

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Marco Aurélio Cavalli

SOUND SYSTEM PUBLIC ADDRESS VERTICAL LINE ARRAY

Passo Fundo

2018

Marco Aurélio Cavalli

SOUND SYSTEM PUBLIC ADDRESS VERTICAL LINE ARRAY

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Edson Santos Acco.

Passo Fundo

2018

Marco Aurélio Cavalli

Sound System Public Address Line Array Vertical

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Edson Santos Acco.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edson Santos Acco - UPF

Prof^a. Dr^a. Blanca Rosa Maquera Sosa - UPF

Prof. Dr. Carlos Alberto Ramirez Behaine - UPF

GRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço a toda a minha família pelo suporte e colaboração principalmente a meus pais.

Agradeço também a todos meus colegas, por termos passado mais essa jornada juntos, com muito sofrimento, mas também com muitas brincadeiras.

Agradeço também a todos os professores, mestres na arte de ensinar, principalmente ao meu orientador Edson.

“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada”.

Albert Einstein

RESUMO

Nos dias atuais é praticamente impossível se pensar em qualquer evento que tenha um número considerável de telespectadores, sem um sistema de áudio para facilitar a compreensão e escuta de todos. Por isso o presente projeto apresenta um sistema de som que visa facilitar e ajudar o profissional que atua na área de sonorização de eventos. O sistema apresentado possui a configuração *Line Array* vertical, que além de uma grande qualidade e eficiência apresentada é compacto e de fácil montagem. O sistema é todo ativo usando um modo de trabalho de bi-amplificação, onde a caixa de *subwoofer* responsável pela execução das frequências mais graves conta com um amplificador Classe d, e a caixa *line array* vertical responsável pela reprodução das frequências de médio e agudo, conta com um amplificador classe AB. O sistema possui um crossover interno, que além do processamento do sinal de áudio existente, através de filtros ativos que visam ter a melhor resposta para o alinhamento, ajuda também o operador pois basicamente o sistema se torna *plug and play*.

Palavras-Chave: *Line Array*, Sistema de Som Ativo, Amplificador, Filtro, Sistema de Áudio.

ABSTRACT

Nowadays it is practically impossible to think of any event that has a considerable number of viewers without an audio system to facilitate understanding and listening to everyone. That is why the present project presents a sound system that aims to facilitate and assist the professional who works in the area of event sound. The system presented has the Line Array vertical configuration, which in addition to a great quality and presented efficiency is compact and easy to assemble. The system is all active using a bi-amplification working mode, where the subwoofer box responsible for the execution of the most severe frequencies has a Class D amplifier, and the vertical line array box responsible for the reproduction of medium and high frequencies, has a class AB amplifier. The system has an internal crossover that, besides the processing of the existing audio signal, through active filters that aim to have the best response to the alignment, also helps the operator because basically the system becomes plug and play.

Keywords: Line Array, Active Sound System, Amplifier, Filter, Audio System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema Simples de PA	15
Figura 2 - Line Array Vertical	16
Figura 3 - Direcionalidade do Sistema	17
Figura 4 - Cluster Vertical	17
Figura 5 - Sistema com um Crossover Ativo	19
Figura 6 - Sistema com um Crossover Passivo	20
Figura 7 - Sistema com Filtros Passivos	20
Figura 8 - Sistema com Filtros Ativos	21
Figura 9 - Vista lateral de um padrão de radiação acústica de um filtro Butterworth.	22
Figura 10 - Vista lateral de um padrão de radiação acústica de um filtro Linkwitz-Riley	23
Figura 11 - Platéia com crossover de alinhamento Butterworth	23
Figura 12 - Platéia com crossover de alinhamento Linkwitz-Riley	24
Figura 13 - Circuito clássico Linkwitz-Riley segunda ordem com admitâncias	24
Figura 14 - Filtro passa baixa LR-4	25
Figura 15 - Filtro passa alta LR-4	26
Figura 16 - Resposta em Frequência Filtro Linkwitz-Riley	27
Figura 17 - Circuito Amplificador Classe A	28
Figura 18 - Gráfico da corrente e da tensão em um amplificador classe B	29
Figura 19 - Circuito Amplificador Classe B	29
Figura 20 - Região de atuação amplificadores Classe A, B e AB.	30
Figura 21 - Amplificador Classe AB com diodos de polarização	30
Figura 22 - Estagio Duplo de Entrada	31

Figura 23 - Amplificador Classe D meia ponte	33
Figura 24 - Gráfico do Rendimento do Amplificador classe D	33
Figura 25 - Diagrama do projeto	34
Figura 26 - Microfone Sem Fio	35
Figura 27 - Mesa de Som YAMAHA	36
Figura 28 – Alto-Falante Grave visão frontal	37
Figura 29 – Alto-Falante Grave visão posterior	37
Figura 30 - Alto-Falante 4"	38
Figura 31 - Tweeter	38
Figura 32 - IRS2092	39
Figura 33 - Buffer de Entrada	41
Figura 34 - Amplificador Não Inversor	41
Figura 35 - Filtros LR-4	43
Figura 36 - Amplificador Inversor	44
Figura 37 - volume independente crossover	44
Figura 38 - Resposta em frequência simulada filtros crossover	45
Figura 39 - Placa Entrada Sinal de Áudio e Crossover	46
Figura 40 - Vista Superior Caixa Grave	47
Figura 41 - Vista Frontal Caixa Grave	47
Figura 42- Caixa Grave Montada	48
Figura 43 - Medição Caixa Line Sem Tweeter	49
Figura 44 - Resposta em frequência caixa line com tweeter	49
Figura 45 - Vista Superior Line Array	50
Figura 46 - Visão Frontal Line Array	51

Figura 47 - Caixa Line Array Vertical Finalizada	52
Figura 48 - Amplificador Classe AB	53
Figura 49 - Simulação Classe AB	55
Figura 50 - Saída amplificador simulação	56
Figura 51 - Amplificador Classe D	57
Figura 52 - Placa Amplificador Classe D	57
Figura 53 - Resposta em frequência filtro passa alta	58
Figura 54 - Saída Classe AB	59
Figura 55 - Distorção Harmônica Total	60
Figura 56 - Medições THD	61

LISTA DE ABREVIATURAS

Av – Ganho de Amplificação

CI – Circuito Integrado

dB – Decibéis

FET – Transistor de Efeito de Campo

FLI – Frequência Limiar Inferior

FPA – Filtro Passa Alta

FPB – Filtro Passa Baixa

Hz – Hertz

mm – milímetro

PA – *Public Adrres*

PWM – Moudlação por largura de pulso

RMS – *Root Mean Square*

W – Watts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL.....	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 PUBLIC ADDRESS SYSTEM.....	15
2.1.1 Microfone	15
2.1.2 Mesa de Som	15
2.2 CLUSTER	16
2.3 LINE ARRAY	16
2.3.1 Método para Construção da Caixa	17
2.4 SUBWOOFER	18
2.4.1 Método para Construção da Caixa	18
2.5 PRÉ-AMPLIFICADOR	18
2.6 CROSSOVER.....	19
2.6.1 Tipos de Crossover	19
2.7 FILTROS	20
2.7.1 Filtros Passivos.....	20
2.7.2 Filtros Ativos	21
2.7.2.1 <i>A topologia Linkwitz-Riley</i>	<i>21</i>
2.8 AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA.....	27
2.8.1 O Amplificador Classe AB.....	27
2.8.1.1 <i>Amplificador Classe A.....</i>	<i>28</i>
2.8.1.2 <i>Amplificador Classe B.....</i>	<i>28</i>

2.8.1.3 Amplificador Classe AB.....	29
2.8.2 O Amplificador Classe D	31
2.8.2.1 Tecnologia	32
3 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO	34
3.1 DEFINIÇÕES DO PROJETO	34
3.1.1 Microfone	34
3.1.2 Mesa de Som	35
3.1.3 Caixa de Som.....	36
3.1.3.1 Alto-falante	36
3.1.4 Amplificador Classe AB.....	39
3.1.4.1 Transistores	39
3.1.5 Amplificador Classe D	39
3.1.5.1 Circuito Integrado	39
3.1.5.2 Transistores	39
3.1.6 Crossover	40
4 DESENVOLVIMENTO.....	41
4.1 PRÉ AMPLIFICADOR.....	41
4.2 CROSSOVER.....	42
4.2.1 Simulação	45
4.3 PLACA CROSSOVER E PRÉ-AMPLIFICADOR	45
4.4 CAIXAS	46
4.4.1 Caixa Subwoofer.....	46
4.4.2 Line Array Vertical	48
4.5 AMPLIFICADOR CLASSE AB.....	53
4.5.1 Estágio duplo de entrada	54
4.5.2 Estágio de Ganho de Tensão.....	55
4.5.3 Estágio de Saída.....	55

4.5.4 Simulação	55
4.6 AMPLIFICADOR CLASSE D	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 CROSSOVER.....	58
5.1.1 Passa Alta	58
5.1.2 Passa Baixa.....	58
5.2 AMPLIFICADOR CLASSE D	58
5.3 AMPLIFICADOR CLASSE AB.....	59
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Nas últimas décadas o avanço tecnológico em certas áreas da atividade humana vai de fascinante a assustador em alguns casos, a eletrônica é um exemplo disso.

Com todos esses avanços tecnológicos, o grande desenvolvimento nas áreas de telecomunicações ocorrido no último século, fez com que houvesse a abertura de portas para uma nova área de desenvolvimento que hoje se denomina engenharia de áudio.

Com a criação dessa nova área denominada engenharia de áudio os avanços em sistemas de som ficaram notórios. Hoje é possível encontrar uma vasta gama de sistemas disponíveis no mercado, onde a principal diferença dos mesmos se dá através da sua área de aplicação, manifestando-se sobretudo em suas configurações.

O presente projeto apresenta um sistema de áudio PA *Line Array* Vertical Ativo, constituído por um *line array* (caixa com os alto-falantes dispostos linearmente o mais próximo possível um do outro) e um *subwoofer* (caixa de grave), onde as duas caixas serão ativas (com amplificadores internos). Este sistema como o nome já diz PA (*public address*) visa atender ao público, com foco de aplicação a eventos de pequeno porte, como palestras, a ser usado por profissionais da área.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de áudio PA *Line Array* Vertical de baixo custo e nível de qualidade aceitável, com foco de uso para eventos de pequeno porte como palestras, o sistema é composto por uma caixa *Line Array* ativa onde a sua amplificação será feita através de um amplificador classe AB e esta caixa será responsável pela reprodução das frequências de médio e agudo, e uma caixa *subwoofer* ativa em que sua amplificação será feita através de um amplificador classe D, e esta será responsável pela reprodução das frequências de grave.

O processamento do sinal de áudio será feito através de um crossover de 2 canais que será constituído de dois filtros ativos, um filtro será um FPB e outro será um filtro FPA. Após os filtros o sinal processado será amplificado e chegará as caixas correspondentes ao sinal dos mesmos constituindo assim um sistema de bi-amplificação.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Projetar e construir as caixas acústicas;
- b) Projetar e confeccionar os filtros de corte e atraso de fase;
- c) Projetar e confeccionar os amplificadores de potência;
- d) Projetar e confeccionar os pré-amplificadores;
- e) Projetar e construir meu painel de entradas;
- f) Realizar medições do alinhamento do sistema;

1.4 JUSTIFICATIVA

A nível nacional, a indústria de sonorização profissional encontra-se muito atrasada em relação a indústria internacional, onde muitas vezes os produtos comercializados não condizem com a expectativa e eficiência que os mesmos deveriam entregar. Com isto a compra de produtos importados se torna muito cara, tornando a aquisição deste tipo de equipamento praticamente inviável.

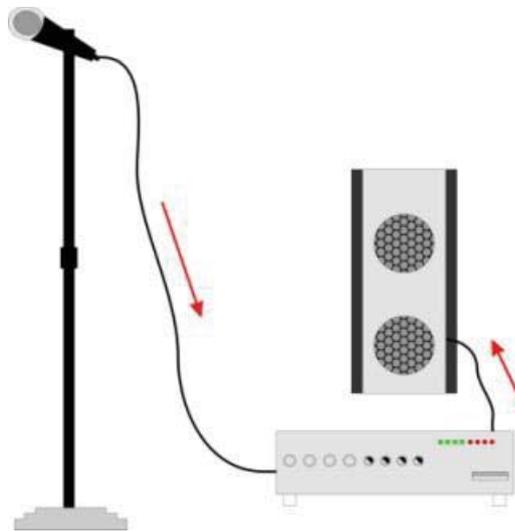
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PUBLIC ADDRESS SYSTEM

O sistema PA (*Public Address system*) é um sistema de som que visa permitir que uma pessoa possa se comunicar com um grande público, onde é feito uma amplificação do som recebido e este sinal é distribuído através de alto-falantes. (GOVERNO DA ÍNDIA, 2012).

A Figura 1 mostra um simples sistema PA, constituído de um microfone, um amplificador e um ou mais alto-falantes.

Figura 1 - Sistema Simples de PA



Fonte: Adaptado de Governo Da Índia (2012, pg. 1)

2.1.1 Microfone

Os microfones em seus diversos modelos, constituem um dos principais elementos do sistema eletroacústico.

Como a capsula de um toca-fitas ou um alto-falante o microfone é um transdutor, em outras palavras um conversor de energia. Ele capta a energia acústica (som) e a transforma em energia elétrica equivalente. (SHURE, 2005).

2.1.2 Mesa de Som

Em qualquer sistema de som, é necessária a presença de uma mesa de som, independentemente de seu número de entradas e saídas, ela pode ser considerada o coração do sistema.

Na mesa de som, é onde é captado as entradas de todos instrumentos e microfones existentes no sistema, sendo possível controlar o volume de cada um desses instrumentos como também é possível um tratamento de equalização de cada canal de entrada.

2.2 CLUSTER

“Cluster é o nome dado a um conjunto de falantes, que podem ou não ser do mesmo tipo. A principal característica de um cluster é que seus componentes ficam todos muito próximos uns dos outros.” (CYSNE 2016, p. 1472).

2.3 LINE ARRAY

Line Array é um sistema de alto falantes que é composto por uma série deles, agrupados linearmente, operando em mesma fase e com a mesma amplitude, para criar uma fonte linear na direção de propagação do som. (LADINO et al., 2014).

O *Line Array* é então composto por um cluster, a Figura 2 mostra um exemplo de *Line Array* vertical.

Figura 2 - Line Array Vertical



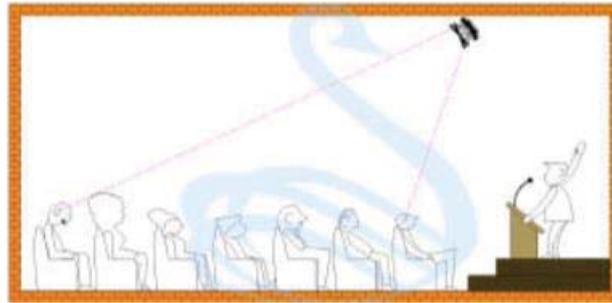
Fonte: <http://shop.whatpa.co.uk> (2017)

O *Line Array* teve sua teoria comprovada em 1992 quando o Dr. Christian Heil disse que um conjunto de alto-falantes alinhados verticalmente tem um comportamento como se fosse um único alto-falante, tendo uma radiação estreita e direcional. (LADINO et al., 2014).

Estes sistemas podem ser usados em qualquer direção, mas sua principal área de atuação é quando colocado de frente para o público, usado como PA. (CARRIZO et al., 2011).

Seu padrão de saída vertical bastante estreito e direcional, ajuda na hora de alinhar o sistema para o público sem ter perdas de som, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Direcionalidade do Sistema



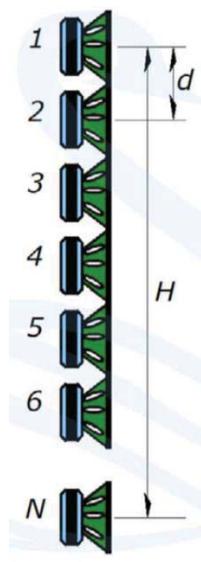
Fonte: Adaptado de Cysne (2016, pg. 1433)

O seu funcionamento baseia-se em na criação de uma frente de onda cilíndrica, o que resulta em uma perda 3dB a cada duplicação da distância, uma melhora considerável se compararmos a uma fonte pontual que irradia uma onda esférica e tem uma perda de 6 dB a cada duplicação da distância. (CARRIZO et al., 2011).

