	61
Figura 47 – NEXTION EDITOR	62
Figura 48 – Fluxograma do <i>firmware</i>	63
Figura 49 – 3D da placa de equalização no software	65
Figura 50 – Placa de circuito impresso do Equalizador já montada	65
Figura 51 – 3D da placa de amplificação no software	66
Figura 52 – Placa de circuito impresso dos Amplificadores já montada	66
Figura 53 – Saída do canal de graves com potenciômetro em 0dB	67
Figura 54 – Saída do canal de médios com potenciômetro em 0dB	67
Figura 55 – Saída do canal de agudos com potenciômetro em 0dB	68
Figura 56 – Soma dos canais com potenciômetro em 0dB.	68
Figura 57– Soma dos canais com potenciômetro em +12 dB.	69
Figura 58 – Soma dos canais com potenciômetro em -12dB.	69
Figura 59 – Montagem das fontes no dispositivo	70
Figura 60 – Montagem do equalizador e controle no dispositivo	70
Figura 61 – Impermeabilização da caixa acústica	71
Figura 62 – Resultado final do dispositivo	71
Figura 63 – Resposta acústica no canal de graves	72
Figura 64 – Resposta acústica no canal de médios	72

Figura 65 – Resposta acústica no canal de agudos	73
Figura 66 – Resposta acústica da soma das vias de graves, médios e agudos	73
Figura 67 – Layout do display	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos filtros Linkwitz-Riley	45
Tabela 2 – Valores dos filtros do Equalizador	48

## **LISTA DE SIGLAS**

EEPROM – *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*

I2C – *Inter-Integrated Circuit*

PWM – *Pulse Width Modulation*

RAM – *Random Access Memory*

SPI – *Serial Peripheral Interface*

VHF – *Very High Frequency*

UHF – *Ultra High Frequency*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVO .....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
1.3 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
2.1 BATERIA ELETRÔNICA.....	18
2.2 EQUALIZADOR .....	20
<b>2.2.1 Filtros Ativos .....</b>	<b>22</b>
2.2.1.1 Filtro Butterworth .....	22
2.2.1.2 Filtro Bessel.....	23
2.2.1.3 Filtro Linkwitz-Riley: .....	24
2.3 AMPLIFICADOR .....	26
2.4 TRANSMISSÃO DE ÁUDIO SEM FIO .....	29
2.5 ALTO-FALANTE .....	30
<b>2.5.1 Parâmetros dos alto-falantes .....</b>	<b>32</b>
2.6 CAIXAS ACÚSTICAS .....	34
2.7 REVERBERAÇÃO .....	38
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....</b>	<b>39</b>
3.1 HARDWARE .....	39
<b>3.1.1 Transmissor e receptor sem fio .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2 Condicionamento do Sinal .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1.3 Equalizador .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.4 Circuito de Reverberação .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.5 Amplificador .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.6 Alto-falantes .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.7 Caixa Acústica .....</b>	<b>55</b>

<b>3.1.8 Fontes de alimentação .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1.9 Potenciômetro Digital.....</b>	<b>59</b>
<b>3.1.10 Microcontrolador e Display .....</b>	<b>60</b>
<b>3.2 FIRMWARE.....</b>	<b>62</b>
<b>3.3 FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO .....</b>	<b>63</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A – PROTÓTIPO CONSTRUIDO .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A bateria é um instrumento musical que pertence à família da percussão, e por isso, diz-se que ela conduz a música, ou realiza a marcação do ritmo. Presente dentro de muitos gêneros musicais, esse instrumento até pode atuar como solo, mas sua principal função é garantir que o andamento da música seja respeitado.

Contudo, engana-se quem vê a bateria como um instrumento só. Segundo Barsalini (2009, p. 09), ela “é um instrumento múltiplo, ou seja, consiste em uma junção de diferentes instrumentos de percussão”. Já Carinci (2012, p. 25), define a bateria como “uma coleção de outros instrumentos”. Isso acontece porque cada um dos componentes da bateria é responsável por emitir um tipo de som com notas e timbres diferentes, oriundos de outros instrumentos de origens e tradições diversas.

Ao serem agrupados, reunidos, estes diversos instrumentos passaram a se configurar como um instrumento só, tocado pelo mesmo músico.

Com o passar dos anos e com a evolução da eletrônica, iniciou-se a ideia de criar uma bateria que tivesse a capacidade de reproduzir sons diferentes e também criar novos sons. Veio então em 1971, a primeira bateria eletrônica, criada por Graeme Edge baterista da banda “The Moody Blues”, com o auxílio do professor Brian Groves da Universidade de Sussex no Reino Unido, com o intuito de criar novos efeitos para o novo álbum “Every Good Boy Deserves Favor”, lançado também no ano de 1971.

Esta primeira versão de bateria eletrônica, segundo Nunes Junior (2017, p.16) “utilizava como sensor um ímã que, quando tinha seu suporte tocado, se movia dentro de uma bobina gerando assim um sinal elétrico que seria sintetizado no circuito principal”. Porém, eram necessários vários circuitos para que o sinal fosse condicionado e posteriormente modificado através de sintetizadores, se tornando inviável comercialmente.

Somente em 1981, a empresa SIMMONS® lançou a bateria eletrônica modelo SDS-5, a qual já possuía um avanço no tipo de sensor e também no condicionamento e processamento do sinal. Esta utilizava um sensor *piezo elétrico*, capaz de converter a vibração mecânica em tensão, gerando um pulso que era recebido por um sintetizador com inúmeras possibilidades de ajuste do áudio.

Desde então, esse processamento realiza a análise da amplitude e o tamanho do pulso gerado, liberando na saída do dispositivo um som pré-definido, com dinâmica e tempo

proporcionais ao valor do pulso de entrada, fazendo assim, com que o baterista tenha a sensação de estar tocando em uma bateria acústica.

Mas para que todos estes avanços consigam atingir o músico ou quem está ouvindo, se faz necessário um retorno de áudio, que deve conter uma equalização e amplificação suficiente para que o som gerado na bateria eletrônica consiga ser reproduzido fielmente.

Esta equalização nada mais é do que um conjunto de circuitos oriundos de filtros ativos, que são destinados a corrigir a resposta em frequência de um determinado sinal de áudio, de acordo com configurações estabelecidas. Tais configurações podem resultar em ganho ou atenuação em certa faixa de frequência, visando tornar a resposta do sistema o mais linear possível (ORFANIDIS, 1996).

## 1.1 OBJETIVO

A partir da necessidade de desenvolver um sistema de monitoração de áudio com uma solução moderna e eficiente, o projeto tem como base, construir um monitor de áudio para o baterista.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir um MONITOR DE ÁUDIO que possua:
  - Comunicação Sem fio
  - Efeito de ambiência
  - Equalizador analógico de 6 faixas
  - Amplificador
  - Que seja controlado por um display *touchscreen*

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A bateria eletrônica não produz som por si só, assim, parte-se deste princípio a criação de um equipamento que pode servir de monitor de áudio para a bateria eletrônica.

As soluções que existem no mercado possuem um equalizador com somente três faixas de frequência de ajuste, o que deixa a configuração extremamente limitada. Além disso, nenhum efeito de ambiência poder ser inserido, e os dispositivos utilizam cabos para se conectar ao instrumento, o que gera desconforto para o baterista quando utiliza o monitor de áudio em palcos.

Com o intuito de corrigir e otimizar as deficiências dos equipamentos já produzidos, o projeto será um monitor de áudio de fácil configuração e utilização pelo baterista, que neste

caso, não necessitará de outras pessoas para conseguir um bom resultado no áudio no seu retorno.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentados os conhecimentos fundamentais para o entendimento e desenvolvimento deste trabalho, tais como aspectos construtivos da bateria eletrônica, topologia de filtros ativos com melhor desempenho em equalizadores de áudio, configuração de amplificadores de potência, formas mais utilizadas de transmitir áudio em tempo real, aspectos construtivos de alto-falantes e os aspectos construtivos de caixas acústicas.

### 2.1 BATERIA ELETRÔNICA

A partir da década de 70, se tornou tendência utilizar sintetizadores para criar efeitos sonoros nas produções musicais. Esses sintetizadores foram concebidos com base em circuitos eletrônicos que combinam ondas elétricas diferentes e geram um sinal de áudio. Sabendo que estes dispositivos já estavam consolidados nos teclados, o professor Brian Groves, a pedido do baterista Graeme Edge desenvolveu um equipamento que possibilitava usar os recursos dos sintetizadores na bateria, caracterizando então a bateria eletrônica (NUNES JUNIOR, 2017).

Figura 1 – Bateria eletrônica em sua configuração padrão



Fonte: <https://www.roland.com/br/products/td-25k>

A configuração padrão de uma bateria eletrônica pode ser vista na Figura 1. Mas a verdade é que esse instrumento possui infinitas possibilidades de configuração, tanto no tipo de som gerado, como na montagem física da estrutura. O baterista pode optar por modificar a configuração padrão tanto para facilitar a execução de tipos de músicas diferentes, quanto para ficar de acordo com seu próprio gosto.

A estrutura mecânica que aparece nos itens 1 a 8 da Figura 1, é chamada de *Pad* ou almofada e esta recebe o impacto causado pelo baterista. O *Pad* pode ser de borracha ou de uma espécie de tecido sintético, como mostra com maior ênfase a Figura 2. Este material é tensionado a ponto de igualar a percepção do baterista a uma pele de bateria acústica.

Figura 2 – *Pad*



Fonte: <https://www.roland.com/br/products/pdx-8>

Para que a vibração gerada no *pad* seja convertida em sinal elétrico, se faz necessário um transdutor capaz de captar estas vibrações e transformá-las em tensão. Na primeira versão da bateria eletrônica, este circuito de conversão era baseado em uma bobina que quando movimentava o suporte que a acoplava, gerava um sinal elétrico posteriormente condicionado pelo sintetizador (NUNES JUNIOR, 2017).

Com o passar dos anos e o avanço da tecnologia, o sistema de captação do sinal foi modificado, e a partir de 1981, quando o baterista toca no *pad*, um sinal elétrico em forma de pulso é gerado. Este é chamado de *trigger*, ou gatilho, e segue até um módulo que posteriormente fará o processamento e o disparo do som, previamente gravado para aquele respectivo canal.

A estrutura que gera o gatilho e está inserida dentro do *pad* é uma cápsula de cristal *piezoelétrico*, como mostra a Figura 3. Esta funciona da seguinte maneira: quando o cristal está em repouso, todas as cargas elétricas positivas e negativas estão simetricamente distribuídas, deixando a carga total neutra. Quando uma força é exercida sobre o cristal, essa simetria é

desfeita e a distribuição irregular das cargas faz surgir uma tensão em forma de pulso. (PATSKO, 2006).

Figura 3 – Cristal *piezoelétrico*



Fonte: <http://www.vidadesilicio.com.br/pastilha-piezoelétrico-27mm-com-fio.html>

O pulso elétrico gerado, chega até um módulo semelhante ao representado no item 9 da Figura 1, que percebe a quantidade de tensão do pulso, e gera o som com amplitude e tempo de emissão proporcional ao sinal de entrada, e assim cria uma dinâmica, o que dá ao baterista a sensação de estar tocando em uma bateria acústica.

Desta forma, o som emitido pelo instrumento é baseado no som de uma bateria acústica e pode ser configurado de várias formas dentro do espectro audível (20Hz a 20kHz). Ainda, é importante ressaltar que cada parte da bateria pode sofrer alteração tanto de volume quanto de timbre, os quais definem o estilo musical a ser executado.

Tratando da faixa de frequência gerada pelo módulo, pode se afirmar que os *pads* 1, 7 e 8 mostrados na Figura 1, são responsáveis pelas frequências médias e altas, tem frequência fundamental entre 300Hz a 900Hz (médias frequências) e as harmônicas, responsáveis pelo timbre, estão nas frequências mais altas variando de 900Hz a 16kHz.

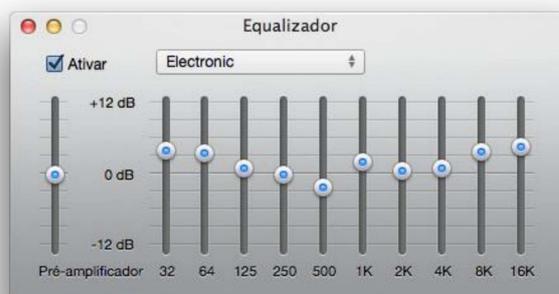
Já os *pads* 2, 3, 4, 5 e 6, possuem frequências fundamentais localizadas entre as médias frequências (300Hz a 900Hz) e as baixas frequências (60Hz a 300Hz), com suas componentes harmônicas também responsáveis pelo timbre localizadas entre 300Hz a 10kHz. (NASCIMENTO, 2011)

## 2.2 EQUALIZADOR

O equalizador de áudio é um dispositivo capaz de ajustar as frequências do áudio de diversas formas, podendo atenuá-las ou aumentá-las, no caso de haver excesso ou falta de graves, médios ou agudos. O equalizador também possibilita remover ruídos que estejam numa faixa específica de frequência.

Dois tipos de equalizadores são os mais utilizados em mistura e produção musical. Um deles é o equalizador gráfico, que como o próprio nome sugere, atua de forma gráfica, e normalmente é representado em barras deslizantes, como mostra a Figura 4. Ele permite aumentar ou diminuir determinadas frequências (normalmente dadas em decibéis (dB)) em um determinado sinal de áudio, ajustando assim a sua tonalidade. Porém, este equalizador está restringido a uma quantidade definida de bandas. (SOMBINARIO, 2016)

Figura 4 – Equalizador gráfico



Fonte: <http://proclass.com.br/home/wp-content/uploads/2015/08/fig.-1-iTunes-Equalizador-gr%C3%A1fico.png>

O segundo equalizador mais empregado no áudio está representado na Figura 5, e é conhecido como equalizador paramétrico. Em termos de configuração, este dispositivo é mais completo que o equalizador gráfico, pois nele é possível escolher vários parâmetros que se pretende modificar, tais como a faixa de frequências em torno da frequência central, e o fator de qualidade (Q), que consiste no número de oitavas que o equalizador irá afetar. Quanto mais alto for o parâmetro (Q) mais estreita será a faixa de frequências atingida.

Figura 5 – Equalizador paramétrico



Fonte: <http://macprovid.vo.llnwd.net/o43/hub/media/1078/7176/4c.png>

Quando se fala em modificar a faixa de frequências no entorno da frequência central, tem-se a possibilidade de selecionar uma determinada banda de frequências e aumentá-las ou diminuí-las, tornando possível distinguir uma frequência de outra, estando ambas próximas na região do espectro. (SOMBINARIO, 2016)

Para que o equalizador possa desempenhar sua função, ele faz uso de filtros ativos. Existem vários tipos de filtros ativos, cada um com um tipo de resposta e também de aplicação diferente. Os mais utilizados em áudio serão apresentados nas seções subsequentes.

### 2.2.1 Filtros Ativos

Um filtro ativo é um dispositivo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada, e permitir a passagem das demais (PERTENCE JR., 2015).

Existem quatro tipos de filtros ativos. O primeiro deles é o filtro passa-baixas, em que somente as frequências abaixo de uma determinada frequência de corte passam. O segundo se chama filtro passa-altas, e permite que apenas as altas frequências a partir da frequência de corte passem. O terceiro é o filtro passa-faixa, que possui uma janela definida e somente as frequências dentro desta janela passam. E por fim, mas não menos importante, há o filtro rejeita-faixa, e este é responsável por impedir uma determinada faixa de frequências de passar.

Se tratando de equalizadores, além do fator Q dos filtros, a resposta dos mesmos quando atingida a frequência de corte também é muito importante, pois cada tipo de filtro responde de forma diferente neste ponto. Entre os tipos de filtros mais comuns utilizados em áudio, estão os que tem funções de transferência tipo Butterworth, Bessel e Linkwitz-Riley<sup>1</sup>. A título de comparação, filtros do tipo passa-baixas serão utilizados para diferenciar os três modelos.

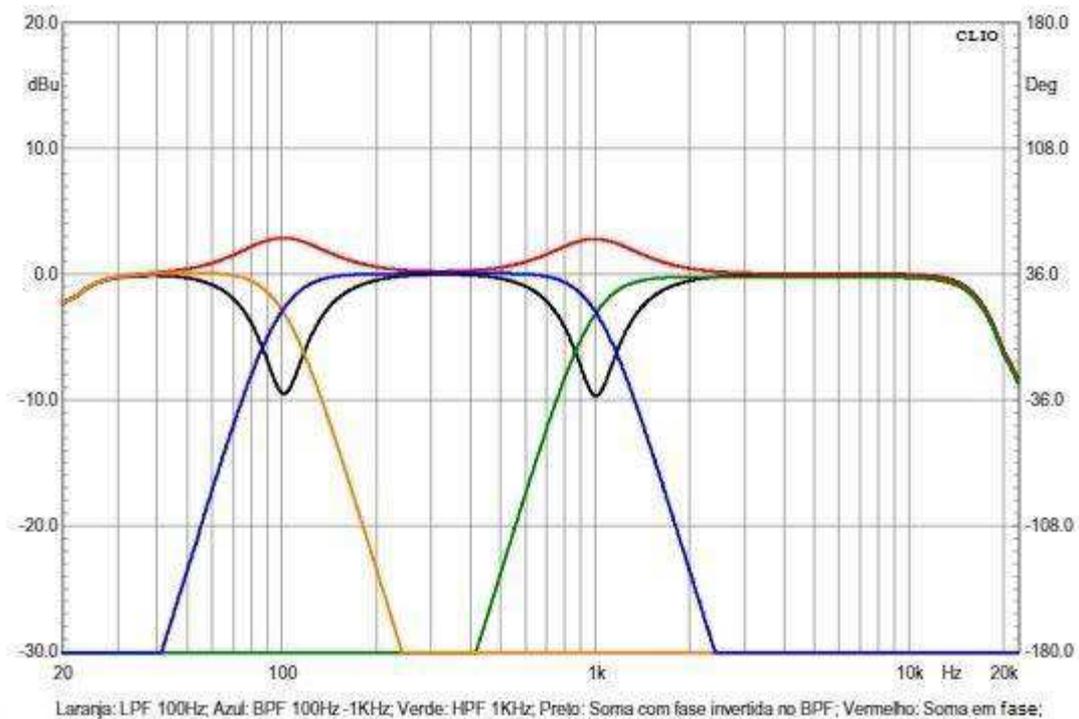
#### 2.2.1.1 Filtro Butterworth

Este filtro é caracterizado por ter a máxima planicidade na sua banda passante, mas com um “calombo” na superposição das vias, o que faz com que tenha um ganho indesejável no momento do cruzamento entre as faixas mostrado na linha vermelha na Figura 6. Os filtros deste tipo possuem a função-resposta descrita na equação (1), por exemplo quando se trata de um filtro passa-baixas.

$$|Hn(j\omega)| = \frac{Kpb}{\sqrt{1+(\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad (1)$$

Onde Kpb é o ganho do filtro passa-baixas quando a frequência  $\omega$  é nula,  $\omega_c$  é a frequência de corte ( $\omega_c=2\pi f_c$ ) e n é a ordem do filtro. (PERTENCE JR., 2015)

Figura 6 – Resposta Butterworth



**Resposta Elétrica de um Crossover de três vias, com frequências de corte iguais a 100 Hz e 1kHz, tipo Butterworth de 24 dB/8ª.**

Fonte: Modificado de: <https://docplayer.com.br/10483913-Eam-eleto-acustica-mass-processamento-digital-de-pa-s-ii.html>

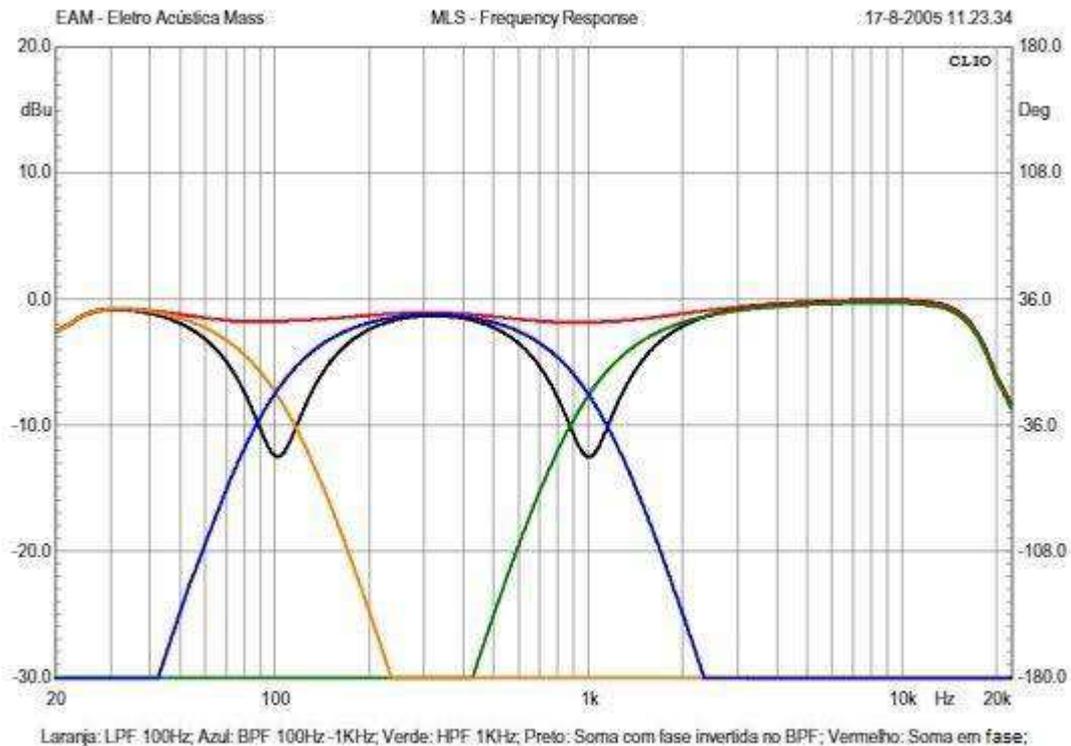
### 2.2.1.2 Filtro Bessel

Este filtro é caracterizado por não ter uma queda tão rápida como o filtro Butterworth como mostra a linha vermelha na Figura 7. Por esta razão, nos circuitos de cruzamento de áudio, a quarta ordem é a ordem mínima recomendável para estes filtros. Por outro lado, este filtro apresenta o melhor desempenho em relação à fase. A equação (2) mostra a resposta deste filtro em 1ª ordem.

