



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LINCOLN TOMAZ DE SOUSA

PROJETO DE DIVISOR DE FREQUÊNCIAS PARA SOM

CAMPINA GRANDE - PB

2014

LINCOLN TOMAZ DE SOUSA

PROJETO DE DIVISOR DE FREQUÊNCIAS PARA SOM

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Engenheiro Eletricista.*

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Hiran de Melo

CAMPINA GRANDE - PB

2014

LINCOLN TOMAZ DE SOUSA

PROJETO DE DIVISOR DE FREQUÊNCIAS PARA SOM

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Hiran de Melo

Aprovado em ____ de _____ de 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hiran de Melo

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

Professor Convidado

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nunca me deixou sozinho nessa jornada.

A meus pais Vera Lúcia e Amilton Batista, que se esforçaram sempre para me dar boas condições de estudo e nunca faltaram com carinho, atenção e amor.

A todos os meus amigos e parentes que sempre torcem pelo meu sucesso.

Aos meus amigos da turma que estiveram ao meu lado sempre que precisei.

Agradeço aos meus mestres por toda contribuição na minha formação acadêmica e profissional, em especial ao professor e orientador Dr. Hiran de Melo pelo acompanhamento acreditando no meu potencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim agradeço a todos os funcionários da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica que contribuíram na realização desse grande sonho de ser engenheiro eletricitista.

RESUMO

Este trabalho propõe o projeto de um divisor de frequências para uso em equipamentos sonoros de médio e grande porte, que utilizam quatro tipos de alto falantes: subwoofer, woofer, driver e super tweeter. O circuito projetado é totalmente analógico e tem como objetivo melhorar a qualidade do som e ainda reduzir o risco de queima dos alto falantes. O divisor de frequências é formado basicamente por quatro filtros elétricos que separam as faixas de frequência ideais para cada tipo de alto falante. Assim o circuito tem como entrada o sinal musical completo e possui quatro saídas. O projeto dos filtros é baseado na teoria da aproximação de Butterworth, mais especificamente a aproximação de quarta ordem, e utilizam-se circuitos do tipo Sallen-Key. Para se determinar as frequências de corte dos filtros foi feita uma pesquisa acerca das frequências de operação de dezenas de alto falantes de diversos fabricantes. O resultado são filtros que possuem frequências de corte dentro dos limites de quaisquer modelos de alto falantes.

PALAVRAS-CHAVE— crossover, alto falantes, subwoofer, woofer, driver, super tweeter, filtros elétricos, aproximação de Butterworth, topologia Sallen-Key, indicador de *clipping*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Crossover automotivo comercializado pela STETSOM.....	11
Figura 2.1 – Curva de sensibilidade do ouvido humano.	13
Figura 2.2 – Subwoofer de 18 polegadas com potência RMS de 2000 W	14
Figura 2.3 – Gráfico da resposta em frequência do subwoofer 15SW1P.....	16
Figura 2.4 – Resposta em frequência simulada de caixa de grave	17
Figura 2.5 – Woofer de 12 polegadas com potência RMS de 450 W	17
Figura 2.6 – Driver’s com e sem corneta acoplada	19
Figura 2.7 – Gráfico da resposta em frequência do driver HD600.....	21
Figura 2.8 – Super Tweeter Hinor HST 600.	21
Figura 2.9 – Gráfico da resposta em frequência do super tweeter ST200 da JBL Selenium.	23
Figura 3.1 – Gráfico das perdas de um filtro Butterworth passa-baixas de quarta ordem	26
Figura 3.2 – Circuito Sallen-Key.....	28
Figura 3.3 – Filtro passa-baixas de segunda ordem.....	29
Figura 3.4 – Filtro passa-altas de segunda ordem	29
Figura 4.1 – Respostas em frequência dos filtros dos quatro alto falantes.....	31
Figura 4.2 – Gráfico da magnitude de G_{s1}	33
Figura 4.3 – Simulação do filtro passa-altas do subwoofer.....	34
Figura 4.4 – Filtro passa-altas com chave comutadora da frequência de corte.	35
Figura 4.5 – Resposta do filtro passa-altas do subwoofer com frequência de corte menor.	35
Figura 4.6 – Resposta do filtro passa-altas do subwoofer com frequência de corte maior.	36
Figura 4.7 – Gráfico da magnitude de G_{s2}	37
Figura 4.8 – Simulação do filtro passa-baixas do subwoofer.....	39
Figura 4.9 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-baixas do subwoofer.....	39
Figura 4.10 – Simulação do filtro passa-faixa do subwoofer	40
Figura 4.11 – Gráfico da resposta simulada do filtro passa-faixa do subwoofer	40
Figura 4.12 – Gráfico da magnitude de G_{w1}	41

Figura 4.13 – Simulação do filtro passa-altas do woofer	42
Figura 4.14 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-altas do woofer	43
Figura 4.15 – Gráfico da magnitude de G_{w2}	44
Figura 4.16 – Simulação do filtro passa-baixas do woofer	45
Figura 4.17 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-baixas do woofer	46
Figura 4.18 – Simulação do filtro passa-faixa do woofer	46
Figura 4.19 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-faixa do woofer	46
Figura 4.20 – Gráfico da magnitude de G_{d1}	47
Figura 4.21 – Simulação do filtro passa-altas do driver	49
Figura 4.22 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-altas do driver	49
Figura 4.23 – Gráfico da magnitude de G_{d2}	50
Figura 4.24 – Simulação do filtro passa-baixas do driver	52
Figura 4.25 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-baixas do driver	52
Figura 4.26 – Simulação do filtro passa-faixa do driver	53
Figura 4.27 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-faixa do driver	53
Figura 4.28 – Gráfico da magnitude de G_t	54
Figura 4.29 – Simulação do filtro passa-altas do super tweeter	55
Figura 4.30 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-altas do super tweeter	56
Figura 5.1 – Ocorrência de clipping em sinal musical	57
Figura 5.2 – Simulação do circuito indicador de clipping	58
Figura 6.1 – Espectro de frequência do som gerado pelo subwoofer sem uso do divisor	60
Figura 6.2 – Espectro de frequência do som gerado pelo subwoofer com uso do divisor	60
Figura 6.3 – Espectro de frequência do som gerado pelo woofer sem uso do divisor	61
Figura 6.4 – Espectro de frequência do som gerado pelo woofer com uso do divisor	61
Figura 6.5 – Espectro de frequência do som gerado pelo driver sem uso do divisor	62
Figura 6.6 – Espectro de frequência do som gerado pelo driver com uso do divisor	62
Figura 6.7 – Espectro de frequência do som gerado pelo super tweeter sem uso do divisor	63
Figura 6.8 – Espectro de frequência do som gerado pelo super tweeter com uso do divisor	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resposta em frequência de diversos modelos de subwoofer.....	15
Tabela 2.2 – Resposta em frequência de diversos modelos de woofer	18
Tabela 2.3 – Resposta em frequência de diversos modelos de driver	20
Tabela 2.4 – Resposta em frequência de diversos modelos de super tweeter	22
Tabela 3.1 – Polinômios de Butterworth.....	27

SUMÁRIO

RESUMO	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	6
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	10
1.1 Os crossover's no mercado atual	11
1.2 Objetivo	12
CAPÍTULO 2 – ALTO FALANTES	13
2.1 Subwoofer	14
2.2 Woofer	17
2.3 Driver	18
2.4 Super Tweeter	21
CAPÍTULO 3 – FILTROS ELÉTRICOS	24
3.1 Aproximação de Butterworth.....	24
3.2 Topologia Sallen-Key	27
CAPÍTULO 4 – PROJETO DOS FILTROS DO DIVISOR DE FREQUÊNCIAS ..	31
4.1 Filtro do subwoofer.....	32
4.1.1 Filtro passa-altas.....	32
4.1.2 Filtro passa-baixas.....	36
4.2 Filtro do woofer	40
4.2.1 Filtro passa-altas.....	40
4.2.2 Filtro passa-baixas.....	43
4.3 Filtro do driver	47
4.3.1 Filtro passa-altas.....	47
4.3.2 Filtro passa-baixas.....	49
4.4 Filtro do super tweeter	53
CAPÍTULO 5 – CIRCUITO INDICADOR DE <i>CLIPPING</i>	57
CAPÍTULO 6 – TESTES E RESULTADOS.....	59
CONCLUSÕES	64
BIBLIOGRAFIA	65
ANEXO 1 – CÓDIGO UTILIZADO NO MATLAB	66
ANEXO 2 – APLICATIVO AUDACITY	71

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Os equipamentos de som mais sofisticados utilizam quatro tipos de transdutores (subwoofer, woofer, driver e super tweeter) para que se possa reproduzir com fidelidade toda a faixa de frequência audível (20 hz a 20 khz). Cada transdutor opera em uma restrita faixa de frequência, porém se forem usados os quatro em conjunto obtêm-se como resultado uma resposta em frequência que abrange toda a faixa audível.

Para aumentar o rendimento de cada transdutor e melhorar a qualidade do som, o ideal é que seja aplicado a cada transdutor apenas sinais dentro da faixa de frequência de operação do mesmo. A função do divisor de frequências é dividir o sinal musical completo em quatro faixas distintas: grave (para subwoofer), médio-grave (para woofer), médio-agudo (para driver) e agudo (para super tweeter). Isso pode ser implementado com uso de filtros (ativos ou passivos) passa-faixa, que filtram um sinal deixando passar apenas a faixa de frequência desejada. A divisão de frequências deve ser feita de forma que a soma dos quatro sinais de saída seja aproximadamente igual ao sinal de entrada, para uma reprodução fiel do som.

As caixas de som são alimentadas por amplificadores de forma que existe pelo menos um amplificador para cada tipo de transdutor. Os amplificadores têm como entrada o sinal gerado na saída do player (cd player, mp3 player, computador, etc.). Existem três formas possíveis para disposição dos filtros: filtros passivos entre o amplificador e os transdutores, filtros ativos entre o player e os amplificadores, filtros passivos entre o player e os amplificadores.

Na saída do amplificador o nível de tensão é alto e isso faz com que a filtragem nesse ponto consuma muita potência. Na entrada do amplificador o nível de tensão é menor que 1 Volt e o uso de filtros passivos tem a desvantagem da atenuação do sinal que pode atingir níveis inviáveis. Com isso, o método mais usado é o uso de filtros ativos entre o player e os amplificadores.

A resposta em frequência do transdutor varia entre os diversos modelos e marcas. Assim, é interessante que os limites de cada faixa de frequência do divisor sejam variáveis. Dessa forma o dispositivo pode ser usado em qualquer equipamento.

1.1 Os crossover's no mercado atual

No mercado atual são produzidos divisores de frequência para som, chamados de crossover's, de diversos modelos e várias marcas diferentes. São vendidos crossover's do tipo analógico ou digital. Os crossover's digitais geralmente são bastante sofisticados, possibilitando ao usuário ajustar com precisão as frequências de corte, e seus filtros possuem uma atenuação de até 48 dB/oitava (crossover profissional) ou 24 dB/oitava (crossover automotivo). Os crossover's analógicos do mercado possuem atenuação de apenas 12 dB/oitava. A figura 1.1 mostra um crossover.



Figura 1.1 – Crossover automotivo comercializado pela STETSOM.

Outro recurso eletrônico bastante importante em grandes sistemas de som é o indicador de *clipping*. Quando se aumenta muito o volume do som a amplitude do sinal atinge seu limite, e a partir daí ocorre distorção no sinal, que passa a ter os picos de onda achatados. Essa distorção é chamada de *clipping*.

Os crossover's profissionais (usados em shows, eventos, etc.), alimentados por tensão alternada de 220 ou 110 Volts, geralmente são digitais e incorporam o indicador de *clipping* (distorção de onda). No entanto os crossover's automotivos, que são alimentados por tensão contínua entre 10 e 15 Volts (bateria do carro) não contam com tal recurso.

1.2 Objetivo

Este Trabalho de Conclusão de Curso é apresentado com foco no projeto e montagem de um divisor de frequências automotivo, usando filtros analógicos, com atenuação de 24 dB/oitava com frequências de corte variáveis e indicador de *clipping*. Espera-se que esse divisor de frequências proporcione um melhor rendimento dos alto falantes, pois os próprios fabricantes indicam nos manuais de alguns alto falantes que a potência suportada pelos mesmos é maior quando a atenuação do filtro utilizado é maior.

Esse trabalho tem como objetivo projetar e montar um dispositivo divisor de frequências que tenha uma entrada para sinal de áudio stereo convencional, e quatro saídas com sinais específicos para cada tipo de transdutor, sendo uma mono para subwoofer (nas frequências reproduzidas pelo subwoofer não é possível perceber o efeito de som stereo, pois são sons que se propagam igualmente em todas as direções), e as demais sendo stereo para woofer, driver e super tweeter. Cada saída deve ter os limites da faixa de frequência variáveis. O dispositivo deve contar também com um indicador de *clipping* na sua entrada (para detectar distorção na saída do player). A alimentação do divisor de frequências deve ser feita através de uma fonte simétrica, que não faz parte deste projeto.

CAPÍTULO 2 – ALTO FALANTES

Os alto falantes são transdutores que convertem energia elétrica em energia sonora. São alimentados por tensão alternada e produzem um som com a mesma forma de onda da tensão aplicada. A faixa de frequência que os humanos conseguem ouvir vai de 20 a 20.000 Hz e os sons musicais geralmente cobrem toda essa faixa. A figura 2.1 mostra a sensibilidade do ouvido humano em função da frequência do som. Por razões físicas e mecânicas, não existe um alto falante que toque toda a faixa de frequência audível.

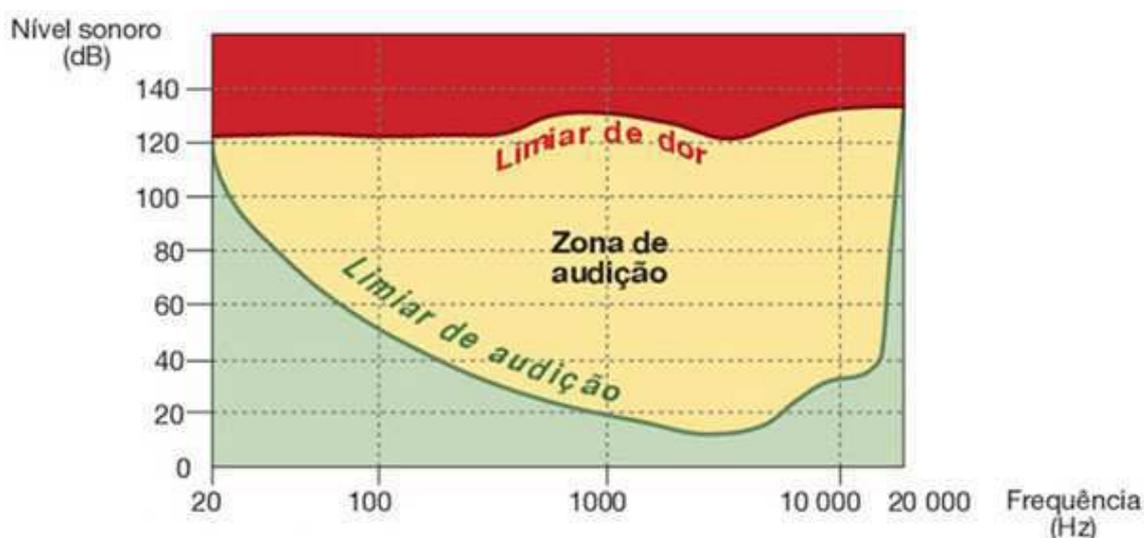


Figura 2.1 – Curva de sensibilidade do ouvido humano.

Existem vários tipos de alto falantes e cada tipo opera em uma restrita faixa de frequência, de forma que qualquer frequência sonora pode ser reproduzida de forma apropriada por algum tipo de alto falante. Então para se reproduzir toda a faixa audível se faz necessária uma associação de dois ou mais tipos de alto falantes que operem em faixas de frequência complementares. Os tipos de alto falantes usados nessa associação dependem da aplicação. O melhor resultado é obtido com uso de quatro tipos de alto falantes (chamado de sistema de 4 vias): subwoofer, woofer, driver e super tweeter. Essa associação é a mais usada em sons de grande porte, que são o alvo do projeto apresentado neste trabalho.

2.1 Subwoofer

O subwoofer é o alto falante responsável pelas frequências graves e subgraves. Nessa faixa estão as frequências fundamentais de contrabaixo, baixo e do bumbo da bateria. Esse tipo de alto falante geralmente é o maior do sistema, e é também o que consome a maior potência (alguns modelos ultrapassam 2000 watts de potência RMS). Cerca de metade da potência disponível no conjunto de amplificadores é destinada aos subwoofer's, pois nas baixas frequências a sensibilidade do ouvido humano é menor. Seu diâmetro varia de 12 a 21 polegadas.



Figura 2.2 – Subwoofer de 18 polegadas com potência RMS de 2000 W.

Foram analisadas as especificações técnicas de alguns dos subwoofer's mais utilizados atualmente e montou-se a tabela 2.1, que mostra a resposta em frequência, dada pelos fabricantes, de cada modelo. Alguns fabricantes disponibilizam inclusive o gráfico da resposta em frequência, do subwoofer instalado em caixa, medida com decibelímetro.