2.3.1 Método para Construção da Caixa

Através da Figura 4 podemos equacionar o tamanho que a caixa terá que ter.

Figura 4 - Cluster Vertical



Fonte: Adaptado de Cysne (2016, pg. 1535)

A equação 1 apresenta a altura da caixa pelo tamanho e quantidade dos alto-falantes

$$H = (n - 1)d \quad (1)$$

Onde:

d – Distância entre dois falantes adjacentes qualquer (m)

n – Quantidade de falantes da pilha

H – Altura total da pilha (m)

A equação 2 apresenta o comprimento de onda do som na FLI

$$\lambda = \frac{v}{FLI} \quad (2)$$

Onde

λ – Comprimento de Onda (m)

v – Velocidade do som (m/s)

FLI – Frequência Limiar Inferior (Hz)

Sendo assim a equação 3 apresenta a altura mínima da caixa (2016, pg. 153)

$$H = \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

2.4 SUBWOOFER

Responsável pela execução das frequências mais baixas, as frequências de grave.

2.4.1 Método para Construção da Caixa

O projeto de construção da caixa foi feito através de recomendações do fabricante, onde a mesma é projetada para ter um filtro acústico, sendo que a frequência de corte deste filtro será dada através dos dados do alto-falante que foi escolhido para o projeto.

2.5 PRÉ-AMPLIFICADOR

Um pré-amplificador é um amplificador que amplifica um sinal eletrônico para uma posterior amplificação ou processamento.

Se o sinal de entrada tiver força o suficiente o pré-amplificador quase não terá trabalho, porém se o sinal for fraco como é o caso em nas saídas de microfones o pré-amplificador se faz muito necessário. (FONSECA, 2007).

Além de deixar o sinal em níveis aceitáveis para poder ser trabalhado, os pré-amplificadores podem ter funções adicionais como equalização. (FONSECA, 2007).

Neste caso eles farão também um controle de volume dos dois sinais de entrada do sistema.

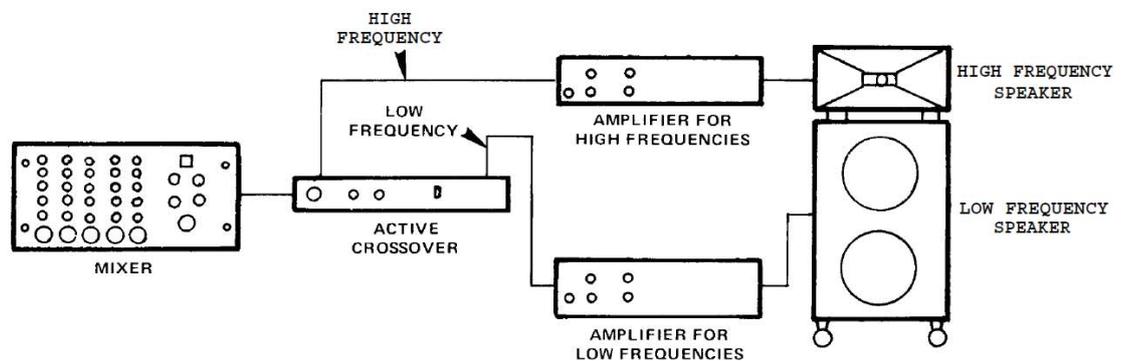
2.6 CROSSOVER

Um crossover é um dispositivo que separa o sinal de áudio proveniente *full-range* (contém todos os espectros de frequência do sinal recebido) em baixa e alta frequência para sistemas bidirecionais ou em baixa, média e alta frequências para sistema de três vias. O crossover se faz necessário para separar e direcionar o sinal de áudio para os amplificadores ou diretamente para os alto falantes dependendo do tipo do crossover. (ELECTRO VOICE, 1979)

2.6.1 Tipos de Crossover

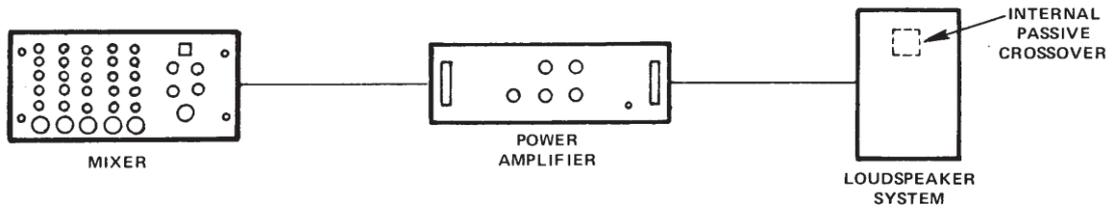
Os crossovers podem ser classificados em dois tipos ativos como visto na Figura 5 ou passivo como visto na Figura 6, que está diretamente relacionado ao tipo de filtro que será usado no crossover. Isto será visto na seção 2.7.

Figura 5 - Sistema com um Crossover Ativo



Fonte: Electro Voice (1979, pg. 3)

Figura 6 - Sistema com um Crossover Passivo



Fonte: Electro Voice (1979, pg. 2)

2.7 FILTROS

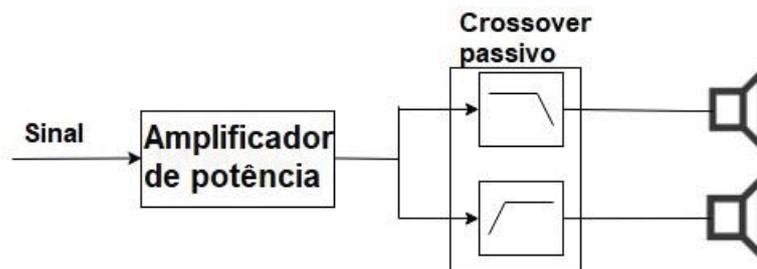
Os filtros são peças fundamentais para o funcionamento do crossover pois eles permitem a divisão de frequências e distribuição destas para os drivers executantes.

2.7.1 Filtros Passivos

Filtro que é constituído de resistores capacitores e indutores. (BOYLESTAD, 2004).

Geralmente de grande tamanho, por se tratar somente dos componentes citados acima, além de serem mais caros e não permitirem muitos ajustes. São indicados para aplicações onde o sinal aplicado é de maior potência (em aplicações de áudio, após os amplificadores de potência). Como a situação mostrada na Figura 7.

Figura 7 - Sistema com Filtros Passivos



Fonte: O autor (2017)

2.7.2 Filtros Ativos

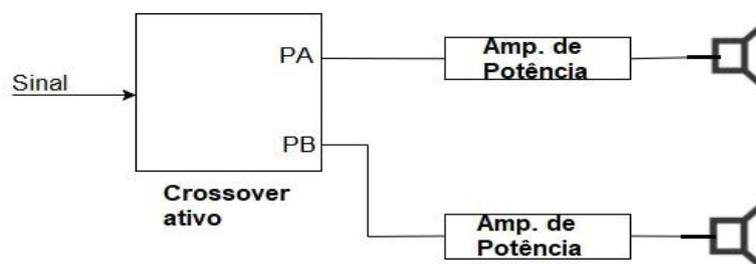
Além conterem resistores, capacitores e indutores como os filtros passivos contém também transistores e amplificadores operacionais. (BOYLESTAD, 2004).

Os filtros ativos possuem uma série de vantagens em relação aos filtros passivos, tais como: diminuição de peso e volume, facilidade de projeto de filtros complexos através da ligação em cascata e possibilidade de amplificação do sinal de entrada (ganho). (PERTENCE JÚNIOR, 1998).

No entanto ele requer alguns cuidados pois sua resposta em frequência fica limitada a capacidade de resposta dos amplificadores operacionais, exigindo assim uma busca e estudo das características dos mesmos. (PERTENCE JÚNIOR, 1998).

Na Figura 8 vimos um sistema de crossover que está montado com filtros ativos e também um sistema em estado de bi-amplificação.

Figura 8 - Sistema com Filtros Ativos



Fonte: O autor (2017)

2.7.2.1 A topologia Linkwitz-Riley

O crossover Linkwitz-Riley é um típico filtro de utilização em sistemas de áudio profissional, seu nome se deve aos engenheiros Siegfried Linkwitz e Russ Riley. O primeiro mostrou a ineficiência do filtro Butterworth no comportamento da acústica, referindo-se a defasagem existente quando diferentes drivers acústicos operam juntos em uma determinada faixa de frequência. Já o segundo apresentou uma solução de cascatear dois filtros Butterworth de segunda ordem, o que determinaria a inserção dos sinais em fase por deslocar ambas as frequências em 360 graus. (TOBEY et al, 1981).

As principais características que distinguem o crossover Linkwitz-Riley dos demais são vistas na frequência de crossover, quando é analisado seu padrão de radiação.

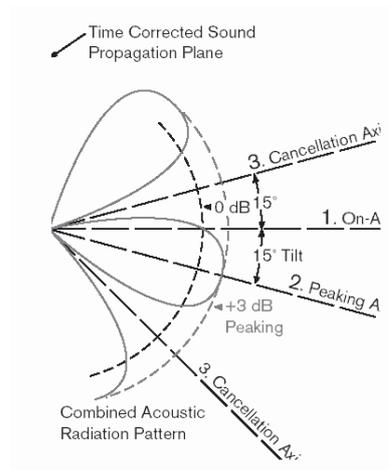
Estaremos levando em consideração apenas a propagação vertical do som, pois todos os crossovers possuem uma boa resposta no plano horizontal, porém Siegfried Linkwitz foi o primeiro a se preocupar com a região das frequências na região de crossover, fora desse eixo principal. (BARROS, sem data).

Stanley P. Lipshitz, utilizou do termo *lobing error* para demonstrar esta característica de cruzamento.

A definição de *lobing error* origina-se da análise dos gráficos polares das saídas acústicas, na frequência de crossover de um sistema de 2 vias. Se a soma acústica não for perfeita é formado um lóbulo fora do eixo, variante com a frequência e com severo *peaking* de amplitude. (BARROS, sem data).

A Figura 9 mostra a visão lateral do padrão de radiação acústico de um sistema de 2 vias onde as duas vias trabalham na mesma frequência.

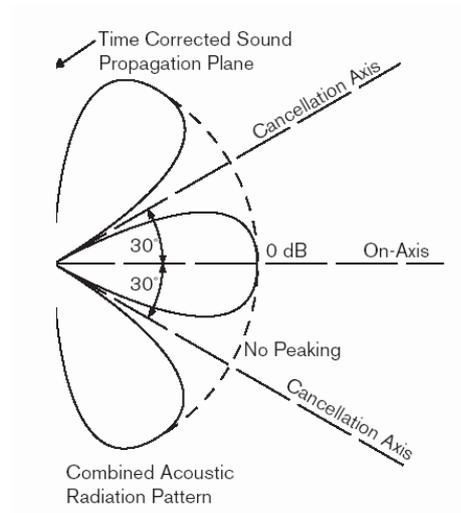
Figura 9 - Vista lateral de um padrão de radiação acústica de um filtro Butterworth.



Fonte: Adaptado de Barros (sem data, pg. 1)

A Figura 10 mostra a visão lateral para um filtro *Linkwitz-Riley*.

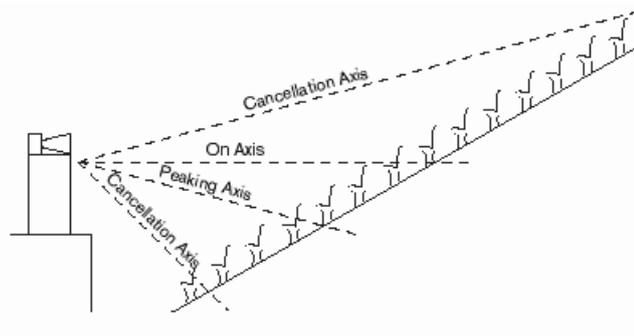
Figura 10 - Vista lateral de um padrão de radiação acústica de um filtro Linkwitz-Riley



Fonte: Adaptado de Barros (sem data, pg. 2)

Para se ter uma total idéia da vantagem de utilizar-se o filtro *Linkwitz-Riley*, suponha que teremos em uma sala de cinema um sistema de áudio de 2 vias com crossover de alinhamento Butterworth, toda vez que o som que estiver sendo reproduzindo estiver na faixa da frequência de crossover, alguma parte da platéia terá o som com um ganho de 3dB, sendo isto nada agradável a seus ouvidos, a figura 11 ilustra essa situação.

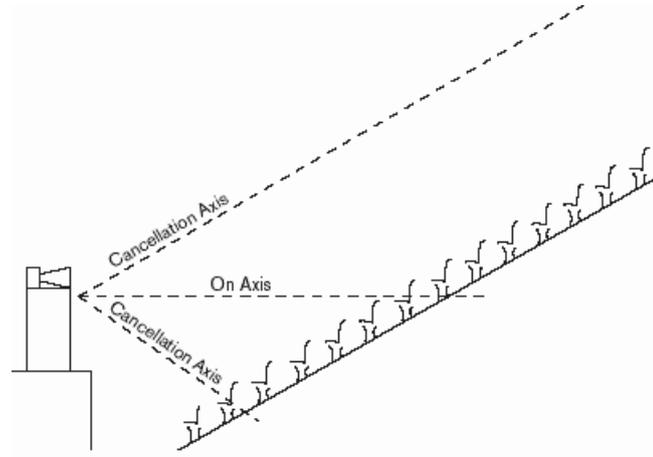
Figura 11 - Platéia com crossover de alinhamento Butterworth



Fonte: Adaptado de Barros (sem data, pg. 2)

Agora suponha que teremos o mesmo sistema de áudio e a mesma sala de cinema, porém agora o sistema utiliza um crossover de alinhamento *Linkwitz-Riley*.

Figura 12 - Platéia com crossover de alinhamento Linkwitz-Riley

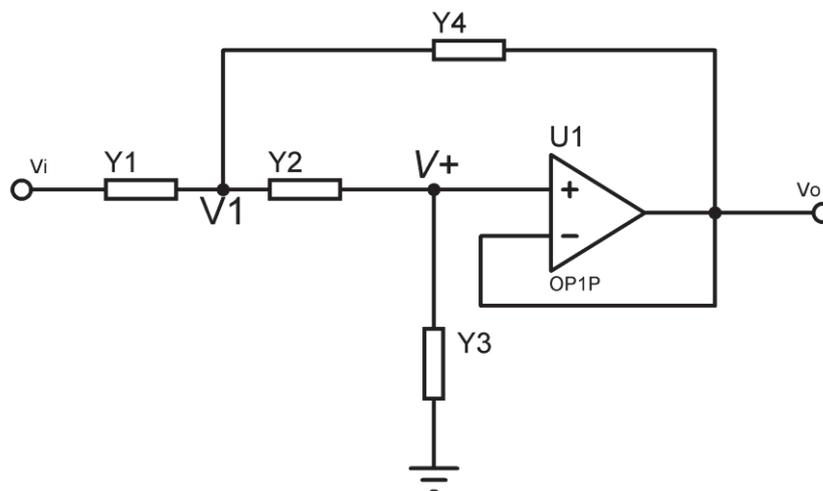


Fonte: Adaptado de Barros (sem data, pg. 3)

A Figura 12 nos mostra que com um crossover de alinhamento *Linkwitz-Riley* não existem *peakings* quando o sistema de áudio está operando na frequência de crossover.

Um tipo de filtro *Linkwitz-Riley* é o chamado filtro LR-2, filtro este de 2ª ordem e 40dB/década de declive, a Figura 13 mostra o modelo deste filtro.