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0}} \quad (2)$$

Onde  $\omega_0$  é  $2\pi f_0$  e  $s$  é  $\sigma + j\omega$ .

Figura 7 – Resposta Bessel



**Resposta Elétrica de um Crossover de três vias, com frequências de corte em 100 Hz e 1 kHz, do tipo Bessel, com taxa de atenuação de 24 dB/8°.**

Fonte: Modificado de: <https://docplayer.com.br/10483913-Eam-eleto-acustica-mass-processamento-digital-de-pa-s-ii.html>

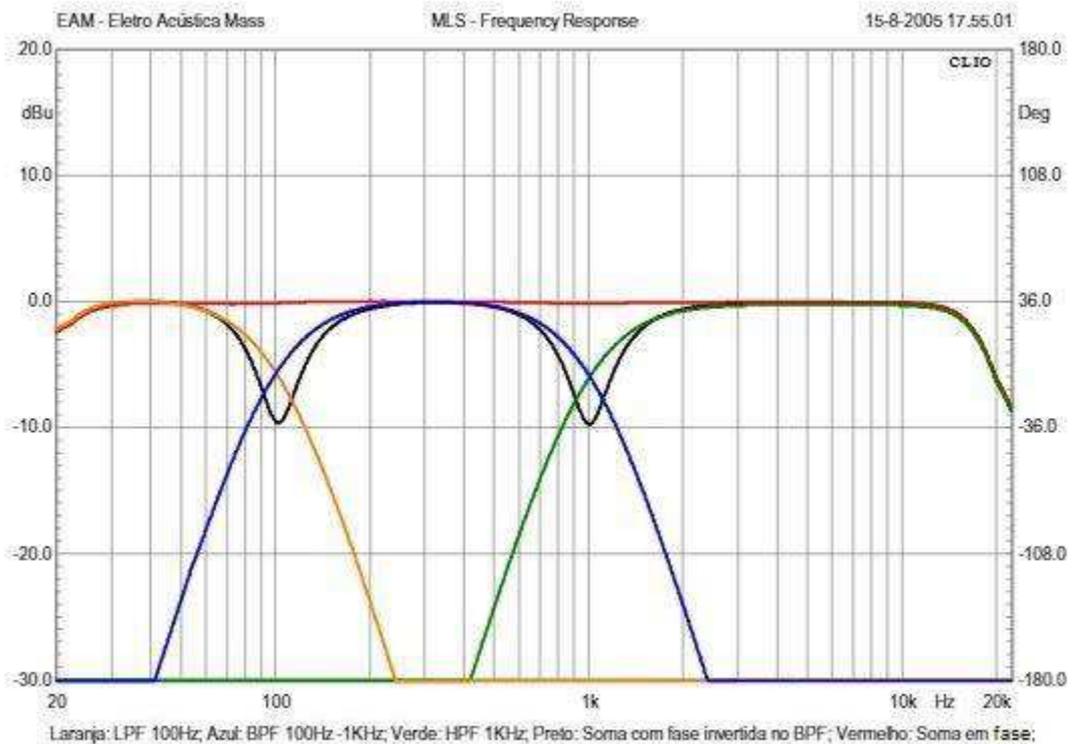
### 2.2.1.3 Filtro Linkwitz-Riley:

Este filtro possui superposição perfeita, ou seja, a transição entre as faixas não gera nenhum tipo de ganho ou atenuação, como mostra a linha vermelha na Figura 8, e sua frequência de corte tem atenuação de 6dB por oitava. O resultado desta característica fica claro quando utilizado em circuitos de equalização, pois o “calombo” observado na transição de faixas nos filtros Butterworth é eliminado neste filtro. A equação (3) mostra a função resposta de 2ª ordem do filtro Linkwitz-Riley para passa-baixas. (LINKWITZ, 2006)

$$|H(j\omega)| = \frac{\omega^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q_0}s + \omega_0^2} \quad (3)$$

Onde  $\omega_0$  é  $2\pi f_0$  e  $s$  é  $\sigma + j\omega$ .

Figura 8 – Resposta Linkwitz-Riley

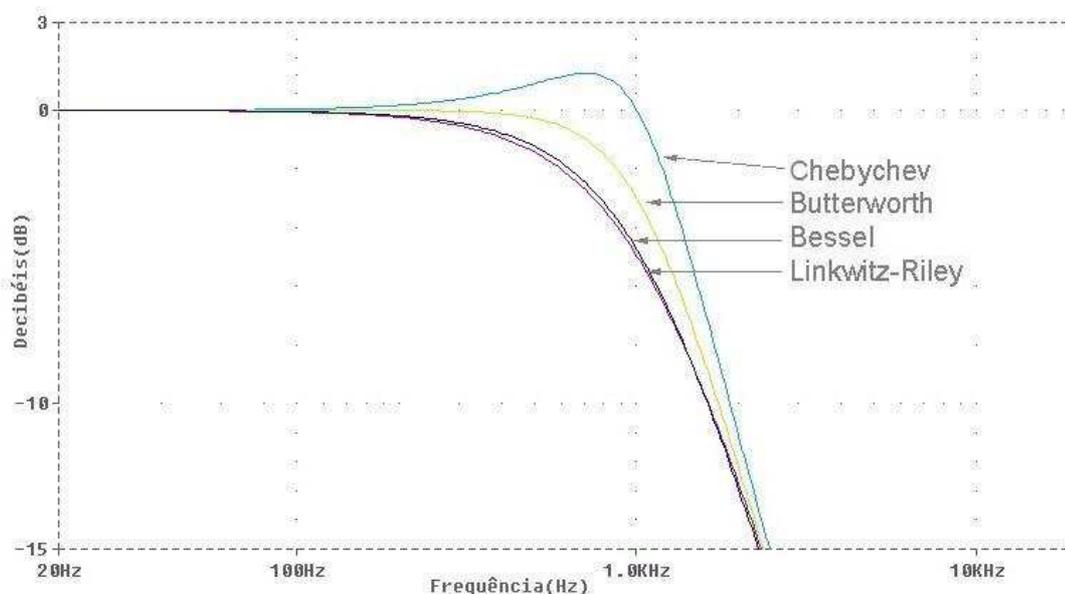


**Resposta Elétrica de um Crossover de três vias, com os cortes em 100 Hz e 1 kHz, do tipo Linkwitz-Riley, com taxa de atenuação de 24 dB/8°.**

Fonte: Modificado de: <https://docplayer.com.br/10483913-Eam-eletro-acustica-mass-processamento-digital-de-pa-s-ii.html>

Para tornar a comparação das respostas dos filtros mais clara, são apresentadas na Figura 9 as curvas de resposta em frequência dos filtros Chebychev, Butterworth, Bessel e Linkwitz-Riley na configuração passa-baixas.

Figura 9 – Curva de resposta em frequência dos filtros para filtro passa-baixas



Fonte: Adaptado de: [https://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc\\_altavoces/GroupdelayQbig.gif](https://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/GroupdelayQbig.gif)

Os filtros Butterworth, Bessel e Linkwitz-Riley tem como característica principal uma resposta mais controlada quando utilizados em áudio. E como pode ser visto na Figura 9 o filtro Chebyshev não tem planicidade na banda passante, e por esta razão não é popular como filtro para cruzamento.

### 2.3 AMPLIFICADOR

“Os amplificadores de potência são utilizados em áudio para proporcionar ao sinal de baixa potência de entrada a energia suficiente para alimentar os alto-falantes, ligados na saída. Para isso é necessário amplificar não só a tensão do sinal de entrada como sua corrente. Como potência é o resultado do produto tensão-corrente, ela acaba também amplificada” (SETTE, 2015, p. 2).

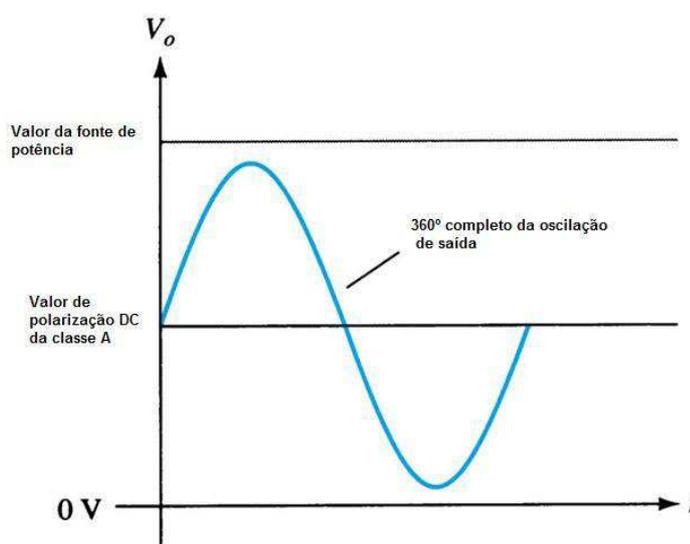
Existem várias classes de amplificadores de potência, entre elas, as mais utilizadas em áudio denominam-se classe A, B, AB e D. A base para definir estes tipos de classes é a relação entre a fidelidade e a eficiência.

Segundo o dicionário, fidelidade é a “particularidade que um sistema acústico possui para reproduzir os sons que pertencem a todas as frequências presentes no som original”. Por isso, um amplificador com alta fidelidade faz com que o sinal de saída tenha praticamente as mesmas características do sinal de entrada, apenas com maior ganho.

Em contrapartida, um amplificador eficiente consegue converter o máximo de potência elétrica em potência sonora. Do contrário a potência elétrica convertida se transforma em perdas e aquecimento do sistema. As classes de amplificadores de potência se distinguem por diferentes configurações de circuitos, as quais priorizam a eficiência ou a fidelidade, ou ainda tentam aliar da melhor forma estas duas características.

O amplificador de classe A apresenta a melhor característica de fidelidade quando comparado aos amplificadores de classe B, AB e D. Contudo, este tem a menor eficiência, que idealmente, não passa de 50%. Isso se deve ao fato de que os transistores de saída estão sempre em condução, pois existe uma corrente de polarização constante, com valor de no mínimo metade da máxima corrente de carga. Um sinal de saída de áudio em classe A está representado na Figura 10.

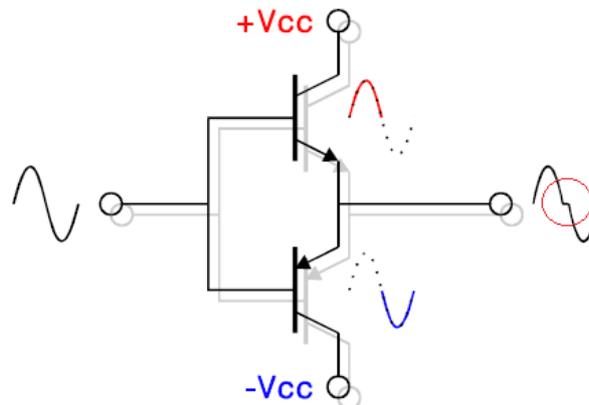
Figura 10 – Classe A



Fonte: Adaptado de: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAATwwAB/classes-amplificadores-potencia#>

Já o amplificador de classe B caracteriza-se por não ter corrente de polarização nos transistores de saída, o que faz aumentar a eficiência do circuito, idealmente para 78,5%. Isso acontece porque os transistores passam a conduzir apenas quando são excitados pelo sinal de entrada. No entanto, torna-se necessário utilizar um par de transistores de saída, pois cada um fica responsável por um semi-ciclo do sinal. Durante a transição da operação de um transistor para outro, há uma interrupção do sinal de saída, pois o nível do sinal de entrada não é suficientemente grande para colocar os transistores em condução. Neste momento, ocorre a chamada distorção de *crossover*, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Classe B com distorção de *crossover* destacada em vermelho

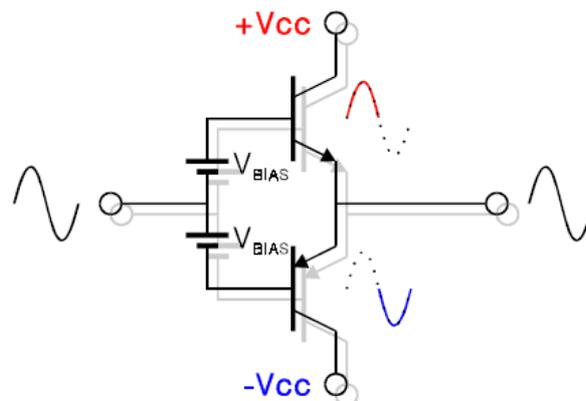


Fonte: Adaptado de: [http://www.studior.com.br/amp\\_avan.pdf](http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf)

Para grandes potências a distorção de *crossover* é relativamente pequena, pois o sinal passa a ser muito maior que o nível dos harmônicos gerados. Contudo, à medida que os níveis do sinal de entrada vão baixando, a diferença também diminui, fazendo com que a distorção passe a ser relevante.

No que se refere ao amplificador de classe AB, pode-se dizer que este possui a junção das melhores características dos amplificadores classe A e classe B. Primeiro, porque a distorção de *crossover* que ocorre na classe B é minimizada, como mostra a Figura 12. E segundo, porque existirá uma corrente mínima de polarização nos transistores de saída, bem menor que a corrente de polarização da classe A, facilitando a condução dos transistores. Esta classe de operação tem sido largamente empregada em amplificadores contínuos.

Figura 12– Classe AB

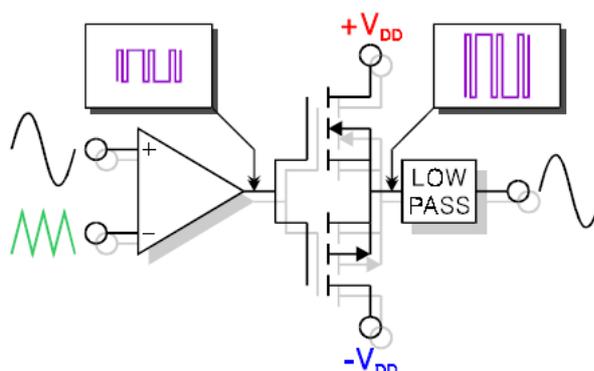


Fonte: Adaptado de: [http://www.studior.com.br/amp\\_avan.pdf](http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf)

Por fim, existem os amplificadores de classe D, que são conhecidos como "amplificadores chaveados". Isso se deve ao fato dos transistores de saída não operarem continuamente, já que o sinal de entrada é constantemente comparado com uma referência, que

possui frequência muitas vezes maior que a máxima frequência contida no sinal de áudio. O resultado é uma onda quadrada PWM (Pulse Width Modulation), cuja largura do pulso varia proporcionalmente à amplitude do sinal de entrada, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Princípio do amplificador classe D



Fonte: Adaptado de: [http://www.studior.com.br/amp\\_avan.pdf](http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf)

Esta onda quadrada é aplicada ao estágio de potência, que por sua vez o envia à carga através de um filtro passa-baixas, que recuperará a "forma" original do sinal. Essa classe de operação tem uma eficiência bastante alta, que fica próxima dos 90%, mas não tem a qualidade de baixa distorção relativa que um amplificador contínuo classe A e AB tem. (BORTONI, 1999)

## 2.4 TRANSMISSÃO DE ÁUDIO SEM FIO

Por obterem alta fidelidade e baixa latência somadas ao baixo ruído, as operações de transmissão sem fio mais utilizados para transmissão de áudio, são conhecidas como UHF e VHF. A operação em UHF, sigla para o termo inglês Ultra High Frequency (Frequência Ultra Alta), opera na faixa de 600 a 660 MHz. Já a operação em VHF, Very High Frequency, que significa Frequência Muito Alta, normalmente opera entre 160 a 250 MHz.

Estes dois tipos de operação são eficientes e capazes de transmitir áudio. Porém, o local onde o sistema de áudio é instalado e a sua finalidade, fazem com que cada uma das operações possuam vantagens e desvantagens.

A principal vantagem da operação em UHF, é que há menos chance de interferência devido a maior disponibilidade do espectro de frequência. Por exemplo, no que se refere a interferência devido a saídas espúrias de equipamentos de radiofrequência e eletroeletrônicos,

a transmissão em UHF é mais indicada, porque os transmissores que operam em frequências na faixa Ultra Alta são menos afetados por esse tipo de ruído.

Os transmissores em UHF também são boas opções em situações em que é importante que as antenas sejam menores e menos visíveis, como o caso de alguns transmissores que precisam ficar ocultos. Da mesma forma, estes dispositivos podem ser preferíveis se for necessário utilizar antenas de alto desempenho para aumentar o alcance.

Agora, quando se fala em custo, tem-se a principal desvantagem da transmissão em UHF. Isso acontece porque os equipamentos de transmissão utilizam uma grande quantidade de componentes de alta frequência, que são mais caros, tudo aliado à necessidade de técnicas de fabricação também mais caras. Além disso, a duração da bateria de um transmissor em UHF é baixa, o que pode gerar gastos ao longo da vida útil do sistema. Ainda, outros custos relativos a manutenção também devem ser levados em conta, especialmente a quantidade de tempo necessário para ajustar o equipamento e verificar seu desempenho.

Nesse sentido, os transmissores em VHF levam vantagem em relação aos transmissores em UHF. O custo das antenas, dos cabos, dos divisores de antenas e dos pré-amplificadores é muito menor para um desempenho equivalente. A duração da bateria dos transmissores VHF é maior, o que conseqüentemente gera economia a longo prazo, além de manutenções mais simples e baratas.

Mas é claro que esses transmissores também possuem algumas desvantagens. Quando um equipamento VHF é operado na região central de uma grande cidade ou em uma área industrial, se faz necessário tomar cuidado para que as interferências de equipamentos industriais sejam evitadas. Outro ponto a ser destacado é a distância de aplicação destes sistemas, pois os ruídos tendem a viajar junto com a frequência de VHF, o que torna a transmissão dificultada. (AUDIO-TECHNICA, 2019)

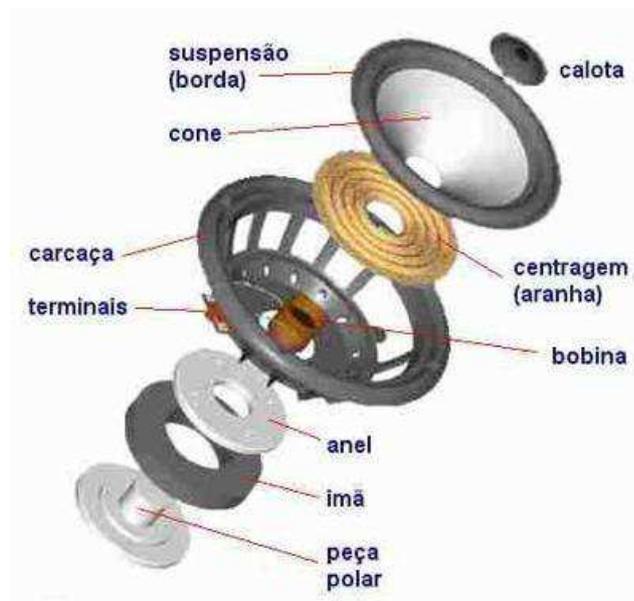
## 2.5 ALTO-FALANTE

O alto-falante é um dispositivo que tem a capacidade de transformar um sinal de audiofrequência em onda acústica. Este transdutor tem como princípio de funcionamento três fatores: o elétrico, que é o sinal injetado na entrada, o mecânico, o qual faz a conversão, e o acústico, que é o resultado dos outros dois, e gera o efeito eletro-mecânico-acústico percebido nos ouvidos, conhecido como som.

Basicamente, a estrutura física de um alto-falante consiste em um cone rígido acoplado a uma bobina móvel localizada em um campo magnético permanente intenso. Quando visto

com mais detalhes, como mostra a Figura 14, percebe-se que este dispositivo possui alguns componentes fixos e outros componentes móveis, responsáveis tanto pela parte elétrica quanto mecânica e acústica.

Figura 14 – Vista explodida de um alto-falante



Fonte: [http://cdn1.clasificados.com/br/pictures/photos/000/038/974/original\\_falante\\_explodido.jpg](http://cdn1.clasificados.com/br/pictures/photos/000/038/974/original_falante_explodido.jpg)

Para que fique mais claro, o alto-falante será dividido em três conjuntos: o conjunto magnético, o conjunto fixo e o conjunto móvel.

O conjunto magnético é composto principalmente por um ímã, que fornece um forte campo magnético ao entreferro, o espaço livre entre a peça polar e a sua parte central. Para que esse campo fique ainda mais intenso, utiliza-se o anel e a peça polar, já que ambos são responsáveis por melhorar a condução da energia magnética gerada pelo ímã para o entreferro.

No conjunto fixo, por sua vez, temos a carcaça, que serve de suporte para todos os componentes do alto-falante. Nesta carcaça estão os terminais que fazem a ligação entre a bobina móvel e os conectores, permitindo que o cone junto com a bobina execute livremente as vibrações vindas do amplificador.

Os demais componentes do alto-falante são responsáveis pelo seu conjunto móvel. Um deles, conhecido como centragem ou aranha, é uma peça que mantém a bobina móvel centralizada no entreferro, permitindo que o cone efetue movimentos para dentro e para fora.

Já a bobina móvel, trabalha dentro do entreferro, e transforma as ondas elétricas recebidas do amplificador em vibrações, que quando transmitidas ao ar pelo cone, causam o fenômeno sonoro. Ela é composta de um cilindro, feito de folha de papel ou alumínio, sobre o qual são enroladas várias espiras de fio de cobre ou alumínio.

O cone transmite as vibrações geradas na bobina móvel para o ar, provocando o som. Seu formato é cônico e geralmente é confeccionado em papel ou polipropileno. Para desempenhar bem sua tarefa, o cone deve ser rígido e possuir alto amortecimento interno. Entre todos os componentes do alto-falante, este é o que mais influência na qualidade do som.