Tabela 2.1 – Resposta em frequência de diversos modelos de subwoofer.

fabricante	modelo	início da resposta (Hz)	fim da resposta (Hz)
JBL Selenium	18SW3P	37	2000
JBL Selenium	15SW3P	38	2000
JBL Selenium	15SW1P	30	2500
JBL Selenium	18SW3A	38	1500
JBL Selenium	15SW19A	50	2500
Oversound	1200 ST	40	2000
Oversound	SUB 15C	30	2000
Oversound	SUB 800	25	1500
Oversound	SUB 1000	35	1500
Oversound	SUB 21-1200	30	1000
Eros	E-18 SDS	25	1500
Eros	E-18 TARGET BASS	30	1000
Eros	E-818 SDS	25	1000
Eros	E-18 PANZER	20	1500
Eros	E-15 TARGET BASS 4.5	35	1000
Snake	HPX2180	35	2700
Snake	HPX2150	40	2200

A figura 2.3 mostra o gráfico, fornecido pela JBL Selenium, para seu subwoofer modelo 15SW1P. Este gráfico mostra duas curvas, a curva de linha cheia representa a resposta na direção de frente com o alto falante, e a curva de linha tracejada representa a resposta em uma direção que faz ângulo de 45° com a frente do alto falante.

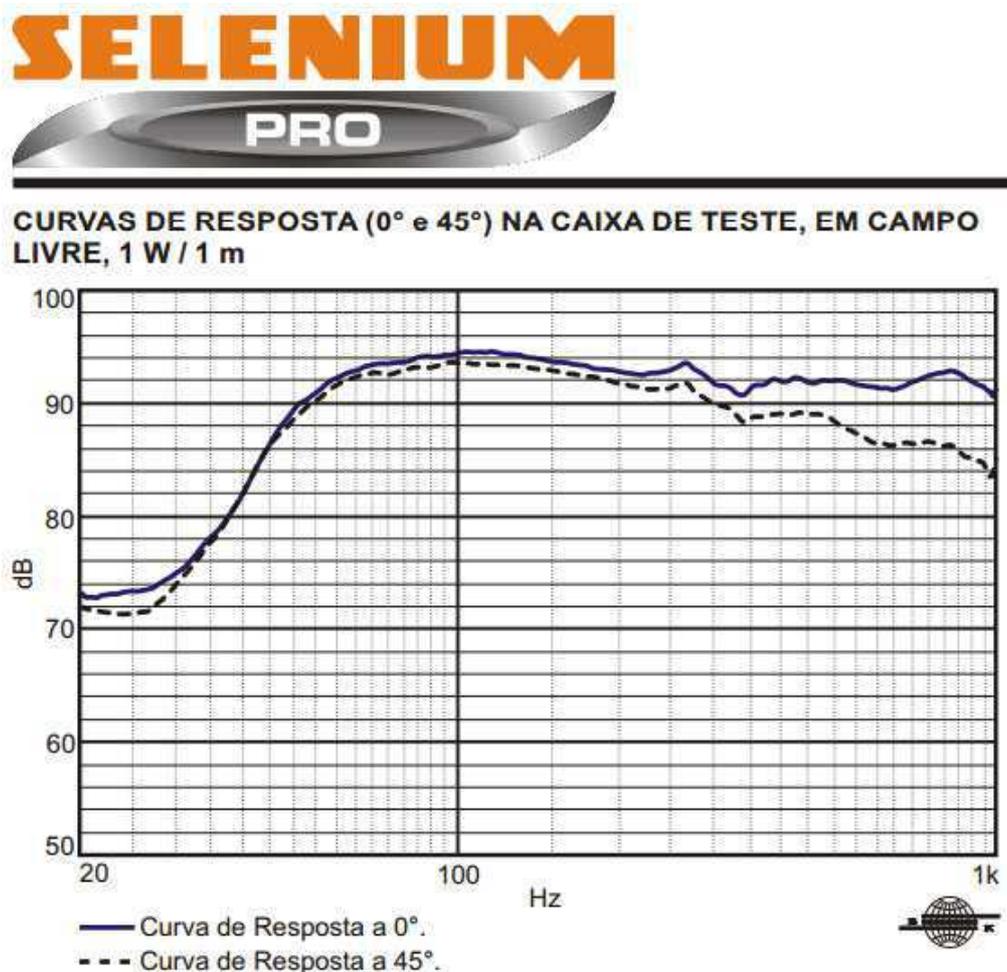


Figura 2.3 – Gráfico da resposta em frequência do subwoofer 15SW1P.

Um detalhe importante na utilização de subwoofer's é que a caixa, em que se instala o mesmo, influencia bastante na resposta em frequência do conjunto (subwoofer mais caixa). A caixa normalmente provoca uma atenuação dos sons abaixo de uma determinada frequência. Existem vários softwares que simulam a resposta em frequência de caixas de subwoofer. Para exemplificar, simulou-se no software WinISD a resposta em frequência da caixa de teste utilizada na obtenção do gráfico da figura 2.3. A resposta obtida é mostrada na figura 2.4.

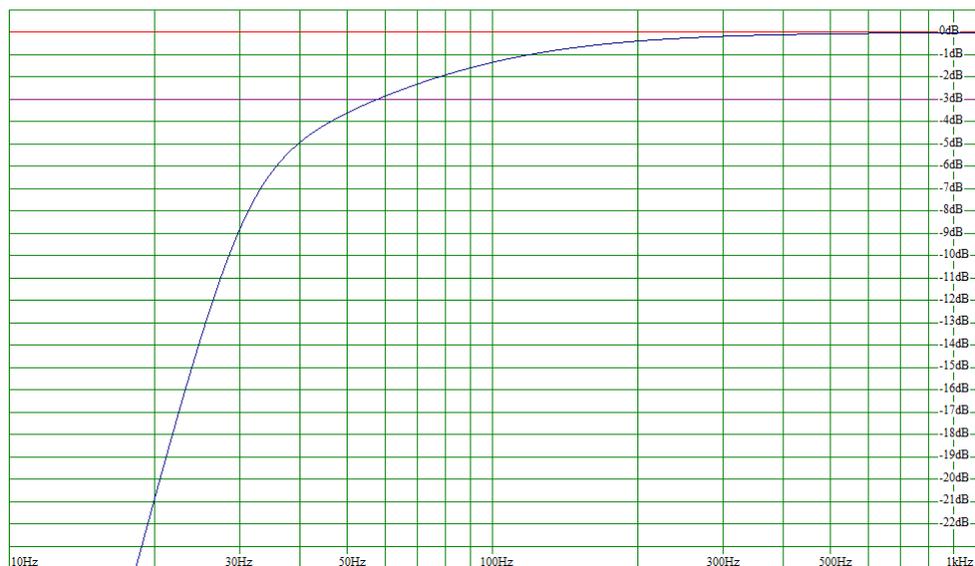


Figura 2.4 – Resposta em frequência simulada de caixa de grave.

2.2 Woofer

O woofer é o alto falante responsável pela reprodução dos sons médio-graves. É dele que saem sons de tambor, parte do piano, da guitarra, etc. O formato do woofer é muito semelhante ao do subwoofer e seu diâmetro varia de 8 a 15 polegadas. A figura 2.5 mostra um woofer.



Figura 2.5 – Woofer de 12 polegadas com potência RMS de 450 W.

Foram analisadas as especificações técnicas de alguns dos woofer's mais utilizados atualmente e montou-se a tabela 2.2, que mostra a resposta em frequência, dada pelos fabricantes, de cada modelo.

Tabela 2.2 – Resposta em frequência de diversos modelos de woofer.

fabricante	modelo	início da resposta (Hz)	fim da resposta (Hz)
JBL Selenium	12PW7	40	4500
JBL Selenium	10PW7	65	4800
JBL Selenium	10PX	52	5500
JBL Selenium	10PW3	60	6000
JBL Selenium	12PX	60	5100
Oversound	LA 10-400	55	4000
Oversound	MG 10-300	60	6000
Oversound	MG 12-300	60	4000
Eros	E-208 MG - C	60	4000
Eros	E-310 H	100	5000
Eros	E-358 XH BLACK	70	7000
Eros	E-510 L/LC	60	4500
Eros	E-1200 MB	45	3500
Snake	ESX310	60	6500
Snake	ESX408	65	6000
Snake	ESV610	50	6000
Snake	HPX2120	50	5000

2.3 Driver

O driver é o alto falante responsável pela reprodução de sons médios e médio-agudos. A voz dos cantores é emitida principalmente pelo driver. Seu formato é bem

diferente do woofer. No driver o som é emitido por um pequeno diafragma e o que determina o tamanho do driver é o tamanho do imã (possivelmente coberto por uma carcaça). Em sua instalação, o driver deve ser acoplado a uma corneta, que pode ser de vários tamanhos. Geralmente o driver fica posicionado dentro da caixa de som e o que se vê do lado de fora é apenas a corneta. Por causa disso, o driver é conhecido também como corneta. A figura 2.6 mostra um driver.



Figura 2.6 – Driver's com e sem corneta acoplada.

Foram analisadas as especificações técnicas de alguns dos driver's mais utilizados atualmente e montou-se a tabela 2.3, da página seguinte, que mostra a resposta em frequência, dada pelos fabricantes, de cada modelo.

Tabela 2.3 – Resposta em frequência de diversos modelos de driver.

fabricante	modelo	início da resposta (Hz)	fim da resposta (Hz)
Eros	EFD252	500	11000
Eros	EFD4160	300	9000
JBL Selenium	D200	500	7000
JBL Selenium	D250-x	400	9000
JBL Selenium	D305	400	9000
JBL Selenium	D405	300	7000
Oversound	DF 200	500	7000
Oversound	DF 250	400	9000
Oversound	DF 375	400	10000
Oversound	DF 475	300	7000
Snake	SD145	800	18000
Snake	3200F	400	14000
Hinor	HD600	500	7000
Hinor	HDC 1000	400	9000
Hinor	HDC 3000	500	6500
Hinor	HDI300	600	6000

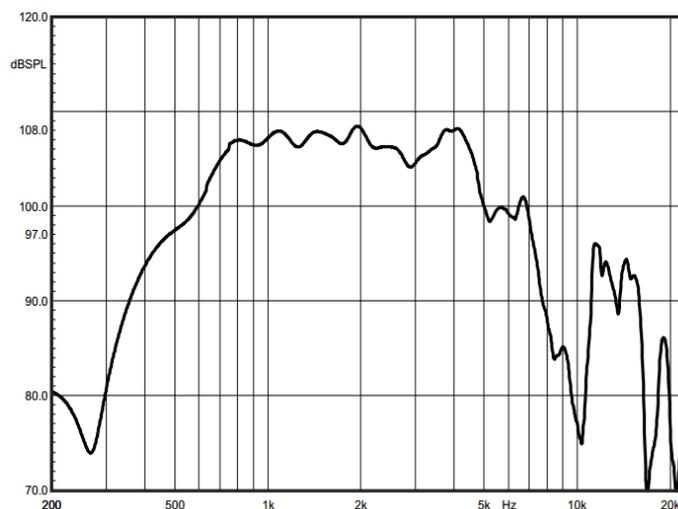


Figura 2.7 – Gráfico da resposta em frequência do driver HD600.

2.4 Super Tweeter

O super tweeter é o alto falante responsável pela reprodução dos sons agudos (as maiores frequências audíveis). O super tweeter originou-se de uma evolução do tweeter que é um alto falante com mesma resposta em frequência sendo que com potência muito menor. Os sons agudos são os sons característicos dos pratos de uma bateria. O super tweeter é o menor dos alto falantes (cerca de 12 a 14 cm) e o que consome menos potência. No entanto a maior ocorrência de queima em alto falantes é nos super tweeter's, isso porque eles são muito sensíveis a sinais com frequência abaixo de sua resposta. Em sua estrutura os super tweeter's possuem uma espécie de corneta com um cone no centro.



Figura 2.8 – Super Tweeter Hinor HST 600.

Foram analisadas as especificações técnicas de alguns dos super tweeter's mais utilizados atualmente e montou-se a tabela 2.4, da página seguinte, que mostra a resposta em frequência, dada pelos fabricantes, de cada modelo.

Tabela 2.4 – Resposta em frequência de diversos modelos de super tweeter

fabricante	modelo	início da resposta (Hz)	fim da resposta (Hz)
Hinor	5HI 150	4000	20000
Hinor	5HI 300	3500	20000
Hinor	HST 600	3500	22000
JBL Selenium	ST200	2000	20000
JBL Selenium	ST302	3500	20000
JBL Selenium	ST304	3500	18000
JBL Selenium	ST350	2500	20000
JBL Selenium	ST400 TRIO	4000	20000
Eros	EFT-800	3500	20000
Eros	EFT-1000	3500	20000
Bravox	T10X	3000	20000
Bravox	T1X	3000	20000

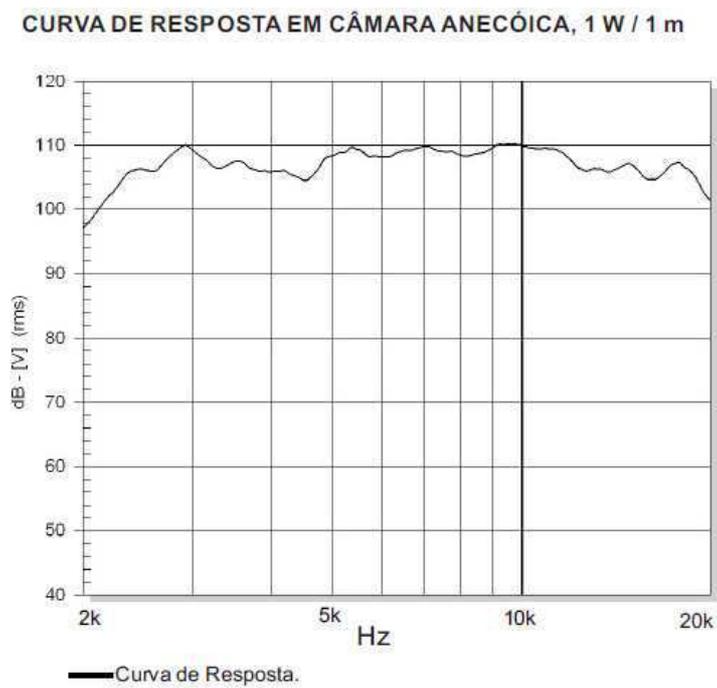


Figura 2.9 – Gráfico da resposta em frequência do super tweeter ST200 da JBL Selenium.

CAPÍTULO 3 – FILTROS ELÉTRICOS

Os filtros elétricos são circuitos capazes de modificar o espectro de frequência de um sinal elétrico. A resposta em frequência desses circuitos tem um ganho e uma defasagem, que dependem da frequência do sinal a eles aplicado. Essa característica permite que eles sejam utilizados para selecionar uma determinada faixa de frequências, ou para eliminar sinais indesejáveis.

De acordo com sua resposta em frequência os filtros são classificados da seguinte forma:

- Filtro passa-baixas: atenua todos os sinais acima de uma determinada frequência.
- Filtro passa-altas: atenua todos os sinais abaixo de uma determinada frequência.
- Filtro passa-faixa: atenua todos os sinais fora de uma determinada faixa de frequência.
- Filtro rejeita-faixa: atenua todos os sinais dentro de uma determinada faixa de frequência.
- Filtro passa-tudo: não causa atenuação, mas muda a fase do sinal.

Os filtros são classificados também como filtros passivos ou filtros ativos, de acordo com os componentes usados. Os filtros passivos são formados apenas por elementos passivos como resistores, capacitores ou indutores. Os filtros ativos são formados por elementos passivos e elementos ativos como amplificadores operacionais ou transistores.

Neste projeto se fez uso de filtros ativos passa-altas e passa-baixas, sendo que usando esses dois filtros em série de forma adequada obtém-se um filtro passa-faixa.

3.1 Aproximação de Butterworth

A atenuação de um filtro passa-baixas é dada pela seguinte função geral

$$|H(j\omega)|^2 = 1 + |K(j\omega)|^2$$

onde $H(s)$ é a atenuação e $K(s)$ é uma função racional em s . A função $K(s)$ deve ter magnitude próxima de zero nas frequências baixas, e muito maior que 1 nas frequências altas. $K(s)$ é um polinômio da forma

$$K(s) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n$$

A aproximação proposta por Butterworth é a seguinte

$$K(s) = \varepsilon \left(\frac{s}{\omega_p} \right)^n$$

onde ε é uma constante, n é a ordem do polinômio e ω_p é a frequência de corte. A função de atenuação correspondente é

$$|H(j\omega)| = \sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{2n}}$$

A aproximação de Butterworth é maximamente plana na origem, cresce um pouco até a frequência ω_p , e a partir daí cresce a uma taxa de $6 \cdot n$ dB/oitava. A atenuação em dB na frequência de corte é dada por

$$A(\omega_p) = 10 \log_{10}(1 + \varepsilon^2)$$

De acordo com a atenuação desejada na frequência de corte, pode-se calcular o parâmetro ε pela expressão

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1 \times A} - 1}$$

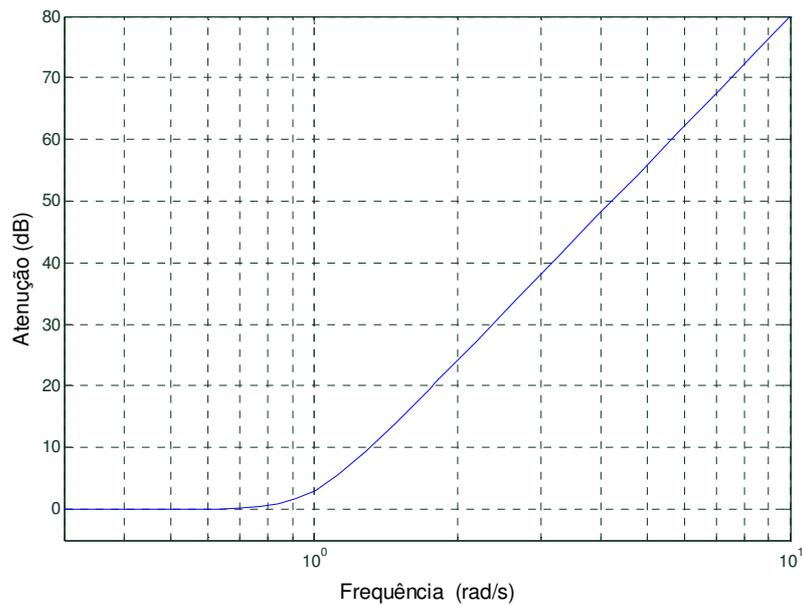


Figura 3.1 – Gráfico das perdas de um filtro Butterworth passa-baixas de quarta ordem.