Figura 13 - Circuito clássico Linkwitz-Riley segunda ordem com admitâncias



Fonte: O autor (2017)

A equação 4 mostra a dedução matemática da função de transferência do circuito mostrado na figura 13, utilizando o teorema de Millman.

$$V1 = \frac{y1 * Vi + y4 * Vo + V+ * y2}{y1 + y2 + y4} \quad (4)$$

Devido ao curto circuito virtual do amplificador operacional, em seu modelo ideal, $V_o = V^+ = \frac{y_2 * V_i}{y_2 + y_3}$, substituindo o valor de V^+ na equação 4 tem-se

$$V_1 = \frac{y_1 * V_i}{y_1 + y_2 + y_4} + V_o * \frac{y_4 * y_2}{y_1 + y_2 + y_4} \quad (5)$$

e

$$V_o = \frac{y_1 * y_2 * V_i}{(y_1 + y_2 + y_4)(y_1 + y_3)} + V_o * \frac{(y_4 + y_2) * y_1}{(y_1 + y_2 + y_4)(y_1 + y_3)} \quad (6)$$

Sendo assim,

$$V_o \left[1 - \frac{y_1 * (y_2 + y_4)}{(y_1 + y_2 + y_4)(y_2 + y_3)} \right] = \frac{y_1 * y_2}{y_1 + y_2 + y_4} * V_i \quad (7)$$

para se obter a função de transferência basta fazer V_o/V_i , obtendo-se assim

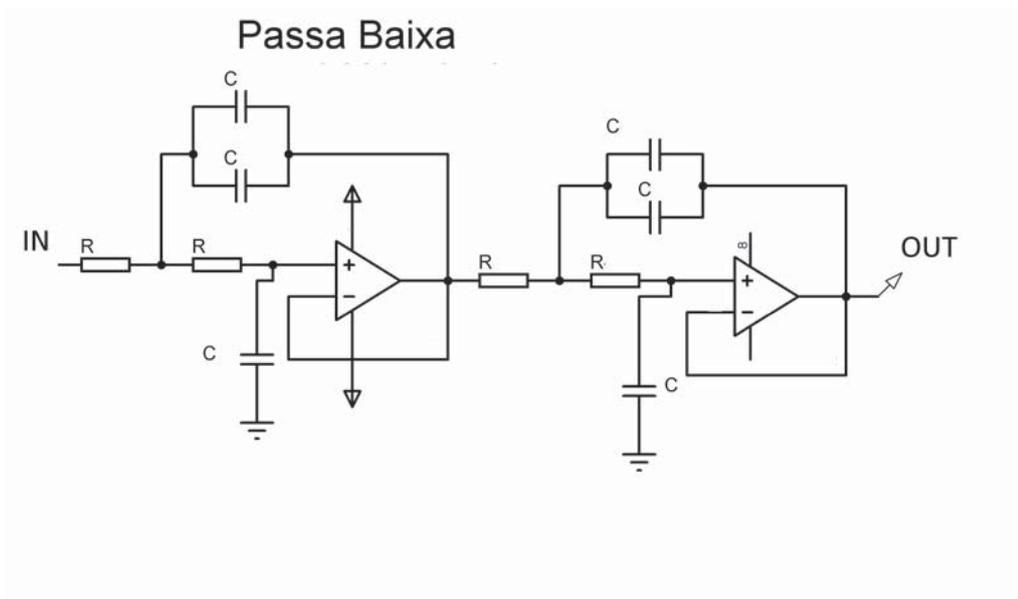
$$H1 = \frac{V_o}{V_i} = \frac{y_1 * y_2}{y_1 * y_2 + y_1 * y_3 + y_3 * y_2 + y_4 * y_3} \quad (8)$$

Com base na função de transferência mostrada na equação 8, pode-se adequar a configuração dos componentes (resistivos e capacitivos) em função das admitâncias para que se obtenha um filtro passa baixa ou passa altas.

Para a obtenção de um filtro linkwitz-Riley de 4ª ordem basta inserir em cascata dois circuitos como o mostrado na Figura 13.

A Figura 14 mostra o circuito de um filtro LR-4 na configuração Passa-Baixas. (Linkwitz, sem data).

Figura 14 - Filtro passa baixa LR-4



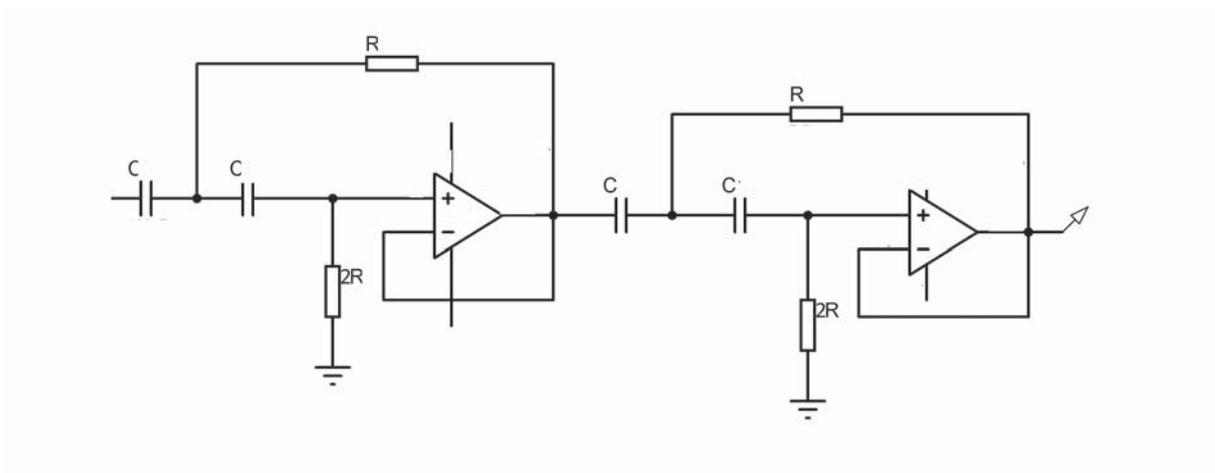
Fonte: O autor (2018)

A equação 9 mostra como se obtém o valor da frequência de crossover do circuito mostrado na figura 14. (Linkwitz, sem data).

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{2} * R * C} \quad (9)$$

A Figura 15 demonstra um filtro linkwitz-Riley de 4ª ordem na configuração passa alta. O valor para o cálculo da frequência de crossover é igual o calculado para o filtro na configuração passa baixa, conforme é mostrado na equação número 9. (Linkwitz, sem data).

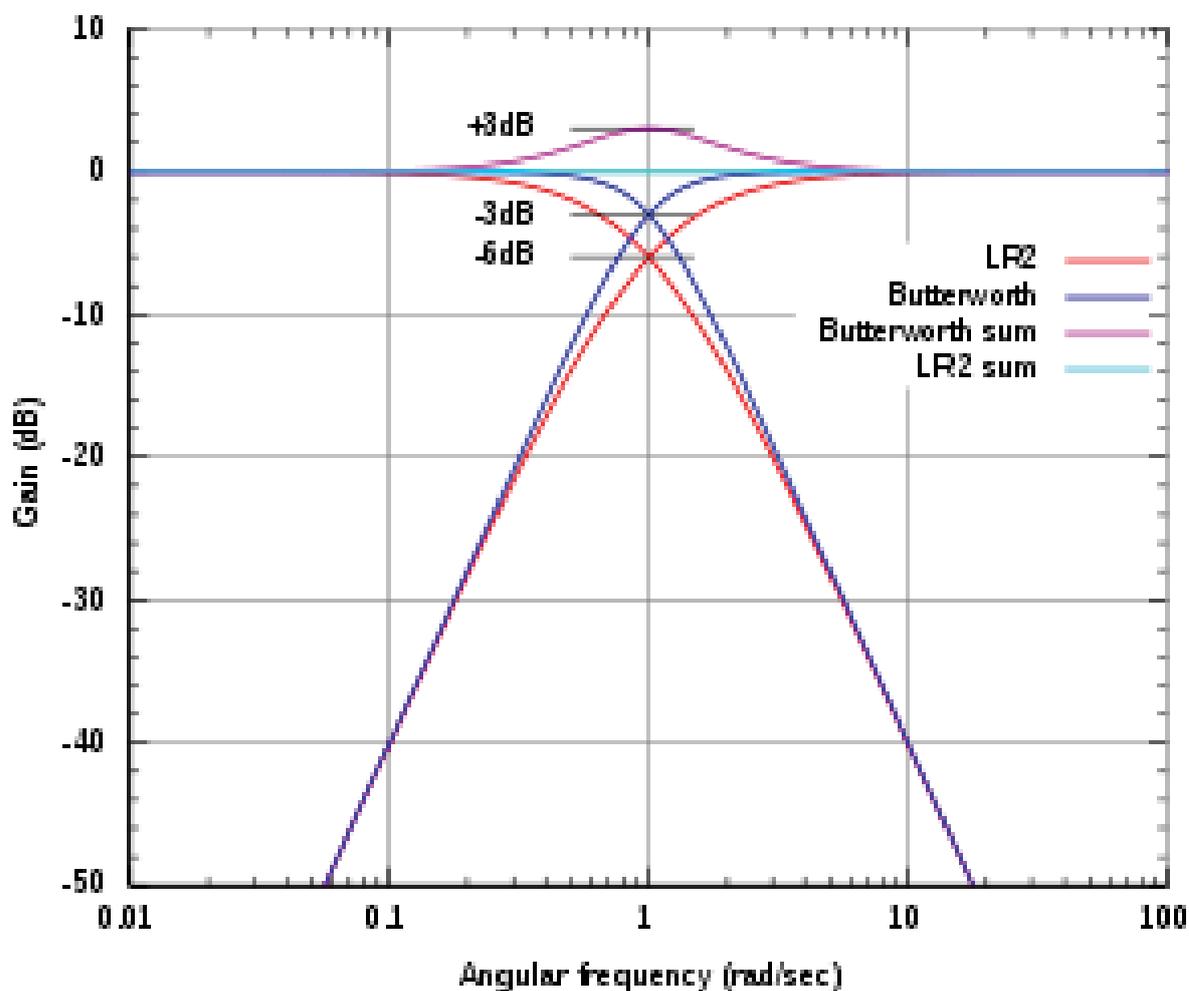
Figura 15 - Filtro passa alta LR-4



Fonte: O autor (2018)

A Figura 16 mostra a resposta em frequência dos filtros *Linkwitz-Riley*

Figura 16 - Resposta em Frequência Filtro Linkwitz-Riley



Fonte: Site Rane (2017)

2.8 AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

Na eletrônica voltado ao áudio há vários equipamentos para diversas funções. Os amplificadores de potência, cuja principal função dos amplificadores de potência é fornecer um grande sinal e grande potência oriundo de pequenos sinais. (BORTONI, sem data).

O que determina a classe de operação de um amplificador é a forma de como os transistores do estágio de saída trabalham, sempre esperando-se obter maior rendimento e menor distorção.

2.8.1 O Amplificador Classe AB

Para um melhor entendimento do funcionamento do estágio de saída classe AB é necessário explanar-se as classes A e B.

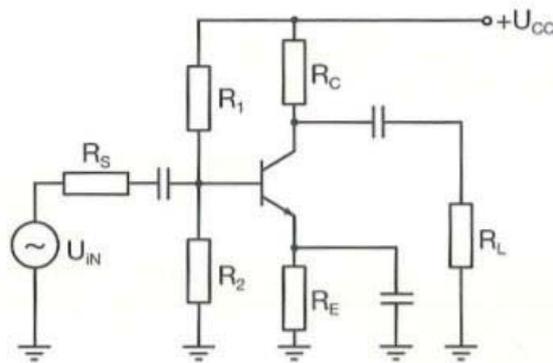
2.8.1.1 Amplificador Classe A

O amplificador classe A, deve ter em seu sinal de saída uma cópia exata do sinal visto em sua entrada, neste caso o transístor opera durante todo o ciclo do sinal de entrada, a distorção do sinal de saída é evitada se o transístor opera em sua região linear. (CORRADI, sem data).

Esta classe apresenta a melhor característica de linearidade, porém o menor rendimento devido ao fato que o mesmo necessita de uma corrente de polarização durante todo ciclo do sinal de entrada. (BORTONI, sem data).

A figura 17 demonstra um amplificador classe A polarizado em emissor comum.

Figura 17 - Circuito Amplificador Classe A

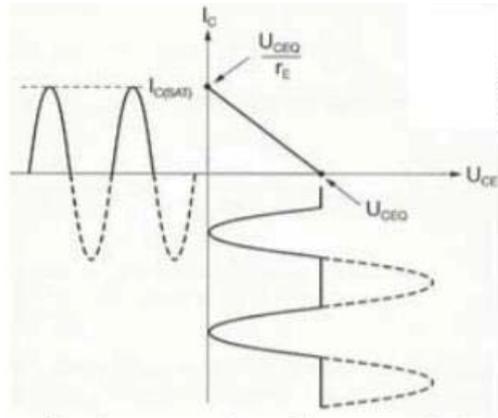


Fonte: Corradi Junior (sem data, pg. 140)

2.8.1.2 Amplificador Classe B

Na classe B são utilizados dois transístores de saída, pois quando um transístor opera na classe B ele corta um semiciclo em sua saída, como pode ser observado na figura 18. Para evitar uma grande distorção no sinal de saída usa-se dois transístores em um arranjo *push-pull*, onde cada transistor opera em um semiciclo diferente. (CORRADI JUNIOR, sem data).

Figura 18 - Gráfico da corrente e da tensão em um amplificador classe B

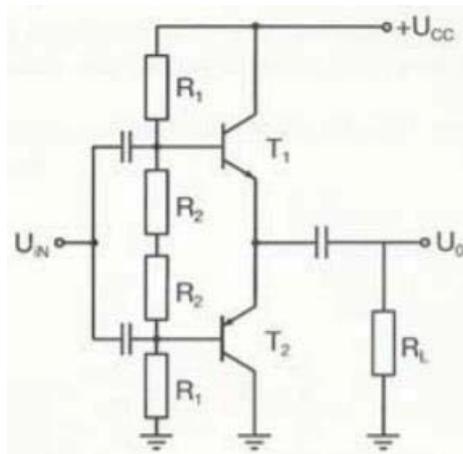


Fonte: Corradi Junior (sem data, pg. 140)

Também é caracterizado por não possuir corrente de polarização nos transistores de saída, obtendo-se assim um rendimento ideal de 78.5%, porém se o nível do sinal vai baixando as distorções vão aumentando. (BORTONI, sem data).

A Figura 19 demonstra o circuito de um amplificador classe B operando em *push-pull*.

Figura 19 - Circuito Amplificador Classe B



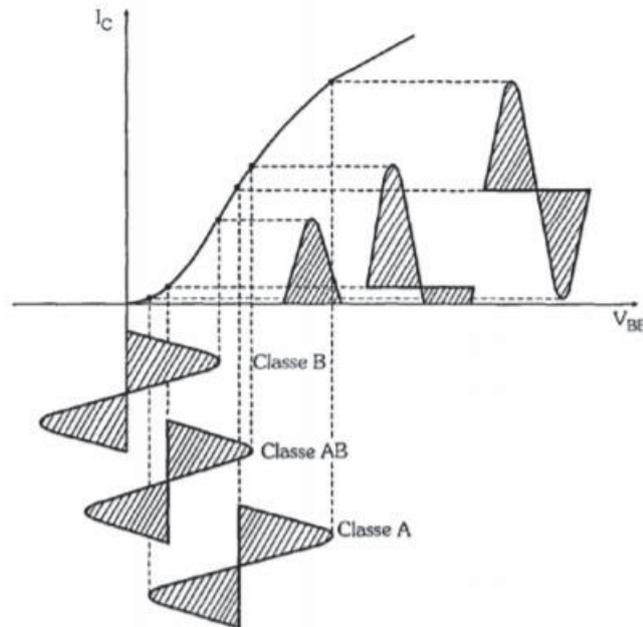
Fonte: Corradi Junior (sem data, pg. 146)

2.8.1.3 Amplificador Classe AB

O amplificador classe AB surge como solução para as distorções vistas nos amplificadores B, para corrigir estas distorções é necessário polarizar os transistores um pouco acima do corte, sendo assim este amplificador opera em uma faixa entre as classes A e B (CORRADI JUNIOR, sem data).