A suspensão, que é uma extensão do cone, tem a função de ajudar a centragem a manter a bobina móvel centralizada no entreferro, permitindo que o conjunto oscilante execute livremente as vibrações. Ela é normalmente fabricada com espuma de poliuretano ou borracha e é um dos componentes que define a frequência de ressonância do alto-falante. E por fim, mas não menos importante, existe a calota, que protege o entreferro contra a entrada de poeira e outras partículas estranhas. Esta é confeccionada em papel, alumínio ou plástico (ALYSSON, 1999).

Assim, quando a corrente elétrica contínua passa pela bobina, gera-se uma força dinâmica proporcional à intensidade do campo magnético, à intensidade da corrente e ao comprimento do fio que forma a bobina, em termos do seu número de espiras.

Esta força dinâmica provoca um deslocamento do conjunto móvel, que promove uma compressão e uma rarefação no ar. Quando esta corrente é uma corrente alternada, a força dinâmica criada segue a forma da corrente, e portanto, o deslocamento do sistema móvel é também linearmente relacionado com a forma da corrente. Estas variações de pressão se propagam através do ar chegando aos nossos ouvidos, causando a sensação de audição.

Devido ao alto-falante ser um dispositivo em que interagem fenômenos eletromagnéticos, mecânicos e acústicos, a modelagem deste sistema é extremamente complexa. Porém, se a operação deste dispositivo se mantém dentro de seus limites de linearidade e opera em regime de “pequenos sinais”, é possível caracterizá-lo em alguns parâmetros que possam ser úteis na aplicação destes ao projeto de sistemas de alto-falantes.

### **2.5.1 Parâmetros dos alto-falantes**

Há alguns anos, os australianos Albert Neville Thiele e Richard H. Small desenvolveram modelos baseados em um conjunto de parâmetros, conhecidos hoje como parâmetros de *Thiele-*

*Small* ou simplesmente parâmetros T-S. Estes parâmetros caracterizam o dispositivo, e os mais importantes deles serão definidos a seguir.

O volume equivalente de ar (VAS), representa a dureza total do cone, da suspensão e da aranha. É especificado como o volume de ar que tem a mesma conformação que o transdutor. Um valor de VAS pequeno corresponde a um pequeno volume de ar, que é mais duro que um volume grande de ar. Portanto, conformação e dureza são inversamente proporcionais. O volume de um gabinete ou caixa de som é proporcional ao VAS.

A frequência de ressonância (FS) é a impedância elétrica equivalente do transdutor, quando este está colocado no ar livre (sem gabinete). A frequência de corte inferior (-3dB) de um gabinete é proporcional a FS.

A medida do pico da ressonância (Qts), representa o fator de qualidade total do driver. Este parâmetro se define através da relação apresentada na equação (4), em que Fh e Fl são as frequências onde a impedância elétrica do driver ao ar livre cai 3 dB (70,7% do valor máximo da ressonância). O volume de um gabinete está relacionado com o Qts, mas não é diretamente proporcional.

$$Qt = \frac{Fh - Fl}{FS} \quad (4)$$

Pode-se dizer que o volume do gabinete fica maior para o Qts grande. Igualmente, a frequência de corte inferior (-3dB) e fica menor quando Qts é grande para um gabinete fechado, a frequência de corte é inversamente proporcional ao Qts. Por ser o fator de qualidade total do driver, inclui todas as perdas mecânicas e elétricas, cada uma destas perdas é representada por um respectivo fator de qualidade Qms e Qes, então para definir o Qts deve se relacionar os fatores de qualidade como mostra a equação (5).

$$Qts = \frac{(Qms \cdot Qes)}{Qms + Qes} \quad (5)$$

O fator de qualidade mecânica (Qms), é representa a razão entre a energia acumulada na conformação e a energia dissipada na resistência mecânica da suspensão.

Fator de qualidade elétrica (Qes), este fator é proporcional à raiz quadrada da razão entre a massa móvel e a conformação mecânica, é inversamente proporcional ao quadrado do fator de força do conjunto eletromagnético, dividido pelo valor da resistência elétrica de corrente contínua Re. A eficiência do driver tem uma relação inversa com Qes.

A resistência elétrica ( $R_e$ ), nada mais é que a resistência elétrica de corrente contínua da bobina do transdutor. Esta resistência é responsável pela geração de calor, já que a maior parte da energia elétrica aplicada é transformada em calor neste parâmetro.

Rendimento de referência do driver ( $\eta_0$ ), indica a relação entre potência acústica gerada e a potência elétrica aplicada. Representa a eficiência a ser obtida na banda passante de qualquer radiador acústico direto.

Por fim o  $X_{m\acute{a}x}$ , é o deslocamento máximo linear (valor de pico) a que pode ser submetido o conjunto móvel, dentro de limites aceitáveis de distorção. Quando este limite é ultrapassado a distorção não linear aumenta fortemente e o driver fica sujeito a danos mecânicos permanentes (SETTE, 1996).

Cada alto-falante possui parâmetros diferentes, e isto faz de cada projeto ser único, portanto o primeiro item a definir, deve ser o alto-falante.

## 2.6 CAIXAS ACÚSTICAS

Uma caixa acústica é um dispositivo cuja finalidade é impedir que as ondas sonoras dianteiras e traseiras emitidas pelos alto-falantes se misturem, o que causa interferência destrutiva e anula o som. Elas também são utilizadas para melhorar a acústica da reprodução sonora, tanto em resposta em frequência quanto em tempo de resposta (VIANA, 2016).

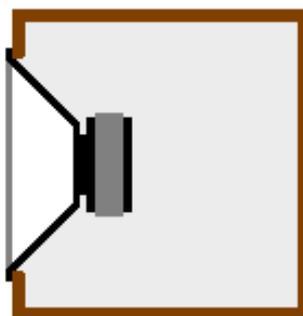
As caixas acústicas normalmente possuem mais de um alto-falante, no intuito de cobrir melhor todas as faixas de frequências audíveis (em torno de 20 Hz a 20 kHz). As unidades pequenas são chamadas de *tweeters* e são responsáveis pelos sons agudos. As unidades de média frequência são chamadas de *mid-ranges* e as de frequências graves de *woofers*.

Para otimizar o funcionamento de cada tipo de alto-falante, o sinal que chega à caixa passa por um circuito divisor de frequências, uma espécie de filtro eletrônico que distribui o espectro sonoro adequadamente entre as diversas unidades. Assim, após esse filtro, somente os agudos são passados para os *tweeters*, os médios para os *mid-ranges* e os graves para os *woofers*.

Para audição em aparelhos de som de alta fidelidade, são usadas caixas acústicas aos pares, com o intuito de obter o efeito da estereofonia. Em cinemas e *home-theaters* são usadas múltiplas caixas acústicas para obter o efeito de *surround*. Ou seja, para cada tipo de aplicação existem diferentes tipos de caixas acústicas, e entre as mais utilizadas estão as caixas seladas, dutadas, passa-banda e linha de transmissão.

As caixas de som seladas, caixas acústicas seladas, ou suspensão acústica, são caracterizadas pelo completo isolamento da massa de ar traseira do falante em relação à da dianteira, como mostra a Figura 15. Como o ar dentro da caixa é comprimido e expandido conforme a movimentação do cone do alto-falante, a pressão interna tem efeito similar a uma mola, expelindo o cone quando ele entra e puxando o cone quando ele sai. Esta é uma caixa relativamente fácil de ser projetada, sendo sua única variável o volume interno de ar livre.

Figura 15 – Caixa selada



Fonte: <http://blog.lojaedifier.com.br/o-que-e-uma-caixa-de-som/>

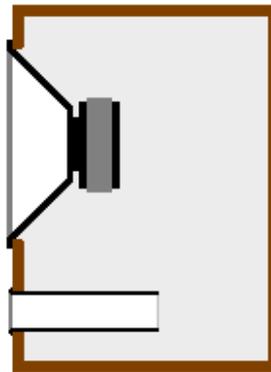
No entanto, a suspensão acústica desta caixa é bem menos linear que a mecânica. Por isso, é aconselhável projetar o alto-falante e a caixa de forma que a força de restituição predominante seja a mecânica.

Acusticamente, ela é caracterizada por tempos de resposta rápidas, isto é, a variação do tempo de resposta do alto-falante varia pouco em função da frequência, ficando abaixo de 10 milissegundos(ms). Assim, ela é responsável por graves rápidos e precisos, percebido em tambores e bumbos rápidos. Porém, sua desvantagem é a extensão dos graves, isto é, a resposta em frequência cai consideravelmente conforme se entra na região dos subgraves (<50 Hz). A resposta do alto-falante numa caixa deste tipo está 180 graus fora de fase acima da ressonância com a resposta abaixo da ressonância. Vale ressaltar que a frequência de ressonância é um fator determinante, o que nada mais é que a frequência em que ocorre o ganho máximo do conjunto acústico (VIANA, 2016).

No entanto, abaixo da ressonância o nível sonoro é tão baixo que existe pouco efeito audível, daí que neste tipo de caixa de som só se considera a resposta de um transdutor acima da ressonância. Quanto maior for a força do ímã mais rapidamente se dá esta mudança de fase, daí que ímãs mais fortes representam melhores transientes mas pior extensão do grave.

A caixa acústica dutada, conhecida como refletora de graves, também é selada em toda sua extensão com exceção de um duto, ressaltado na Figura 16. Este duto, nada mais é que um tubo de diâmetro e comprimento projetados para ressonar em uma frequência desejada, normalmente onde o alto-falante tem mais deficiência de resposta. O projeto é mais complexo por envolver outras variáveis além do volume da caixa, e necessita de um estudo de compromisso entre resposta em frequência e tempo de resposta.

Figura 16 – Caixa dutada



Fonte: <http://blog.lojaedifier.com.br/o-que-e-uma-caixa-de-som/>

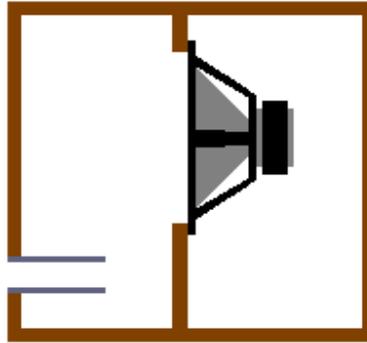
Um fator prático a ser considerado é a velocidade do ar no duto, que se for muito alta pode “soprar” e causar ruídos indesejados. Este tipo de caixa de som tem grande versatilidade, pois pode ter seu comportamento drasticamente alterado por uma simples alteração do comprimento do duto.

Acusticamente, ela tem um reforço de amplitude na região de ressonância do duto de 3dB, e pode ser projetada para que fique plana e capaz de responder com força na região dos subgraves. Porém, sua desvantagem está no alto tempo de resposta e a sua variação em frequência, podendo ficar com valores de até 20-30ms de diferença entre 20 Hz e 80 Hz. Isso significa que uma batida de um tambor pode ter o impacto inicial no tempo da música, e o subgrave demora a responder, ficando um som embolado e atrasado. Se bem projetada, a caixa oferece um compromisso adequado em tempo de resposta, resposta em frequência e um grave forte e contínuo (VIANA, 2016).

As caixas passa-banda, são caracterizadas por reproduzir somente uma faixa de frequência. Seu projeto é muito complicado e difícil de acertar, e seu comportamento

assemelha-se a uma caixa de som dutada. Dependendo da configuração de dutos, são chamadas de 4ª ou 6ª ordem, como mostra a Figura 17.

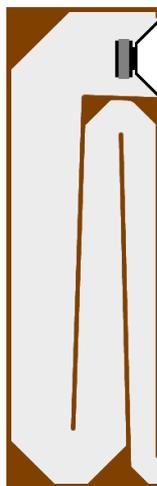
Figura 17 – Caixa passa-banda



Fonte: <http://blog.lojaedifier.com.br/o-que-e-uma-caixa-de-som/>

Por fim, a caixa do tipo linha de transmissão é bem diferente das anteriores. Pouco se parece com uma caixa de som convencional pois na verdade não é selada e nem tem dutos, mas sim se assemelha a um grande corredor na traseira do alto-falante, cuja área é equivalente à do cone aberto na outra extremidade, como mostra a Figura 18. Possui um projeto refinado e alia o baixo tempo de resposta de uma caixa selada com a extensão de resposta de uma caixa de som dutada. Entretanto, seu uso é restrito devido a suas grandes dimensões (VIANA, 2016).

Figura 18 – Caixa linha de transmissão



Fonte: <http://blog.lojaedifier.com.br/o-que-e-uma-caixa-de-som/>

## 2.7 REVERBERAÇÃO

Todo tipo de onda sofre deformação e a onda sonora não é uma exceção. Porém uma onda sonora não pode ser polarizada, por ser uma onda longitudinal, e não transversal. O que ocasiona a reverberação é a reflexão do som, e a ocorrência desses fenômenos se dá pela percepção humana dos fatos. Estes fenômenos sonoros ocorrem por que o ouvido humano só consegue captar e processar sons que são produzidos em um intervalo maior que 100ms. Se o obstáculo que refletir o som estiver muito próximo, o som produzido e o refletido chegam ao ouvido ao mesmo tempo, o ouvinte então perceberá um som mais forte, pois o som emitido foi reforçado pelo refletido.

Quando o obstáculo está um pouco mais afastado, de modo que o som emitido e o som refletido têm um intervalo de tempo menor que 100ms ocorre o fenômeno da reverberação. Nesse caso ao receber dois estímulos do mesmo tipo em menos de 100ms o ouvinte tem a sensação que o som ainda não foi extinguido. Fenômenos deste tipo são importantes em auditórios, para que o ouvinte sintase mais seguro do que ouviu. (Carvalho,2007)

### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

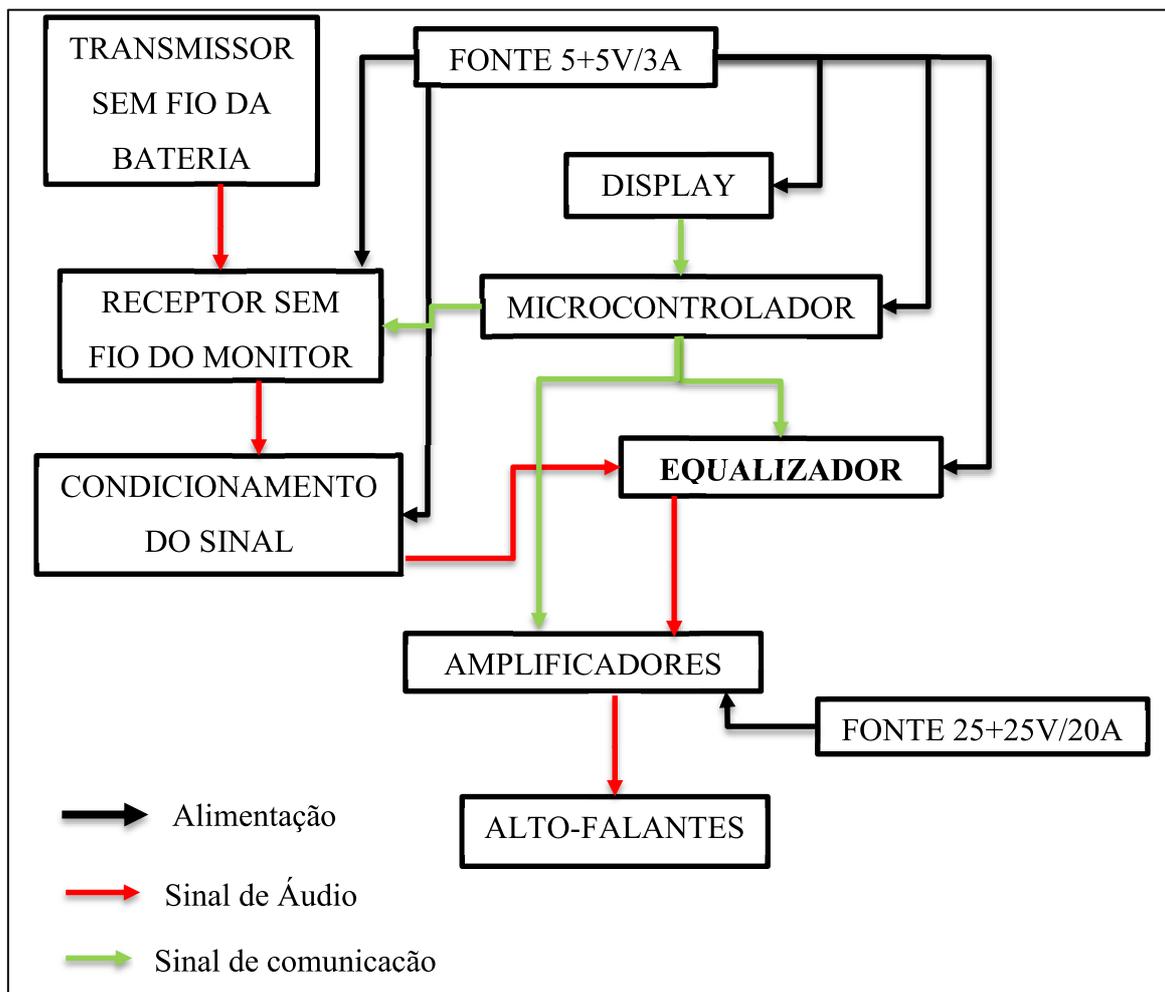
A idéia é que o protótipo do monitor de áudio tenha um *layout* simples e apenas o display para controle e uma chave liga/desliga apareçam, além dos alto-falantes. Todos os circuitos estão inseridos dentro da caixa, separados da parte acústica porém ocultos do exterior.

Para tornar a abordagem de todas as partes do projeto mais detalhada, este é dividido em termos de *hardware*, *firmware*, e componentes que deverão ser utilizados. Esses tópicos serão apresentados nas seções a seguir.

#### 3.1 HARDWARE

O diagrama de blocos que se observa na Figura 19 apresenta uma visão geral das partes que compõem o *hardware* do projeto. Na sequência, cada bloco será descrito com mais detalhes.

Figura 19 – Diagrama do *hardware* do projeto



Fonte: Próprio Autor.

Após o baterista ligar o protótipo, o sinal de áudio oriundo do instrumento é transmitido sem fio em VHF para o receptor, que insere o sinal em um circuito de condicionamento para posteriormente ser filtrado e amplificado. O display *touchscreen* é responsável por atuar ligando e desligando o receptor, bem como os circuitos de amplificação e de reverberação. Além disso, o equalizador também é controlado pelo display, e nele é possível dar ganho ou atenuação nas faixas pré-estabelecidas.

### 3.1.1 Transmissor e receptor sem fio

O dispositivo transmissor é responsável por fazer com que o sinal de áudio gerado pelo instrumento chegue ao dispositivo receptor. Assim, o receptor pode entrega-lo ao circuito de condicionamento, sem atraso e com definição suficiente para ser processado analogicamente. O transmissor e o receptor escolhidos são os VAM V-109 apresentados na Figura 20. Estes operam em VHF dentro da faixa de frequência de 200 a 271Mhz, com capacidade de alcance de até 60 metros e resposta em frequência de 60 a 18kHz, a qual é suficiente para a utilização no projeto.

Figura 20 – Transmissor e receptor VHF



Fonte: Próprio Autor

Tanto o transmissor quanto o receptor são originalmente alimentados por baterias. No caso do transmissor, que é conectado ao instrumento e está longe do protótipo, essa alimentação foi mantida. Contudo, tendo em vista que o receptor está localizado no próprio monitor, este é

alimentado pela fonte do protótipo. A Figura 21 mostra onde está localizado o transmissor e receptor de áudio.

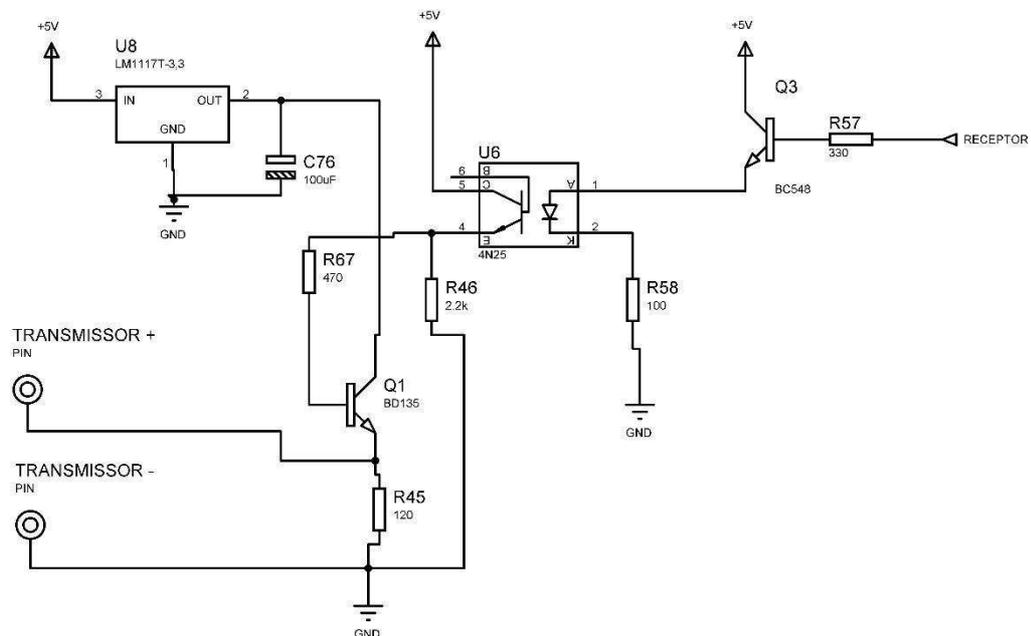
Figura 21 – Bateria transmitindo e monitor recebendo



Fonte: Próprio Autor

Para que o módulo receptor seja alimentado por comandos do *display*, foi criado um circuito que o aciona a partir do microcontrolador, transistores e optoacopladores, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Condicionamento do receptor



Fonte: Próprio Autor

Tendo em vista que o microcontrolador suporta apenas 80mA em cada uma de suas portas e que o optoacoplador 4N25 necessita de até 60mA para o acionamento do seu LED interno, o

transistor BC548 foi inserido na entrada do optoacoplador. Assim, apenas 10mA são drenados na saída do microcontrolador para o chaveamento do transistor, e o transistor limita a corrente injetada no LED interno do optoacoplador em 50mA.