Normalizando a frequência como sendo $\varepsilon^n \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)$, pode-se chegar a expressão

$$|H(s)|^2 = 1 + (-s^2)^n$$

(Consultar Daryanani, G. “*Principles of active network synthesis and design*” para ver a dedução da expressão acima)

As raízes de $|H(s)|^2$ são os pontos do plano complexo que tenham módulo 1 e ângulo múltiplo de $\frac{\pi}{n}$. A função de perdas no domínio s é então dada por

$$H(s) = \prod_j (s - s_j)$$

onde s_j são as raízes do lado esquerdo do plano complexo.

A forma fatorada dos polinômios de Butterworth normalizados de ordem 1 até 5 é dada na tabela 3.1. Para desnormalizar o polinômio é necessário substituir s por

$s \left(\frac{\varepsilon^n}{\omega_p} \right)$ onde ε e ω_p são definidos no projeto do filtro.

Tabela 3.1 – Polinômios de Butterworth

n	H(s)
1	s+1
2	s ² +1,414s+1
3	(s ² +s+1)(s+1)
4	(s ² +0,76537s+1)(s ² +1,84776s+1)
5	(s ² +0,61803s+1)(s ² +1,61803s+1)(s+1)

Todo esse cálculo foi feito para um filtro passa-baixas. Mas também pode-se usar a mesma tabela 5 para projeto de filtros passa-altas. A diferença é que para um filtro passa-altas deve-se desnormalizar o polinômio de Butterworth substituindo s por $\left(\frac{\omega_p}{s \times \varepsilon^n}\right)$. Essa manipulação é conhecida como transformação de frequência. Neste projeto se faz uso da aproximação de quarta ordem. Pois esta aproximação resulta em uma curva de atenuação com inclinação de 24 dB por oitava, que é a inclinação desejada.

3.2 Topologia Sallen-Key

Para montar um filtro elétrico, é necessário encontrar um circuito que tenha como função de transferência $T(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{H(s)}$. O inverso da função de atenuação é a função de ganho do filtro. Geralmente os filtros de ordem par têm sua função de ganho representada por $\frac{n}{2}$ funções biquadráticas. Essas funções biquadráticas são da forma:

$$T_{PB} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2}, \text{ para filtro passa-baixas}$$

$$T_{PA} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2}, \text{ para filtro passa-altas}$$

Essa é a representação paramétrica, onde Q e ω_c são os parâmetros do filtro. No caso do filtro de Butterworth o parâmetro Q é igual a 0,7071 e ω_c é a frequência na qual a atenuação é de 3 dB.

Uma forma simples, muito utilizada, para realização de funções biquadráticas é a topologia Sallen-Key. A figura 3.2 ilustra o circuito Sallen-Key, com realimentação negativa, onde Z_1, Z_2, Z_3 e Z_4 são impedâncias generalizadas.

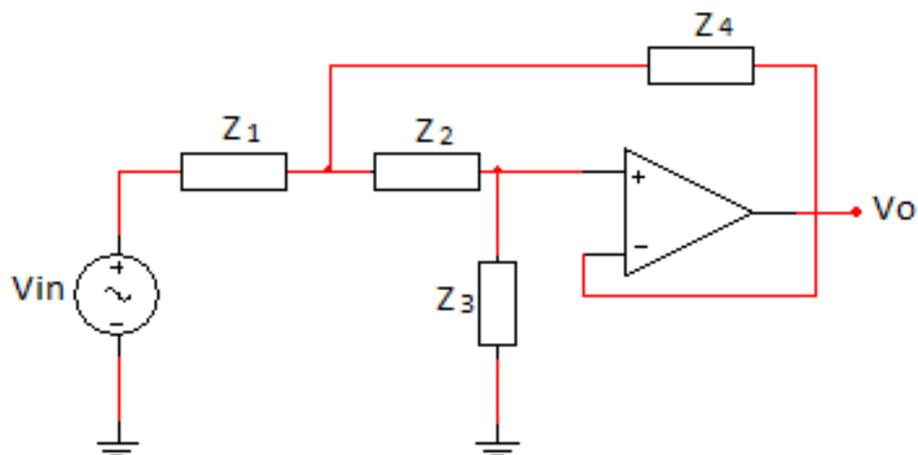


Figura 3.2 – Circuito Sallen-Key.

A função de transferência deste circuito é dada por

$$T_{SK} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_4 (Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4}$$

Escolhendo-se adequadamente as impedâncias Z_1, Z_2, Z_3 e Z_4 pode-se obter diversos formatos de funções, inclusive as biquadráticas dos filtros passa-baixas e passa-altas de Butterworth, que foram usadas nesse trabalho.

Para se obter a função biquadrática do filtro passa-baixas deve-se substituir Z_1 e Z_2 por resistores, e Z_3 e Z_4 por capacitores, resultando no circuito da figura 3.3.

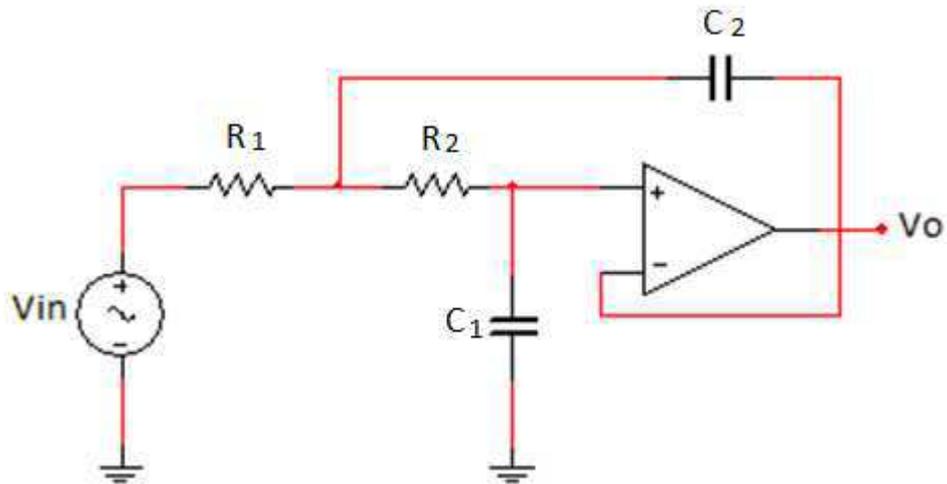


Figura 3.3 – Filtro passa-baixas de segunda ordem.

A função de transferência desse circuito é

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 + C_1(R_1 + R_2)s + C_1C_2R_1R_2s^2} \quad (1)$$

Para obter a função biquadrática do filtro passa-altas deve-se substituir Z_3 e Z_4 por resistores, e Z_1 e Z_2 por capacitores, resultando no circuito da figura 3.4.

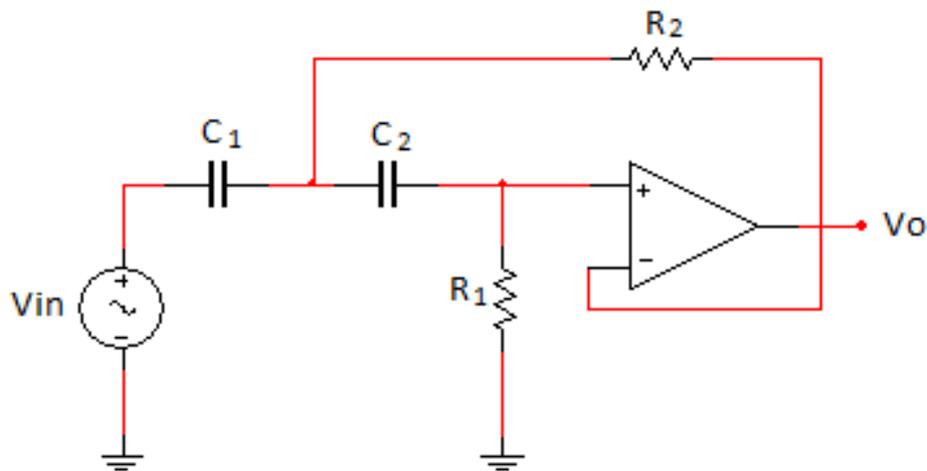


Figura 3.4 – Filtro passa-altas de segunda ordem.

A função de transferência desse circuito é

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{C_1 C_2 R_1 R_2 s^2}{1 + R_2 (C_1 + C_2) s + C_1 C_2 R_1 R_2 s^2} \quad (2)$$

CAPÍTULO 4 – PROJETO DOS FILTROS DO DIVISOR DE FREQUÊNCIAS

O divisor de frequências proposto aqui será formado por três filtros passa-faixa para subwoofer, woofer e driver, mais um filtro passa-altas para o super tweeter. O filtro do super tweeter é diferente dos demais porque os sinais musicais nunca ultrapassam a frequência de operação do super tweeter.

Os filtros passa-faixas têm a faixa de passagem limitada entre duas frequências de corte ω_{c1} e ω_{c2} , onde $\omega_{c1} < \omega_{c2}$. Pode-se obter um filtro passa-faixa ligando em série um filtro passa-altas (com frequência de corte ω_{c1}) e um filtro passa-baixas (com frequência de corte ω_{c2}).

O filtro passa-faixa do subwoofer deve ter sua frequência de corte ω_{c2} igual a frequência de corte ω_{c1} do filtro passa-faixa do woofer. Isso é feito para que a resposta total do sistema seja plana. Na frequência de corte a atenuação do filtro é de 3 dB. Em termos de potência uma atenuação de 3 dB significa que o valor original caiu a metade. Dessa forma, na frequência de corte ω_{c2} o subwoofer vai tocar com metade da potência que seria fornecida caso não se usasse o filtro. E como ω_{c2} também é frequência de corte do filtro do woofer, este também vai receber metade da potência original nessa frequência. O mesmo ocorre na frequência de corte entre o woofer e o driver, e entre o driver e o super tweeter. Assim o som produzido pelo conjunto de alto falantes tem uma resposta plana até nas frequências de transição entre os filtros. A figura 4.1 mostra as respostas em frequência dos filtros sobrepostas em um único gráfico.

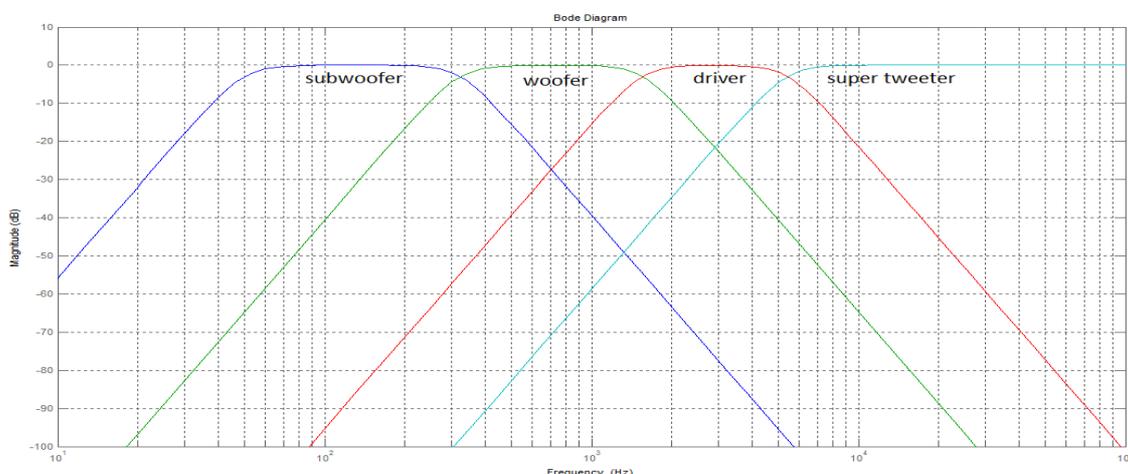


Figura 4.1 – Respostas em frequência dos filtros dos quatro alto falantes.

Para definir as frequências de corte dos filtros foram analisadas as tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 com as respostas em frequência dos alto falantes pesquisados.

4.1 Filtro do subwoofer

No caso do subwoofer a frequência de corte ω_{c1} do filtro não depende principalmente da sua resposta em frequência, mas sim da caixa em que o subwoofer está instalado. A frequência de sintonia das caixas utilizadas para subwoofer's varia geralmente entre 50 e 70 Hz. Outro fator que também deve ser considerado é o gosto musical do usuário. Se for usada uma frequência de corte mais baixa o som terá uma melhor qualidade. No entanto, se for usada uma frequência de corte mais alta, obtém-se uma maior pressão sonora nas frequências entre 70 e 100 Hz. É nessa faixa que tocam as batidas de grave, de músicas eletrônicas entre outras, conhecidas popularmente como “pancadação”.

4.1.1 Filtro passa-altas

Primeiramente deve-se escolher a frequência de corte ω_{c1} do filtro do subwoofer igual a 50 Hz. Usando o MATLAB foi obtida a seguinte aproximação de Butterworth de quarta ordem com frequência de corte 50 Hz.

$$G_{s1} = \frac{s^4}{s^4 + 820,8s^3 + 3,368 \cdot 10^5 s^2 + 8,098 \cdot 10^7 s + 9,734 \cdot 10^9}$$

Essa é a função de transferência do filtro passa-altas que compõe o filtro passa-faixa do subwoofer. O diagrama de bode de G_{s1} é mostrado na figura 4.2.

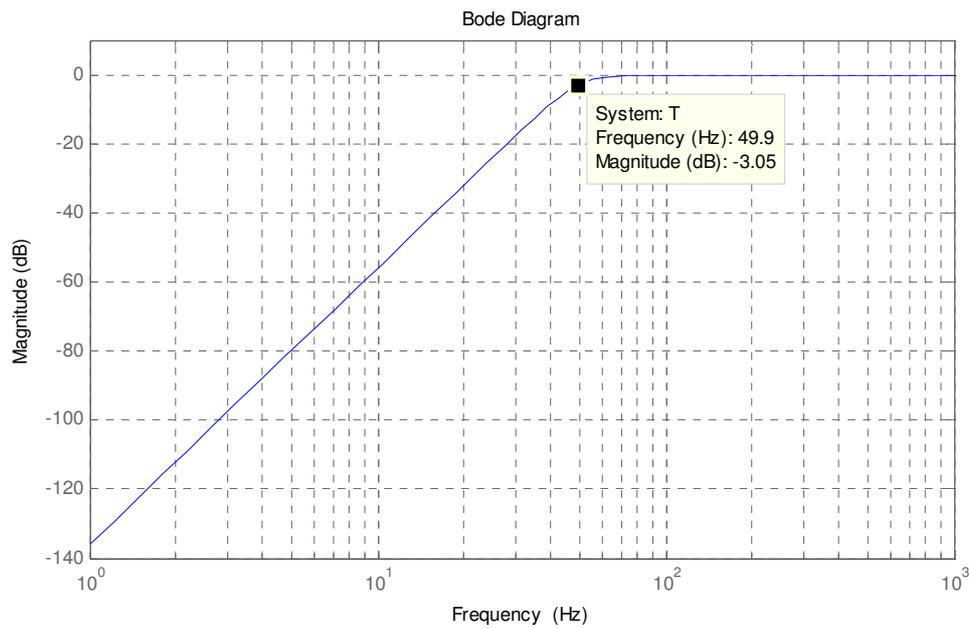


Figura 4.2 – Gráfico da magnitude de G_{s1} .

Para encontrar um circuito que realize a função G_{s1} ela foi dividida em duas biquadráticas mostradas abaixo

$$G_{s1} = \frac{s^4}{s^4 + 820,8s^3 + 3,368 * 10^5 s^2 + 8,098 * 10^7 s + 9,734 * 10^9}$$

$$G_{s1} = \frac{s^2}{s^2 + 240,4s + 9,866 * 10^4} * \frac{s^2}{s^2 + 580,4s + 9,866 * 10^4}$$

$$G_{s1} = U_{s1} * V_{s1}$$

Onde

$$U_{s1} = \frac{s^2}{s^2 + 240,4s + 9,866 * 10^4}$$

$$V_{s1} = \frac{s^2}{s^2 + 580,4s + 9,866 * 10^4}$$

O circuito da figura 13 é capaz de realizar U_{s1} e V_{s1} . Comparando as funções de transferência desejadas com a equação (2) encontram-se os valores dos resistores e

capacitores. Escolhendo os capacitores iguais a $1\mu\text{F}$, foram calculados os seguintes valores para os componentes.

Para U_{s1} :

$$C_1 = C_2 = 1\mu\text{F}$$

$$R_1 = 8333\Omega$$

$$R_2 = 1216\Omega$$

Para V_{s1} :

$$C_1 = C_2 = 1\mu\text{F}$$

$$R_1 = 3448\Omega$$

$$R_2 = 2940\Omega$$

Montou-se no MULTISIM o circuito com valores comerciais mais próximos possível dos calculados acima. O circuito simulado é mostrado na figura 4.3.