A Figura 20 demonstra a região de operação de um amplificador classe AB entre as classes A e B.

Figura 20 - Região de atuação amplificadores Classe A, B e AB.

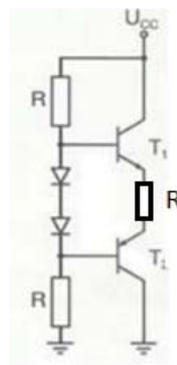


Fonte: Corradi Junior (sem data, pg. 149)

Na operação em classe AB, os transístores operam um pouco acima do corte, o que faz com que mesmo sem sinal aplicado as bases dos transístores, se tenha alguma corrente circulando neles, fazendo com que a corrente no coletor não seja nula, eliminando assim a distorção por transição, um fator indesejável e perceptível a audição humana. (CORRADI, sem data).

Para o manter o ponto Q (ponto de operação) mais estável pode-se utilizar dois diodos de polarização como apresentados na figura 21, porém este processo possui um inconveniente pelo fato da dificuldade de se encontrar diodos com a mesmas características dos diodos emissores dos transistores, mas possuem a vantagem de evitar a deriva térmica.

Figura 21 - Amplificador Classe AB com diodos de polarização

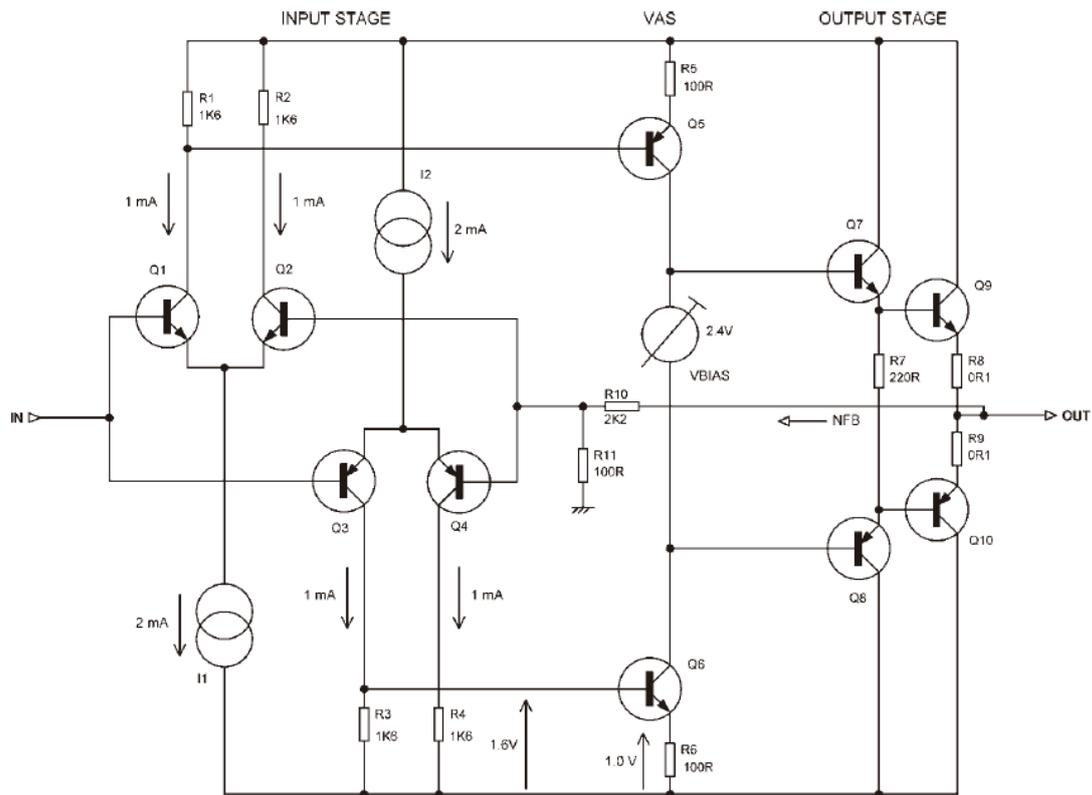


Fonte: Corradi Junior (sem data, pg. 149)

2.8.1.3.1 Estágio Duplo de Entrada

Quando dois estágios diferenciais de entrada são utilizados, um como complemento do outro, estes dois sinais ficam referenciados as tensões de alimentação superior e inferior. A Figura 22 mostra um exemplo deste circuito com valores apenas representativos.

Figura 22 - Estagio Duplo de Entrada



Fonte: Self (2009, pg. 134)

O uso de duas entradas ao invés ajuda em uma redução na distorção do estágio de entrada do amplificador. Se corretamente dimensionados cada par diferencial trabalha apenas com um semiciclo da onda do sinal de entrada. (SELF,2009).

2.8.2 O Amplificador Classe D

Os amplificadores que operam em classe D possuem grande diferença dos demais que trabalham em outras classes. Na classe não existem dispositivos de saída operando em modo linear, como visto nas outras classes, mas sim trabalhando na região de corte (*turn off*) e

saturação (*turn on*), conectado a saída diretamente aos extremos da fonte alimentação, isso ocorrendo em uma frequência de centenas de quilohertz.

Quando o sinal de entrada é variado (positiva ou negativamente), a tensão média de saída varia proporcionalmente ao sinal na entrada, sendo esses valores médios observado no filtro passa-baixas. A saída do amplificador classe D é proporcional à tensão da fonte de alimentação. Os amplificadores classe D cujo estágio de saída possui a configuração ponte completa funcionam como os amplificadores lineares, e a energia flui no sentido fonte de alimentação carga. (SELF, 2006).

2.8.2.1 Tecnologia

A teoria do amplificador classe D é bastante simples, porém na vida real têm-se algumas complicações.

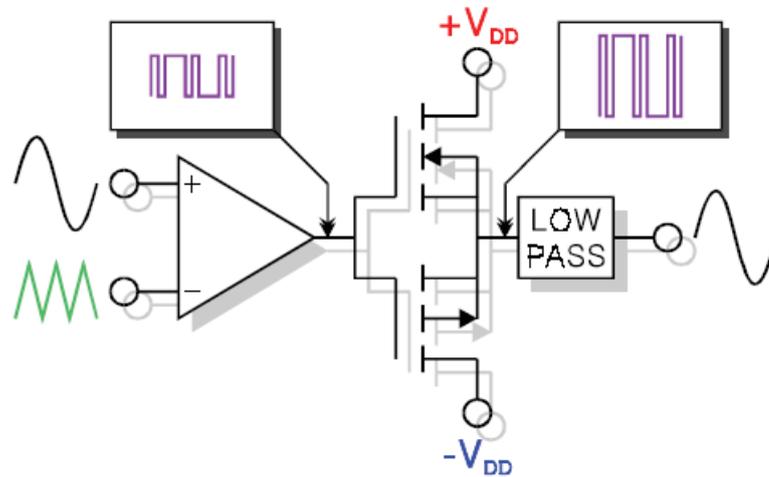
O *gate* dos FETs possuem grande resistência de entrada, mas ainda assim é necessárias grandes correntes de entrada nas altas frequências, isso dá ao fato de os FETs possuírem alta capacitância de entrada, tornando assim o circuito de *Gate Drive* muito importante em se tratando de um projeto de amplificador classe D. Em amplificadores de alta potência é utilizado diodos *schottky* externos conectados da carga para fonte para bloquear pulsos de retorno gerado por cargas indutivas.

O sinal PWM a ser gerado para o acionamento dos *Gate Drivers* é gerado por meio de um comparador diferencial. Uma entrada recebe o sinal de áudio que será amplificado e a outra entrada recebe um sinal em forma de onda dente de serra ou triangular, onde esta tem que possuir uma frequência de chaveamento que respeite o teorema de *Nyquist*. (REGINATTO, 2008).

Após o chaveamento dos FETs faz-se necessário um filtro de saída passa-baixas para transformar o sinal PWM novamente em senoidal e também a prevenção da radiação da frequência de chaveamento amplificador para o cabo externo em que é ligado o alto-falante. Para amplificadores classe D com ponte completa (BTL) geralmente usa-se filtros Butterworth de 4ª ordem. (REGINATTO, 2008).

A Figura 23 demonstra o princípio de funcionamento de um amplificador classe D.

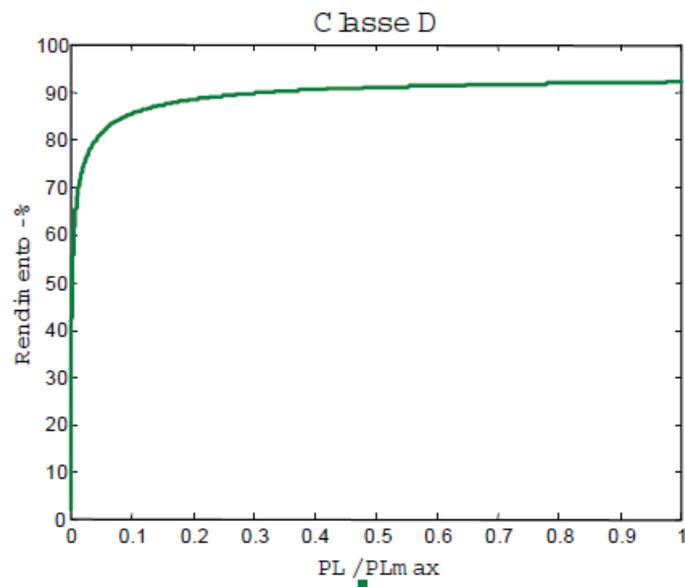
Figura 23 - Amplificador Classe D meia ponte



Fonte: Bortoni (sem data, pg. 4)

Essa classe de operação possui um rendimento bastante elevado perto dos 90% como mostrado no gráfico da Figura 24, porém sua qualidade de baixa distorção é inferior aos amplificadores lineares. (BORTONI, sem data).

Figura 24 - Gráfico do Rendimento do Amplificador classe D



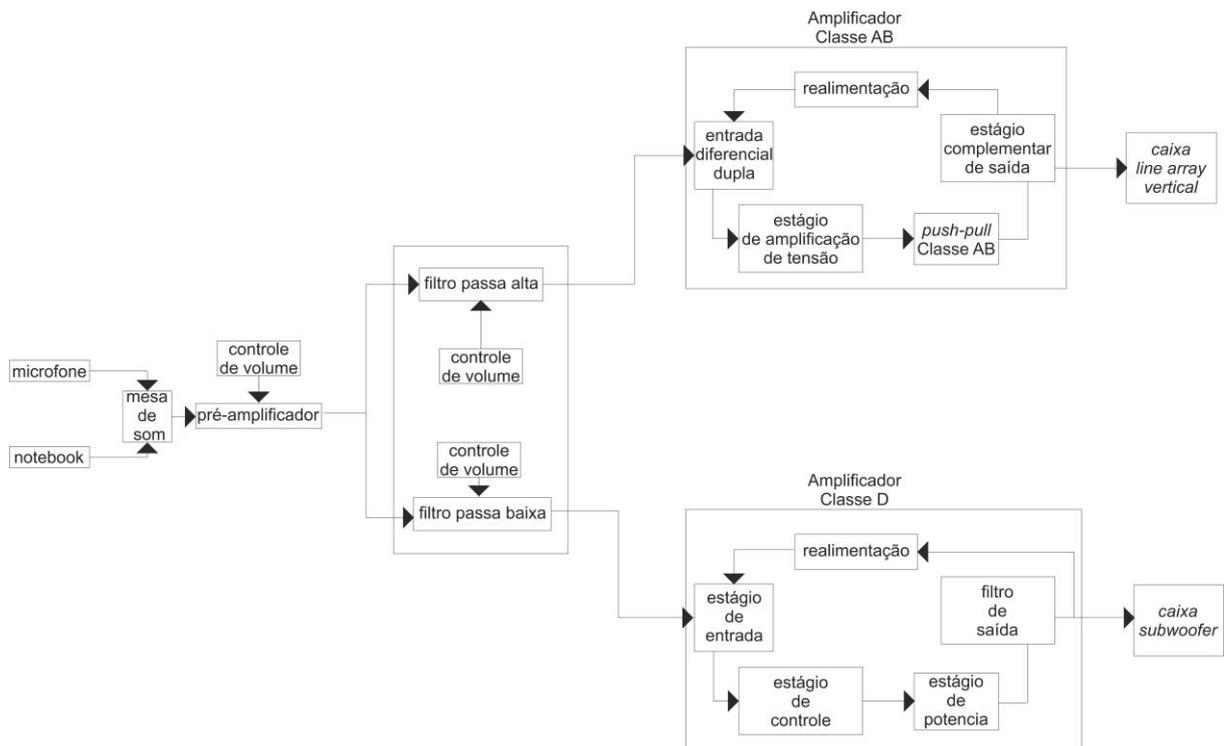
Fonte: Bortoni (sem data, pg. 5)

3 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO

Este capítulo trata das características de planejamento e desenvolvimento do projeto. Descreve os objetivos do projeto, a metodologia de desenvolvimento e os fatores relevantes a escolha dos componentes.

Na Figura 25 apresenta o diagrama do projeto.

Figura 25 - Diagrama do projeto



Fonte: O autor (2018)

3.1 DEFINIÇÕES DO PROJETO

Para a composição do sistema PA apresentado na Figura 25 são necessárias algumas atribuições ao projeto, que serão descritas a seguir.

3.1.1 Microfone

Como o projeto visa uma aplicação para eventos corporativos de pequeno porte, bom como palestras, para maior comodidade e facilidade foi escolhido um microfone sem fio.

O modelo escolhido é PGXD24/BETA58 –X8B da marca SHURE, mostrado a seguir na Figura 26.

Figura 26 - Microfone Sem Fio



Fonte: O autor (2018)

3.1.2 Mesa de Som

A mesa de som para a finalidade do projeto não necessita ter muitas entradas de áudio, bem como seus recursos de tratamento para cada canal, devido ao tipo de evento que o sistema foi projetado geralmente ter um notebook ligado e um ou dois microfones.

Por isso a mesa escolhida foi a MG10XU da YAMAHA. A mesa conta com 10 canais de entrada, sendo destes 4 canais mono, e 3 canais estéreo, possui também com 2 canais de saída estéreo, uma saída de monitor (retorno). (YAMAHA, 2013).

A Figura 27 mostra a mesa de som utilizada.

Figura 27 - Mesa de Som YAMAHA



Fonte: O autor (2018)

3.1.3 Caixa de Som

As caixas de som foi desenvolvida pelo autor desse projeto e será explicada no tópico 4.4.

3.1.3.1 Alto-falante

O alto falante escolhido para a caixa de som responsável por reproduzir as frequências graves foi o alto falante de 12" modelo SH-1230J de 800W impedância de 8 ohms faixa de atuação de 30Hz a 2000Hz e principal frequência de ressonância 40Hz. (SHAMSONIC, sem data).

As Figuras 28 e 29 mostram o alto falante.

Figura 28 – Alto-Falante Grave visão frontal



Fonte: O autor (2018)

Figura 29 – Alto-Falante Grave visão posterior



Fonte: O autor (2018)

Os alto-falantes para a caixa responsável por reproduzir as frequências médias e agudas são os falantes de 4" modelo YC-91A da marca BLG com 25W RMS mostrado na Figura 29, devido as medições apresentarem uma resposta muito baixa nas alta frequências foi necessária a colocação de um *tweeter* de 25W mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Alto-Falante 4"



Fonte: O autor (2018)

Figura 31 - *Tweeter*



Fonte: O autor (2018)

3.1.4 Amplificador Classe AB

Os cálculos e circuitos do amplificador será explicado no tópico 4.5.

3.1.4.1 Transistores

Os transistores para a configuração de entrada diferencial dupla, foram os transistores 2N5401(PNP) e o transistor 2N5551(NPN), nos quais os dois formam um par complementar.