O transistor interno do 4N25 é polarizado e aciona o transistor de potência BD135, o qual tem função de conduzir até 1,5A do regulador de tensão LM1177(3,3V) para alimentar o receptor. Nas equações 6 e 7 temos os valores de corrente de polarização dos transistores próximos aos indicados pelos *datasheets* dos componentes.

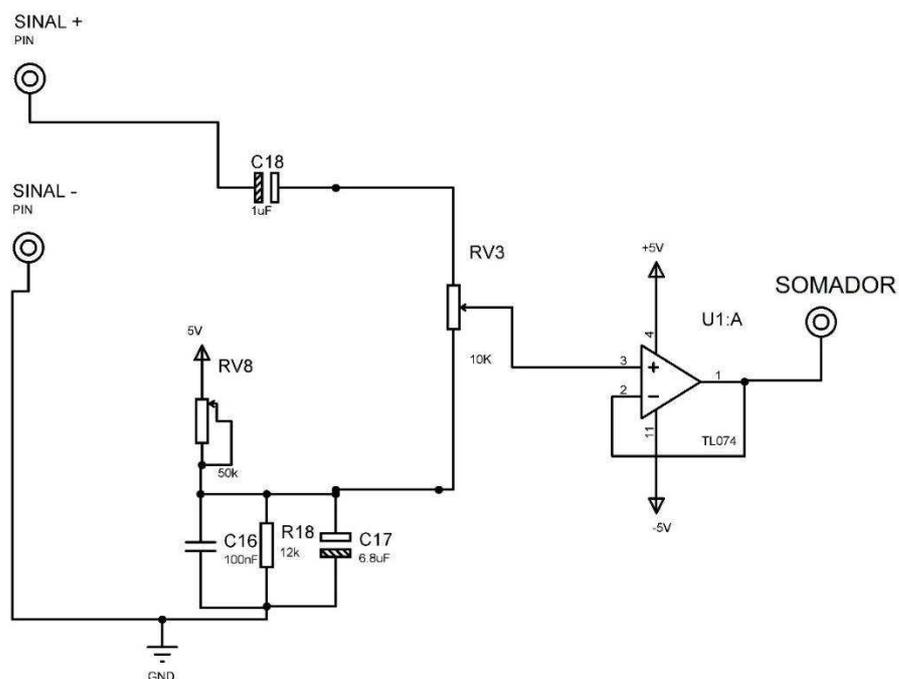
$$I_b \text{ BC548} = \frac{3,3-0,8}{330} = 7,5\text{mA} \quad (6)$$

$$I_b \text{ BD135} = \frac{5-0,8}{470} = 8,9\text{mA} \quad (7)$$

### 3.1.2 Condicionamento do Sinal

O circuito de condicionamento do sinal do receptor VHF é conectado a um amplificador operacional na configuração de *buffer*, com um nível DC adicionado, para que os potenciômetros digitais tenham o nível que necessitam para funcionar, no caso 0 a 5V, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Circuito de condicionamento do sinal



Fonte: Próprio Autor.

Como o sinal de áudio varia entre valores negativos e positivos de tensão, este não pode ser inserido de maneira direta no potenciômetro digital. Por isso, um *offset* foi adicionado ao sinal de entrada, deslocando a referência do sinal e adequando a faixa de excursão com a faixa de trabalho linear do potenciômetro. O circuito da Figura 23 mostra como foi realizado o deslocamento no ponto de trabalho mencionado. Através da equação 8, sabe-se que o capacitor de  $6.8\mu\text{F}$  gera uma frequência de corte de 2 Hz para o circuito, o que proporciona a passagem das altas frequências. Portanto, todo potenciômetro que for conectado ao terra virtual vai receber o *offset* sem perder a referência necessária para o funcionamento do filtro.

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad (8)$$

A equação 9 mostra que o valor do capacitor é suficiente para permitir a passagem das frequências altas, por apresentar a impedância em 20Hz 10% menor que o divisor de tensão.

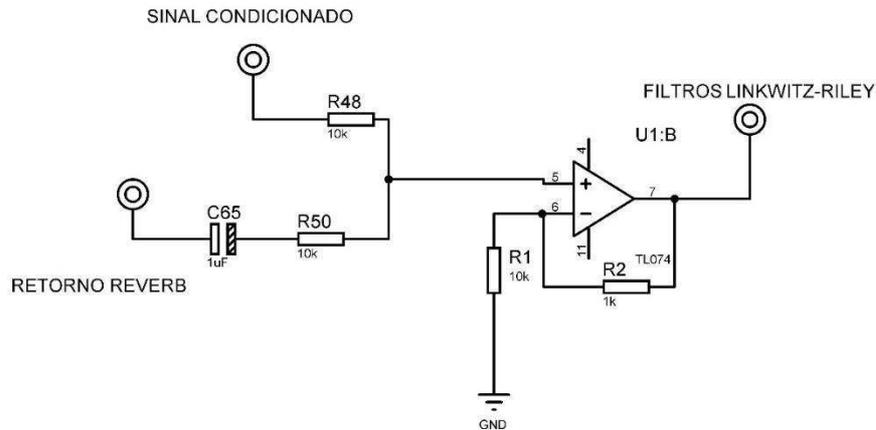
$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 6,8\mu\text{F} \cdot 20} = 1170\Omega \quad (9)$$

Para que o terra virtual mostrado na Figura 23 chegue nos destinos necessários sem ruído, foi adicionado ao circuito um capacitor de 100nF. A equação 10 mostra como o valor deste componente está apropriado para a função, pois apresenta uma impedância muito pequena para as frequências acima de 20kHz se comparado com o divisor de tensão.

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 100\text{n} \cdot 20\text{k}} = 79\Omega \quad (10)$$

Com o objetivo de unir os circuitos de condicionamento e do efeito de reverberação foi adicionado ao circuito um amplificador operacional na configuração de somador. Este tem a função de atenuar o sinal, para que os níveis de ruído não sejam acrescidos, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Circuito Somador



Fonte: Próprio Autor.

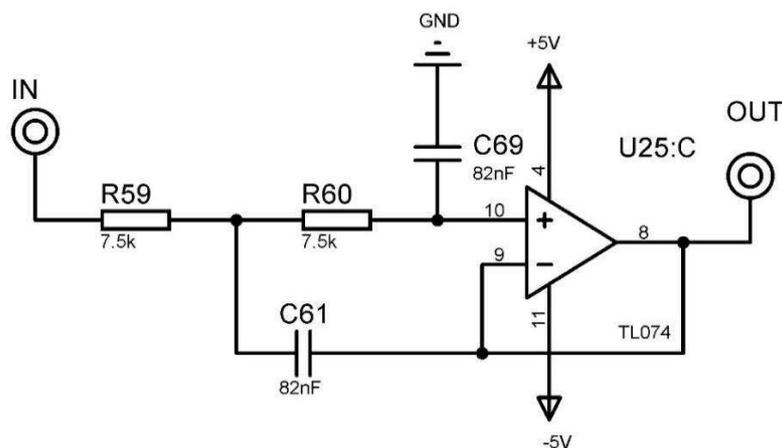
O circuito somador é definido pela equação 11.

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(\frac{V_1}{\frac{R_48}{1}} + \frac{V_2}{\frac{R_50}{1}}\right) \quad (11)$$

Após a adequação de tensão e soma dos sinais, chega-se ao próximo estágio, os filtros ativos. Estes fazem a pré-filtragem do sinal, dividindo-o em três bandas: grave, médio e agudo. Neste estágio, são utilizados filtros Linkwitz-Riley de 2ª ordem, como mostram as Figuras 25, 26 e 27. A equação 12 define o corte de frequência destes filtros.

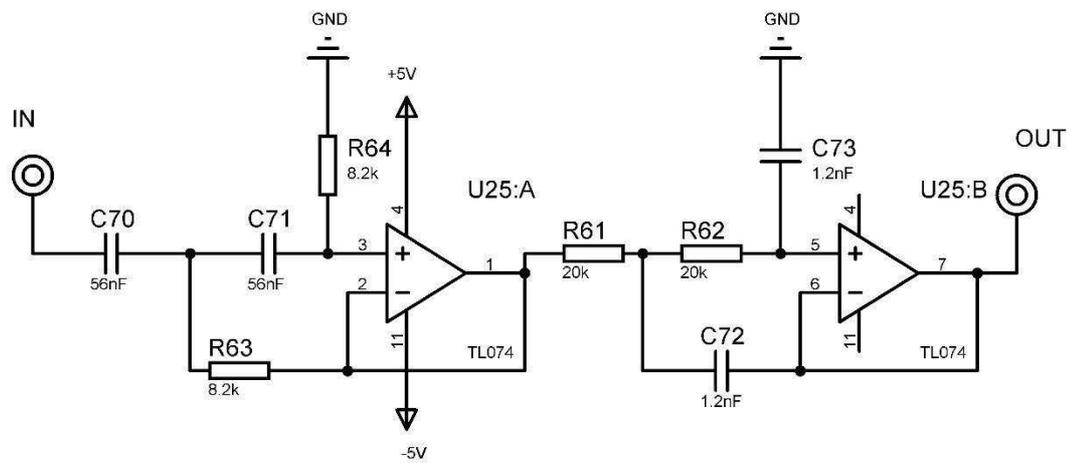
$$F_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad (12)$$

Figura 25 – Filtro Linkwitz-Riley Passa-baixas



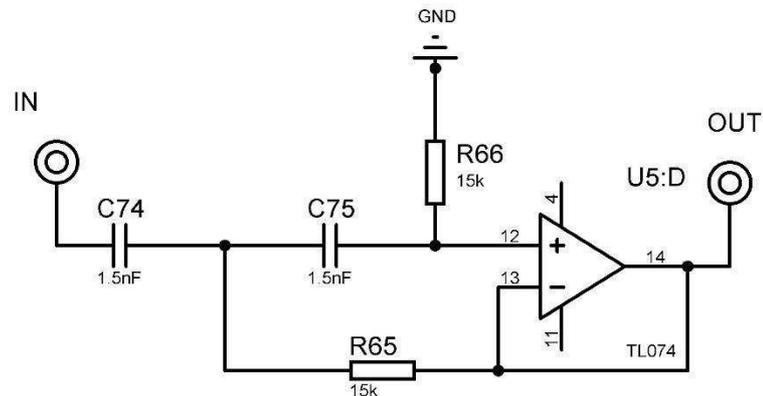
Fonte: Próprio Autor.

Figura 26 – Filtro Linkwitz-Riley Passa-banda



Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Filtro Linkwitz-Riley Passa-altas



Fonte: Próprio Autor.

Os valores dos componentes definidos a partir da equação de cada filtro são mostrados abaixo na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores dos filtros Linkwitz-Riley

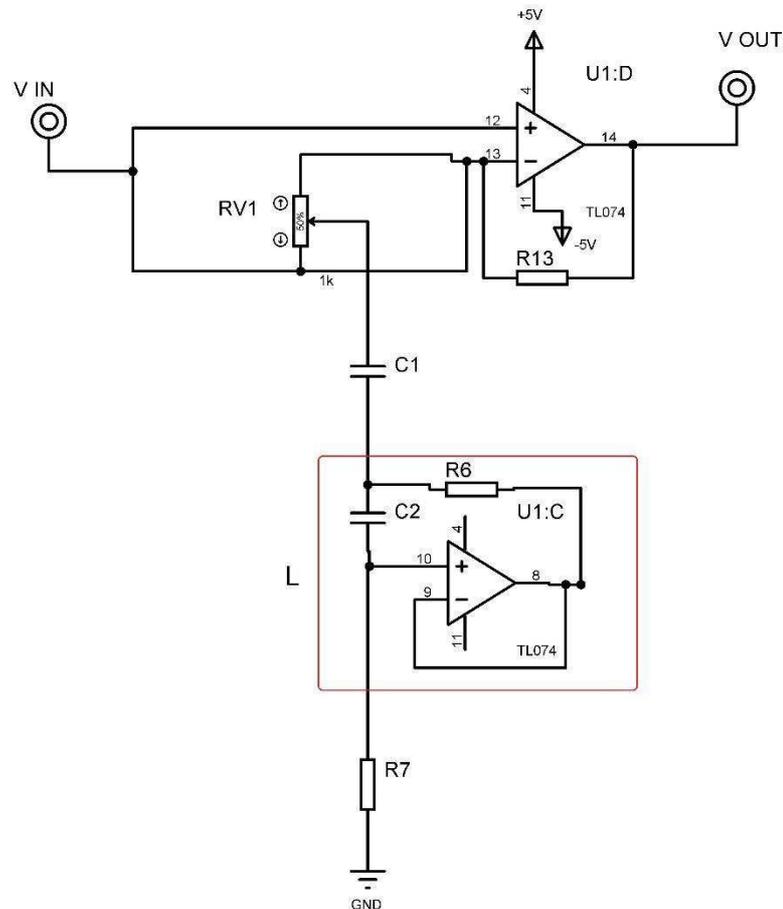
Filtro	Passa baixas	Passa altas	Passa baixas	Passa altas
Alto-falante	Grave	Médios	Médios	Agudos
Frequência de corte	250hz	300hz	6.5khz	7khz
Resistor	7.5k	8.2k	20k	15k
Capacitor	82nF	56nF	1.2nF	1.5nF

Fonte: Próprio Autor.

### 3.1.3 Equalizador

O equalizador projetado é do tipo gráfico, baseado em filtros ativos analógicos, nos quais são utilizados circuitos RLC passivos de 12db/oitava na ressonância da frequência desejada. Os circuitos RLC passivos são amplamente utilizados em equipamentos de áudio, os quais são conectados a um amplificador operacional que irá fazer a diferenciação do sinal quando for selecionado ganho ou atenuação, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Um dos 6 canais do circuito Equalizador



Fonte: Próprio Autor

O potenciômetro RV1 pode controlar o grau de ganho ou corte da frequência ressonante definida pelo filtro em série de C1, “L” e R7, variando as proporções relativas de feedback negativo e a entrada do sinal do amplificador operacional.

O “L” se dá através de um circuito no qual um amplificador operacional está simulando o componente XL de um indutor, porém com a vantagem de conseguir valores muito maiores do que os padrões existentes encontrados em um indutor físico, e sem as desvantagens da

resistência do seu enrolamento e também do tamanho normalmente grande, o qual inviabilizaria o projeto. A seguir tem-se os parâmetros que determinam os componentes do circuito da Figura 28.

A equação 13 mostra a atenuação quando o potenciômetro estiver no mínimo.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R7}{RV1+R7} \quad (13)$$

A equação 14 mostra o ganho quando o potenciômetro estiver no máximo.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{RV1+R7}{R7} \quad (14)$$

A equação 15 mostra como é calculado o valor para o indutor simulado “L”, onde Q é o fator de qualidade e a fo é quem determina a frequência central em que este filtro ressonará, e consequentemente o corte ou ganho de frequência. (GILES,1980)

$$L = \frac{QR6}{2\pi fo} \quad (15)$$

Nesta equação é recomendado utilizar o fator de qualidade 1,414 quando o equalizador for menor que 10 bandas e se maior, utilizar 1,7 mantendo assim o melhor cruzamento entre as faixas de áudio.

Para a definição dos capacitores foram utilizadas as fórmulas a seguir:

$$C1 = \frac{L}{(R7-R6)R6} \quad (16)$$

$$C2 = \frac{1}{2\pi foL} \quad (17)$$

Os componentes de cada um dos 6 filtros do equalizador é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores dos filtros do Equalizador

	Slider1	Slider2	Slider3	Slider4	Slider5	Slider6
Frequência central	80	160	1,6kHz	4,5kHz	8kHz	16kHz
R6	1K	1K	510	510	510	510
R7	100K	100K	68K	56K	68K	51K
Q	1.414	1.414	1.414	1.414	1.414	1.414
C1	1uF	560nF	150nF	47nF	22nF	12nF
C2	33nF	18nF	2.2nF	1nF	560pF	330pF

Fonte: Próprio Autor

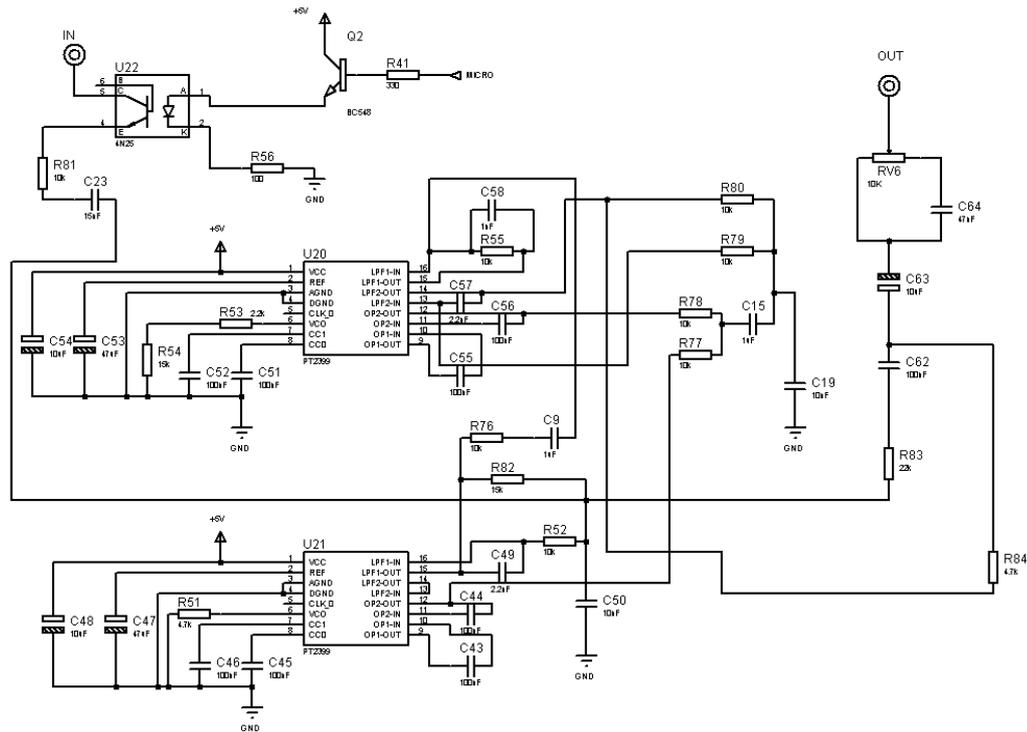
### 3.1.4 Circuito de Reverberação

O circuito de reverberação é baseado no circuito integrado PT2399, o qual é um processador de áudio de eco, equipado com conversor analógico-digital e digital-analógico de alta frequência de amostragem. O PT2399 também possui uma memória interna de processamento digital de 44Kb que é utilizada para gerar o tempo de atraso (*delay*), e um circuito oscilador controlado por tensão interno no relógio do sistema, tornando a frequência facilmente ajustável.

O PT2399 possui distorção muito baixa (THD <0,5%) e ruído muito baixo (<<90dBV), o que garante uma saída de áudio de alta qualidade. O circuito utilizado no projeto une dois CI's na configuração *delay*, a qual é possível a partir de ajustes nos valores e na disposição dos componentes. Assim, tem-se um deles com tempo rápido (81mS) somado a outro com tempo lento (228mS), e o resultado gerado quando somado ao sinal de entrada, forma o efeito de reverberação, os componentes utilizados foram de acordo com *datasheet* do circuito integrado. O circuito utilizado é mostrado na Figura 29.

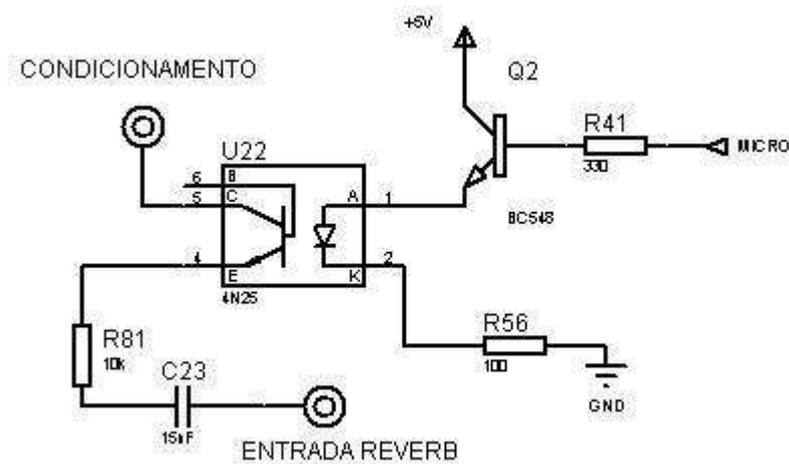
Na figura 30, é mostrado o circuito necessário para ativar o efeito de reverberação. Quando o baterista selecionar a opção no display, o sinal do microcontrolador envia um nível lógico alto ou nível lógico baixo para o transistor BC548, este aciona o LED do optoacoplador e permite a passagem do sinal de condicionamento para a entrada do circuito de reverberação.