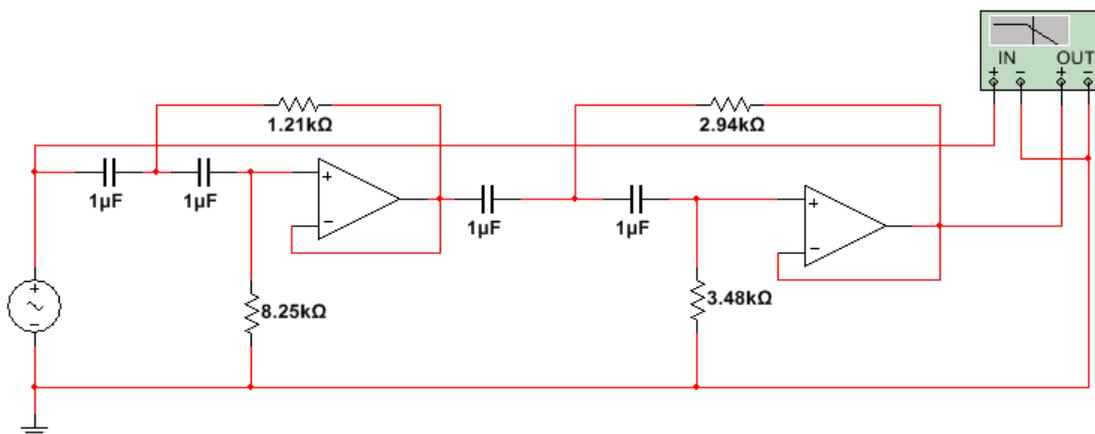


Figura 4.3 – Simulação do filtro passa-altas do subwoofer.

Como foi dito anteriormente que a frequência de corte ω_{c1} depende da caixa de som e também do gosto musical do usuário, foi feita uma modificação nesse circuito para que se possa variar facilmente sua frequência de corte. A forma encontrada para se

fazer essa variação é uma mudança simultânea nos valores de R_2 (referente a U_{s1}) e C_1 (referente a V_{s1}).

Essa mudança é feita através de uma chave como mostra a figura 4.4.

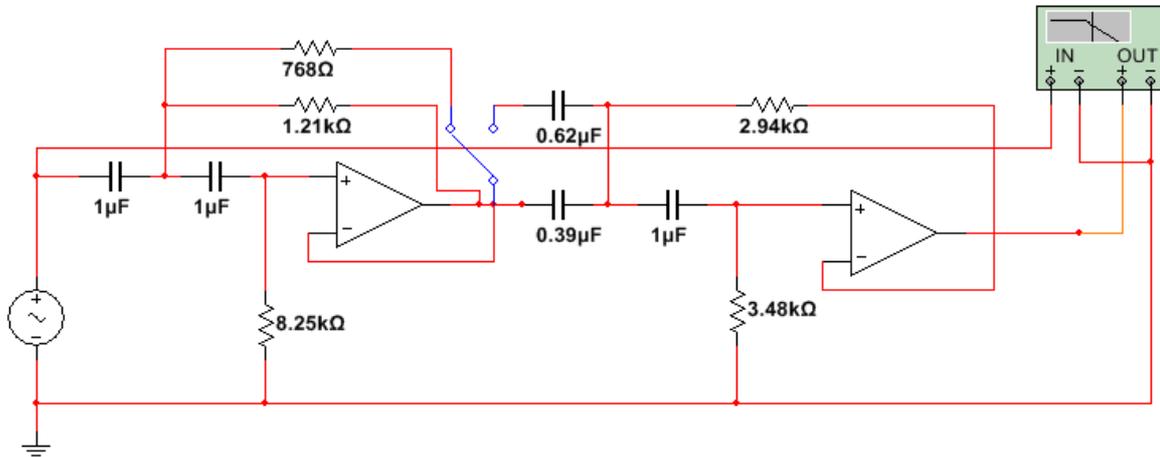


Figura 4.4 – Filtro passa-altas com chave comutadora da frequência de corte.

Vamos agora analisar esse circuito. Com a chave S na posição da direita o circuito é muito semelhante ao circuito da figura 15 que realiza a aproximação de Butterworth calculada para a frequência de corte de 50 Hz. A única diferença é que o capacitor C_1 foi substituído por uma associação de capacitores. A figura 4.5 mostra a resposta do circuito operando dessa forma.

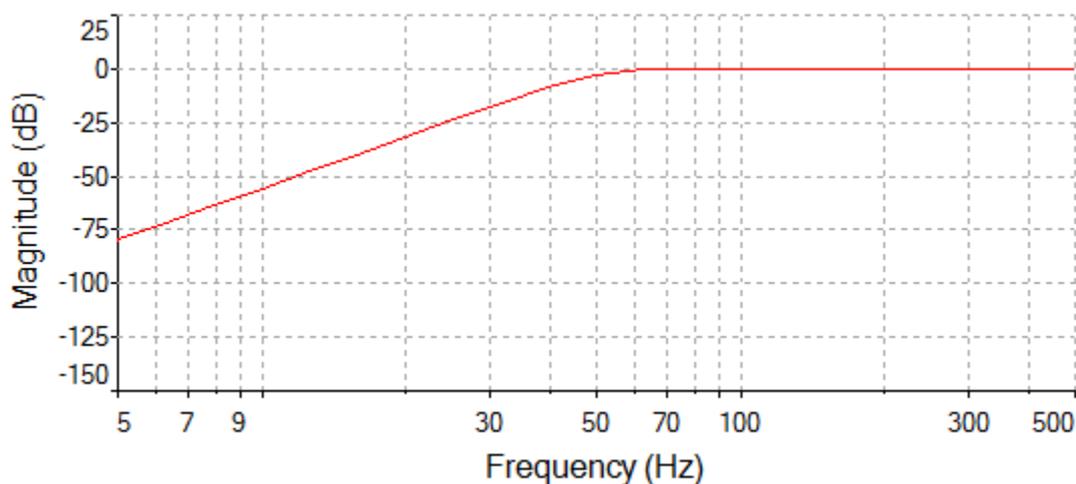


Figura 4.5 – Resposta do filtro passa-altas do subwoofer com frequência de corte menor.

Mas se a chave S for ligada na posição da esquerda os valores de R_2 (referente a U_{s1}) e C_1 (referente a V_{s1}) são reduzidos por um fator de 0,386 e a função de transferência do circuito passa a ser

$$\frac{s^2}{s^2 + 240,4s + 2,58 * 10^5} * \frac{s^2}{s^2 + 580,4s + 2,58 * 10^5}$$

Com isso a frequência de corte do circuito total aumenta. Operando dessa forma o circuito tem a resposta conforme mostrado na figura 4.6.

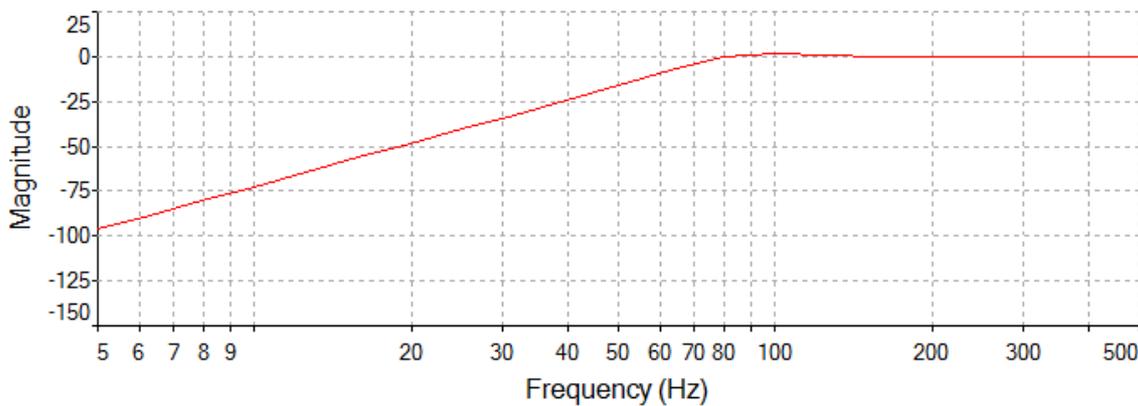


Figura 4.6 – Resposta do filtro passa-altas do subwoofer com frequência de corte maior.

O circuito passou a ter ganho maior que -3 dB a partir dos 70 Hz. No entanto o filtro deixou de se comportar como um filtro de Butterworth e agora tem um ganho pouco maior que 0 dB próximo dos 100 Hz. Esse comportamento ainda é satisfatório.

Assim pode-se escolher uma frequência de corte passa-altas, do subwoofer, de 50 ou 70 Hz alterando apenas a posição de uma chave

4.1.2 Filtro passa-baixas

Para definir a frequência de corte ω_{c2} , passa-baixas do subwoofer, deve-se observar a máxima frequência de operação do subwoofer e também a mínima frequência de operação do woofer. Pois como já foi dito anteriormente, o ω_{c2} do filtro do subwoofer será igual ao ω_{c1} do filtro do woofer.

Esses limites de frequência foram observados através das tabelas 1 e 2. O fim da resposta em frequência dos subwoofer's pesquisados varia de 1000 a 2700 Hz. Usa-se a média geométrica entre estes valores que é igual a $\sqrt{1000 * 2700} = 1643 \text{ Hz}$. O início da resposta em frequência dos woofer's pesquisados varia de 40 a 100 Hz. Usou-se a média geométrica entre estes valores que é igual a $\sqrt{40 * 100} = 63 \text{ Hz}$. Por fim, calculou-se a frequência de corte como a média geométrica entre o fim da resposta do subwoofer e o início da resposta do woofer. $\omega_{c2} = \sqrt{63 * 1643} = 322 \text{ Hz}$. Essa forma de calcular é interessante pois o valor encontrado está bem distante dos limites de todos os subwoofer's e woofer's pesquisados.

Com uso do MATLAB foi obtida a seguinte expressão para a aproximação de Butterworth de quarta ordem com frequência de corte 322 Hz

$$G_{s2} = \frac{1,676 * 10^{13}}{s^4 + 5287s^3 + 1,398 * 10^7 s^2 + 2,164 * 10^{10} s + 1,676 * 10^{13}}$$

Essa é a função de transferência do filtro passa-baixas que compõe o filtro passa-faixa do subwoofer. O diagrama de bode de G_{s2} é mostrado na figura 4.7.

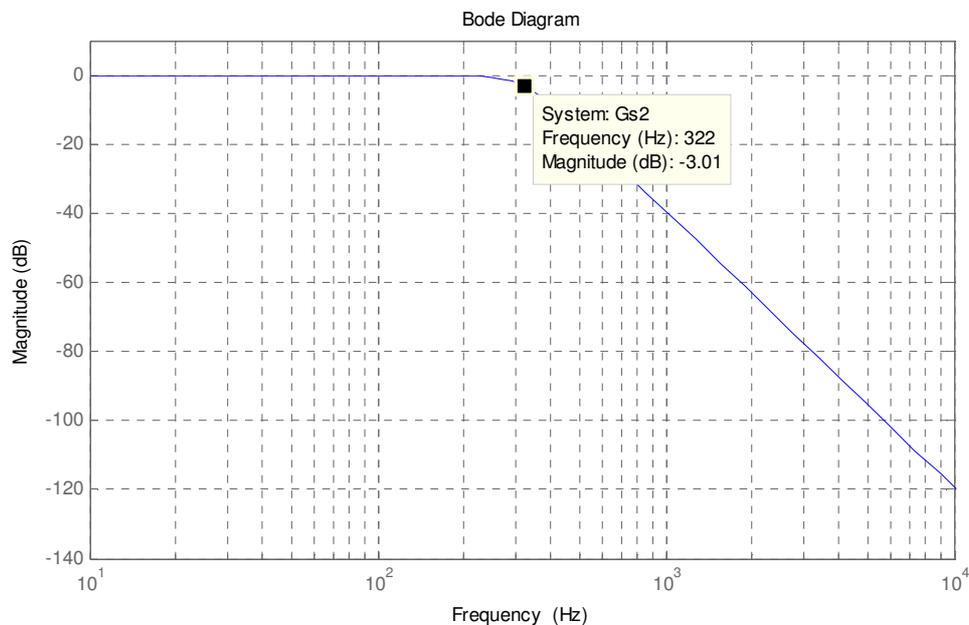


Figura 4.7 – Gráfico da magnitude de G_{s2} .

Para encontrar um circuito que realize a função G_{s2} ela foi dividida em duas biquadráticas mostradas abaixo

$$G_{s2} = \frac{1,676 * 10^{13}}{s^4 + 5287s^3 + 1,398 * 10^7 s^2 + 2,164 * 10^{10} s + 1,676 * 10^{13}}$$

$$G_{s2} = \frac{4,093 * 10^6}{s^2 + 1548s + 4,093 * 10^6} * \frac{4,093 * 10^6}{s^2 + 3738s + 4,093 * 10^6}$$

$$G_{s2} = U_{s2} * V_{s2}$$

Onde

$$U_{s2} = \frac{4,093 * 10^6}{s^2 + 1548s + 4,093 * 10^6}$$

$$V_{s2} = \frac{4,093 * 10^6}{s^2 + 3738s + 4,093 * 10^6}$$

O circuito da figura 12 é capaz de realizar U_{s2} e V_{s2} . Comparando as funções de transferência desejadas com a equação (1) encontram-se os valores dos resistores e capacitores. Escolhendo os resistores iguais a 10 k Ω , foram calculados os seguintes valores para os componentes.

Para U_{s2} :

$$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 18,91 \text{ nF}$$

$$C_2 = 129 \text{ nF}$$

Para V_{s2} :

$$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 45,66 \text{ nF}$$

$$C_2 = 53,5 \text{ nF}$$

Montou-se no MULTISIM o circuito com valores comerciais mais próximos possível dos calculados acima. O circuito simulado é mostrado na figura 4.8.

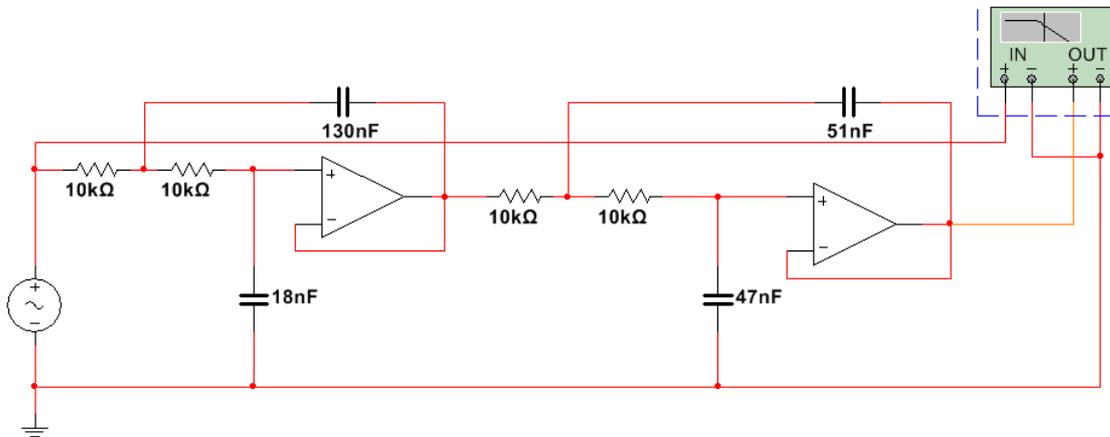


Figura 4.8 – Simulação do filtro passa-baixas do subwoofer.

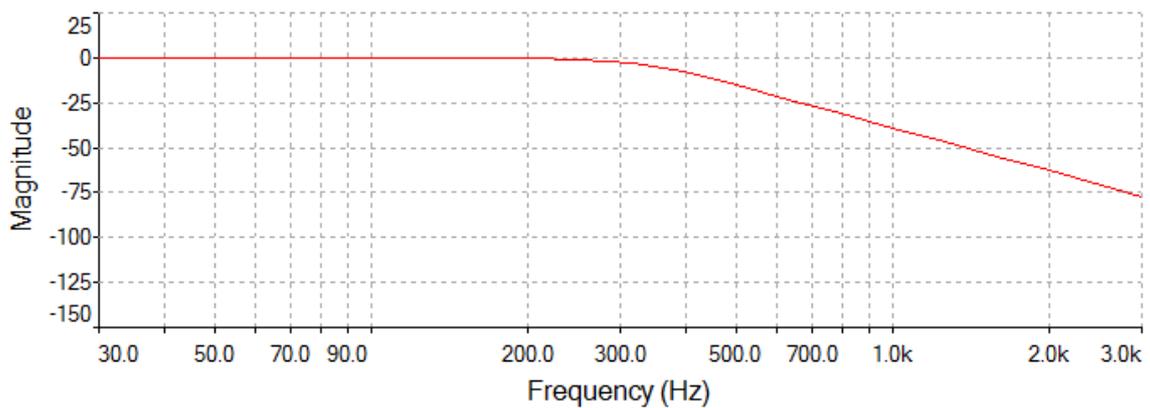


Figura 4.9 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-baixas do subwoofer.

E por fim ligam-se em série o filtro passa-baixas e o passa-altas para se obter o filtro passa-faixa do subwoofer. O circuito obtido é mostrado na figura 4.10. E sua resposta é mostrada na figura 4.11.

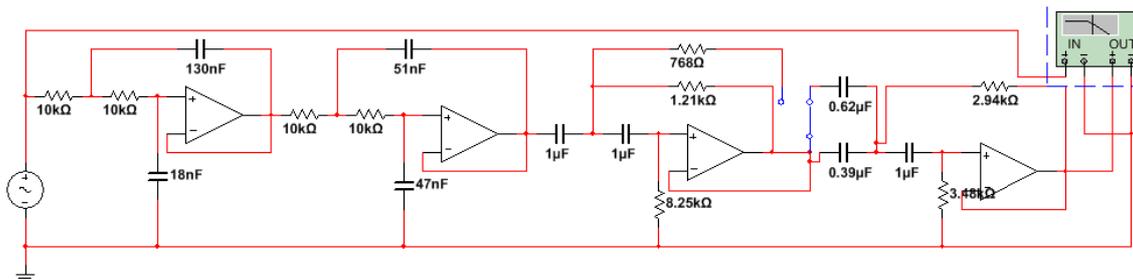


Figura 4.10 – Simulação do filtro passa-faixa do subwoofer.