Para a parte do ganho de tensão, bem como a parte do estágio de saída *push-pull* foram escolhidos os transistores 2SA1837(PNP) e 2SC4793(NPN) onde eles são pares complementares e com aplicação para amplificadores de áudio. (TOSHIBA, 2006)

Para o estágio complementar de saída foram escolhidos os transistores 2SA1943(PNP) e 2SC5200(NPN), pares complementares garantido uma alta fidelidade para áudio. (TOSHIBA,2016).

3.1.5 Amplificador Classe D

O circuito será explicado no item 4.6

3.1.5.1 Circuito Integrado

Para ser feita a comparação do sinal de áudio e acionamento dos gates foi usado em CI próprio para amplificadores classe D, o IRS2092 específico para amplificadores classe D em meia ponte. CI este mostrado na Figura 32.(INTERNATIONAL RECTIFIER, 2013).

Figura 32 - IRS2092



Fonte: INTERNATIONAL RECTIFIER (pag. 1, 2013)

3.1.5.2 Transistores

Os transistores escolhidos foram os IRFB4227 MOSFET otimizados para amplificadores classe D em meia ponte. (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2007).

3.1.6 Crossover

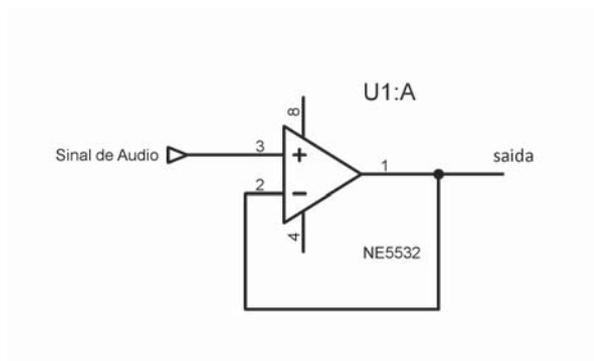
Para os filtros ativos bem como o buffer de entrada foi utilizado o amplificador operacional NE5532 com aplicação para áudio segundo o fabricante. (TEXAS INSTRUMENTS, sem data).

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 PRÉ AMPLIFICADOR

Como o sinal de áudio já vira em níveis aceitáveis da mesa de som, para o circuito pré-amplificador foi utilizado um buffer, devido ao seu ganho unitário apenas para isolar a mesa de som dos circuitos de amplificação, circuito mostrado na Figura 33.

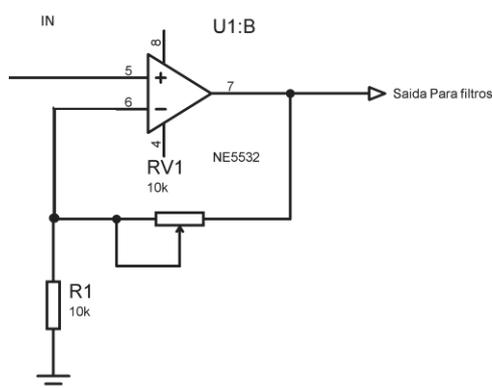
Figura 33 - Buffer de Entrada



Fonte: O autor (2018)

Para o controle de volume geral do sistema foi utilizado um circuito na configuração amplificador não inversor. Mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Amplificador Não Inversor



Fonte: O autor (2018)

Para calcularmos o ganho deste amplificador usamos a seguinte fórmula

$$A_v = \frac{RV1}{R1} + 1 \quad (10)$$

Sabendo que os valores de RV1 e de R1 são iguais a $10K\Omega$ o ganho máximo que o amplificador tem é de duas vezes o valor da entrada.

4.2 CROSSOVER

Para o crossover foi utilizado dois filtros da topologia Linkwitz-Riley de 4ª ordem sendo um deles na configuração passa-baixa e outro na configuração passa alta. A frequência de crossover escolhida para os dois filtros é a mesma de 150Hz. Para o cálculo dos componentes utilizaremos a equação 9 demonstrada no tópico 2.7.1.2

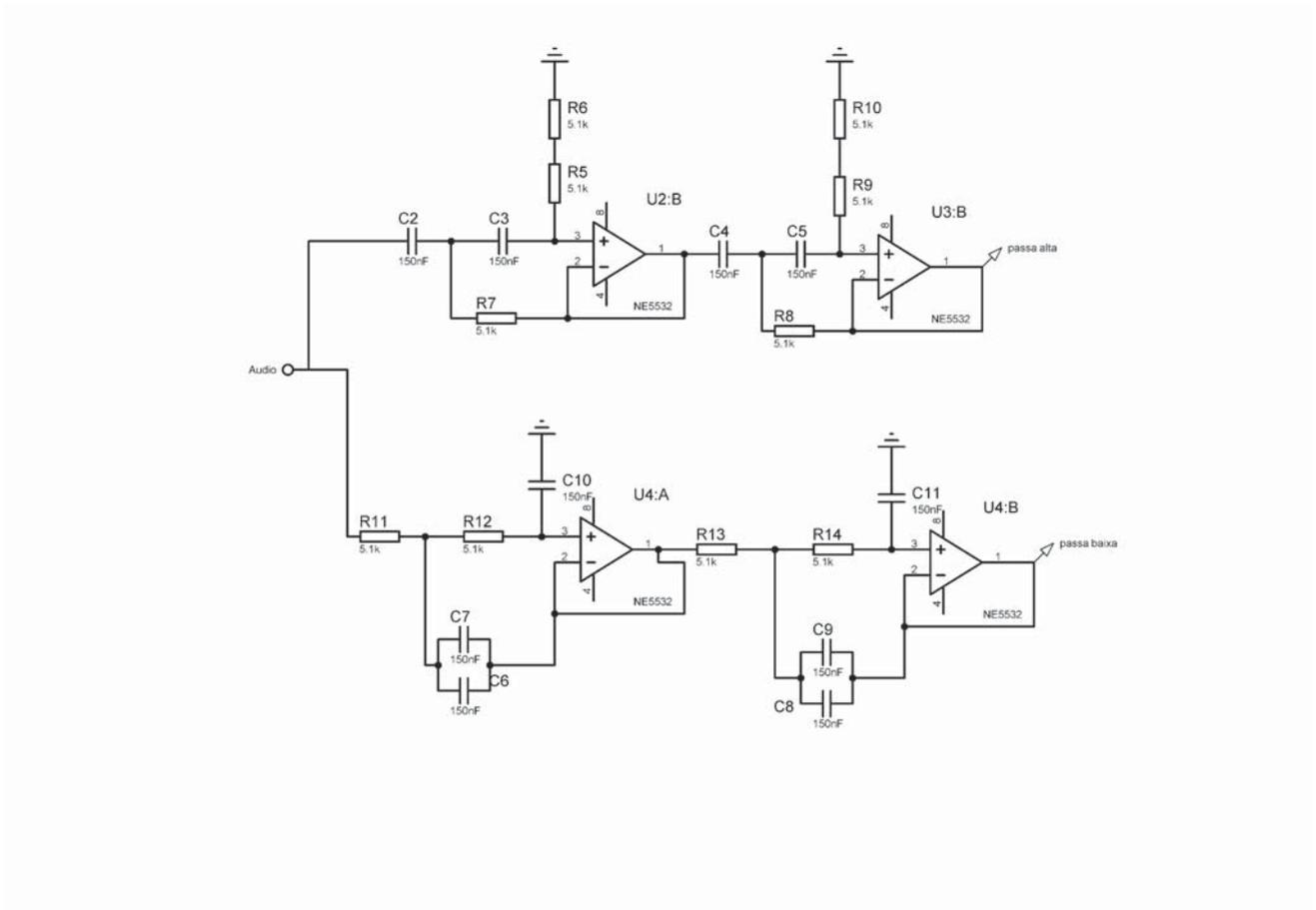
Primeiro foi adotado o valor de um resistor e em seguida calculado o valor do capacitor. O valor adotado do resistor foi o valor de $5.1K\Omega$, substituindo os valores na equação 9 obtemos a seguinte equação: (Linkwitz, sem data)

$$150 \text{ Hz} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{2} * 5,1k * C} \quad (11)$$

Resolvendo a equação número 11 obtemos que o valor do capacitor é de 147,11nF, como não há capacitor com esse valor o valor escolhido foi o capacitor de 150nF. Resultando assim em uma valor de frequência de corte de 147Hz.

A Figura 35 mostra o circuito dos dois filtros, o circuito superior o filtro Linkwitz-Riley passa alta de 4ª ordem e o circuito inferior o filtro Linkwitz-Riley de 4ª ordem passa baixa. (Linkwitz, sem data).

Figura 35 - Filtros LR-4



Fonte: O autor (2018)

Para se ter um pequeno ajuste de crossover foi adicionado na saída de cada filtro um controle de volume independente. Este controle de volume foi feito através de amplificadores inversores, a faixa de ganho dos dois amplificadores inversores forma escolhida de -40dB até 3dB. Para o cálculo do ganho em valor real é necessário transformar o valor que está em dB. Para isso é usado a equação número 12.

$$A_v = 10^{\frac{\text{ganho em dB}}{20}} \quad (12)$$

Substituindo os valores na equação número 12 temos:

$$A_v = 10^{\frac{3}{20}} \quad (13)$$

$$A_v = 1.41 \quad (14)$$

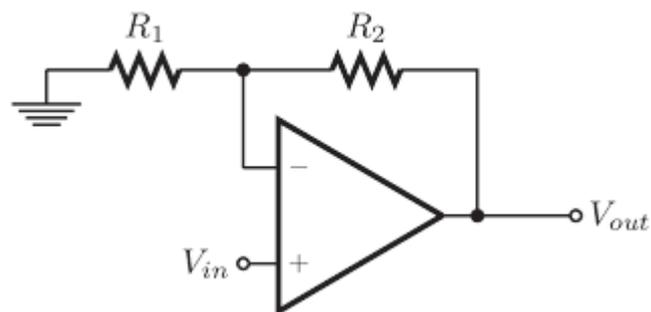
E

$$Av = 10^{\frac{-40}{20}} \quad (15)$$

$$Av = 0.01 \quad (16)$$

Sabendo os valores de ganho desejado, agora utilizamos a fórmula de ganho do amplificador inversor, que para circuito mostrado a seguir na Figura 36 (PERTENCE JÚNIOR, 1998).

Figura 36 - Amplificador Inversor



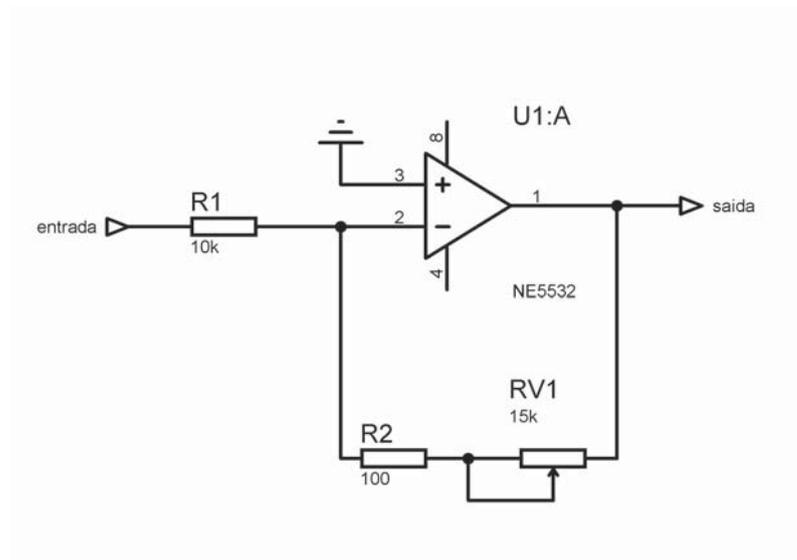
Fonte: O autor (2018)

A fórmula é:

$$Av = -\frac{R2}{R1} \quad (17)$$

Sendo assim conhecendo os valores desejados de ganho a Figura 37 nos mostra o circuito desse controle de volume do crossover. (PERTENCE JÚNIOR, 1998).

Figura 37 - volume independente crossover

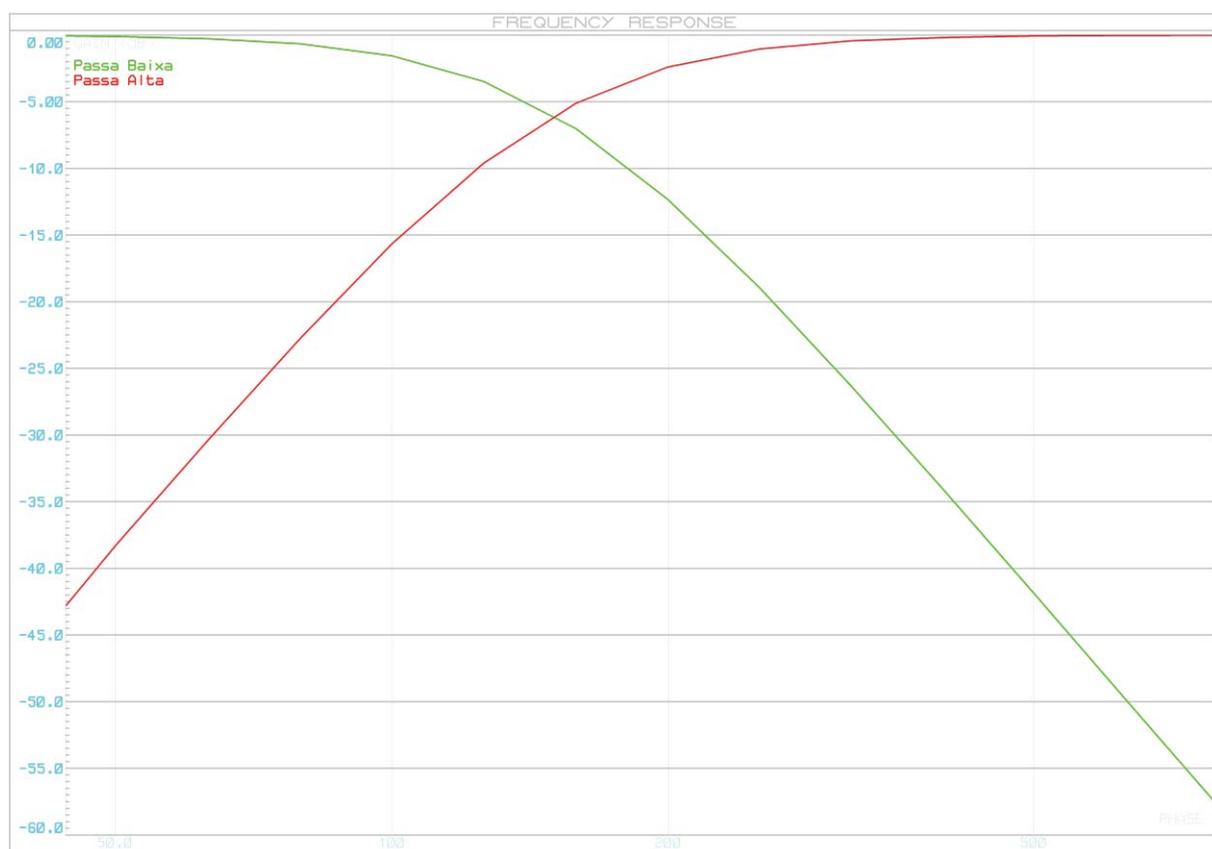


Fonte: O autor (2018)

4.2.1 Simulação

Foi simulado via o software Proteus 8 a resposta em frequência dos filtros demonstrados na Figura 35. A figura 38 mostra essa resposta em frequência.