Figura 29 – Circuito de Reverberação



Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – Acionamento Reverberação



Fonte: Próprio Autor

A equação 18 mostra a corrente definida para o acionamento do circuito de reverberação.

$$I_b \text{ BC548} = \frac{3,3 - 0,8}{330} = 7,5 \text{mA} \tag{18}$$

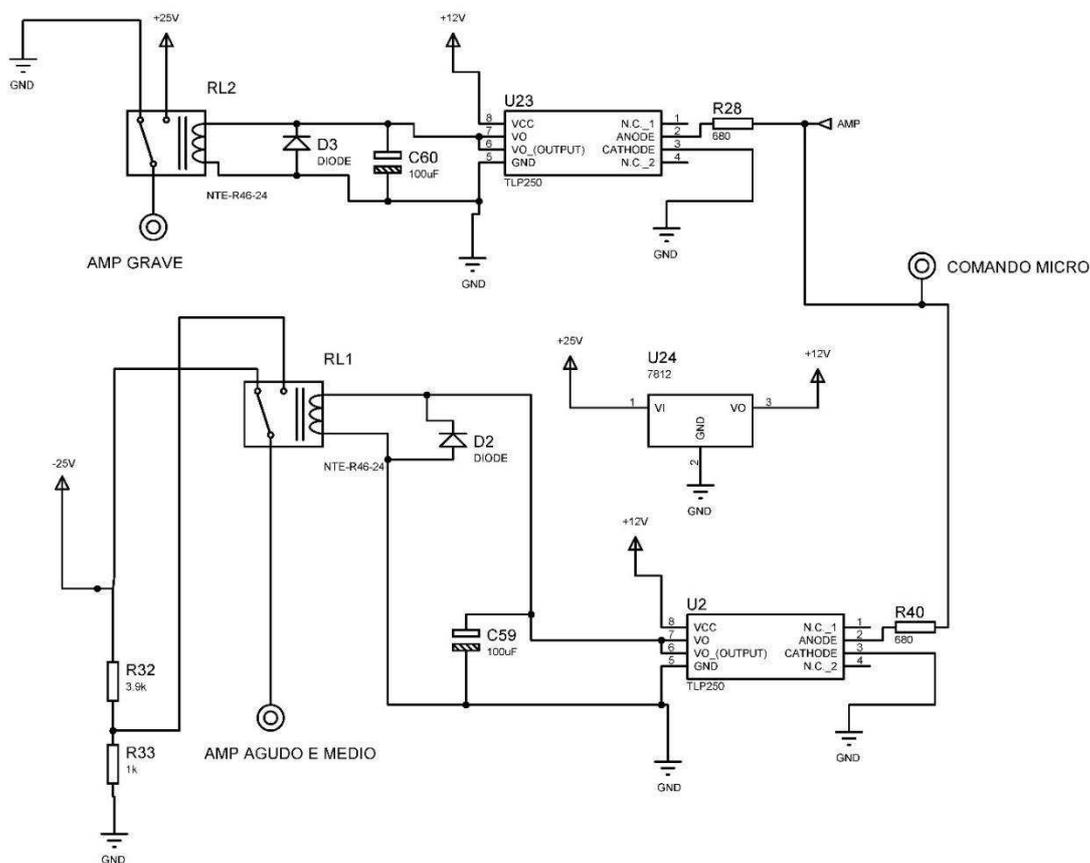
### 3.1.5 Amplificador

Este projeto preza pela qualidade do áudio gerado. Por isso, os amplificadores escolhidos foram os da família TDA. Estes são circuitos integrados de alto rendimento, eficiência de 60% e classe AB, portanto, são capazes de suprir as demandas do projeto.

Definidos para o projeto pelo nível de potência, o TDA2052 consegue atingir uma potência de 60 Watts a 8 ohms. Assim, este foi destinado ao tweeter que é responsável por reproduzir as altas frequências e também ao alto-falante de médias frequências. Enquanto isso, o TDA7294 é capaz de gerar 150 Watts a 8 ohms ligado em ponte, e por isso é responsável por tocar o alto-falante dos graves.

Para que os circuitos de amplificação pudessem ser ligados e desligados pelo microcontrolador, fez-se necessária a adição de um circuito auxiliar, que é apresentado na Figura 31. Neste circuito, o optoacoplador TLP250 é conectado ao microcontrolador, e por meio dele os relés são acionados, os quais então, injetam o nível de tensão necessário no pino de ativação dos CI's para que os amplificadores entrem em operação.

Figura 31 – Circuito de ativação dos Amplificadores



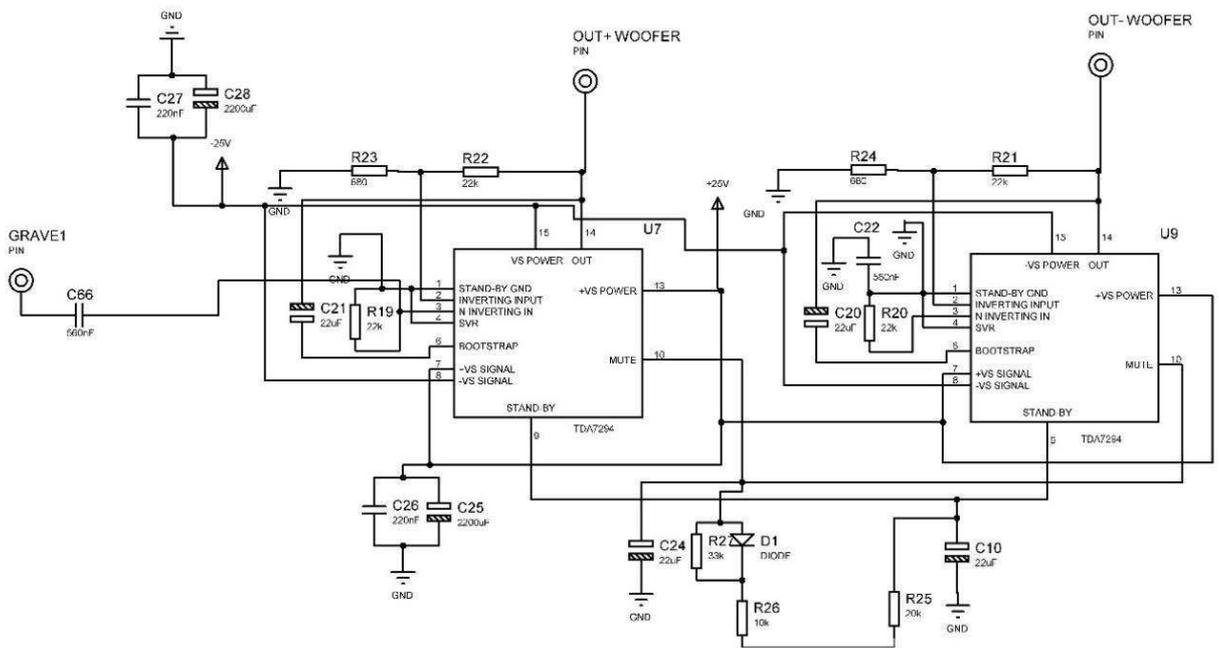
Fonte: Próprio Autor

$$I_{LED} = \frac{3,3}{680} = 4,8mA \quad (19)$$

Através da equação 19, tem-se que o optoacoplador necessita de uma corrente de 5 mA para ativar o LED interno. Já em relação ao nível de tensão necessário para ativar os amplificadores, sabe-se que o amplificador de graves necessita de 25V para entrar em operação, enquanto que o amplificador de médios e agudos utiliza tensões de -25V para desativar e -20V para ativar.

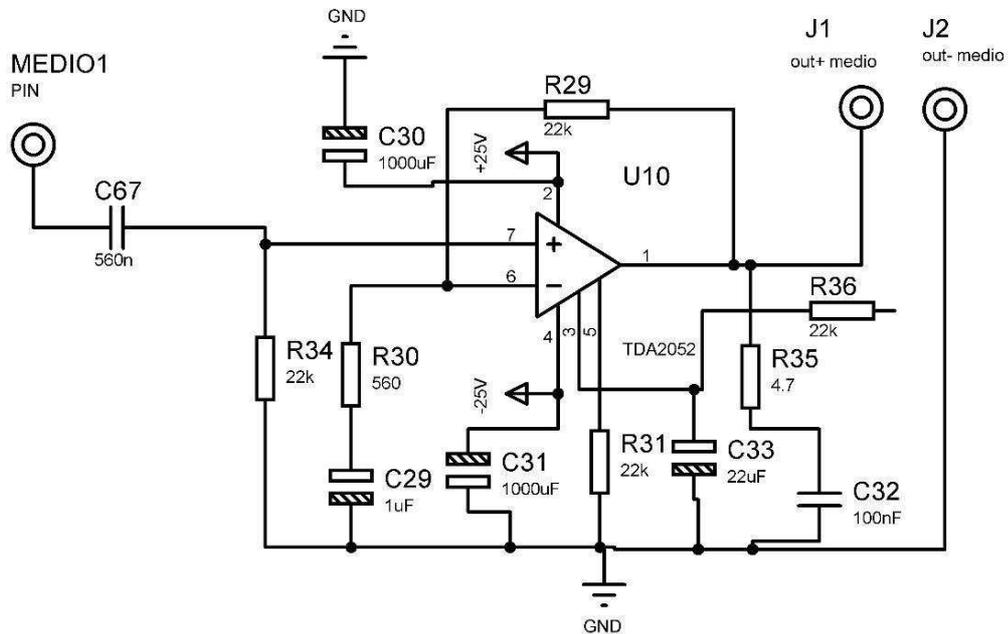
Todos os circuitos utilizados nos amplificadores e os valores dos componentes são indicados nos seus datasheets e podem ser vistos nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Amplificador de Graves



Fonte: Próprio Autor

Figura 33 – Amplificador de Médios e Agudos



Fonte: Próprio Autor

### 3.1.6 Alto-falantes

Os alto-falantes a serem utilizados foram definidos de acordo com a necessidade de cada faixa de frequência. As altas frequências se propagam com mais facilidade, assim como nas médias frequências. Apenas, nos sons mais graves é que a condição de propagação é dificultosa, isto, devido ao seu comprimento de onda que é maior que as faixas anteriormente citadas.

Sendo assim, as potências foram definidas da seguinte forma: o dispositivo responsável pelo grave terá potência de 80 Watts RMS, o responsável pelos médios, terá potência de 20 Watts RMS, e o *tweeter*, responsável pelas frequências altas, terá 45 Watts RMS.

O alto-falante escolhido para as frequências graves foi o ARLEN 12/102, representado na Figura 34. Ele possui 12 polegadas de diâmetro, 8 ohms de impedância, cone seco, e bobina simples.

O tipo de cone do alto-falante foi definido especificamente para este projeto, pois como se trata da bateria eletrônica que é um instrumento que produz sons rápidos e com muita energia, o dispositivo atende a necessidade de reproduzir com perfeição este som.

Figura 34 – ARLEN 12/102



Fonte: Próprio Autor

O alto-falante escolhido para as frequências médias é o HINOR 6HBF1160DI mostrado na Figura 35, com 20 Watts RMS, 8ohms de impedância, 6 polegadas de diâmetro, cone seco, e bobina simples. Este dispositivo tem características muito importantes para este projeto, pois cobre uma faixa grande de frequência com perfeição, onde é necessário se fazer nítido e preciso a reprodução desta faixa, para que o som não gere um efeito “abafado”.

Figura 35 – HINOR 6HBF1160DI



Fonte: Próprio Autor

O *tweeter* que será destinado as frequências altas, será o ETM ET2-51 como mostrado na Figura 36, com 2 polegadas de diâmetro, possui 45 Watts RMS, e 8 ohms de impedância. O que faz com que o som emitido seja extremamente nítido e preciso, frequências altas tornam o som melhor compreendido e também é nas altas frequências que os timbres e detalhes estão presentes.

Figura 36 – ETM ET2-51

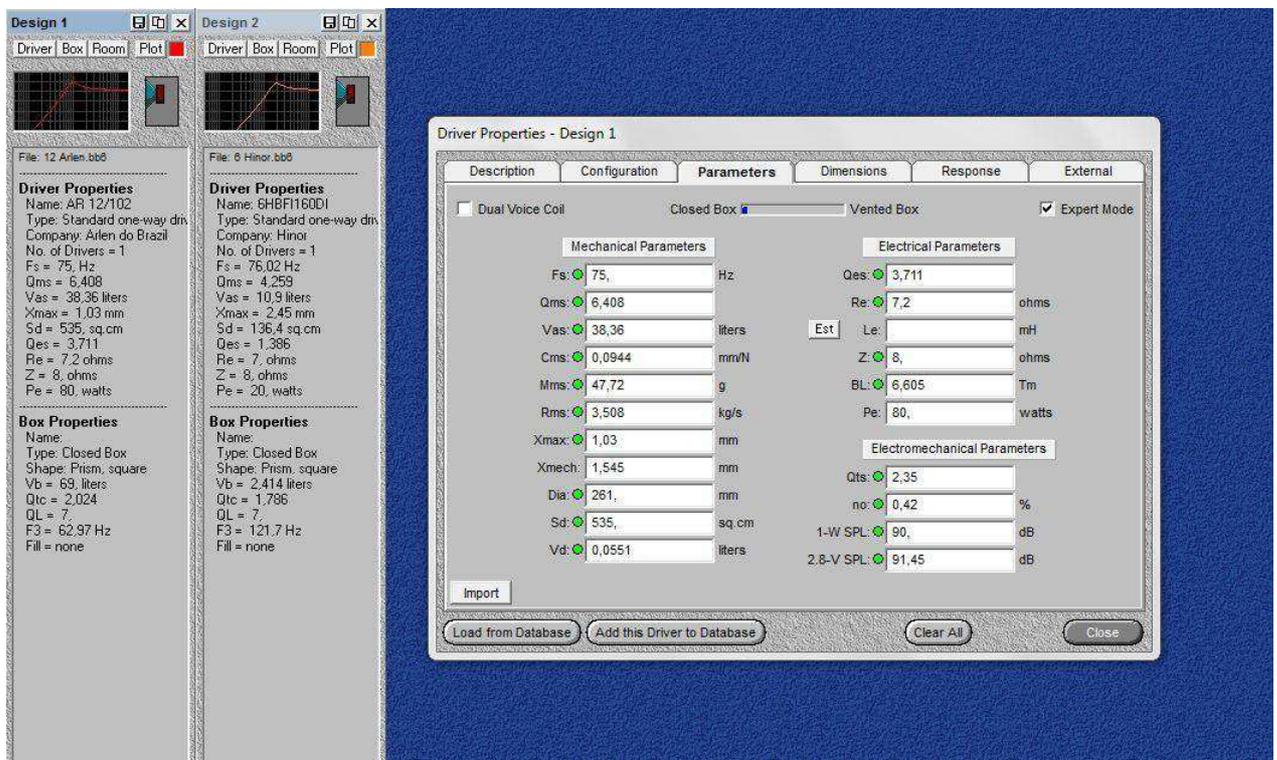


Fonte: Próprio Autor

### 3.1.7 Caixa Acústica

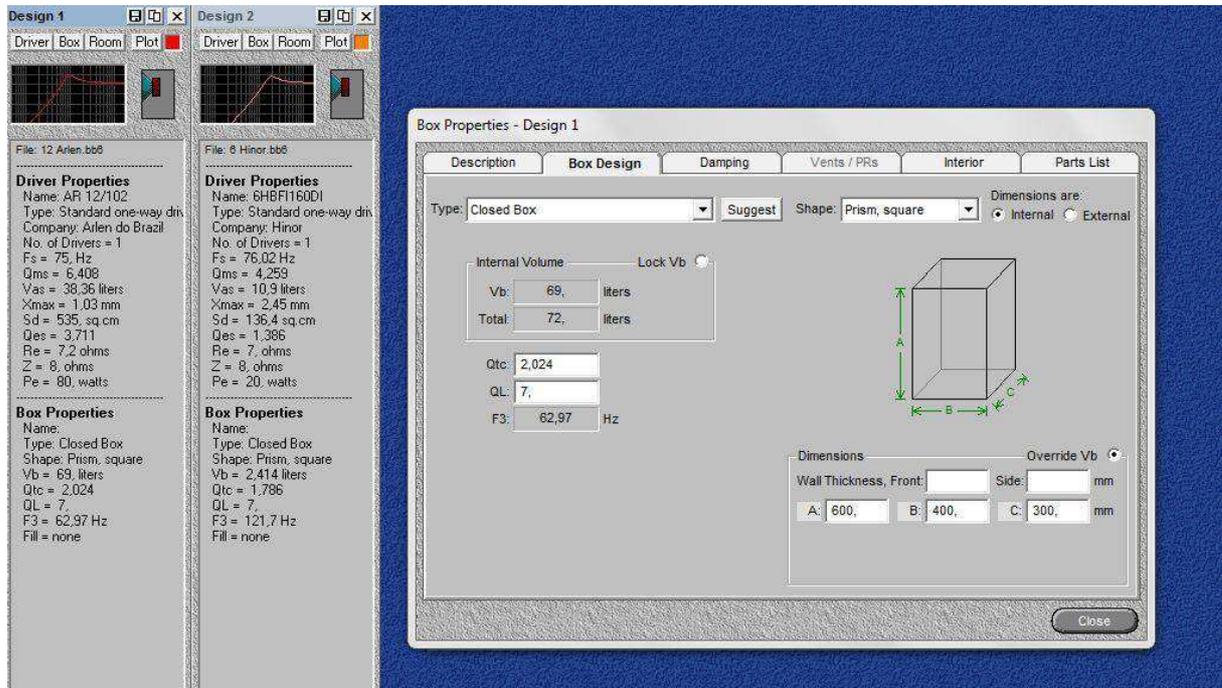
A caixa acústica foi desenvolvida a partir do software de projeto de caixas, no qual deve-se inserir os parâmetros do alto-falante e após isso, o software já indica qual deve ser o tipo de caixa acústica a ser projetada bem como delimitação de tamanho e para qual frequência de ressonância será a utilização. O ideal é que a ressonância do alto-falante fique sempre abaixo da frequência de utilização da caixa.

Figura 37 – Software e parâmetros do alto falante



Fonte: Próprio Autor.

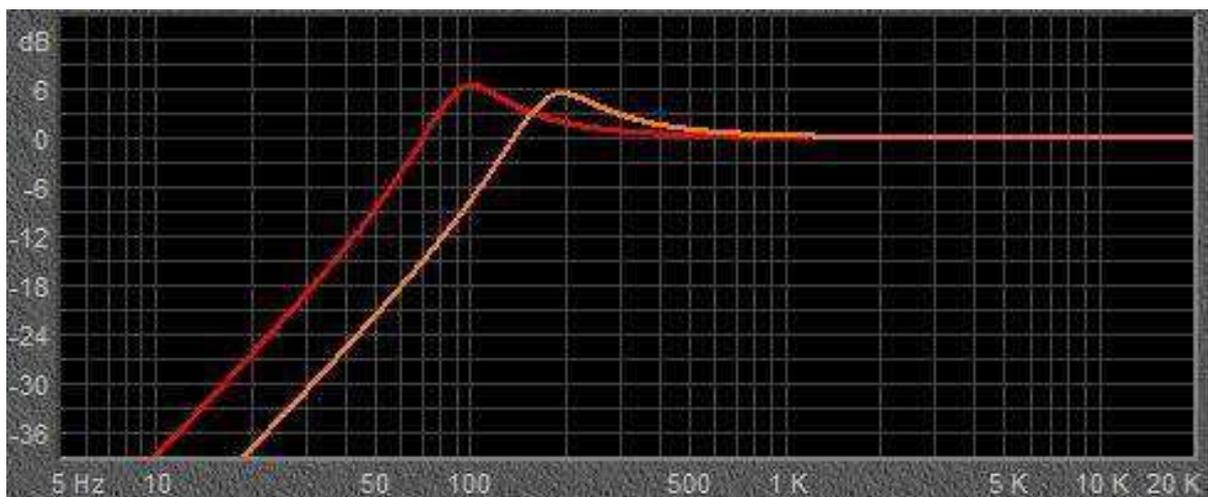
Figura 38 – Software definição da caixa



Fonte: Próprio Autor.

As Figuras 37 e 38 mostram como funciona a interface do software. Após definidas as medidas e tipo de caixa, é possível plotar o gráfico de resposta acústica da mesma, tal como mostra a Figura 39.

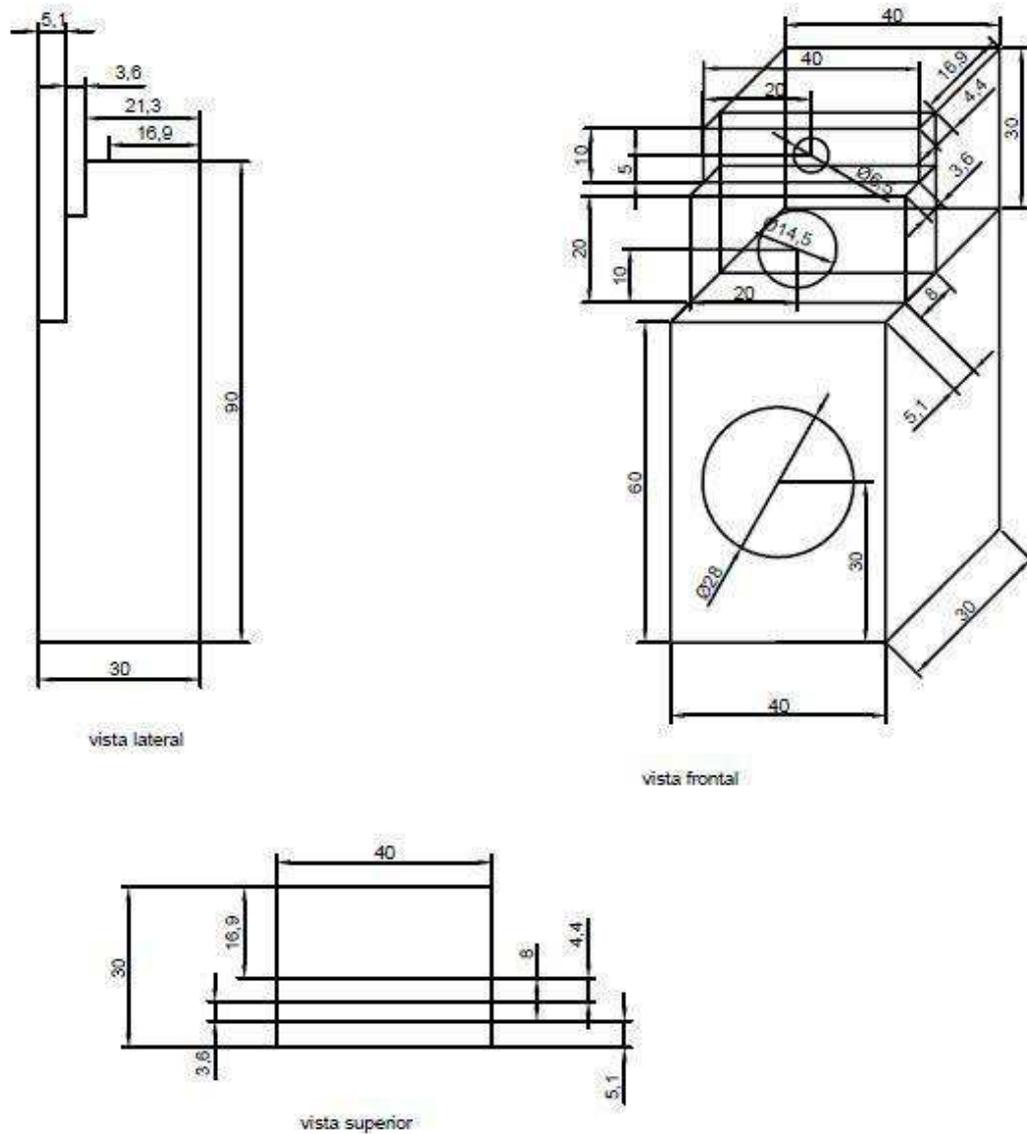
Figura 39 – Software resposta esperada das caixas



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com as dimensões obtidas no software de projeto de caixas e o projeto da caixa foi realizado no software de desenho, como mostra a Figura 40. A partir deste, a caixa foi confeccionada.