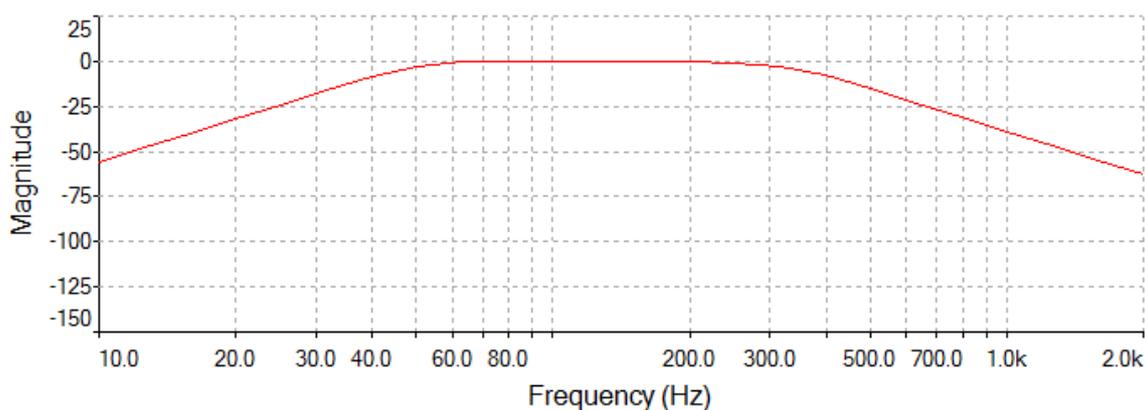


Figura 4.11 – Gráfico da resposta simulada do filtro passa-faixa do subwoofer.

4.2 Filtro do woofer

O filtro do woofer é um passa-faixa formado por um passa-altas (de quarta ordem) em série com um passa-baixas (também de quarta ordem). No caso do woofer a caixa de som não provoca atenuação. Não há necessidade de uma frequência de corte variável para o woofer.

4.2.1 Filtro passa-altas

A frequência de corte ω_{c1} do filtro passa-altas do woofer deve ser igual a frequência de corte do filtro passa-baixas do subwoofer que é de 322 Hz. Com uso do MATLAB foi obtida a seguinte expressão para a aproximação de Butterworth de quarta ordem com frequência de corte 322 Hz

$$G_{w1} = \frac{s^4}{s^4 + 5287s^3 + 1,398 \cdot 10^7 s^2 + 2,164 \cdot 10^{10} s + 1,676 \cdot 10^{13}}$$

Essa é a função de transferência do filtro passa-altas que compõe o filtro passa-faixa do woofer.

O diagrama de bode de G_{w1} é mostrado na figura 4.12.

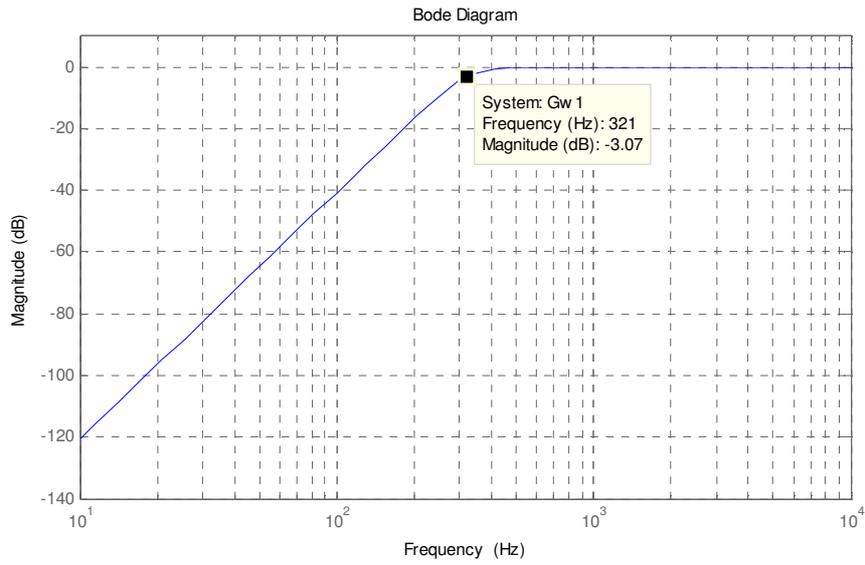


Figura 4.12 – Gráfico da magnitude de G_{w1} .

Para encontrar um circuito que realize a função G_{w1} ela foi dividida em duas biquadráticas mostradas abaixo

$$G_{w1} = \frac{s^4}{s^4 + 5287s^3 + 1,398 \cdot 10^7 s^2 + 2,164 \cdot 10^{10} s + 1,676 \cdot 10^{13}}$$

$$G_{w1} = \frac{s^2}{s^2 + 1548s + 4,093 \cdot 10^6} * \frac{s^2}{s^2 + 3738s + 4,093 \cdot 10^6}$$

$$G_{w1} = U_{w1} * V_{w1}$$

Onde

$$U_{w1} = \frac{s^2}{s^2 + 1548s + 4,093 \cdot 10^6}$$

$$V_{w1} = \frac{s^2}{s^2 + 3738s + 4,093 \cdot 10^6}$$

O circuito da figura 13 é capaz de realizar U_{w1} e V_{w1} . Comparou-se as funções de transferência desejadas com a equação (2) para se encontrar os valores dos resistores e capacitores. Escolhendo os capacitores iguais a 10nF, foram calculados os seguintes valores para os componentes.

Para U_{w1} :

$$C_1 = C_2 = 10nF$$

$$R_1 = 129,1k\Omega$$

$$R_2 = 18,9k\Omega$$

Para V_{w1} :

$$C_1 = C_2 = 10nF$$

$$R_1 = 53,5k\Omega$$

$$R_2 = 45,7k\Omega$$

Montou-se no MULTISIM o circuito com valores comerciais mais próximos possível dos calculados acima. O circuito simulado é mostrado na figura 4.13.

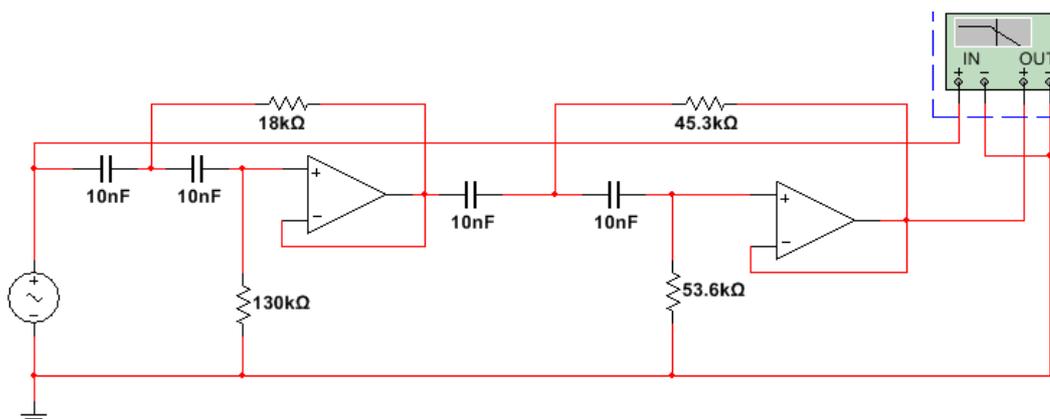


Figura 4.13 – Simulação do filtro passa-altas do woofer.

E o diagrama de Bode correspondente é mostrado na figura 4.14. Com a simulação obtêm-se um resultado muito próximo do esperado.

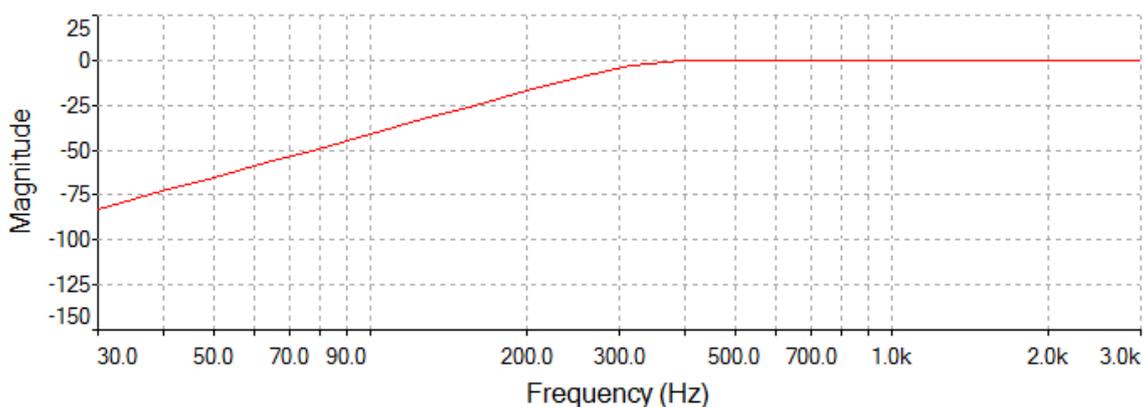


Figura 4.14 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-altas do woofer.

4.2.2 Filtro passa-baixas

Para definir a frequência de corte ω_{c2} , passa-baixas do woofer, deve-se observar a máxima frequência de operação do woofer e também a mínima frequência de operação do driver. Pois o ω_{c2} do filtro do woofer será igual ao ω_{c1} do filtro do driver.

Esses limites de frequência foram observados através das tabelas 2 e 3. O fim da resposta em frequência dos woofer's pesquisados varia de 3500 a 7000 Hz. Usou-se a média geométrica entre estes valores que é igual a $\sqrt{3500 * 7000} = 4950 \text{ Hz}$. O início da resposta em frequência dos driver's pesquisados varia de 300 a 800 Hz. Usou-se a média geométrica entre estes valores que é igual a $\sqrt{300 * 800} = 490 \text{ Hz}$. Por fim, foi calculada a frequência de corte como a média geométrica entre o fim da resposta do woofer e o início da resposta do driver. $\omega_{c2} = \sqrt{490 * 4950} = 1557 \text{ Hz}$. Esse resultado é satisfatório pois o valor encontrado está bem distante dos limites de todos os woofer's e driver's pesquisados.

Com uso do MATLAB foi obtida a seguinte expressão para a aproximação de Butterworth de quarta ordem com frequência de corte 1557 Hz

$$G_{w2} = \frac{9,159 \cdot 10^{15}}{s^4 + 2,556 \cdot 10^4 s^3 + 3,268 \cdot 10^8 s^2 + 2,447 \cdot 10^{12} s + 9,159 \cdot 10^{15}}$$

Essa é a função de transferência do filtro passa-baixas que compõe o filtro passa-faixa do woofer. O diagrama de bode de G_{w2} é mostrado na figura 4.15.

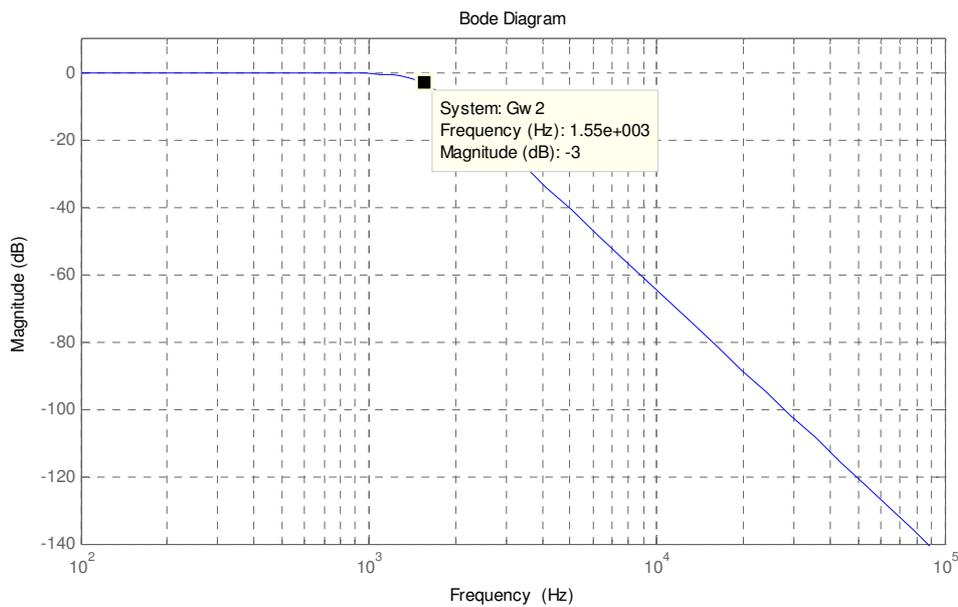


Figura 4.15 – Gráfico da magnitude de G_{w2} .

Para encontrar um circuito que realize a função G_{w2} ela foi dividida em duas biquadráticas mostradas abaixo

$$G_{w2} = \frac{9,159 * 10^{15}}{s^4 + 2,556 * 10^4 s^3 + 3,268 * 10^8 s^2 + 2,447 * 10^{12} s + 9,159 * 10^{15}}$$

$$G_{w2} = \frac{9,571 * 10^7}{s^2 + 7488s + 9,571 * 10^7} * \frac{9,571 * 10^7}{s^2 + 1,808 * 10^4 s + 9,571 * 10^7}$$

$$G_{w2} = U_{w2} * V_{w2}$$

Onde

$$U_{w2} = \frac{9,571 * 10^7}{s^2 + 7488s + 9,571 * 10^7}$$

$$V_{w2} = \frac{9,571 * 10^7}{s^2 + 1,808 * 10^4 s + 9,571 * 10^7}$$

O circuito da figura 12 é capaz de realizar U_{w2} e V_{w2} . Comparou-se as funções de transferência desejadas com a equação (1) para encontrar os valores dos resistores e

capacitores. Escolhendo os resistores iguais a $10\text{ k}\Omega$, foram calculados os seguintes valores para os componentes.

Para U_{w2} :

$$R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 3,9\text{ nF}$$

$$C_2 = 26,7\text{ nF}$$

Para V_{w2} :

$$R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 9,4\text{ nF}$$

$$C_2 = 11,1\text{ nF}$$

Montou-se no MULTISIM o circuito com valores comerciais mais próximos possível dos calculados acima. O circuito simulado é mostrado na figura 4.16. E o diagrama de Bode da simulação é mostrado na figura 4.17.

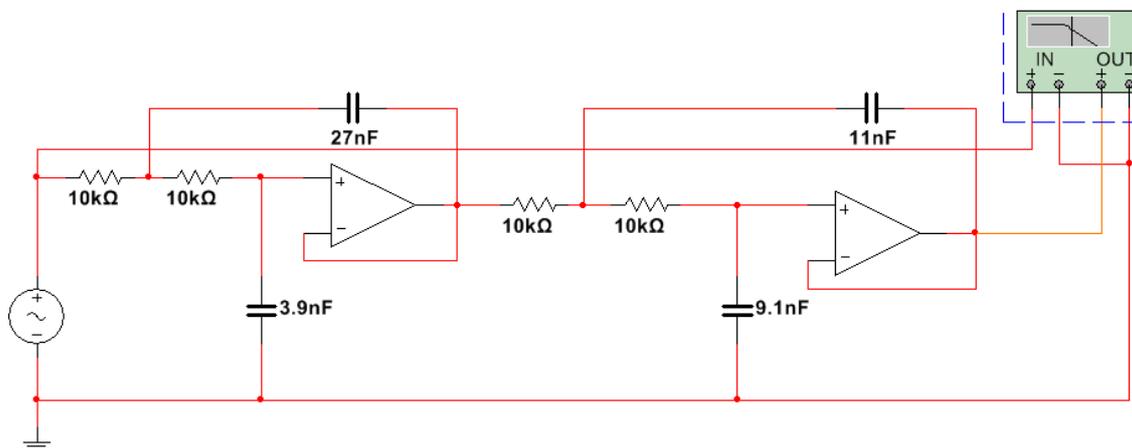


Figura 4.16 – Simulação do filtro passa-baixas do woofer.

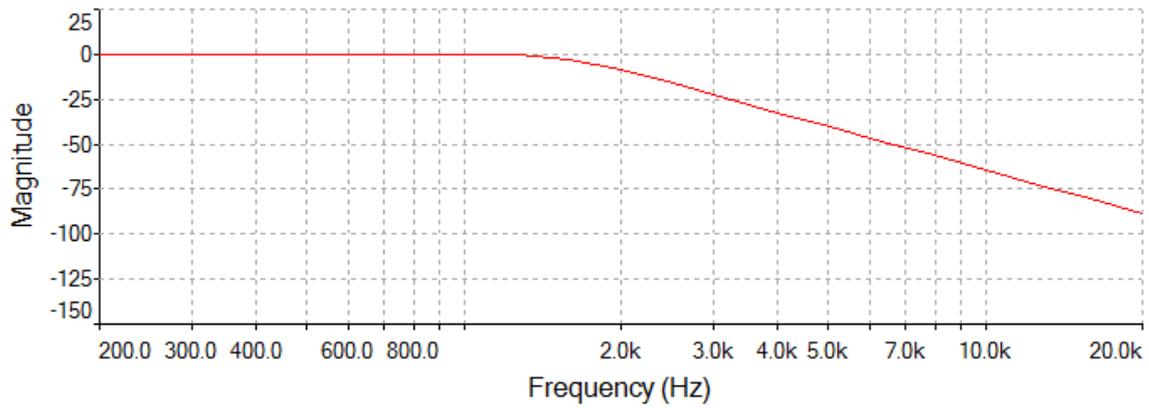


Figura 4.17 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-baixas do woofer.