Figura 38 - Resposta em frequência simulada filtros crossover



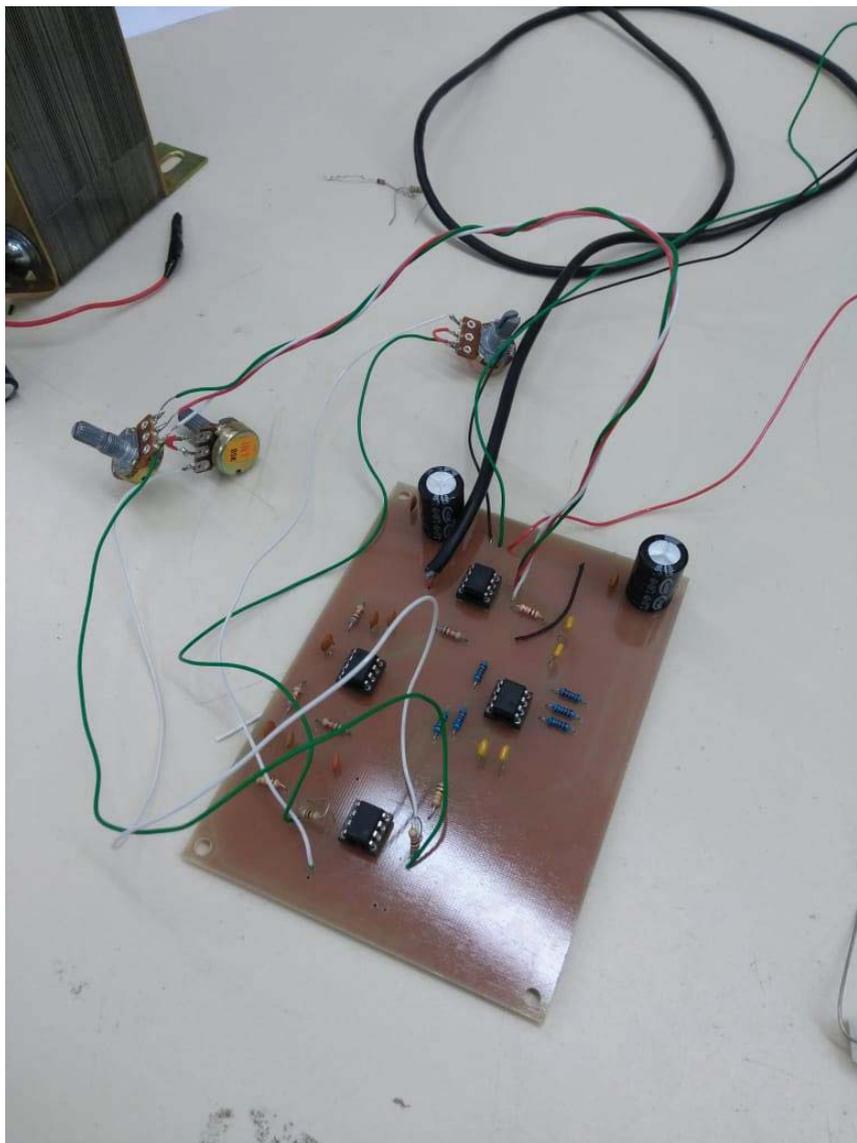
Fonte: O autor (2018)

4.3 PLACA CROSSOVER E PRÉ-AMPLIFICADOR

A placa confeccionada para os tópicos 4.1 e 4.2 foi a mesma uma vez os dois possuem apenas tratamento do sinal de áudio recebido, não possuem nenhuma parte de potência, por isso a mesma possuem um plano de terra.

A Figura 39 mostra a foto da placa construída.

Figura 39 - Placa Entrada Sinal de Áudio e Crossover



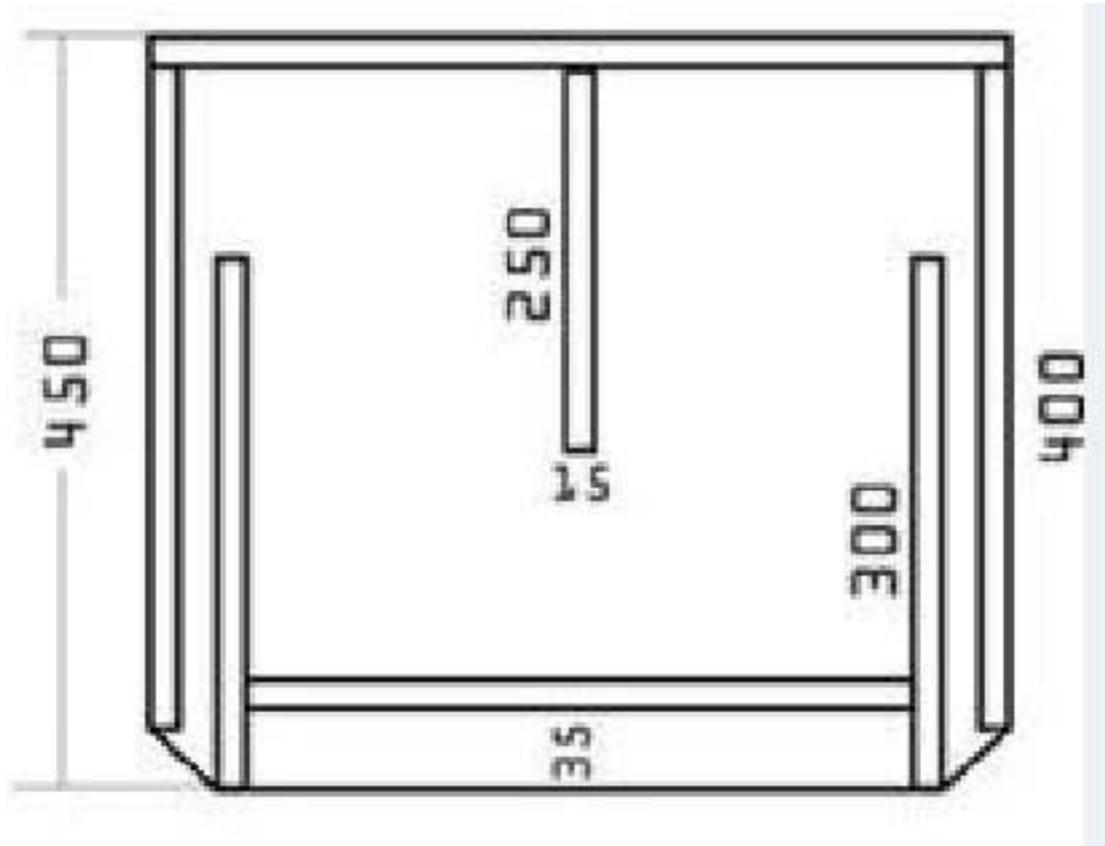
4.4 CAIXAS

4.4.1 Caixa Subwoofer

A caixa *do subwoofer* responsável por reproduzir as frequências graves. A Figura 40 mostra o projeto da caixa com frequência de ressonância de 45Hz e resposta em frequência de 30Hz a 3000Hz, casando perfeitamente com o alto falante escolhido.

A caixa foi toda feita de MDF 15mm, a Figura 40 demonstra uma vista superior do projeto da caixa com suas respectivas medidas em mm.

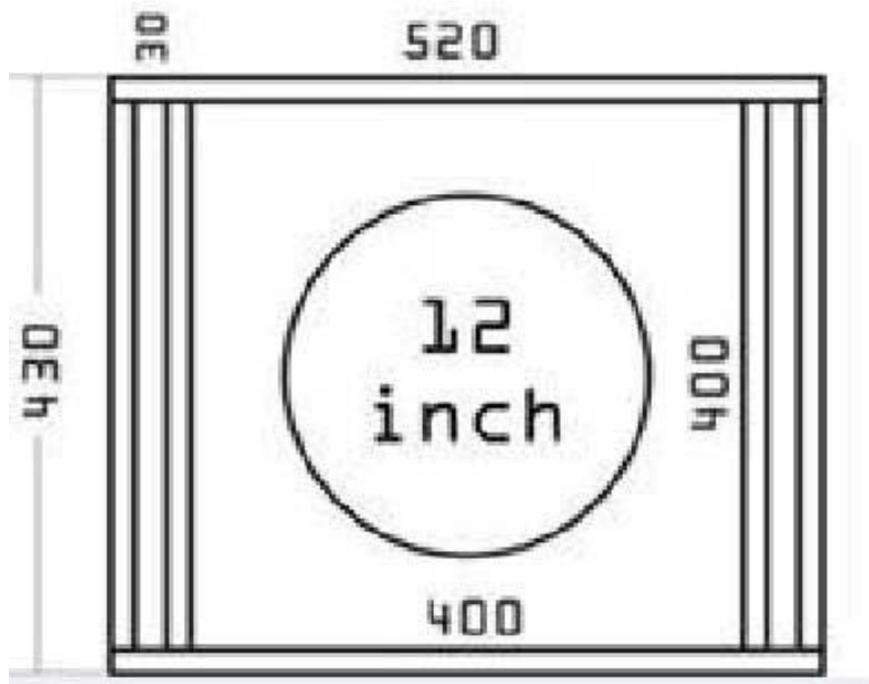
Figura 40 - Vista Superior Caixa Grave



Fonte: SOMBOX (sem data)

A Figura 41 mostra a vista frontal da caixa, com suas respectivas medida em mm.

Figura 41 - Vista Frontal Caixa Grave



Fonte: SOMBOX (sem data)

A Figura 42 mostra uma foto da caixa já montada.

Figura 42- Caixa Grave Montada



Fonte: O autor (2018)

4.4.2 Line Array Vertical

A construção da caixa *line array* vertical se passa pelas equações dispostas no tópico 2.3.1.

A primeira parte da definição para construção da caixa se passa pela frequência utilizada no crossover ou seja os 150Hz. O tamanho da caixa se dará pela equações 2 e 3.

Primeiramente definindo nosso comprimento de onda através da equação 2.

Onde nosso limiar de frequência inferior (FLI) é os 150Hz.

$$\lambda = \frac{340m/s}{150Hz} \quad (18)$$

O comprimento de onda será de 2.26 metros

Pelo equação número 3 temos que a altura da nossa caixa ilustrada na Figura 4 será de 112 centímetros, porém devido aos custos do projeto é adotado $H = \frac{\lambda}{2}$.

Primeiramente foram colocados 6 alto falantes YC-91A dispostos simetricamente na caixa, mas medições realizadas através do software Smaart com um microfone RTA, mostraram que a resposta em frequência da mesma não era aceitável como mostra a figura 43.

Figura 43 - Medição Caixa Line Sem Tweeter

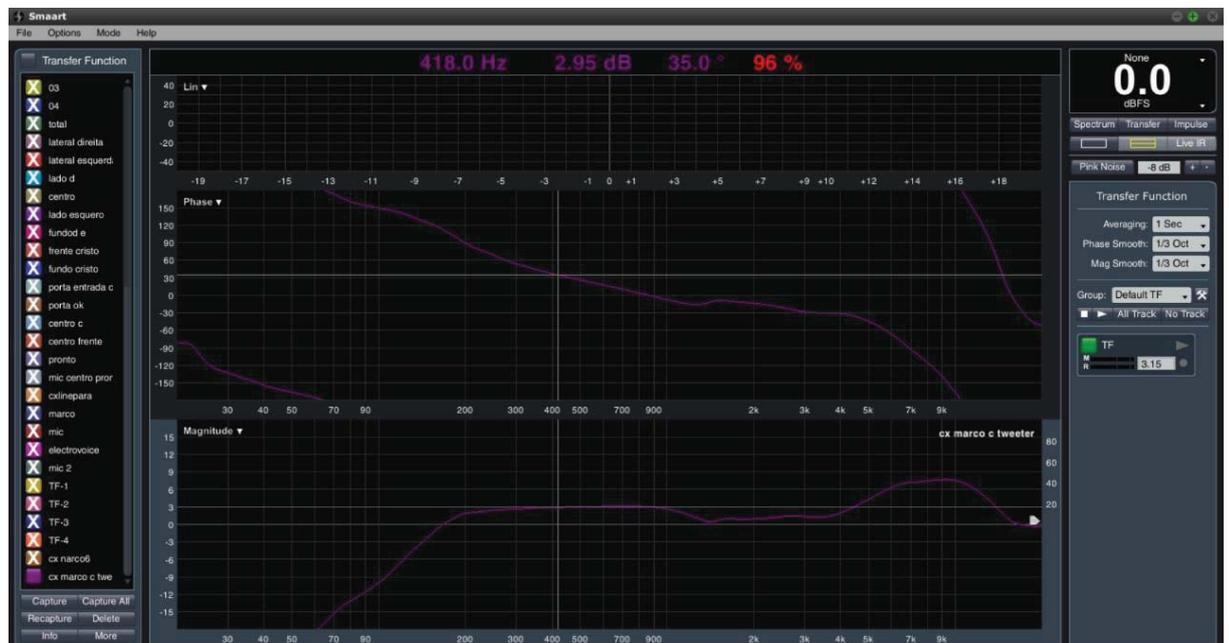


Fonte: O autor (2018)

Por isso foi adicionado um tweeter acrescentando um tamanho maior da caixa sendo a altura H final demonstrada na Figura 4 de 69 centímetros.

A Figura 44 demonstra a resposta em frequência da caixa com o tweeter adicionado.

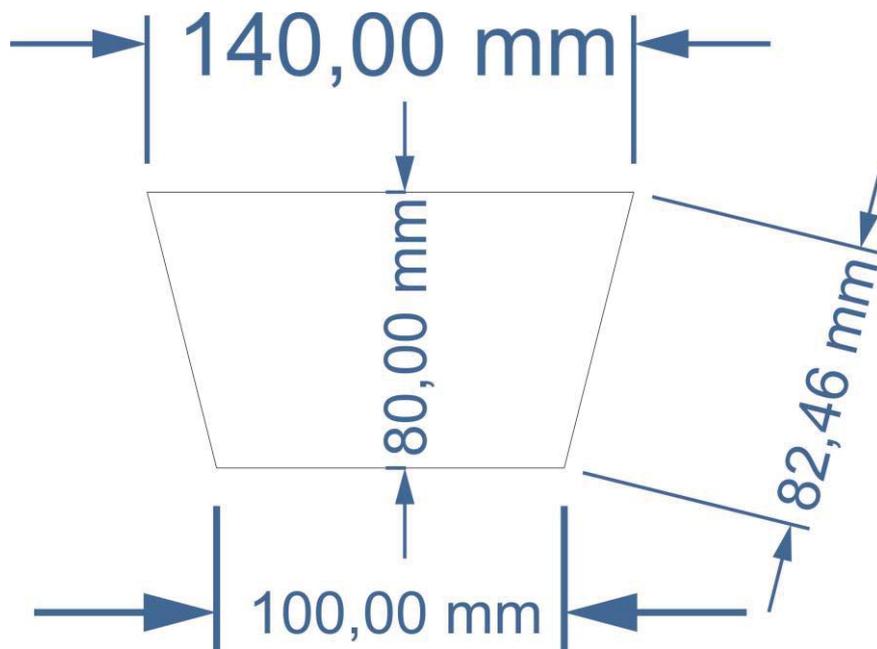
Figura 44 - Resposta em frequência caixa line com tweeter



Fonte: O autor (2018)

A Figura 45 mostra a vista superior da caixa.