Figura 40 – Projeto da caixa acústica



Fonte: Próprio Autor.

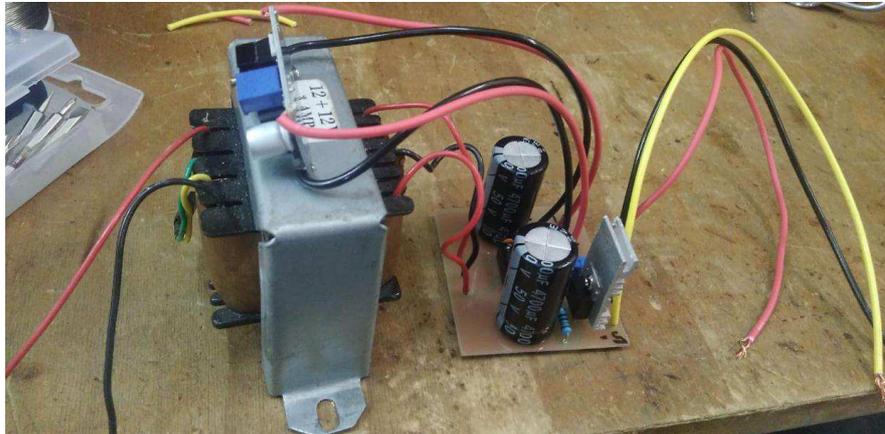
O alto-falante de médios e o tweeter foram recuados para que o sinal de áudio de todos os alto-falantes saia em fase. Assim, os três transdutores geram o sinal a partir do mesmo ponto, e tem-se o ajuste de fase acústico.

### 3.1.8 Fontes de alimentação

Para que se tenha uma estabilidade de tensão nos circuitos de sinais menores e no microcontrolador, e também seja garantida potência para os amplificadores, os quais são os maiores consumidores de energia deste projeto, foram utilizadas duas fontes distintas.

A fonte 1 é uma fonte linear com capacidade de até 3A, e tensão de saída de 5+5Vdc. A tensão positiva desta fonte é gerada por um conversor DC-DC *buck* que possui o CI LM2596, o qual reduz a tensão de 12V para 5V. Já a fonte negativa é gerada a partir do CI LM337. A fonte 1 é mostrada na Figura 41.

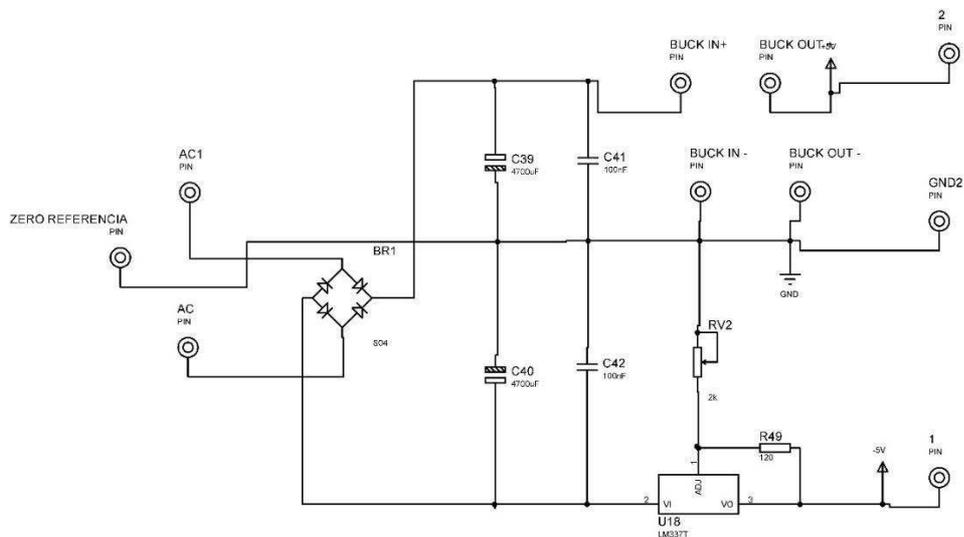
Figura 41 – Fonte linear e conversor DC-DC



Fonte: Próprio Autor.

O circuito de retificação e regulação é apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Circuito da fonte linear



Fonte: Próprio Autor.

O cálculo do *ripple* da fonte é expressado na equação 19.

$$V_{\text{Ripple}} = \frac{V_p}{f.C.R} \quad (20)$$

A fonte 2 é composta por duas fontes chaveadas ligadas em série, formando 25+25Vdc, com capacidade de 500 Watts. Estas possuem sistema de ventilação por demanda e proteção contra curto circuito e sobrecarga, as quais suprem totalmente a necessidade do projeto. A Figura 43 mostra uma destas fontes.

Figura 43 – Fonte Chaveada



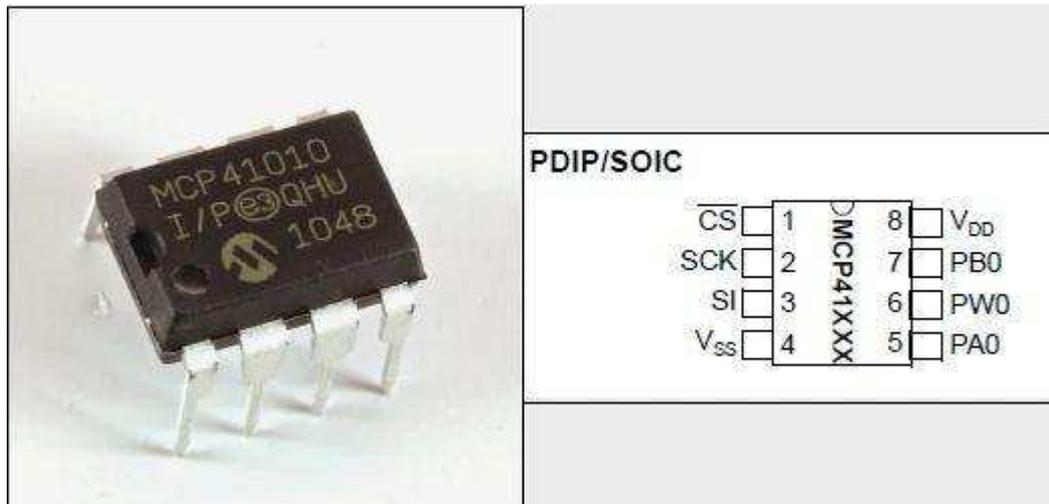
Fonte: Próprio Autor.

### 3.1.9 Potenciômetro Digital

Para que seja possível os ajustes de ganho e atenuação das faixas do equalizador via *touchscreen*, foram implementados potenciômetros digitais. Estes dispositivos se comunicam com o display via microcontrolador por comunicação SPI.

Os potenciômetros digitais utilizados são os MCP41010, que possuem 256 níveis, comunicação SPI e tensão de trabalho de até 5V. De acordo com a posição do *slider* no *touchscreen*, os potenciômetros atuam no respectivo filtro, atenuando ou adicionando ganho. A Figura 44 mostra o MCP41010.

Figura 44 – Potenciômetro Digital



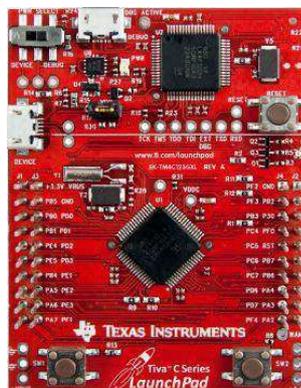
Fonte: <https://www.electroschematics.com/learn-use-digital-potentiometers/>

### 3.1.10 Microcontrolador e Display

O microcontrolador escolhido foi o TM4C123 presente na EK-TM4C123GXL LaunchPad, apresentado na Figura 46. Ele possui um processador ARM® Cortex M4 de 32 bits e 80 MHz, 256 kB de memória Flash, 32 kB de memória RAM e 2 kB de memória EEPROM, além de dois conversores A/D de 12 bits, doze temporizadores de 16/32 ou 32/64 bits, módulo PWM, e comunicações seriais UART, SPI e I2C.

A princípio, os módulos que são utilizados são SPI, que se comunica com os potenciômetros digitais do equalizador, e também a comunicação UART que faz a comunicação entre o microcontrolador e o display *touchscreen*.

Figura 45 - Tiva™ EK-TM4C123GXL Launchpad



Fonte: Próprio Autor

O display escolhido será o Nextion Enhanced NX4827K043 - 4.3" HMI mostrado na Figura 46, com memória flash de 32MB, memória EEPROM de 1024 bytes, memória RAM de 8192 bytes, buffer de instrução de 1024 bytes, 65536 cores e resolução de 480x272 pixels.

Figura 46 – NEXTION NX4827K043



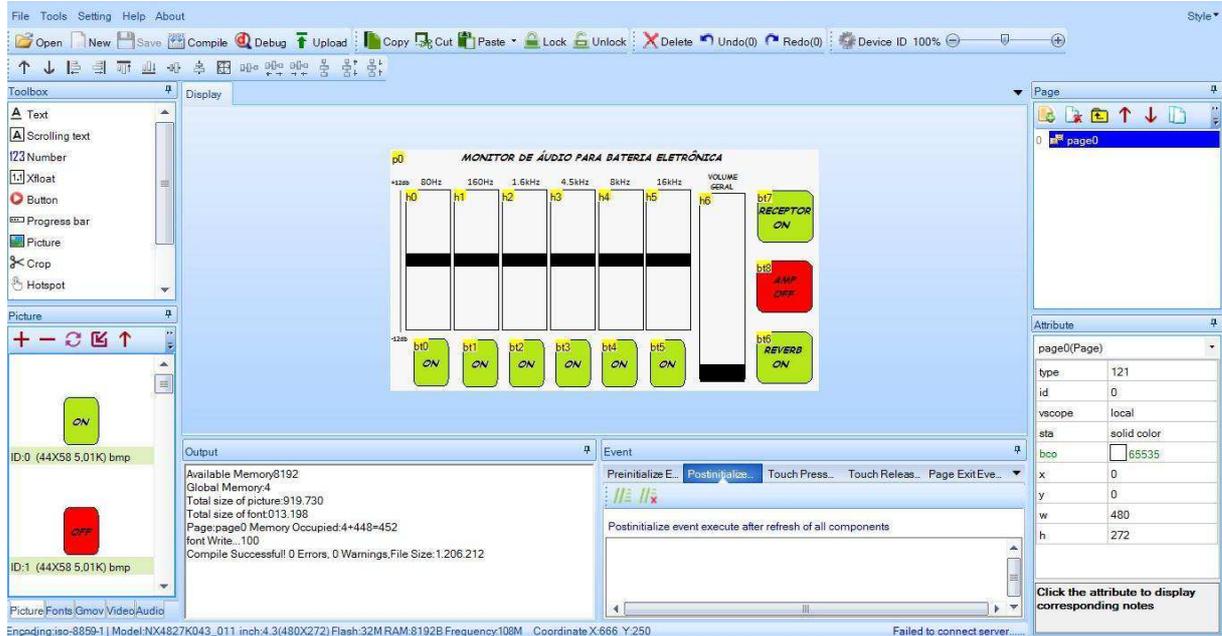
Fonte: [https://cdn.itead.cc/media/catalog/product/4/\\_/4.3\\_nextion\\_enhanced\\_hmi\\_touch\\_display-8.jpg](https://cdn.itead.cc/media/catalog/product/4/_/4.3_nextion_enhanced_hmi_touch_display-8.jpg)

O display é responsável por intermediar a comunicação entre o usuário e o protótipo. O usuário define os parâmetros no display o qual se comunica com o microcontrolador e então é realizado o ajuste os potenciômetros digitais, também de outras opções, tais como o efeito de áudio, o sinal de entrada e também a saída de áudio que tem como destino os amplificadores.

Este display foi escolhido por ter como característica a facilidade de configuração e criação do *layout* de fundo, e também pela comunicação UART que realiza com o microcontrolador.

O *layout* e as configurações do *display* são realizados no software NEXTION EDITOR onde todos os recursos podem ser acessados e configurados, como mostra a Figura 47. Neste editor é possível simular e verificar quais valores são esperados na saída UART, a qual o display utiliza para se comunicar com o microcontrolador.

Figura 47 – NEXTION EDITOR



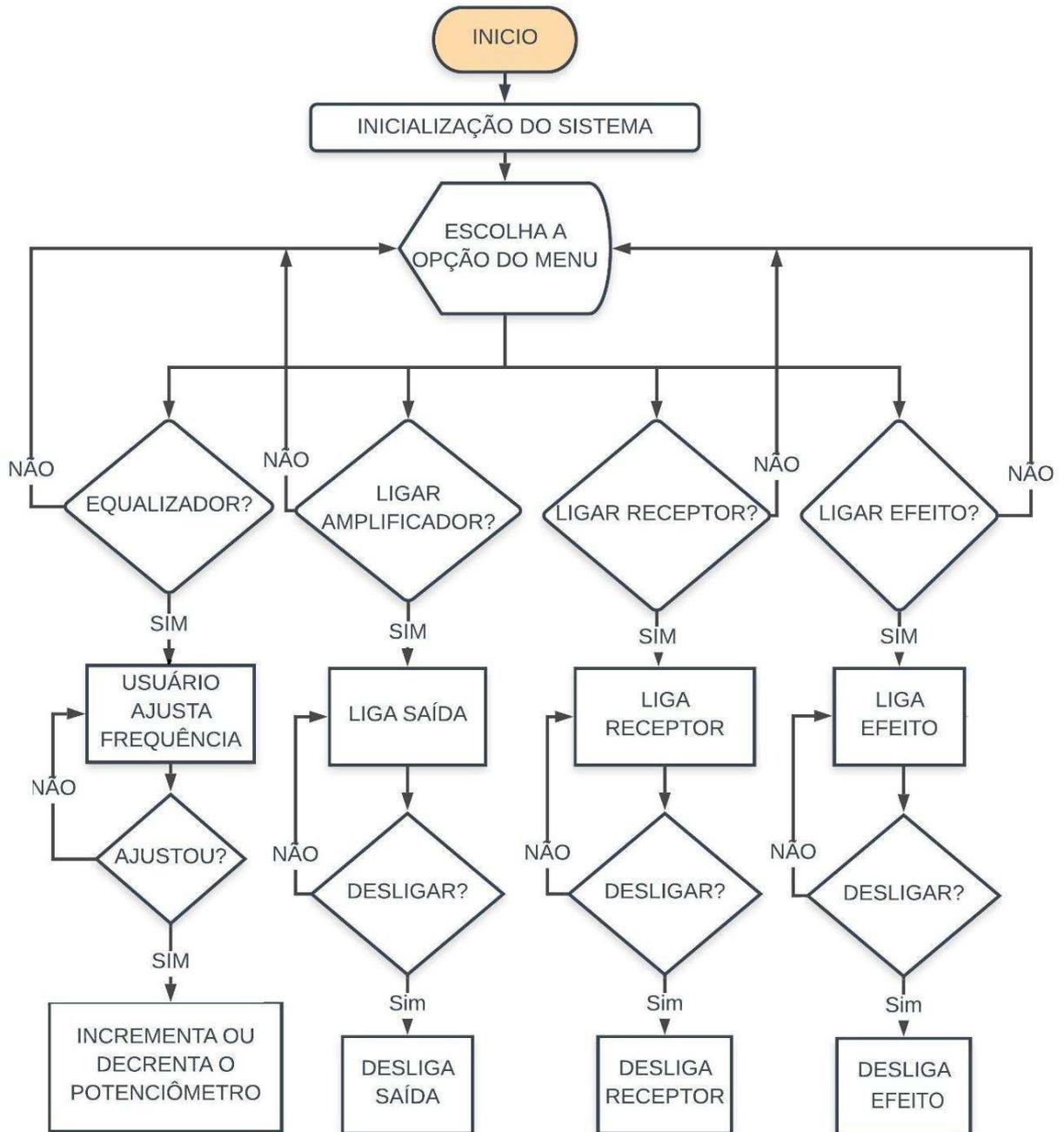
Fonte: Próprio Autor

### 3.2 FIRMWARE

O microcontrolador é o dispositivo fundamental para o funcionamento do monitor de áudio, e por isso, um *firmware* foi desenvolvido. O código foi construído a partir do compilador IAR, o qual é amplamente utilizado na disciplina de Microcontroladores II do curso.

A partir da necessidade do protótipo, o microcontrolador realiza a comunicação com o display de forma serial. O mesmo adquire os valores gerados no display, e identifica qual é o botão que está sendo pressionado. Após isso, envia a informação no caso dos *sliders*, até o potenciômetro digital via SPI, que vai incrementar ou decrementar no respectivo filtro do equalizador, gerando ganho ou atenuação do sinal de áudio. Já no caso dos atuadores de sinal de entrada, sinal para o amplificador e acionamento do circuito de reverberação, o microcontrolador envia um nível lógico alto ou nível lógico baixo, ligando ou desligando o LED dos optoacopladores de seus respectivos circuitos.

O fluxograma apresentado na Figura 48, demonstra a estrutura do firmware deste projeto.

Figura 48 - Fluxograma do *firmware*

Fonte: Próprio Autor

### 3.3 FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO

Para o funcionamento correto do dispositivo deve-se seguir uma sequência de acionamentos, primeiro o transmissor sem fio já conectado ao instrumento, depois ligar as duas chaves interruptoras do monitor de áudio, primeiro a menor depois a maior, só então acionar o

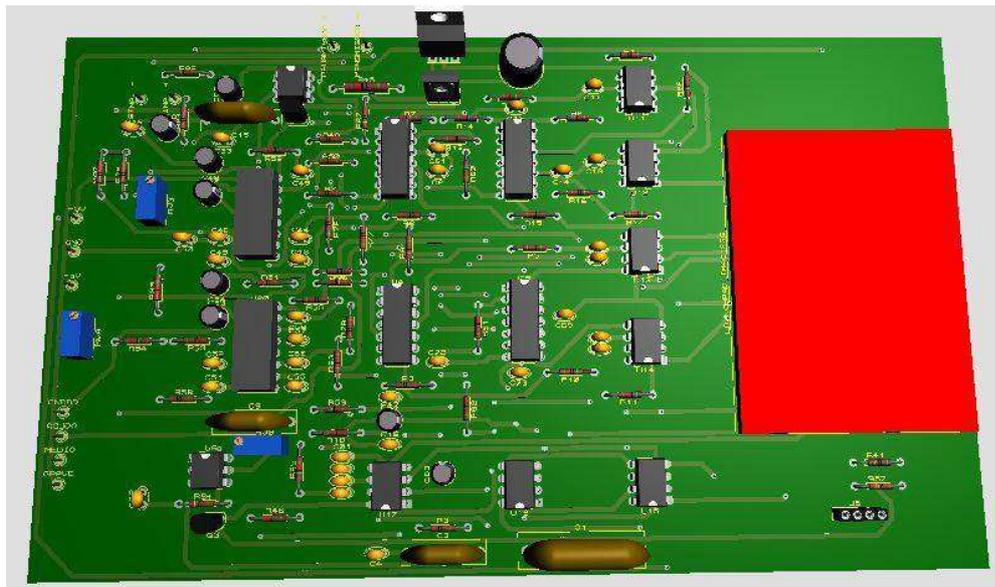
botão de ligar receptor e por fim o botão de ligar amplificadores. O sistema estará em funcionamento, agora o baterista poderá interagir com o equalizador, ligando o botão de liberação de cada banda, um por vez, e fazendo o ajuste necessário de ganho ou atenuação para cada um dos 6 canais. O botão de reverberação pode ser acionado quando o usuário quiser, adicionando assim um efeito de ambiência ao sinal de áudio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar o desenvolvimento do projeto estão dispostos a seguir os resultados obtidos.

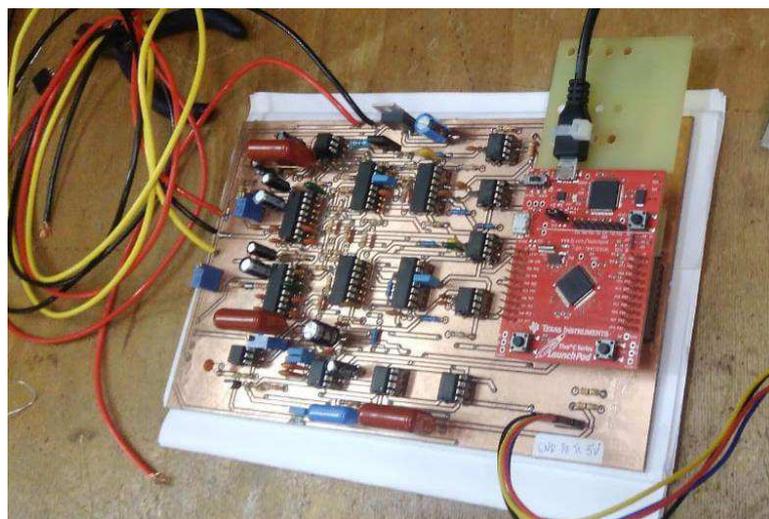
Os circuitos de equalização e amplificação foram todos simulados, como mostram as Figuras 49 e 51 e prototipados em placa de circuito impresso como mostram as Figuras 50 e 52 através do software de simulação de circuitos.