E por fim ligam-se em série o filtro passa-baixas e o passa-altas para se obter o filtro passa-faixa do woofer. O circuito obtido é mostrado na figura 4.18. E sua resposta é mostrada na figura 4.19.

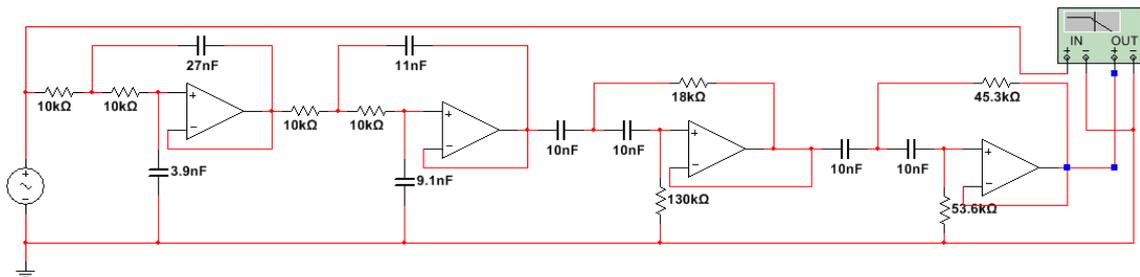


Figura 4.18 – Simulação do filtro passa-faixa do woofer.

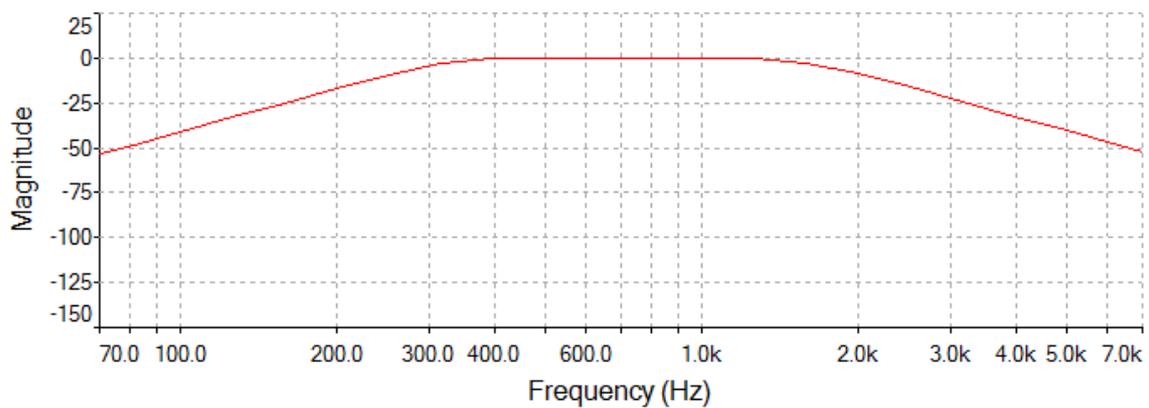


Figura 4.19 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-faixa do woofer.

4.3 Filtro do driver

O filtro do driver é um passa-faixa formado por um passa-altas (de quarta ordem) em série com um passa-baixas (também de quarta ordem).

4.3.1 Filtro passa-altas

A frequência de corte w_{c1} do filtro passa-altas do driver deve ser igual a frequência de corte do filtro passa-baixas do woofer que é de 1557 Hz. Com uso do MATLAB foi obtida a seguinte expressão para a aproximação de Butterworth de quarta ordem com frequência de corte 1557 Hz

$$G_{d1} = \frac{s^4}{s^4 + 2,556 \cdot 10^4 s^3 + 3,268 \cdot 10^8 s^2 + 2,447 \cdot 10^{12} s + 9,159 \cdot 10^{15}}$$

Essa é a função de transferência do filtro passa-altas que compõe o filtro passa-faixa do driver. O diagrama de bode de G_{d1} é mostrado na figura 4.20.

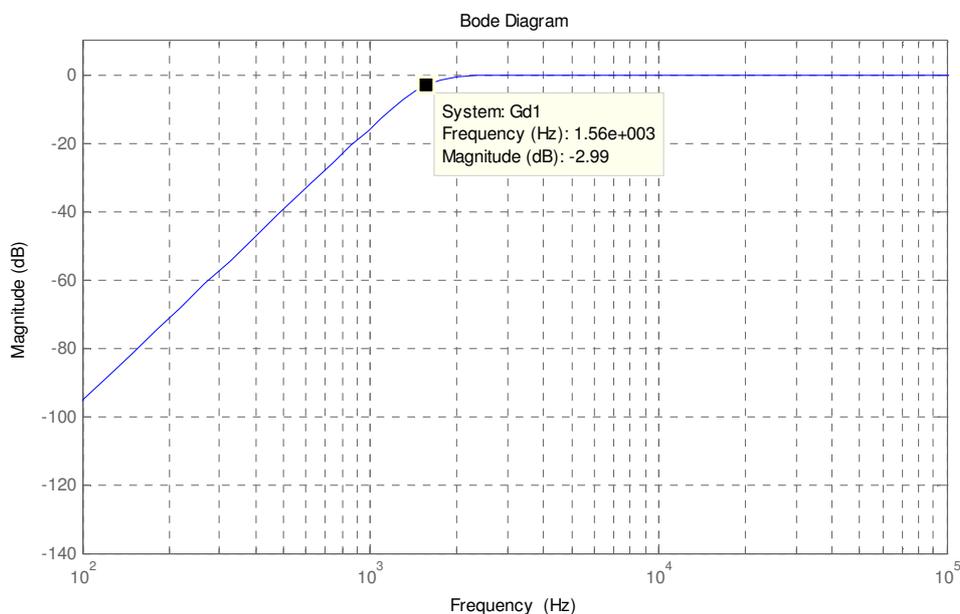


Figura 4.20 – Gráfico da magnitude de G_{d1} .

Para encontrar um circuito que realize a função G_{dl} ela foi dividida em duas biquadráticas mostradas abaixo

$$G_{dl} = \frac{s^4}{s^4 + 2,556 * 10^4 s^3 + 3,268 * 10^8 s^2 + 2,447 * 10^{12} s + 9,159 * 10^{15}}$$

$$G_{dl} = \frac{s^2}{s^2 + 7488s + 9,571 * 10^7} * \frac{s^2}{s^2 + 1,808 * 10^4 s + 9,571 * 10^7}$$

$$G_{dl} = U_{dl} * V_{dl}$$

Onde

$$U_{dl} = \frac{s^2}{s^2 + 7488s + 9,571 * 10^7}$$

$$V_{dl} = \frac{s^2}{s^2 + 1,808 * 10^4 s + 9,571 * 10^7}$$

O circuito da figura 13 é capaz de realizar U_{dl} e V_{dl} . Comparando-se as funções de transferência desejadas com a equação (2) encontram-se os valores dos resistores e capacitores. Escolhendo os capacitores iguais a 10nF, foram calculados os seguintes valores para os componentes.

Para U_{dl} :

$$C_1 = C_2 = 10nF$$

$$R_1 = 26,7k\Omega$$

$$R_2 = 3,9k\Omega$$

Para V_{dl} :

$$C_1 = C_2 = 10nF$$

$$R_1 = 11,1k\Omega$$

$$R_2 = 9,4k\Omega$$

Montou-se no MULTISIM o circuito com valores comerciais mais próximos possível dos calculados acima. O circuito simulado é mostrado na figura 4.21.

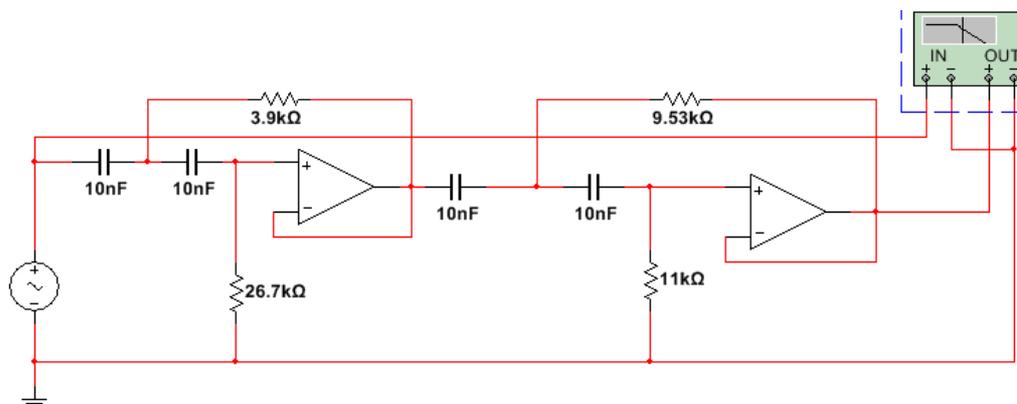


Figura 4.21 – Simulação do filtro passa-altas do driver.

E o diagrama de Bode correspondente é mostrado na figura 4.22. Com a simulação obteve-se um resultado muito próximo do esperado.

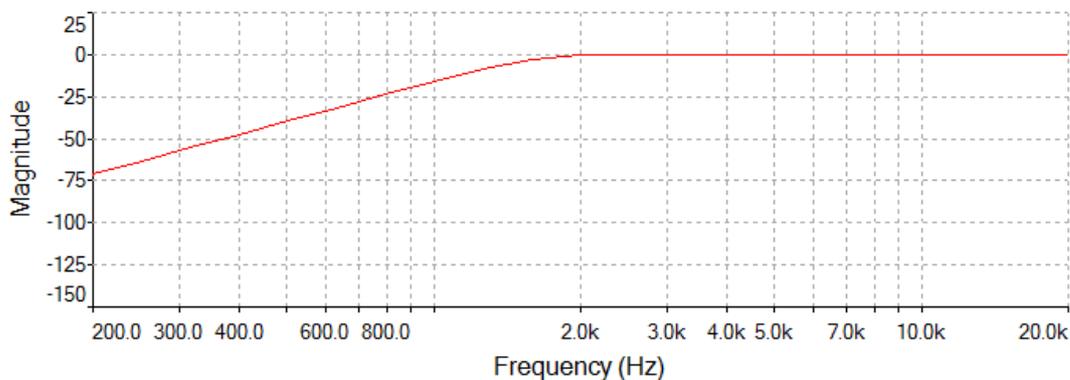


Figura 4.22 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-altas do driver.

4.3.2 Filtro passa-baixas

Para definir a frequência de corte w_{c2} , passa-baixas do driver, deve-se observar a máxima frequência de operação do driver e também a mínima frequência de operação do super tweeter. Pois o w_{c2} do filtro do driver será igual ao w_c do filtro do super tweeter.

Esses limites de frequência foram observados através das tabelas 3 e 4. O fim da resposta em frequência dos driver's pesquisados varia de 6000 a 18000 Hz. Usou-se a média geométrica entre estes valores que é igual a $\sqrt{6000 * 18000} = 10392 \text{ Hz}$. O início da resposta em frequência dos super tweeter's pesquisados varia de 2000 a 4000 Hz. Usou-se a média geométrica entre estes valores que é igual a $\sqrt{2000 * 4000} = 2828 \text{ Hz}$. Por fim, foi calculada a frequência de corte como a média geométrica entre o fim da resposta do woofer e o início da resposta do driver. $w_{c2} = \sqrt{2828 * 10392} = 5421 \text{ Hz}$. Esse resultado é satisfatório pois o valor encontrado está bem distante dos limites de todos os driver's e super tweeter's pesquisados.

Com uso do MATLAB foi obtida a seguinte expressão para a aproximação de Butterworth de quarta ordem com frequência de corte 5421 Hz

$$G_{d2} = \frac{1,346 * 10^{18}}{s^4 + 8,901 * 10^4 s^3 + 3,961 * 10^9 s^2 + 1,033 * 10^{14} s + 1,346 * 10^{18}}$$

Essa é a função de transferência do filtro passa-baixas que compõe o filtro passa-faixa do driver. O diagrama de bode de G_{d2} é mostrado na figura 4.23.

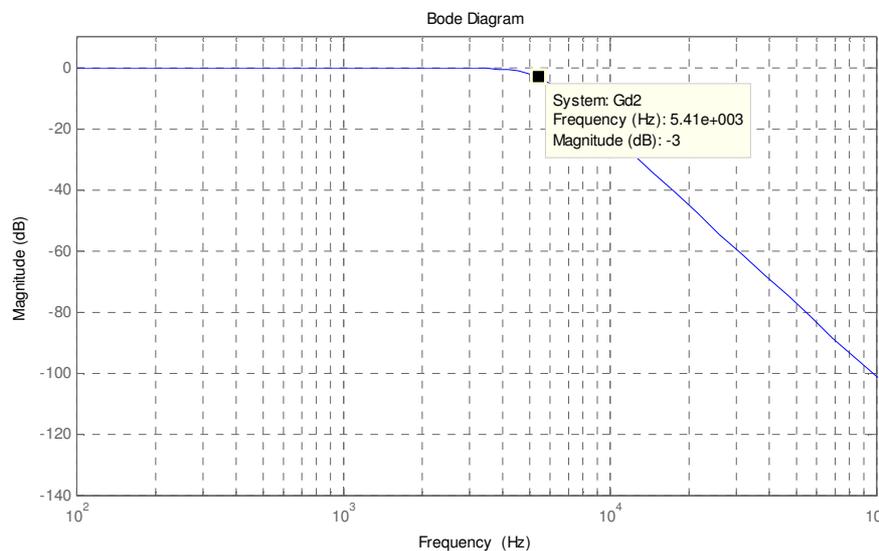


Figura 4.23 – Gráfico da magnitude de G_{d2} .

Para encontrar um circuito que realize a função G_{d2} ela foi dividida em duas biquadráticas mostradas abaixo

$$G_{d2} = \frac{1,346 * 10^{18}}{s^4 + 8,901 * 10^4 s^3 + 3,961 * 10^9 s^2 + 1,033 * 10^{14} s + 1,346 * 10^{18}}$$

$$G_{d2} = \frac{1,16 * 10^9}{s^2 + 2,607 * 10^4 s + 1,16 * 10^9} * \frac{1,16 * 10^9}{s^2 + 6,294 * 10^4 s + 1,16 * 10^9}$$

$$G_{d2} = U_{d2} * V_{d2}$$

Onde

$$U_{d2} = \frac{1,16 * 10^9}{s^2 + 2,607 * 10^4 s + 1,16 * 10^9}$$

$$V_{d2} = \frac{1,16 * 10^9}{s^2 + 6,294 * 10^4 s + 1,16 * 10^9}$$

O circuito da figura 12 é capaz de realizar U_{d2} e V_{d2} . Comparando as funções de transferência desejadas com a equação (1) encontram-se os valores dos resistores e capacitores. Escolhendo os resistores iguais a 10 k Ω , foram calculados os seguintes valores para os componentes.

Para U_{d2} :

$$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 1,1 \text{ nF}$$

$$C_2 = 7,7 \text{ nF}$$

Para V_{d2} :

$$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 2,7 \text{ nF}$$

$$C_2 = 3,2 \text{ nF}$$

Montou-se no MULTISIM o circuito com valores comerciais mais próximos possível dos calculados acima. O circuito simulado é mostrado na figura 4.24.

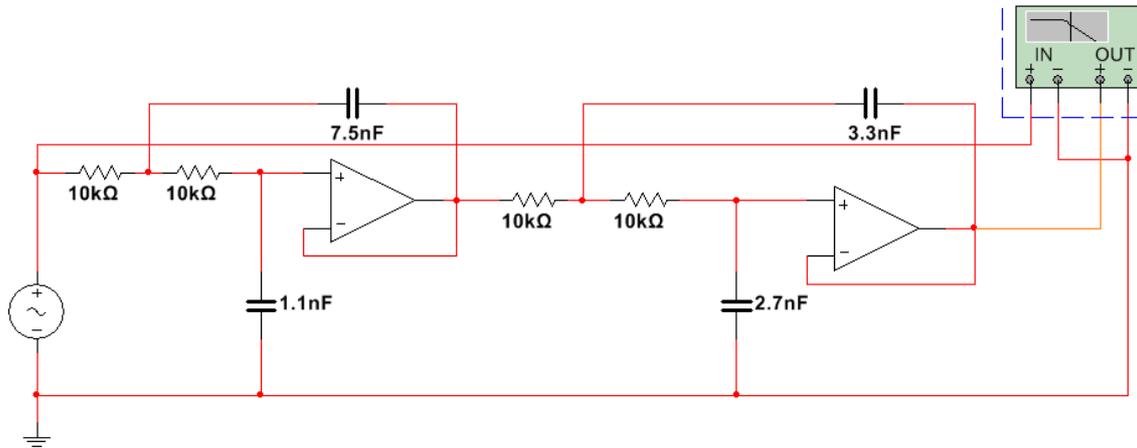


Figura 4.24 – Simulação do filtro passa-baixas do driver.

E o diagrama de Bode da simulação é mostrado na figura 4.25.