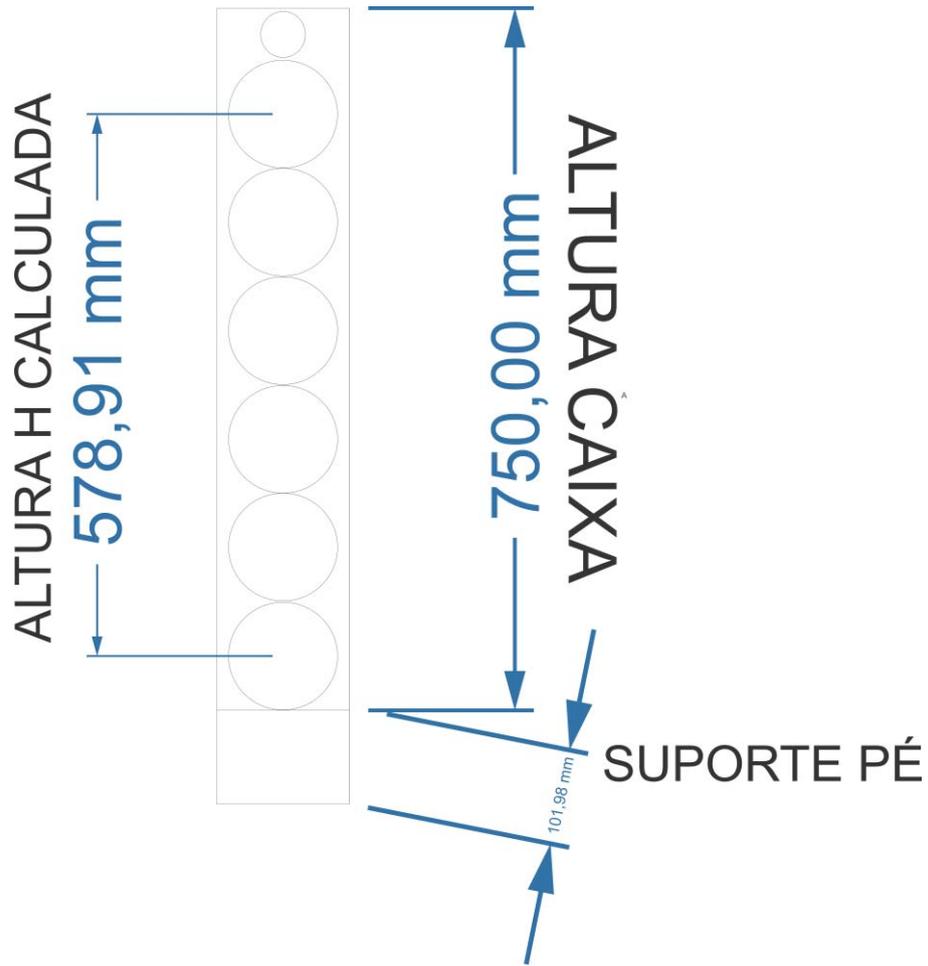
Figura 45 - Vista Superior Line Array



Fonte: O autor (2018)

A Figura 46 mostra a visão frontal da caixa

Figura 46 - Visão Frontal Line Array



Fonte: O autor (2018)

A Figura 47 mostra uma visão frontal da caixa finalizada.

Figura 47 - Caixa Line Array Vertical Finalizada



Fonte: O autor (2018)

Totalizando uma potência total da caixa de 175 Watts RMS e uma impedância de aproximadamente 5 ohms devido a ligação dos alto falantes ser constituída da seguinte maneira 3 pares dos alto falantes ligados em série, e esses 3 pares ligados em paralelo.

O estágio de entrada é representado pelo divisor de tensão entre R1 e R2 e pelos transistores Q10, Q11, Q14 e Q15 que formam o estágio de dupla entrada.

Os pares Q12 e Q13, e Q8 e Q9, são as fontes de corrente para alimentação do estágio duplo de entrada.

Q1 e Q2 caracterizam o ganho de tensão (VAS).

Q3 caracteriza o multiplicador de VBE.

Q4 e Q5 caracterizam o estágio de saída push-pull classe AB.

Q6 e Q7 caracterizam o par complementar de saída.

R37, R36, R35, R34 caracterizam a realimentação.

Todas as referências de componentes feitas nos próximos tópicos se referem a Figura 48.

4.5.1 Estágio duplo de entrada

O estágio duplo de entrada possui um ganho de tensão caracterizado pela resistência de carga do emissor (que inclui $r_{e'}$, resistência intrínseca do emissor), sabe-se que $r_{e'}$ é caracterizado pela corrente do emissor por isso primeiro é necessário calcular essa corrente, como possui uma fonte de corrente fixa, através dos pares de transistores Q12 e Q13, Q8 e Q9, calcularemos apenas a corrente de um par pois o princípio de funcionamento é o mesmo e os circuitos são iguais.

A fonte de corrente é feita através do transistor Q8 que força um VBE de aproximadamente 680mV em cima do resistor R20 de 100Ω, forçando um fluxo de corrente de 6.8mA, esta corrente é dividida igualmente para cada transistor, sendo assim cada transistor possui uma corrente de 3.4mA. (SELF,2006).

Com a corrente de 3.4mA, o valor de $r_{e'}$ é dado por V_T que é de 26mv dividido pela corrente do emissor. Neste caso o valor de $r_{e'}$ será:

$$r_{e'} = \frac{26mV}{3.4mA} \quad (19)$$

$$r_{e'} = 7.64\Omega \quad (20)$$

Portanto a resistência intrínseca total será de duas vezes $r_{e'}$, será de 15.28Ω.

Assumindo um β do transistor infinito e sendo a resistência de carga caracterizada pelo R24 teremos que ganho de tensão do estágio de entrada, neste caso chamada de *IPS gain*, será:

$$IPS\ gain = \frac{2200\Omega}{15.28\Omega + 56\Omega} \quad (21)$$

$$IPS\ gain = 30.86 \quad (22)$$

Na prática esse ganho é reduzido pelo fato de o β do transistor para via de cálculos ser 50 dado pelo *datasheet*.

Sendo assim:

$$IPS\ gain = \frac{2200\Omega}{(15.28\Omega + 56\Omega) * \beta} \quad (23)$$

$$IPS\ gain = 0.617 \quad (24)$$

4.5.2 Estágio de Ganho de Tensão

Estágio caracterizado pelos transistores Q1 e Q2 da Figura tem seu ganho calculado da mesma forma que o estágio de entrada.

Como o esquemático utilizado para o projeto do amplificador se baseia em SELF (2009), e o mesmo não apresenta explanação para cálculo deste ganho, os ajustes de ganho foram feitos por tentativa e erro.

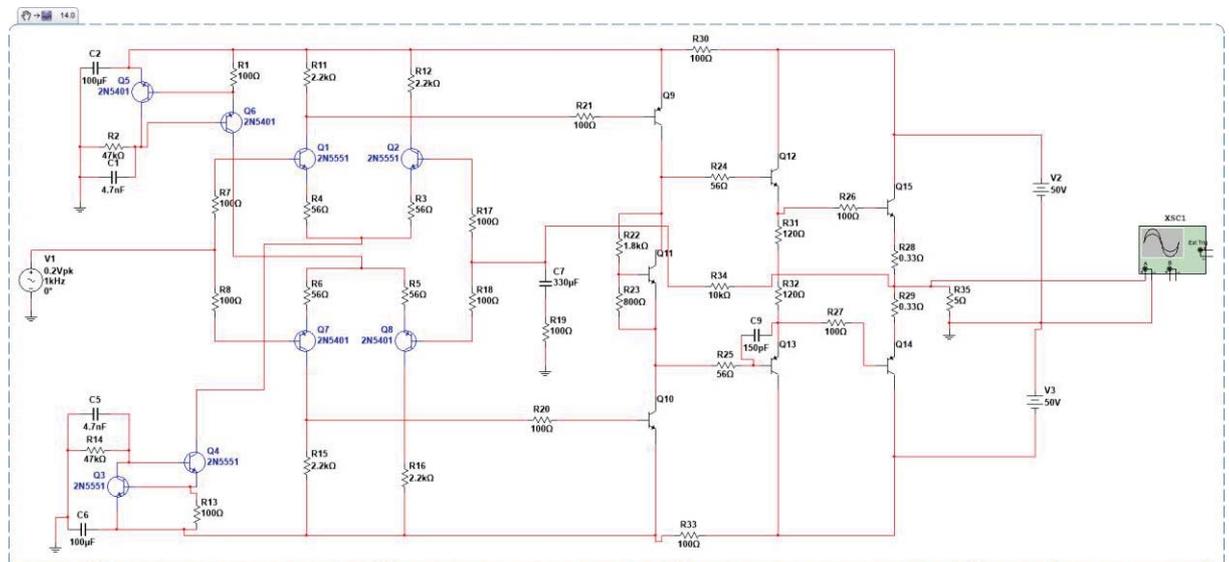
4.5.3 Estágio de Saída

O estágio de saída configurado pelo *push-pull* e pelo par complementar possui ganho de tensão unitário apenas contribui com a corrente de saída.

4.5.4 Simulação

A simulação foi realizada no software Multisim, o circuito simulado difere um pouco do circuito montado, pois o software não possuía alguns transistores utilizados no projeto, por isso foram utilizados transistores ideais. O circuito simulado é apresentado na Figura 49.

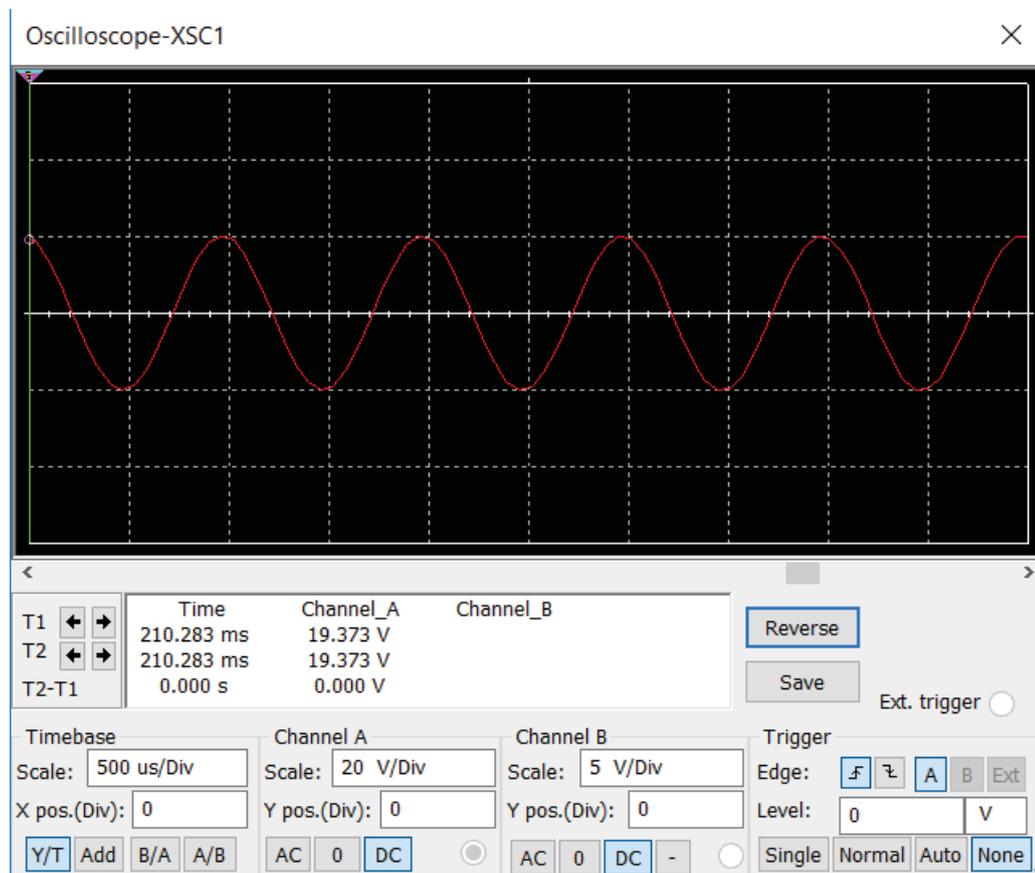
Figura 49 - Simulação Classe AB



Fonte: O autor (2018)

A Figura 50 mostra a saída do amplificador simulado.

Figura 50 - Saida amplificador simulação



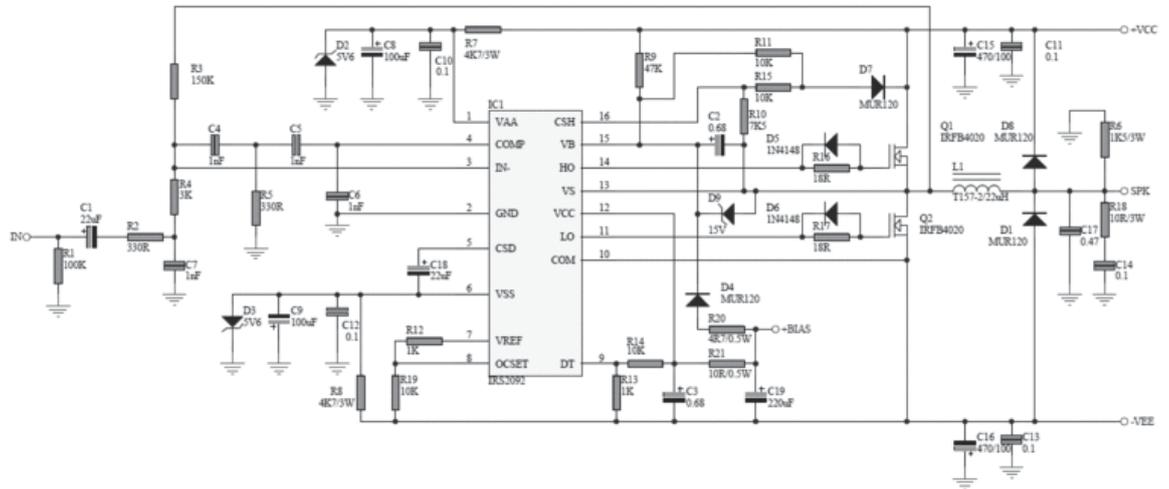
Fonte: O autor (2018)

4.6 AMPLIFICADOR CLASSE D

O amplificador classe D foi feito através do CI IRS2092, CI este desenvolvido para amplificadores classe D, contando com comparador e gate driver internos, a montagem de seu circuito foi feita via datasheet.

A Figura 51 mostra o circuito utilizado.

Figura 51 - Amplificador Classe D



Fonte: O autor (2018)

A Figura 52 mostra a placa de circuito impresso do amplificador

Figura 52 - Placa Amplificador Classe D



Fonte: O autor (2018)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará os resultados obtidos com este projeto.

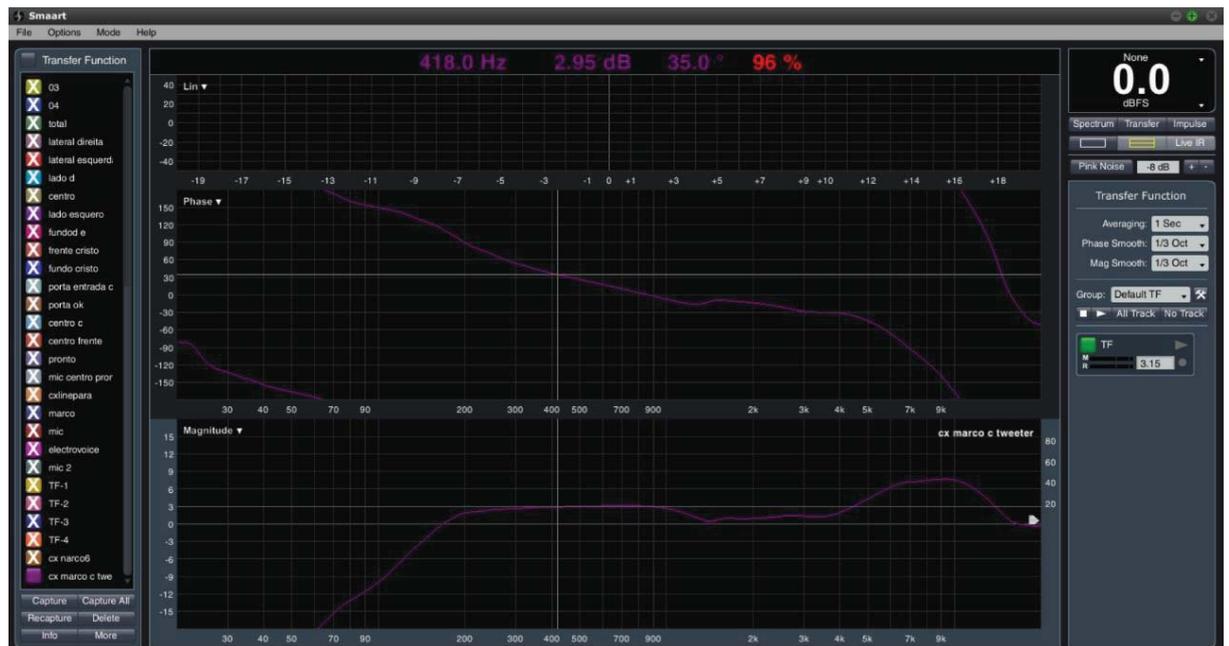
5.1 CROSSOVER

Os filtros foram calculados para uma frequência de corte de 150Hz isso a -6dB.