Figura 49 – 3D da placa de equalização no software



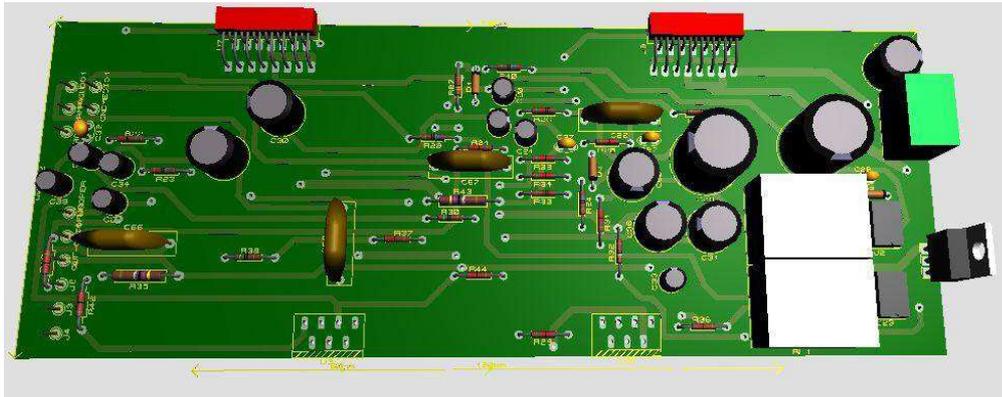
Fonte: Próprio Autor

Figura 50 – Placa de circuito impresso do Equalizador já montada



Fonte: Próprio Autor

Figura 51 – 3D da placa de amplificação no software



Fonte: Próprio Autor

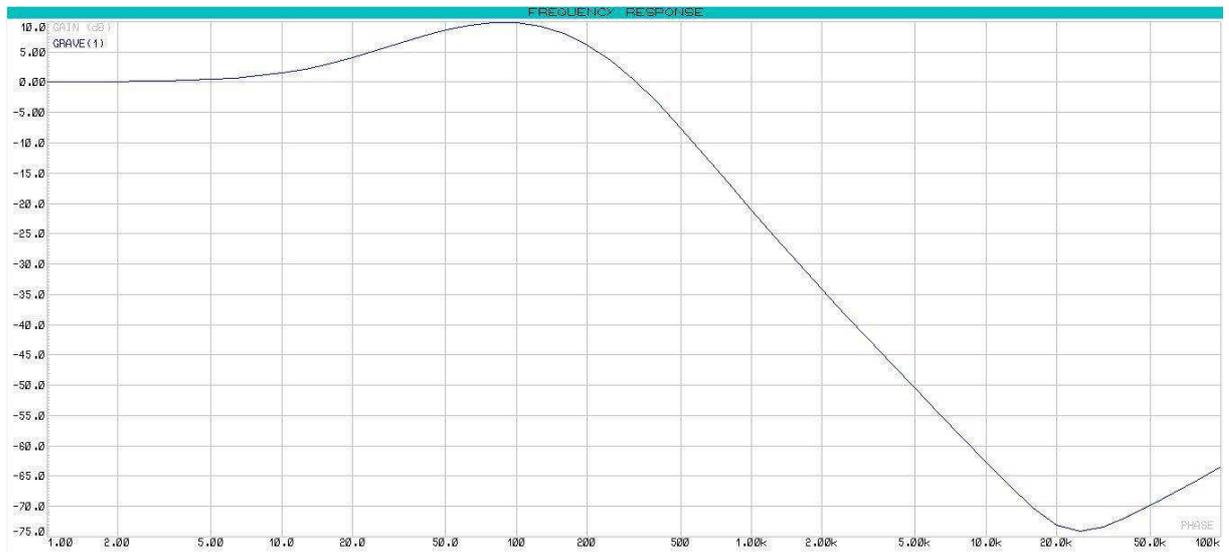
Figura 52 – Placa de circuito impresso dos Amplificadores já montada



Fonte: Próprio Autor

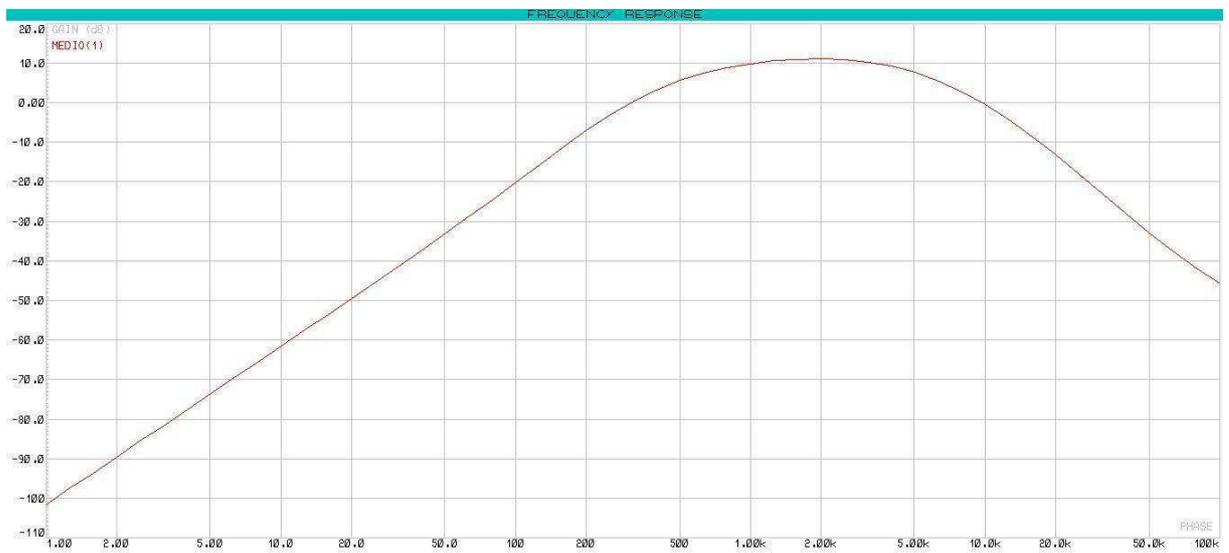
As curvas mostradas nas Figuras 53, 54, 55, 56, 57 e 58 são os resultados elétricos da simulação do sistema funcionando em conjunto, estes são oriundos da placa de circuito impresso da Figura 50.

Figura 53 – Saída do canal de graves com potenciômetro em 0dB



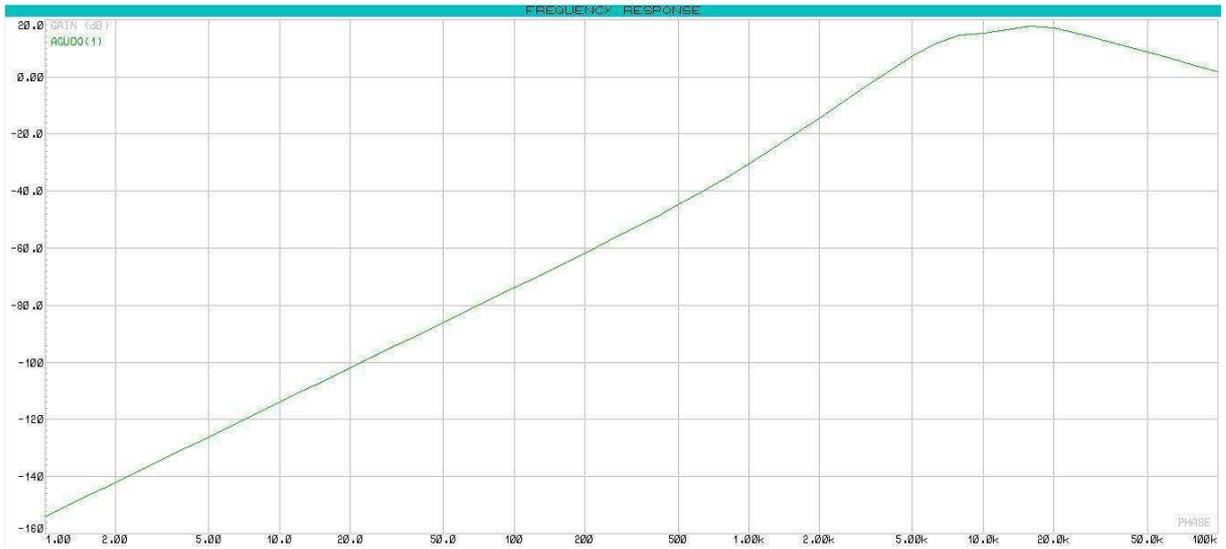
Fonte: Próprio Autor

Figura 54 – Saída do canal de médios com potenciômetro em 0dB



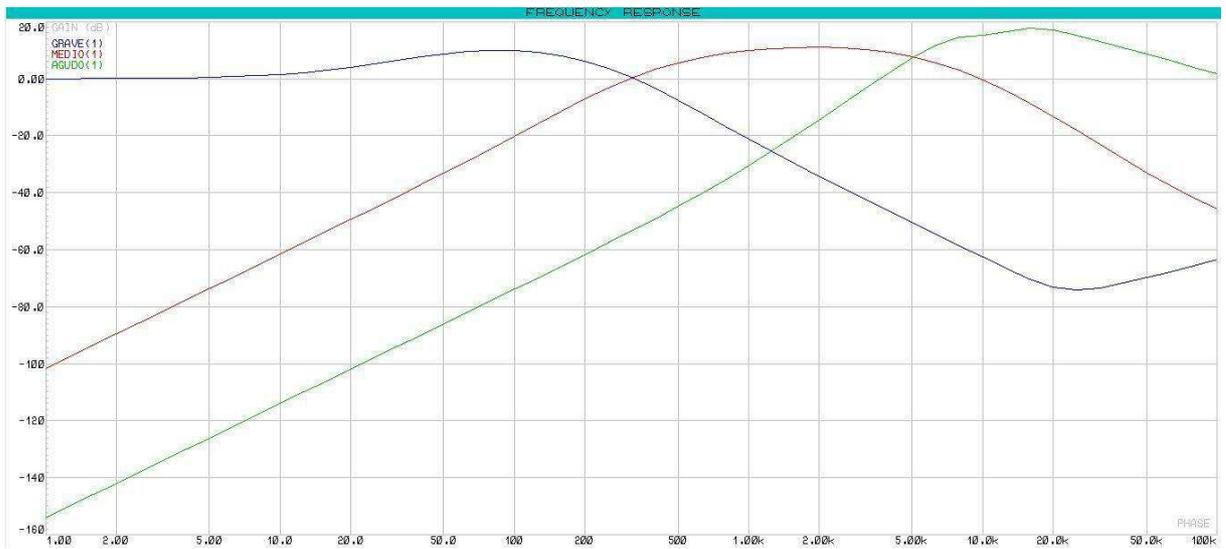
Fonte: Próprio Autor

Figura 55 – Saída do canal de agudos com potenciômetro em 0dB



Fonte: Próprio Autor

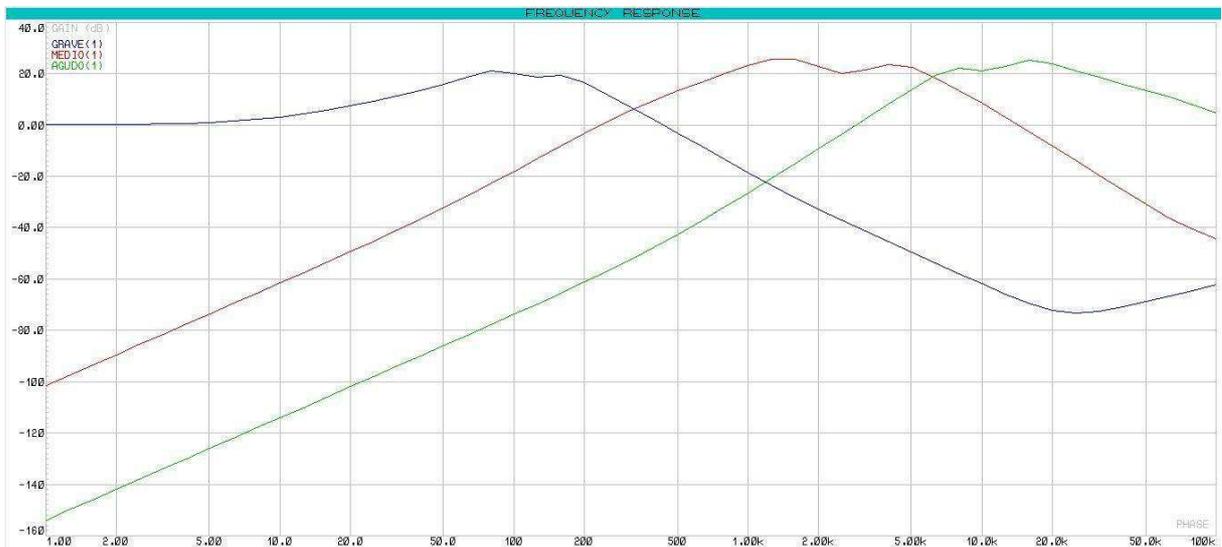
Figura 56 – Soma dos canais com potenciômetro em 0dB.



Linha azul graves, vermelha médios e verde agudos

Fonte: Próprio Autor

Figura 57 – Soma dos canais com potenciometro em +12dB

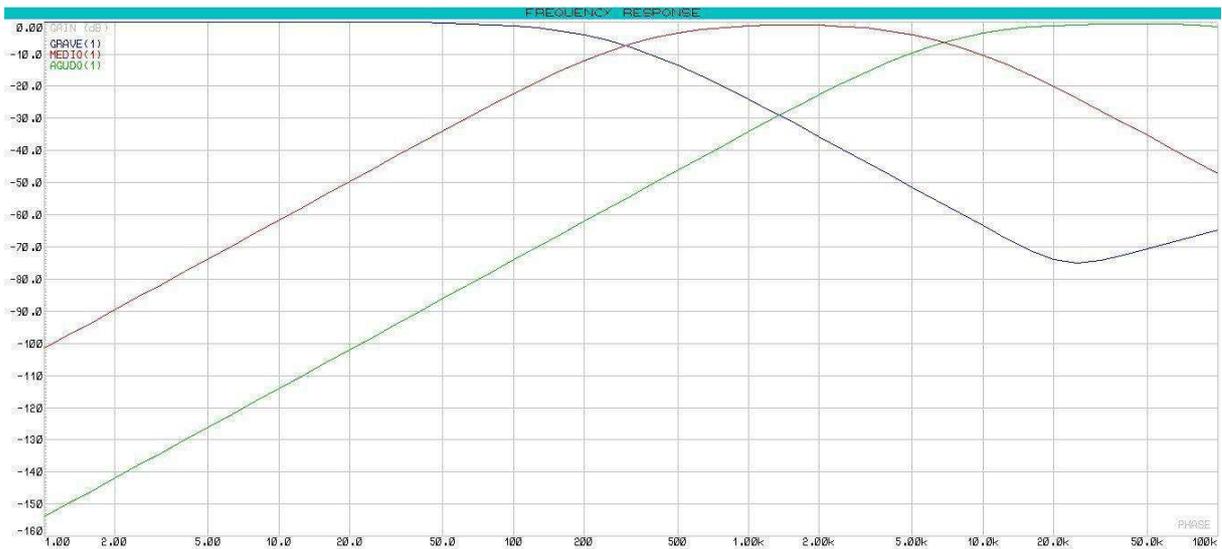


Linha azul graves, vermelho médios e verde agudos

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 57, é possível ver que o ganho se dá entorno de +12dB como o esperado. Na Figura 58 observa-se que a atenuação em relação a Figura 56 está também próximo de 12dB.

Figura 58 - Soma dos canais com potenciometro em -12dB



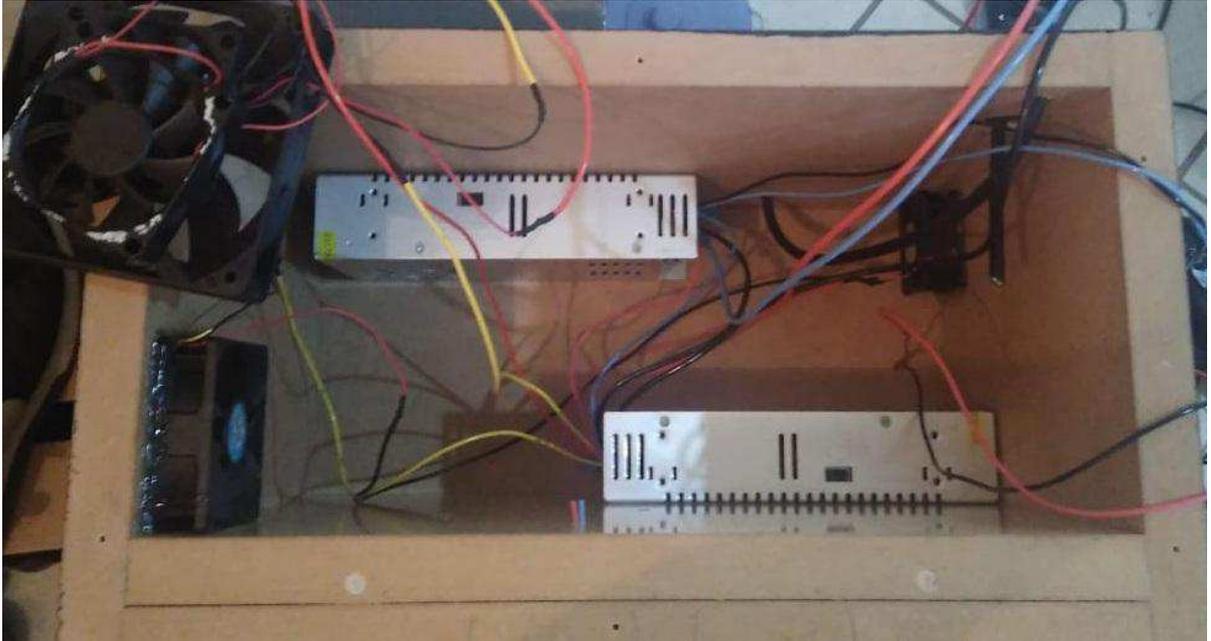
Linha azul graves, vermelho médios e verde agudos

Fonte: Próprio Autor

A simulação elétrica mostra que o sistema cumpre com a eficiência de equalização desejada.

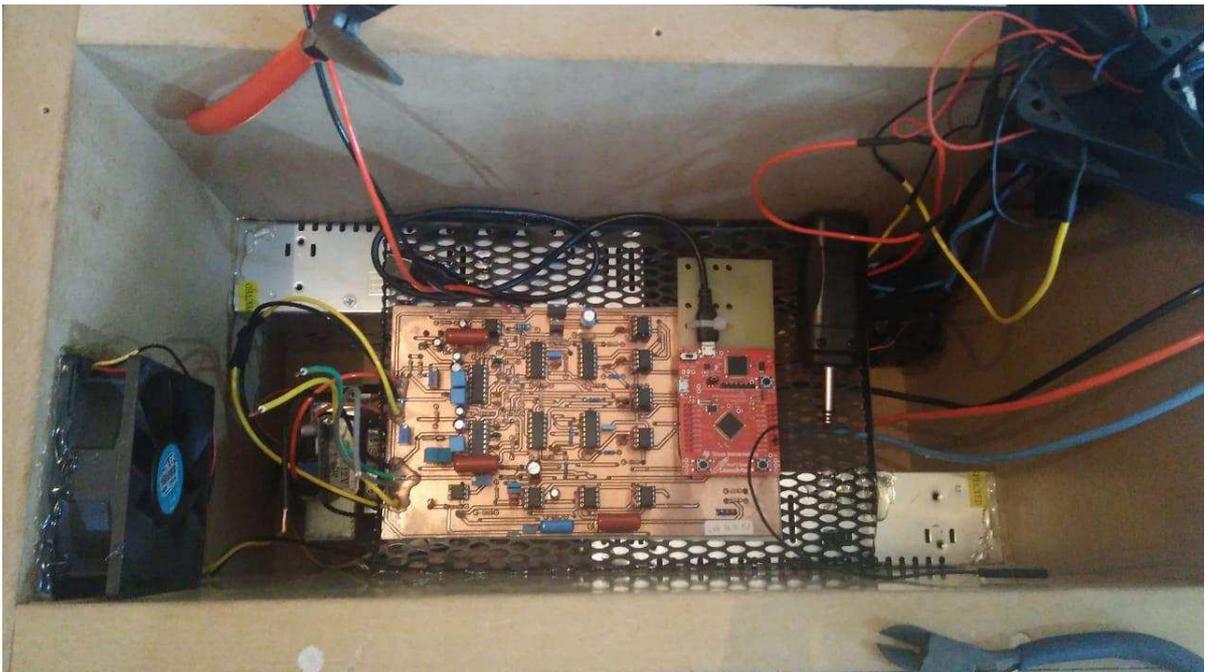
Nas Figuras 59 e 60 são mostrados os circuitos inseridos no cubículo da caixa acústica, as fontes, o equalizador e controle, bem como os amplificadores.

Figura 59 – Montagem das fontes no dispositivo



Fonte: Próprio Autor

Figura 60 – Montagem do equalizador e controle no dispositivo



Fonte: Próprio Autor

As medições acústicas mostradas nas Figuras 63, 64, 65 e 66 são resultado obtidos do protótipo concluído mostrado na Figura 62.