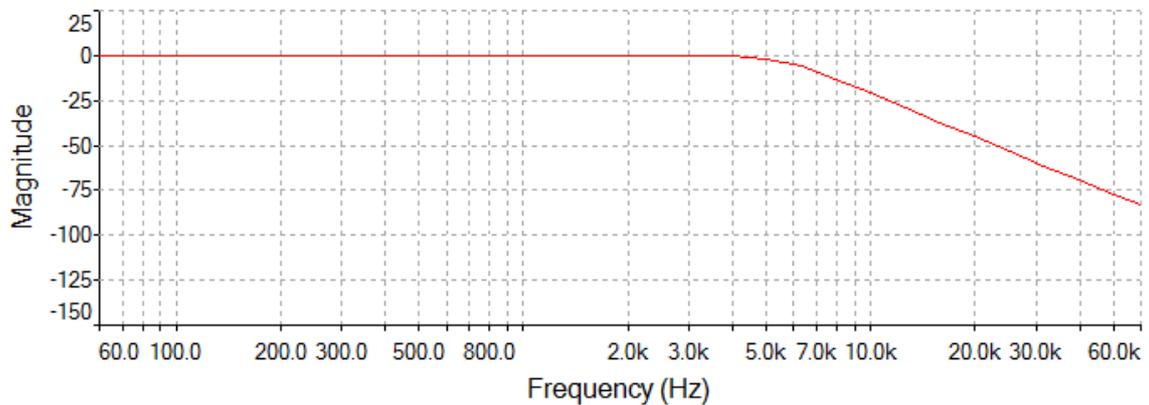


Figura 4.25 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-baixas do driver.

E por fim ligam-se em série o filtro passa-baixas e o passa-altas para se obter o filtro passa-faixa do woofer. O circuito obtido é mostrado na figura 4.26. E sua resposta é mostrada na figura 4.27.

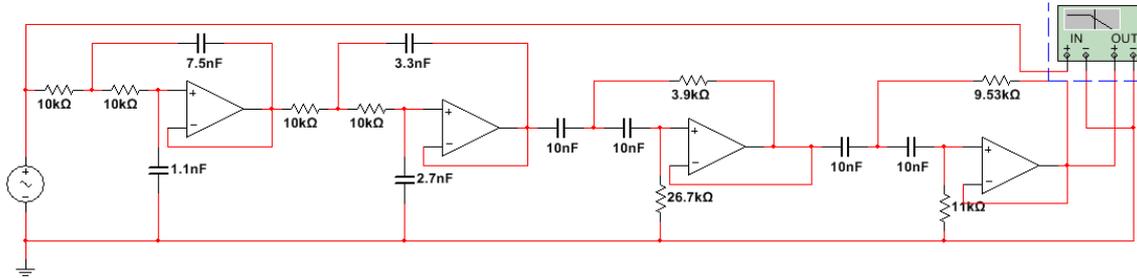


Figura 4.26 – Simulação do filtro passa-faixa do driver.

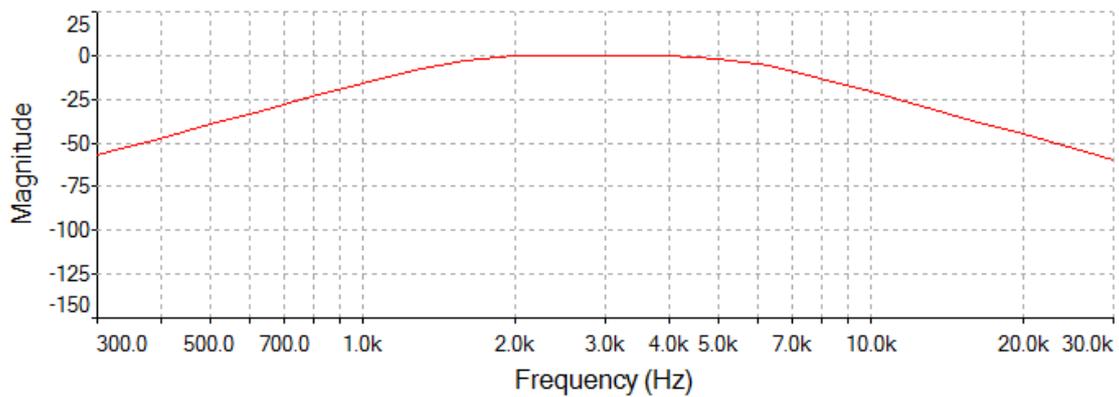


Figura 4.27 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-faixa do driver.

4.4 Filtro do super tweeter

O filtro do super tweeter não é um filtro passa-faixa como nos demais alto falantes, mas sim um filtro passa-altas de quarta ordem com frequência de corte w_c igual a frequência de corte w_{c2} do filtro do driver que é de 5421 Hz. Com uso do MATLAB obtêm-se a seguinte expressão para a aproximação de Butterworth de quarta ordem com frequência de corte 1557 Hz

$$G_t = \frac{s^4}{s^4 + 8,901 \cdot 10^4 s^3 + 3,961 \cdot 10^9 s^2 + 1,033 \cdot 10^{14} s + 1,346 \cdot 10^{18}}$$

Essa é a função de transferência do filtro passa-altas do super tweeter.

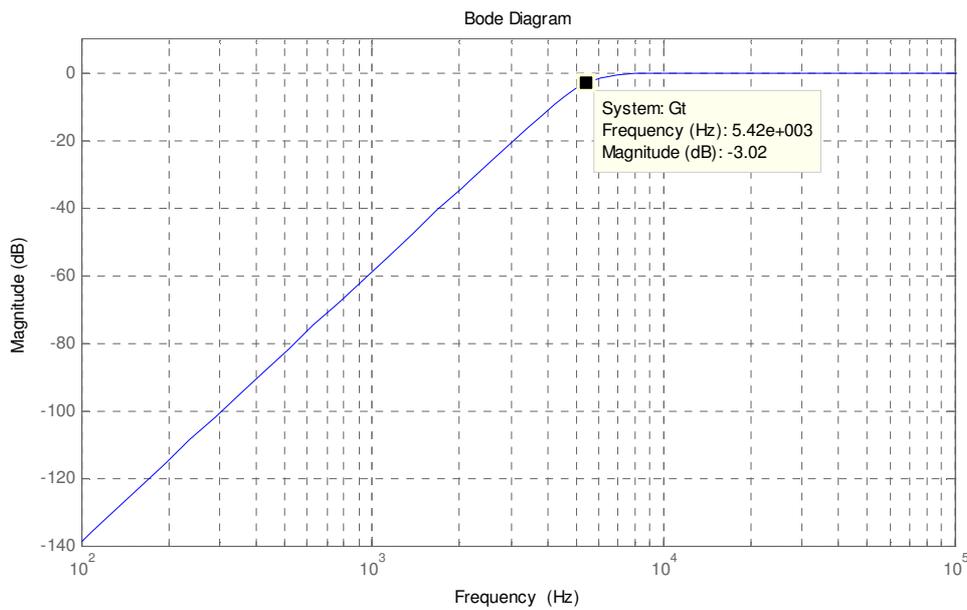


Figura 4.28 – Gráfico da magnitude de G_t .

Para encontrar um circuito que realize a função G_t ela é dividida em duas biquadráticas mostradas abaixo

$$G_t = \frac{s^4}{s^4 + 8,901 * 10^4 s^3 + 3,961 * 10^9 s^2 + 1,033 * 10^{14} s + 1,346 * 10^{18}}$$

$$G_t = \frac{s^2}{s^2 + 2,607 * 10^4 s + 1,16 * 10^9} * \frac{s^2}{s^2 + 6,294 * 10^4 s + 1,16 * 10^9}$$

$$G_t = U_t * V_t$$

Onde

$$U_t = \frac{s^2}{s^2 + 2,607 * 10^4 s + 1,16 * 10^9}$$

$$V_t = \frac{s^2}{s^2 + 6,294 * 10^4 s + 1,16 * 10^9}$$

O circuito da figura 13 é capaz de realizar U_t e V_t . Comparando as funções de transferência desejadas com a equação (2) encontram-se os valores dos resistores e

capacitores. Escolhendo os capacitores iguais a 10nF, foram calculados os seguintes valores para os componentes.

Para U_t :

$$C_1 = C_2 = 10nF$$

$$R_1 = 7,7k\Omega$$

$$R_2 = 1,1k\Omega$$

Para V_t :

$$C_1 = C_2 = 10nF$$

$$R_1 = 3,2k\Omega$$

$$R_2 = 2,7k\Omega$$

Montou-se no MULTISIM o circuito com valores comerciais mais próximos possível dos calculados acima. O circuito simulado é mostrado na figura 4.29.

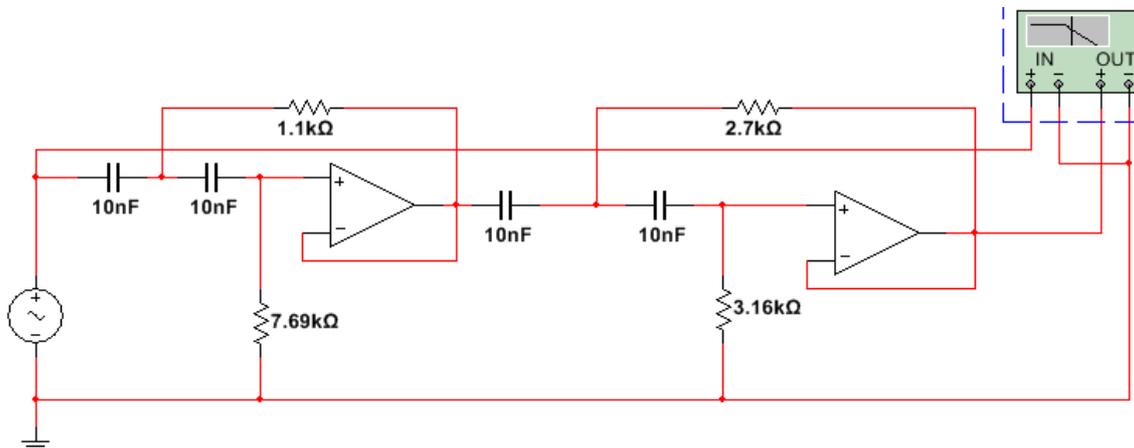


Figura 4.29 – Simulação do filtro passa-altas do super tweeter.

E o diagrama de Bode correspondente é mostrado na figura 4.30. Com a simulação obtém-se um resultado muito próximo do esperado.

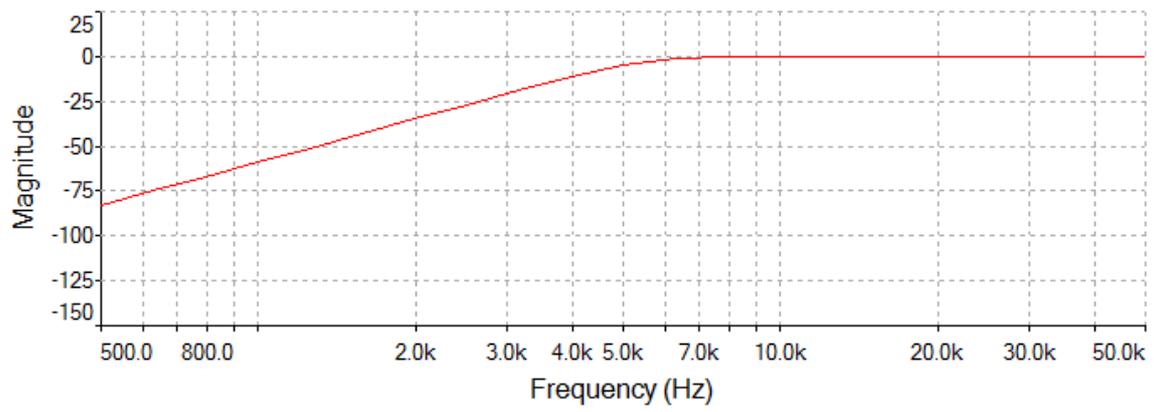


Figura 4.30 – Gráfico da resposta da simulação do filtro passa-altas do super tweeter.

CAPÍTULO 5 – CIRCUITO INDICADOR DE *CLIPPING*

Um recurso muito útil acoplado ao nosso divisor é o indicador de *clipping*. O indicar de *clipping* tem a função de detectar distorção no sinal musical da entrada do divisor de frequências. O termo *clipping* significa distorção do sinal causada por ganho demasiado. Essa distorção pode ser causada tanto pelos geradores de sinais como pelos amplificadores de potência.

Neste projeto deseja-se detectar o *clipping* causado pelo player que gera o sinal e controla o ganho do mesmo. O player tem um limite de tensão de saída que varia geralmente de 2 a 4 Volts.

Ao aumentar o ganho do sinal de forma que o sinal original ultrapassaria esse limite de tensão ocorre essa distorção que é ilustrada na figura 5.1. É como se os picos do sinal fossem achatados.

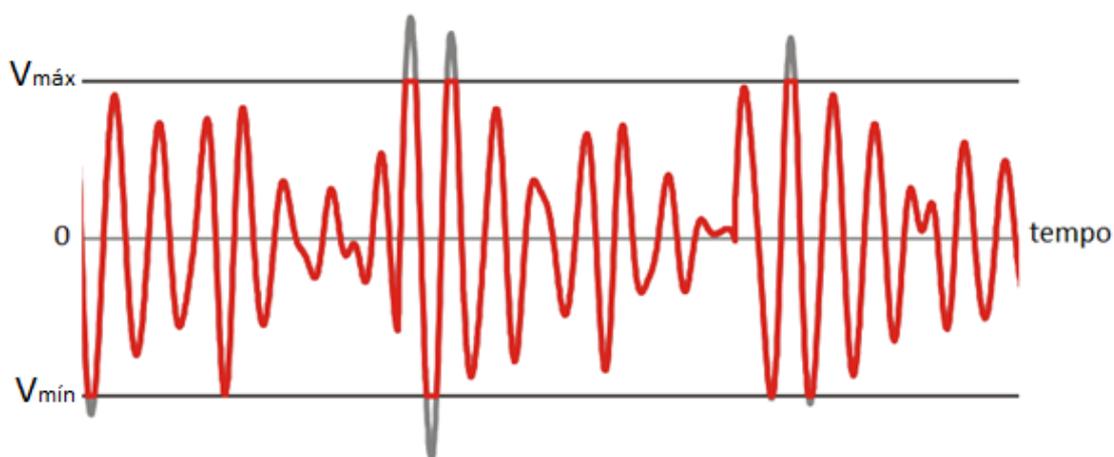


Figura 5.1 – Ocorrência de clipping em sinal musical.

O circuito indicador de clipping detecta quando o sinal ultrapassa um determinado limiar de tensão e indica a ocorrência através do acendimento de um led. O circuito detecta tanto os picos positivos quanto os picos negativos. O acendimento do led não dura apenas o tempo de duração do pico mas sim um tempo suficiente para percepção ótica.

O circuito indicador de clipping escolhido para nosso divisor é mostrado na figura 5.2. O circuito funciona com dois amplificadores operacionais operando como comparadores de tensão. O sinal de entrada é comparado com duas tensões de referência simétricas. Quando o sinal ultrapassa o limite (positivo ou negativo) um dos amplificadores operacionais satura e aciona o transistor que permite o acendimento do led. O capacitor na saída dos amplificadores operacionais faz com que o led permaneça aceso por alguns instantes para que possa ser percebido visivelmente.

A tensão de referência pode ser ajustada através do potenciômetro de 20k Ω . Dessa forma o circuito pode detectar distorção de qualquer player. Com a simulação consegue-se variar a tensão de referência de 0 até +/-5,9V.

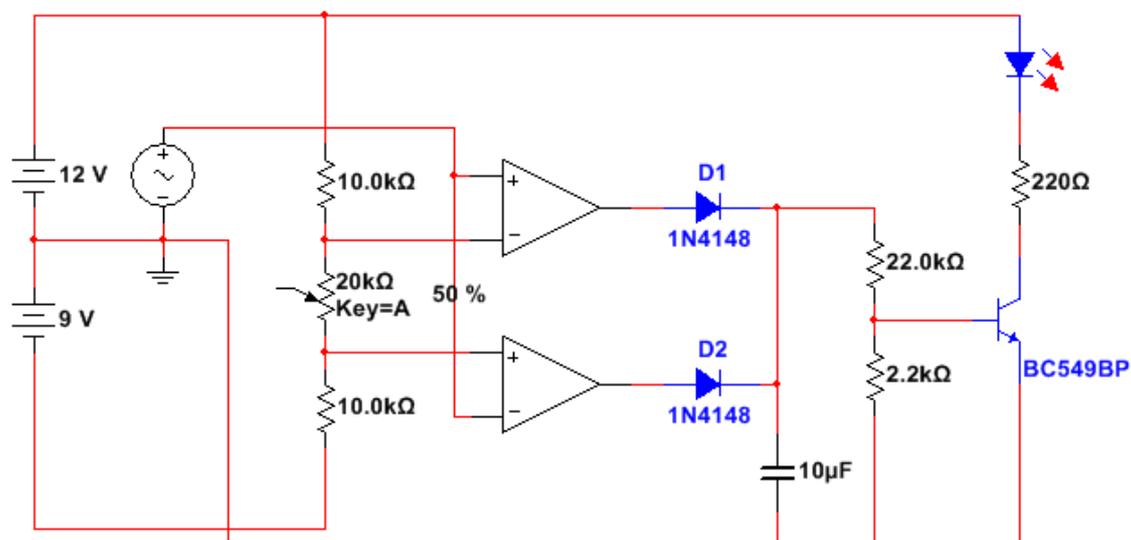


Figura 5.2 – Simulação do circuito indicador de clipping.

CAPÍTULO 6 – TESTES E RESULTADOS

Para testar a eficiência do divisor de frequências projetado foi realizado um teste de medição do volume do som.

Foi medido o volume do som produzido pelos alto falantes, numa certa faixa de frequência, com e sem o uso do divisor. Esse teste foi realizado através do software Audacity. O Audacity permite a geração de um sinal de amplitude constante em uma faixa de frequência especificada pelo usuário. O mesmo programa permite a gravação de som através do microfone do computador e gera o espectro de frequência do som gravado.