5.1.1 Passa Alta

A Figura 53 mostra a resposta em frequência do filtro passa alta.

Figura 53 - Resposta em frequência filtro passa alta



Fonte: O autor (2018)

A resposta não é linear devido que a medição foi realizada diretamente no sistema, sendo que a caixa possui um ganho nas altas frequências.

5.1.2 Passa Baixa

Para o filtro passa baixo não é possível fazer essa análise de resposta em frequência via software. Por isso foi achada a frequência de corte via osciloscópio tentando achar a queda de 6dB que é aproximadamente metade de V_{in} , a frequência ficou em torno 170Hz.

5.2 AMPLIFICADOR CLASSE D

O amplificador classe d por motivos não descobertos não funcionou, visto que o circuito é retirado através do *datasheet* do IRS2092, mesmo sendo feitas todas as recomendações de application note existentes, o mesmo não acionava sua saída do gate driver. O IRS2092 possui uma proteção contra sobre corrente está proteção é realizada através de um pino de tensão de referência, onde o mesmo deveria largar uma tensão de 5.1 Volts, porém este pino sempre

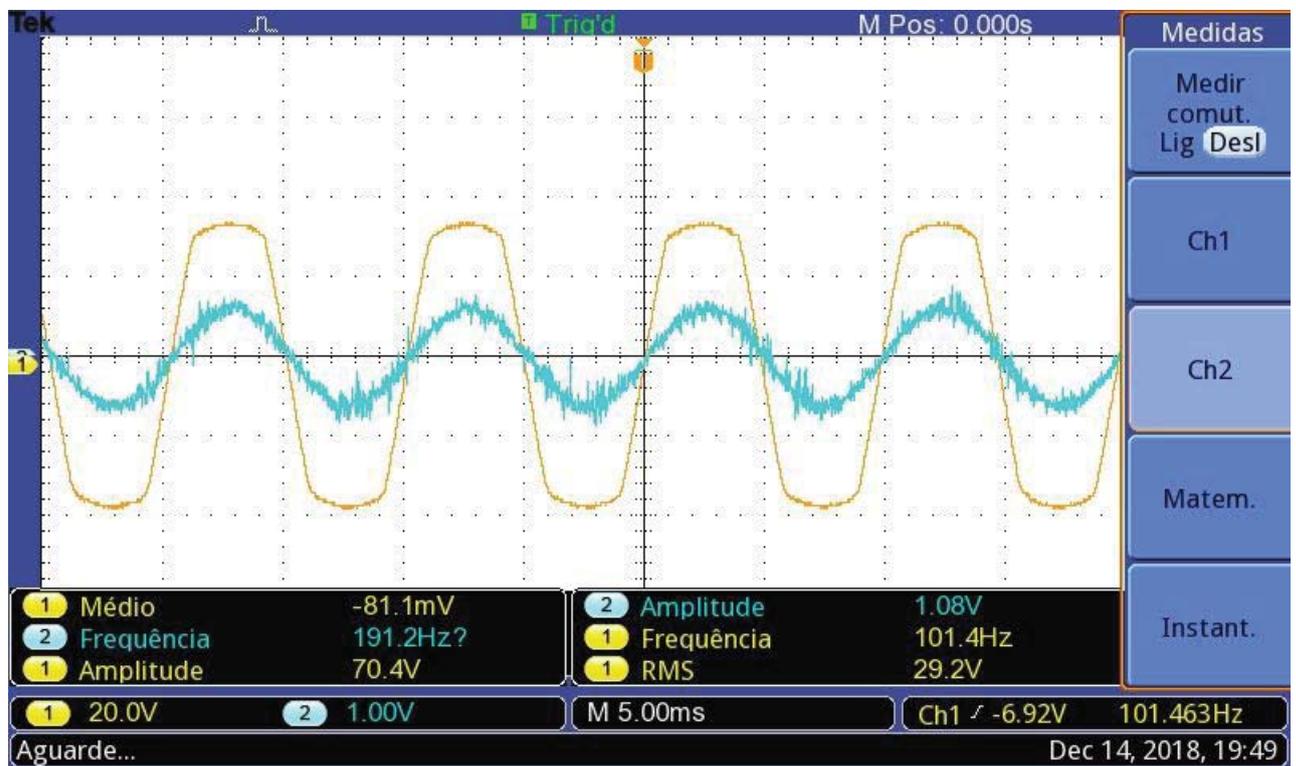
apresentava a tensão de alimentação do circuito, como nunca havia a tensão correta o IRS2092 atuava sua proteção e o circuito de acionamento dos transistores de saída nunca ativava.

5.3 AMPLIFICADOR CLASSE AB

Para a medição dos resultados deste amplificador foram utilizados dois métodos a potência de saída entregue pelo mesmo e sua distorção harmônica total(THD).

A Figura 54 mostra a tensão de saída com uma entrada senoidal de 1Vpp a 100Hz, com uma carga de 175 Watts RMS com uma impedância de 5Ω.

Figura 54 - Saída Classe AB



Fonte: O autor (2018)

Para o cálculo da potência de saída utilizamos a seguinte fórmula:

$$P_{out} = \frac{V_{rms}^2}{R_l} \quad (25)$$

Onde V_{rms} é dado por:

$$V_{rms} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (26)$$

Sendo assim V_{rms} será:

$$V_{rms} = \frac{35 V}{\sqrt{2}} \quad (26)$$

$$V_{rms} = 24.74 V \quad (27)$$

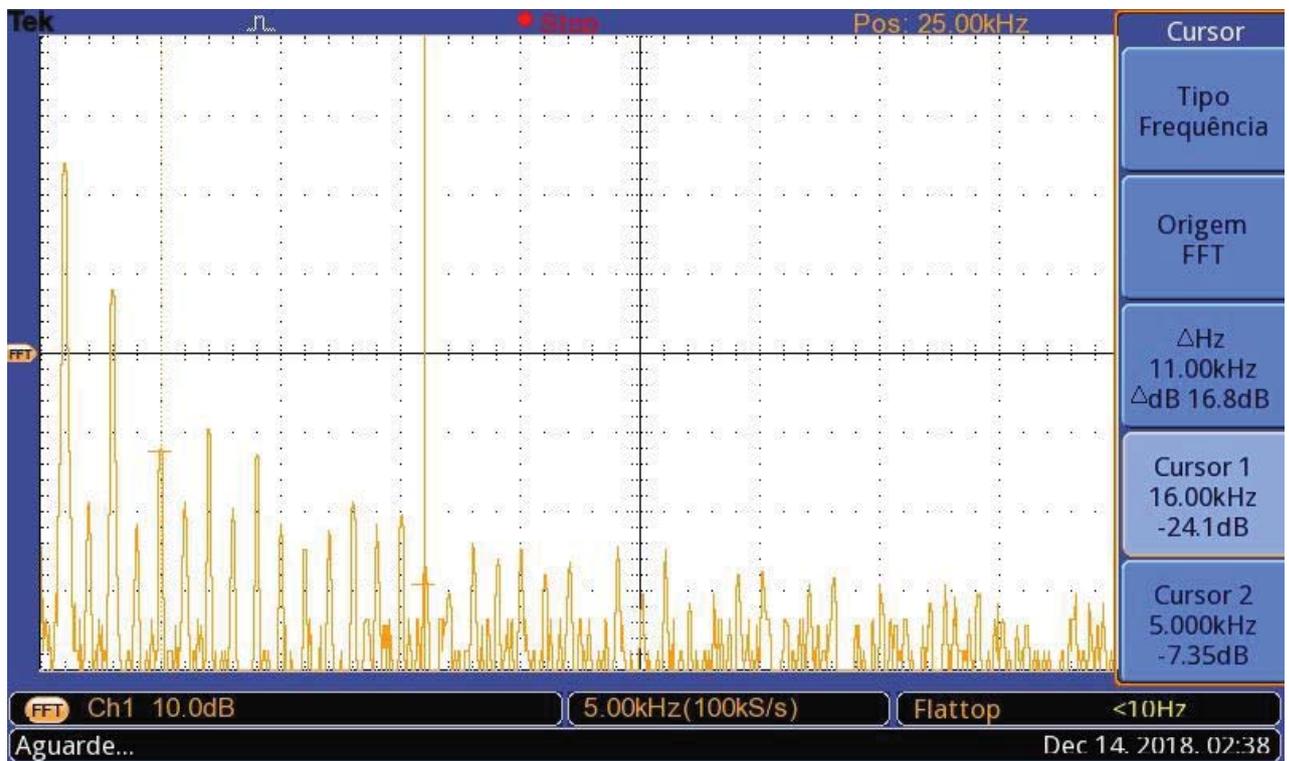
Sabendo então o valor de V_{rms} que é 24 V e que R_1 é 5Ω temos:

$$P_{out} = \frac{24.74^2}{5} \quad (28)$$

$$P_{out} \approx 120w \quad (29)$$

A Figura 55 mostra a Distorção Harmônica Total do amplificador

Figura 55 - Distorção Harmônica Total



Fonte: O autor (2018)

A Figura 56 mostra os valores medidos na Figura 55.

Figura 56 - Medições THD

Frequencia	Valor em dB	Valor Normal
1KHz	29	28.18
2KHz	-13.7	0.206
3KHz	13	4.46
4KHz	-16.5	0.149
5KHz	-7.35	0.429
6KHz	-13.7	0.206
7KHz	-4.55	0.592
8KHz	-14.5	0.188
9KHz	-8.55	0.373
10KHz	-16.9	0.142
11KHz	-19.7	0.103
12KHz	-18.5	0.118
13KHz	-15.3	0.171
14KHz	-22.5	0.074
15KHz	-18.1	0.124

Fonte: O autor (2018)

Na equação número 30 é apresentada a formula para o cálculo da THD.

$$THD = \sqrt{\frac{a1^2+a2^2+a3^2+a4^2...+an^2}{a0^2}} * 100 \quad (30)$$

Sendo assim substituindo os valores medidos teremos

$$THD = \sqrt{\frac{0.206^2+4.46^2+0.149^2+0.429^2+0.206^2+0.592^2+0.188^2+0.373^2+0.142^2+0.103^2+0.118^2+0.171^2+0.074^2+0.124^2}{28.18^2}} * 100\% \quad (31)$$

THD ≈ 16%	(32)
-----------	------

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos do trabalho não foram atendidos totalmente, a principal ideia do projeto de obter uma qualidade superior não foi totalmente alcançada visto que o amplificador apresentou uma grande distorção do sinal de entrada, mesmo utilizando todos os meios conhecidos para que essa distorção fosse a menor possível, alguns ajustes são necessários para que se possa ter uma melhor resposta e estabilidade do amplificador, a duplicação de pares complementares pode ajudar na melhora dessa resposta, bem como os ajustes dos resistores ligados ao emissor dos transistores complementares de saída possa melhorar a resposta. Ajustar melhor o ganho do estágio de entrada também pode ajudar a melhorar a resposta. Esses ajustes tomam tempo e a melhor maneira de ser feita é pelo método de tentativa e erro, visto que as simulações e cálculos, apresentam resultados melhores que os obtidos com o projeto.

O amplificador classe D não funcionou devido a problemas com o CI utilizado para tal, mesmo executando todos os passos indicados no *datasheet* e *application note* disponíveis. O sistema de proteção do CI IRS2092, aparenta ser o problema crucial para o não acionamento dos transistores MOSFET de saída, este amplificador apresentava grande importância para o projeto, por isso o tempo investido para que o mesmo funcionasse foi muito grande, isso acabou prejudicando também outros resultados do projeto como o do próprio amplificador classe AB.

Grandes foram as dificuldades encontradas, desde a dificuldade de reposição em certos componentes, até mesmo materiais teóricos para aplicação no projeto. Muitos ajustes tiveram que ser feitos de modo de tentativa e erro, isso tomou muito tempo, a maioria dos testes muitas vezes era demorada, sendo que alguns experimentos necessitavam da espera de placa de circuito impresso ficar prontas, devido à alta corrente exigida pela carga, a *protoboard* ficava impossibilitada de ser usada. Quando realizados teste em *protoboard* com cargas menores as respostas obtidas muitas vezes eram satisfatórias porém quando essa carga era aumentada, para os valores necessários para o projeto as respostas muitas vezes eram completamente diferentes as obtidas com cargas menores.

Para projetos futuros, no amplificador classe AB é necessário a adição de ao menos mais um par de transistores complementares para o melhor casamento da potência da caixa com a potência fornecida pelo amplificador classe AB. Como também ajustes de ganho podem ser feitos para melhorar a resposta como THD do amplificador, também pode ser readequado o divisor de tensão da entrada do amplificador, para que o sinal que chegue para ser amplificado seja menor. Na placa dos filtros esses ajustes de ganho também podem ser feitos como também a adição de um divisor de tensão na entrada.

Apesar dos problemas citados o projeto consegue apresentar pontos positivos visto que em testes separados as duas caixas construídas com valores baixos como o proposto tem resposta mais que satisfatória, bem como o filtros funcionaram muito bem. Com alguns ajustes é possível ter uma resposta satisfatória do sistema.

REFERÊNCIAS

BARROS, Marcelo H. M. **Porque o alinhamento Linkwitz-Riley é superior a qualquer outro crossover?**. HotSound Ind & Com.

BORTONI, Rosalfonso. **Amplificadores de Potência**. Disponível em: <http://www.studior.com.br/amp_avan.pdf>. Acesso em: 03 novembro 2017.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 10. ED, Prentice Hall/Pearson, 2004

CARIZZO, Cristian D; MELIAN, Jose S; STETTLER, Guillermo. Discentes UTN: **Arreglos Lineales de Fuentes Sonoras**. 2011. Artigo (curso de Engenharia Eletrônica) – Facultad Regional Córdoba. Universidad Tecnológica Nacional, 2011.

CORRADI JUNIOR, Romeu. **Manual de Electrónica Básica**. Disponível em: <http://www.corradi.junior.nom.br/amp_pot.pdf>. Acessado em 03 novembro 2017.

CYSNE, Luiz Fernando Otero. **A Nova Bíblia do Som**. 1ª Edição, Cia do Ebook, Brasil, 2016.

ELECTRO VOICE, *The PA Bible*, 1979

FONSECA, Nuno. **Introdução à Engenharia de Som**. 1. Ed, FCA, Portugal, 2007.

GOVERNO DA INDIA, *Maintenance Handbook on Public Address System*, Virtual Books, 2012. Disponível em: <<http://www.rdso.indianrailways.gov.in/works/uploads/File/Maintenance%20handbook%20on%20Public%20Address%20System.pdf>>

INTERNATIONAL RECTIFIER. **IRS 2092** disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/irs2092.pdf?fileId=5546d462533600a401535675f1be2790>

Linkwitz, Siegfried H. **Active Crossover Networks for Noncoincident Drives**, JOURNAL OF THE AUDIO ENGINEERING SOCIETY.

ON SEMICONDUCTOR. **2N5551**, disponível em:
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/2N5550-D.PDF>

PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 5 ed. Macgraw-hill, 1998.

REGINATTO, Cristian Roni. Discente da UPF: **Estudo, Projeto e Caracterização de um Amplificador de Áudio Classe D**. 2008. Trabalho de conclusão de curso (curso de Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo, 2008.

SELF, Douglas. **Audio Power Amplifier Design Handbook**. 4ª Edição, Newnws, Oxford, 2006.

TOBEY, Gene E.; GRAEME, Jerald G.; HUELSMAN, Lawrence P.. **Operational Amplifiers, design and applications**. Singapore: Editora Macgraw-hill, 1993.

TOSHIBA. **2SC4793**, disponível em:
https://www.mouser.com/catalog/specsheets/toshiba_2SC4793.pdf

TOSHIBA. **2SC5200**, disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/316951.pdf>

SELF, Douglas. **Audio Power Amplifier Design Handbook**. 5ª Edição, Newnws, Oxford, 2009.

<https://sombbox.com.br/2015/06/15/projeto-de-um-subwoofer-compacto-para-alto-falante-12-polegadas/>. acessado em 10/12/2018 as 6:30.