Figura 61 – Impermeabilização da caixa acústica



Fonte: Próprio Autor

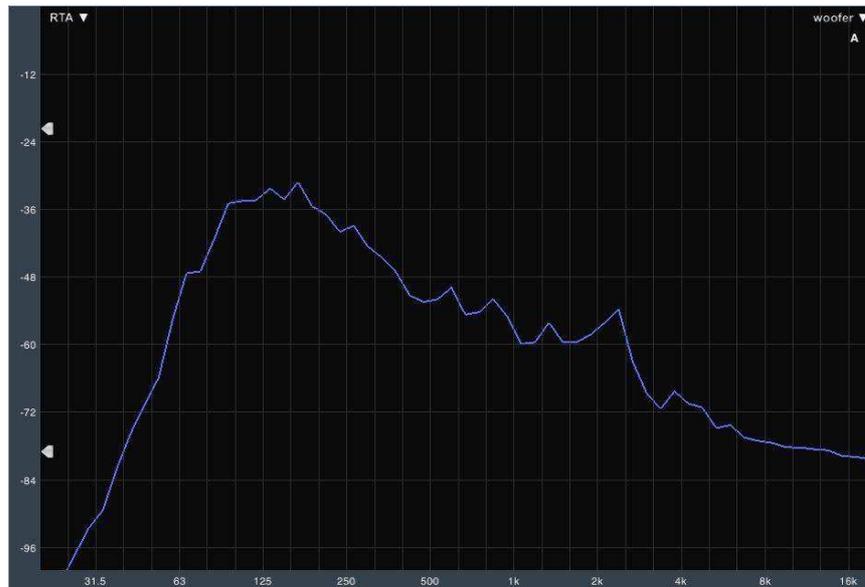
Figura 62 – Resultado final do dispositivo



Fonte: Próprio Autor

As respostas acústicas foram obtidas com o microfone Sennheiser e835, placa de som UCA 222 BEHRINGER e um software de alinhamento de áudio. As medidas realizadas com o padrão de distância de 1 metro entre caixa e microfone utilizando ruído ROSA aplicado no dispositivo transmissor.

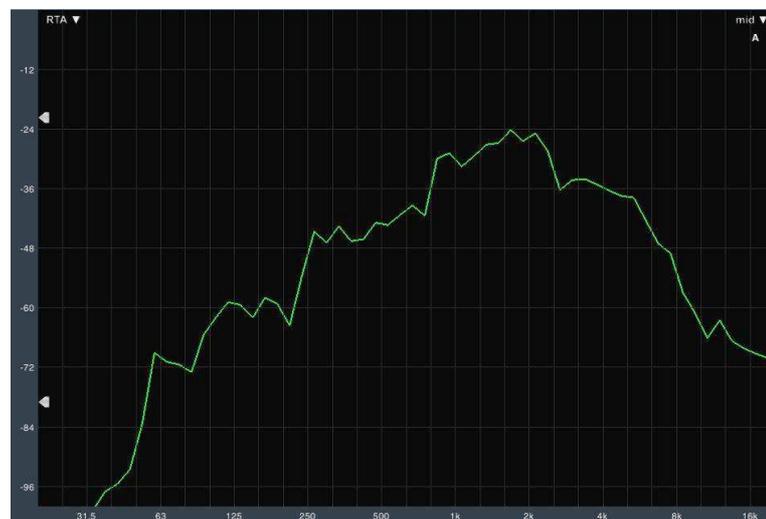
Figura 63 – Resposta acústica no canal de graves



Fonte: Próprio Autor

Comparando a resposta elétrica da Figura 53 com a resposta acústica da Figura 63 tem-se um resultado coerente.

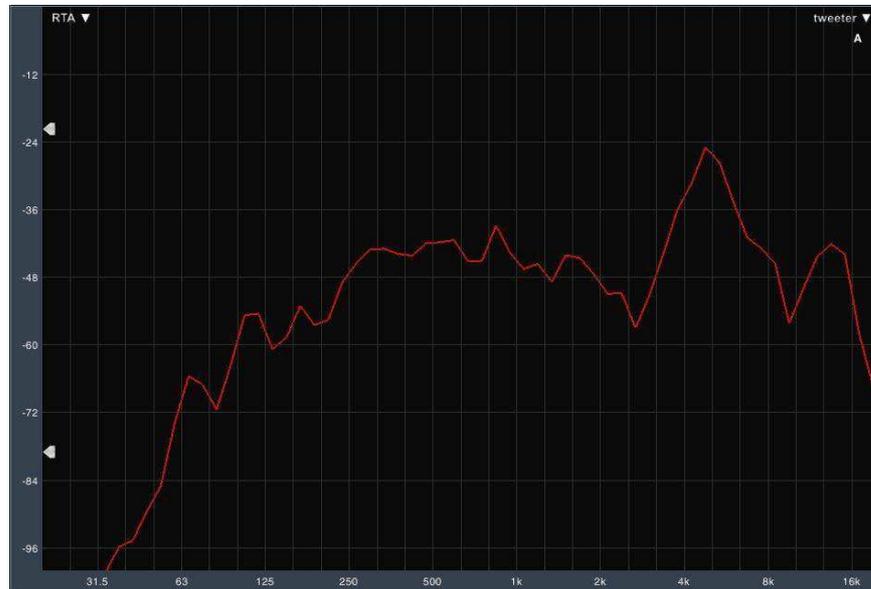
Figura 64 - Resposta acústica no canal de médios



Fonte: Próprio Autor

Da mesma forma comparando a resposta acústica da Figura 64 com a resposta elétrica da Figura 54, tem-se uma resposta coerente.

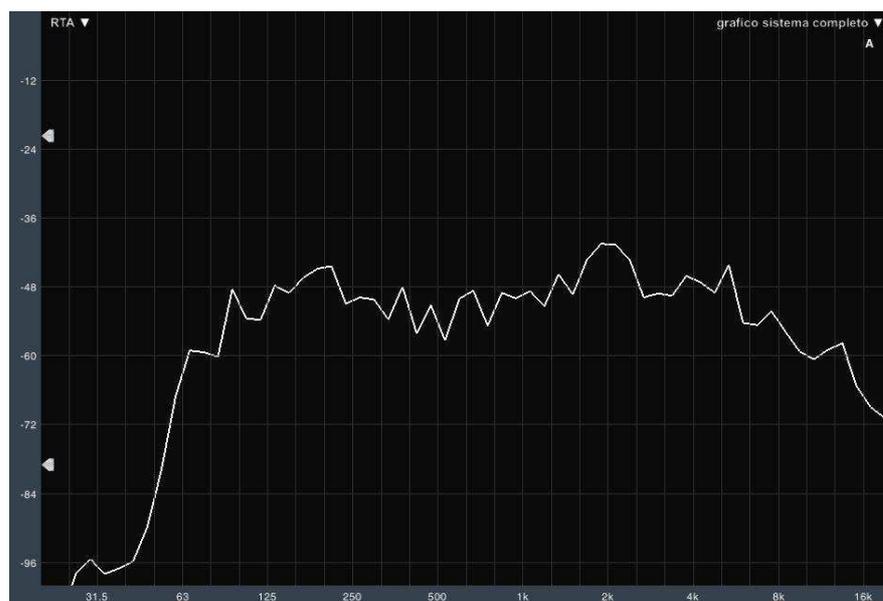
Figura 65 - Resposta acústica no canal de agudos



Fonte: Próprio Autor

Desta vez comparando a resposta elétrica da Figura 55 com a resposta acústica da Figura 65, tem-se uma divergência, e isto se dá pelo fator de limitação do microfone utilizado, pois o mesmo não possui uma curva ideal em altas frequências.

Figura 66 - Resposta acústica da soma das vias de graves, médios e agudos

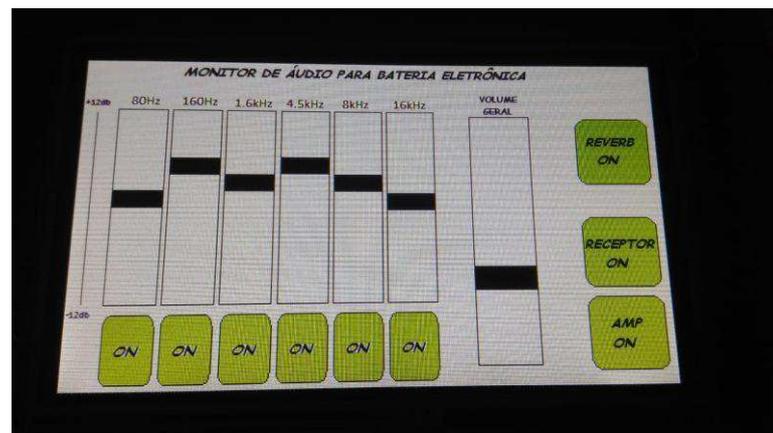


Fonte: Próprio Autor

Na Figura 66 tem-se o sinal de todas as 3 vias juntas, e é possível perceber que apesar das variações ocasionadas pelo próprio sistema de medição, existe uma planicidade dentro da faixa proposta pelo projeto. Onde é possível comparar com a Figura 56 que mostra a resposta elétrica esperada no sistema.

O resultado final da interface do display a qual o baterista poderá interagir com o dispositivo está mostrada na Figura 67.

Figura 67 – Layout do display



Fonte: Próprio Autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o término do projeto, fica evidente que muito conhecimento foi adquirido ao longo deste percurso, além da capacidade de resolver os problemas que pouco a pouco foram encontrados. Grande parte das disciplinas do curso foram de fundamental importância para que fosse possível avançar em cada um dos circuitos desenvolvidos.

No circuito do transmissor e receptor sem fio, se fez necessário um circuito de acionamento do receptor de áudio. Este trouxe um desafio no sentido de garantir a corrente necessária para que a transmissão se mantivesse estável.

Para que o efeito de ambiência pudesse ser adicionado, foram necessários inúmeros testes, pois é extremamente complexo estabilizar um oscilador controlado por tensão.

O equalizador analógico sem dúvidas foi o circuito que mais demandou tempo e dedicação, pois os métodos utilizados na construção deste tipo de circuito são bem diferentes dos métodos comumente utilizados na eletrônica convencional. Foram utilizados desde filtros ativos simples até circuitos com simulador de indutância, os quais tem papel fundamental em equalizadores analógicos.

Os amplificadores utilizados são de classe AB, e isto acarreta em inúmeros detalhes a serem considerados. O principal e mais perigoso é a geração de calor que estes produzem, o que faz necessário um arrefecimento extremamente eficiente, pois o ambiente em que estão inseridos é todo de madeira e não permite superaquecimento.

Todo o controle e gerenciamento destes circuitos foi realizado por um display *touchscreen* e um microcontrolador. Esta etapa também demandou muito trabalho e tempo, pois a comunicação utilizada pelo display é simples mas os valores que o mesmo envia devem ser identificados e interpretados de maneira correta para que haja comunicação. Então fez-se um estudo e também uma lógica no microcontrolador para que fosse possível compreender estes valores e posteriormente realizar as funções selecionadas no display.

A comunicação utilizada por todos os potenciômetros digitais é simples, porém possui detalhes nos pinos de seleção que demandaram estudo e entendimento para que os comandos que são enviados até eles pelo microcontrolador sejam coerentes com a definição no display.

Para a caixa acústica fez-se um estudo acústico dedicado para cada faixa de frequência e alto-falante utilizado, as dimensões foram pensadas para o máximo rendimento dos alto-falantes e também para que estes pudessem responder a todo o espectro de frequência gerado pela bateria eletrônica. Este sistema se torna complexo uma vez que são utilizadas 3 vias de

áudio e isso acarreta em muitos detalhes a serem pensados, pois a acústica vai muito além de apenas inserir um alto-falante em uma caixa de madeira. Então, para que todos estes alto-falantes fossem acoplados corretamente foi necessário muito estudo, tempo e testes práticos.

Os desafios de implementar circuitos digitais comandando circuitos analógicos na prática são bastante complexos, pois geram ruídos os quais são de difícil localização e solução.

O protótipo finalizado teve um ótimo desempenho se tratando de potência, e também das funções de equalização e reverberação propostas desde o início. Os resultados acústicos e elétricos condizem com o projetado e também com o esperado.

Por fim, tendo em vista o nível de ruído gerado ao excursionar o máximo ganho, pode-se pensar em alguma forma de atenuar o mesmo. Ainda, o protótipo pode ser otimizado na questão de robustez da caixa onde estão inseridos os circuitos, o que fará uma proteção a mais na hora do transporte. Também pode ser reduzida a espessura da chapa de MDF utilizada na confecção da caixa para aliviar o peso, o que não afetaria a acústica.

## REFERÊNCIAS

- Alysson. **Partes de um alto-falante**. UFPR 1999. Disponível em: [ttp://www.eletrica.ufpr.br/edu/sensores/1999/alysson/partesdoaltofalante.htm](http://www.eletrica.ufpr.br/edu/sensores/1999/alysson/partesdoaltofalante.htm)>. Acesso em: 19 mai. 2019, 22:35:50.
- AUDIO-TECHNICA. **UHF Versus VHF**. Disponível em: < <https://www.audio-technica.com/cms/site/9c52c3e2c9f62181/index.html>>. Acesso em: 5 mai. 2019, 19:46:25.
- BARSALINI, Leandro. As sínteses de Edison Machado: um estudo sobre o desenvolvimento de padrões de samba na bateria. 2009. 172p. Dissertação (Mestrado em Música) – Instituto de Artes, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- BORTONI, Rosalfonso. **Amplificadores de Potência**. In: ENCONTRO DE SISTEMAS DE ÁUDIO. 1999. Disponível em: <[http://www.studior.com.br/amp\\_avan.pdf](http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf)>. Acesso em: 1 mai. 2019.
- CARINCI, Enrico Joseph. Técnica estendida na performance de bateristas brasileiros. 2012. 108p. Dissertação (Mestrado em Música) - Escola de música e Artes Cênicas - UFG, Goiânia, 2012.
- CARVALHO, Tomas. **REVERBERAÇÃO**. InfoEscola, 2007. Disponível em : < <https://www.infoescola.com/fisica/reverberacao/>>. Acesso em: 29 nov.2019, 9:56:08.
- GILES, Martin. **AUDIO/RADIO HANDBOOK**. National Semiconductor Corporation, 1980.
- LINKWITZ, Siegfried. **Filtros Ativos**. Disponível em: < <http://www.linkwitzlab.com/filters>> Acesso em 15 mai. 2019, 14:54:30.
- NASCIMENTO, Michael. **Mapa Gráfico das Frequências Fundamentais para equalização**. Disponível em: < <http://gravandoemcasa.com/2011/09/mapa-das-frequencias-fundamentais-para-equalizacao/>>. Acesso em: 7 mai.2019, 10:04:30.
- NUNES JUNIOR, Sergio Fernando. Projeto de Bateria Eletrônica em Arduino. 2017. 51p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP, 2017.
- ORFANIDIS, Sophocles J. Introduction to Signal Processing: Prentice-Hall Signal Processing Series, 1996.
- PATSKO, Luís Fernando. **Tutorial aplicações, funcionamento e utilização de sensores**. Maxwell Bohr Instrumentação Eletrônica, 2006. Disponível em: <[http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2019, 17:33:45.
- PERTENCE JR., Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 8ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

SETTE, Homero. **Amplificador-Conceitos Básicos**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/295813081\\_AMPLIFICADOR\\_-CONCEITOS\\_BASICOS](https://www.researchgate.net/publication/295813081_AMPLIFICADOR_-CONCEITOS_BASICOS). Acesso em: 20 mai. 2019, 20:47:35.

SETTE, Homero. **Análise e Síntese de Alto Falantes & Caixas Acústicas Pelo Método de Thiele – Small**. Editora H. Sheldon, 1996.

SOMBINARIO. **Equalizadores**. Disponível em: < <https://www.sombinario.com/wp-content/uploads/2016/01/Tipos-de-Equalizadores.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2019, 18:45:02.

VIANA, Junior. **O que é uma caixa de som?**. Blog Edifier 2 de maio de 2016. Disponível em : <<http://blog.lojaedifier.com.br/o-que-e-uma-caixa-de-som/>>. Acesso em: 5 mai.2019, 19:56:08.

## APÊNDICE A – PROTÓTIPO CONSTRUIDO

Neste apêndice, serão apresentadas as imagens finais do projeto.

Figura A-1 – Saída de ar da ventilação forçada

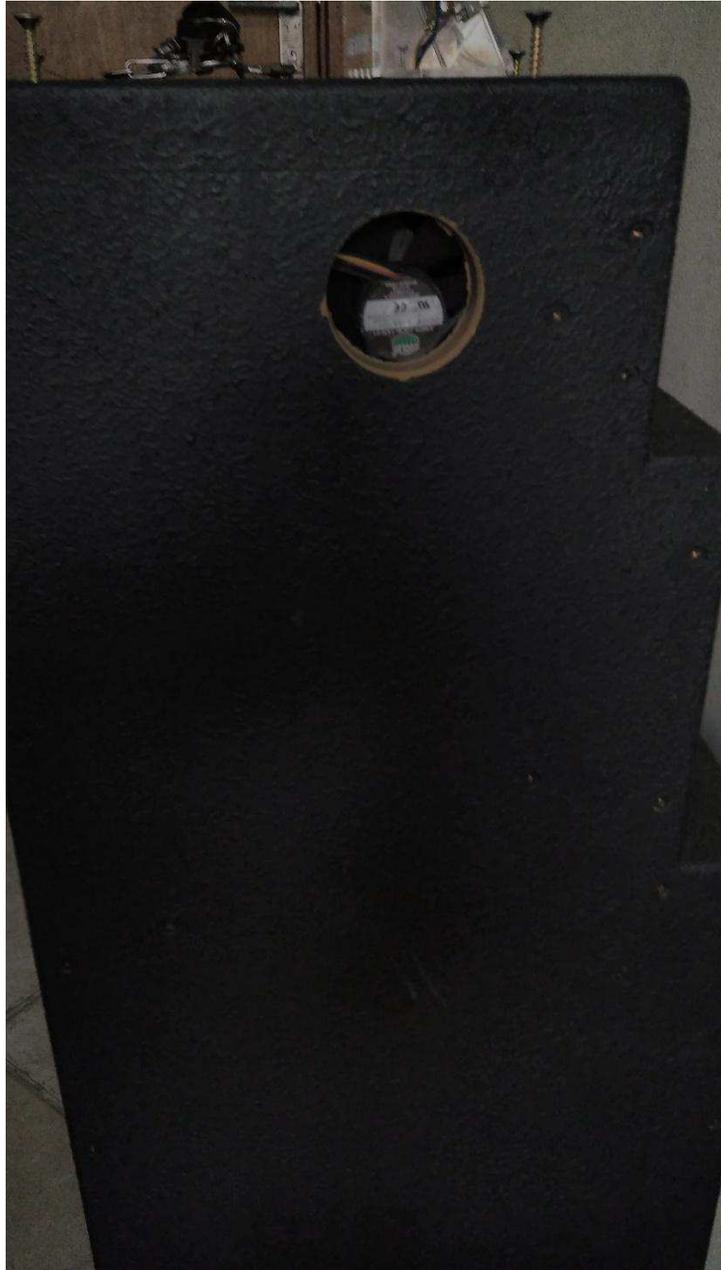


Figura A-2 – Entrada de ar da ventilação forçada



Figura A-3 – Vista dos circuitos finalizados

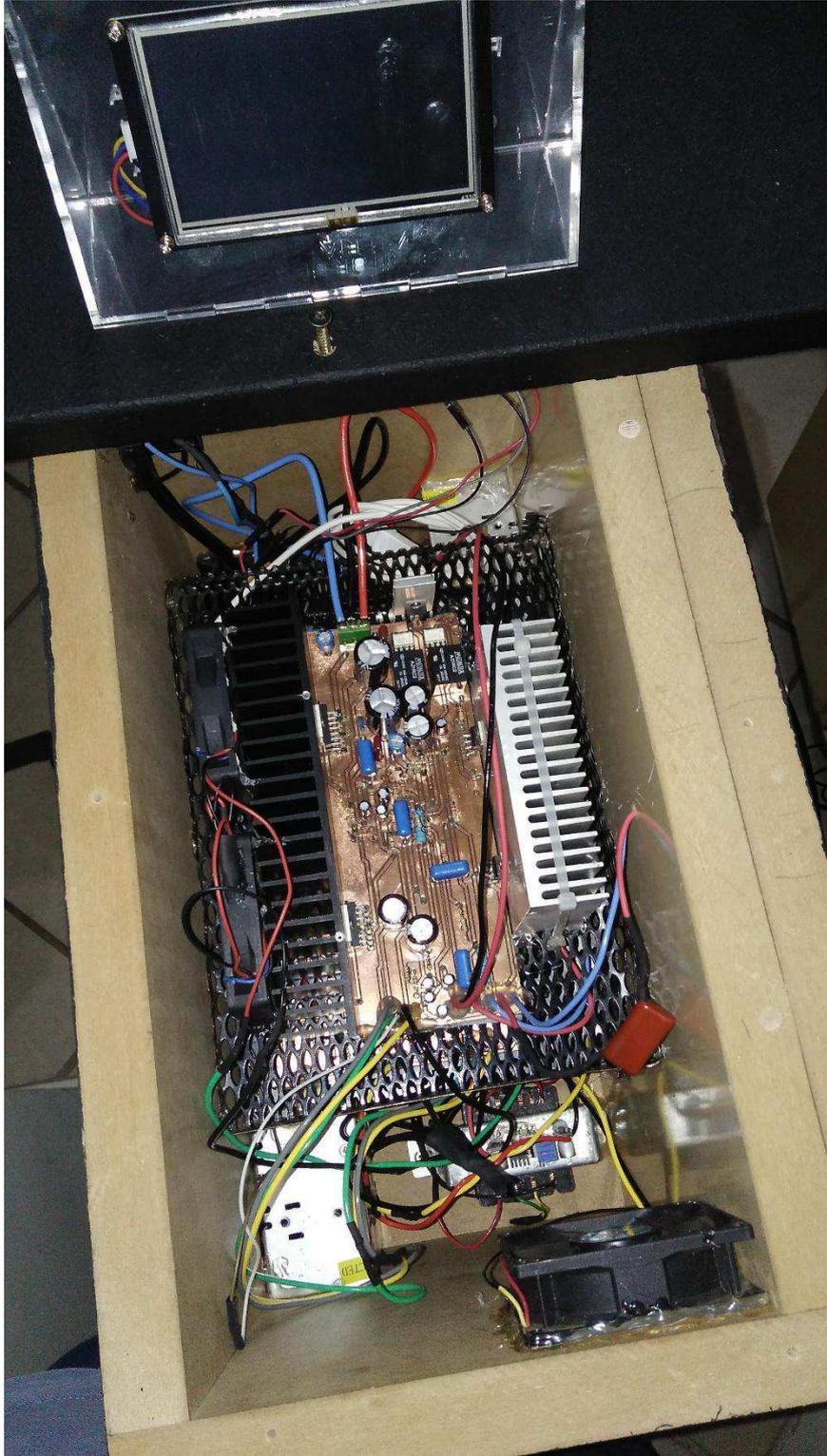


Figura A-4 - Protótipo completo