Então foi aplicada uma faixa de frequência adequada em cada tipo de alto falante. Foi gravado o som reproduzido, com e sem o uso do divisor, para se fazer a comparação dos espectros de frequência e avaliar a atenuação provocada pelo divisor de frequências. Esse teste não possui precisão para se medir a atenuação, mas permite que se tenha uma noção da mudança que o divisor de frequências provoca no som reproduzido. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras a seguir.

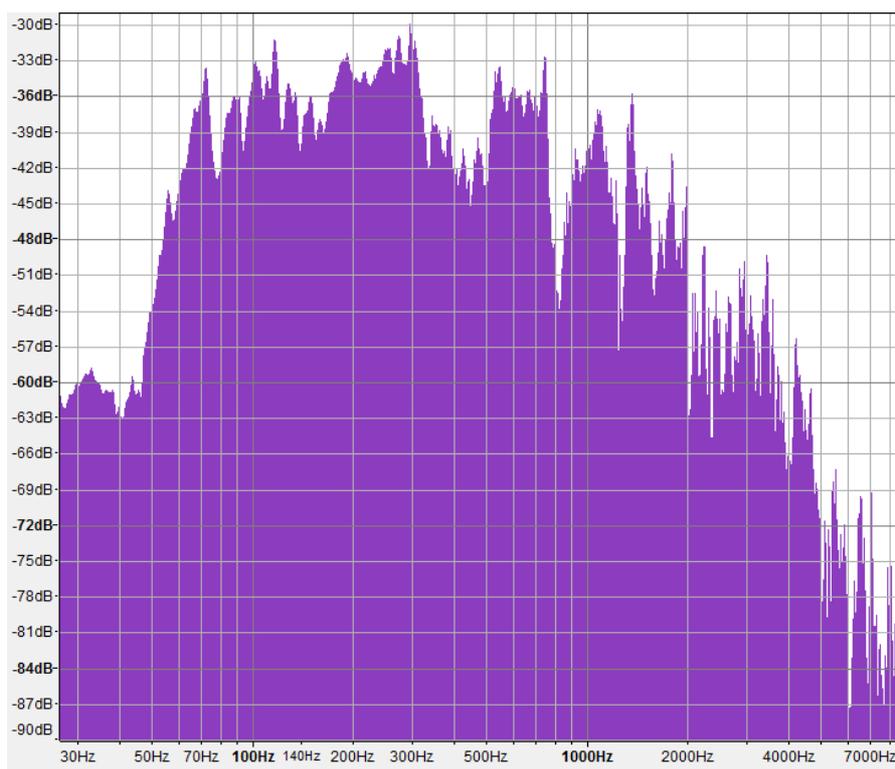


Figura 6.1 – Espectro de frequência do som gerado pelo subwoofer sem uso do divisor.

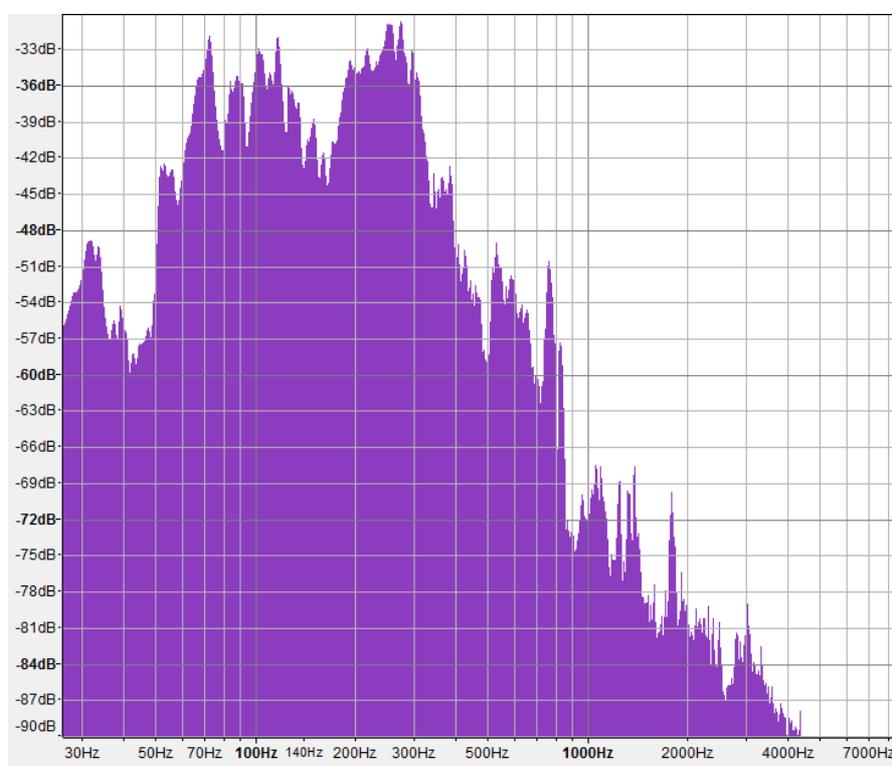


Figura 6.2 – Espectro de frequência do som gerado pelo subwoofer com uso do divisor.

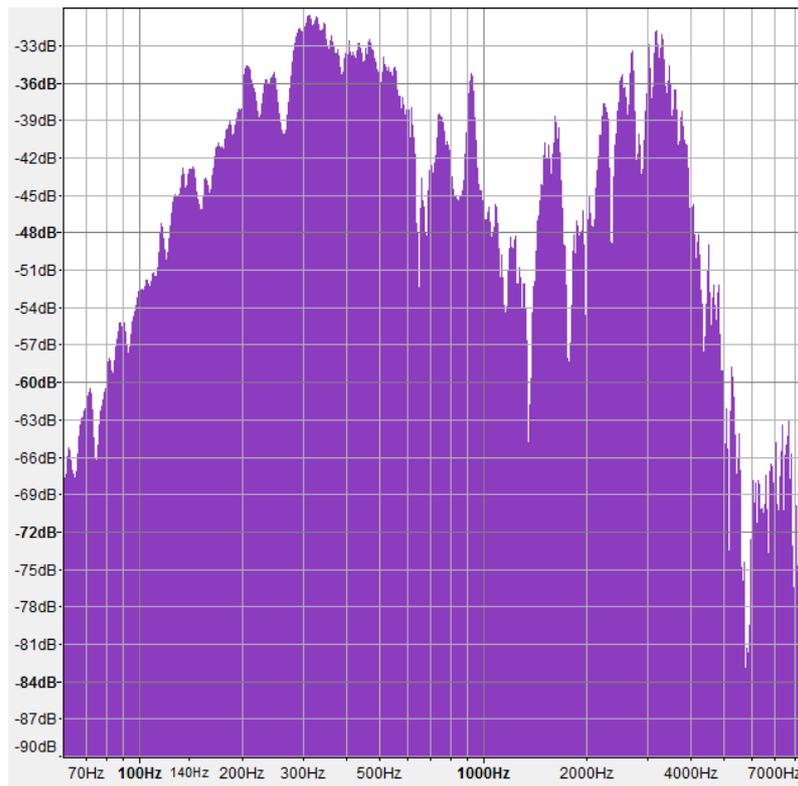


Figura 6.3 – Espectro de frequência do som gerado pelo woofer sem uso do divisor.

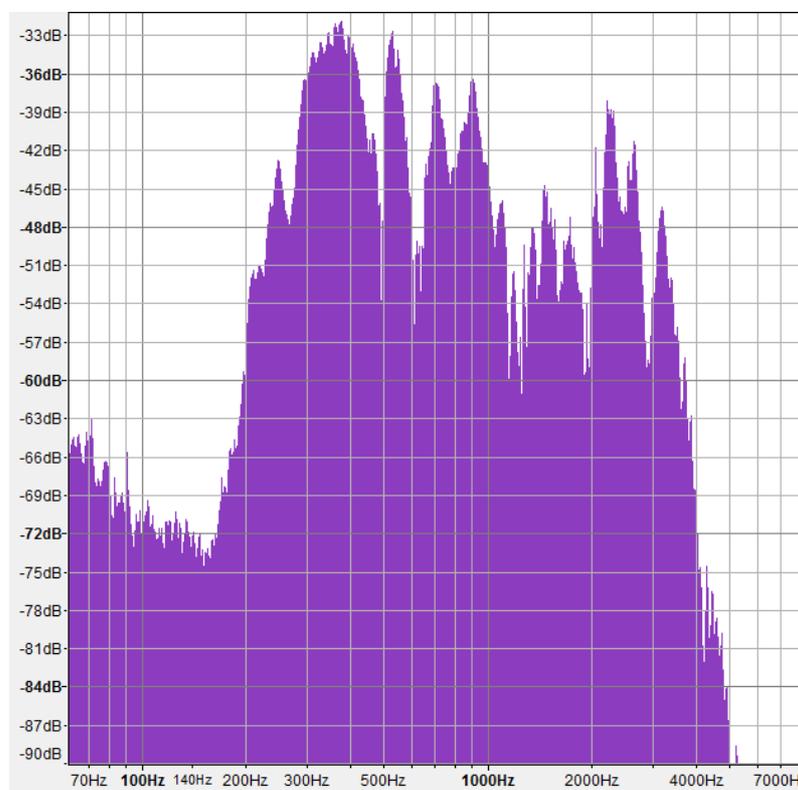


Figura 6.4 – Espectro de frequência do som gerado pelo woofer com uso do divisor.

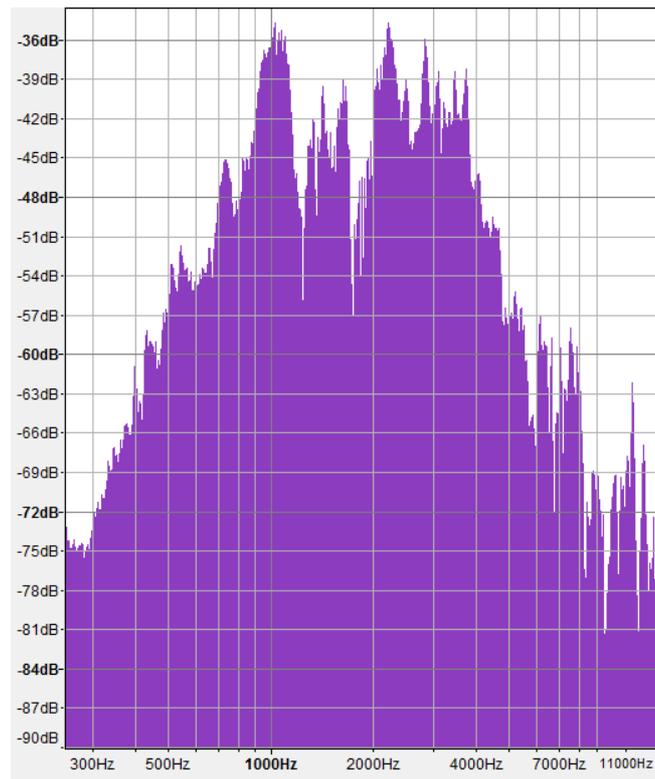


Figura 6.5 – Espectro de frequência do som gerado pelo driver sem uso do divisor.

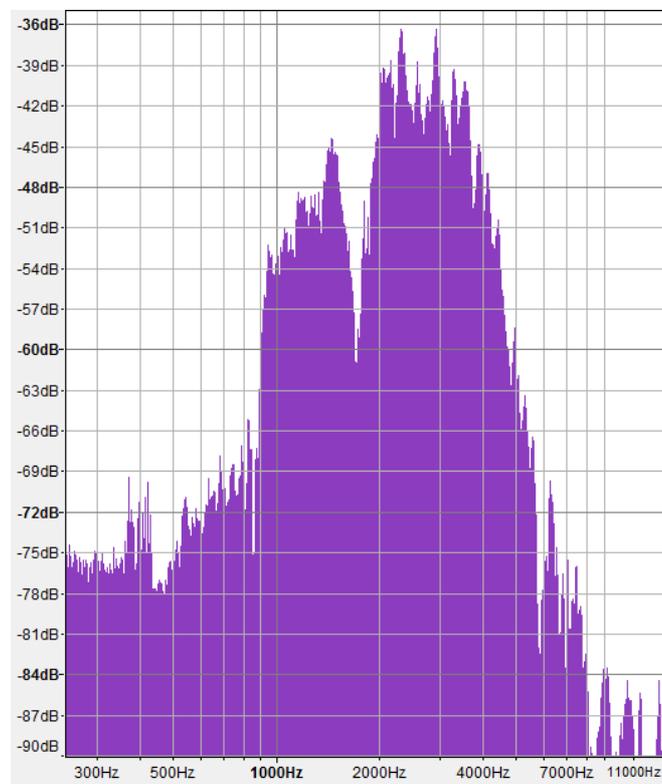


Figura 6.6 – Espectro de frequência do som gerado pelo driver com uso do divisor.

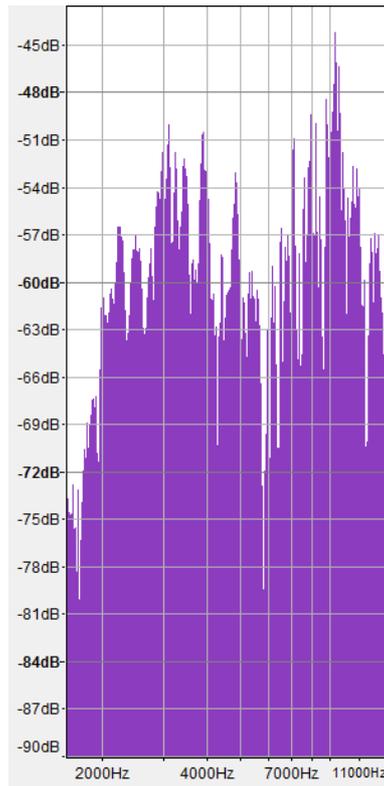


Figura 6.7 – Espectro de frequência gerado pelo super tweeter sem uso do divisor.

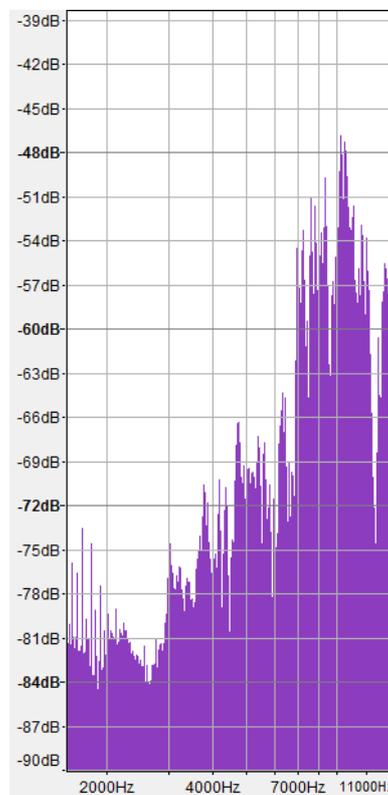


Figura 6.8 – Espectro de frequência gerado pelo super tweeter sem uso do divisor.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi projetado um divisor de frequências para equipamentos de som de médio e grande porte. O projeto foi feito a partir de filtros elétricos de quarta ordem, do tipo Butterworth, realizados por circuitos com topologia Sallen-Key. Esse tipo de filtro possui curva de atenuação com inclinação de 24 dB por oitava, tendo assim um desempenho melhor do que os crossover's existentes no mercado, que possuem atenuação com inclinação de 12 dB por oitava.

As frequências de corte dos filtros foram determinadas a partir de um levantamento acerca das respostas em frequências de diversos alto falantes encontrados no mercado. Dessa forma o divisor de frequências projetado pode ser utilizado com a maioria dos alto falantes de diversas marcas e modelos.

Os testes realizados comprovaram a eficácia dos filtros projetados, uma vez que os resultados obtidos são bem próximos do esperado. Inclusive o circuito indicador de clipping funcionou perfeitamente.

BIBLIOGRAFIA

Daryanani, G. **Principles of active network synthesis and design**. Universidade de Michigan. Wiley, 1976.

Notas de aula do professor Dr. Hiran de Melo.

Van Valkenburg, M. E. **Analog Filter Design**. Oxford University Press, 1982.

Chen, W. **Passive and active filters: theory and implementations**. Universidade de Michigan. Wiley, 1986.

Temes, G. C. **Selected papers on integrated analog filters**. Universidade Cornell. IEEE Press, 1987.

Mello, L. F. P. **Projetos de fontes chaveadas**. Erica, 1988.

Tooley, M. **Circuitos Eletrônicos**. Elsevier Editora, 2008.

ANEXO 1 – CÓDIGO UTILIZADO NO MATLAB

```
%obtenção da função Gs1, seu diagrama de bode e
```

```
%sua representação em biquadráticas
```

```
s=tf('s')
```

```
[B,A]=butter(4,314.1,'high','s')
```

```
Gs1=tf(B,A)
```

```
raizes=roots(A)
```

```
p1=poly([raizes(1),raizes(2)])
```

```
p2=poly([raizes(3),raizes(4)])
```

```
figure (1)
```

```
bode(Gs1)
```

```
grid on
```

```
Us1=tf([1 0 0],p1)
```

```
Vs1=tf([1 0 0],p2)
```

```
%obtenção da função Gs2, seu diagrama de bode e
```

```
%sua representação em biquadráticas
```

```
[B,A]=butter(4,2023.2,'low','s')
```

```
Gs2=tf(B,A)
```

```
raizes=roots(A)
```

```
p1=poly([raizes(1),raizes(2)])
p2=poly([raizes(3),raizes(4)])
figure (2)
bode(Gs2)
grid on
Us2=tf([0 0 p1(3)],p1)
Vs2=tf([0 0 p2(3)],p2)
bode(Vs2)

%obtenção da função Gw1, seu diagrama de bode e
%sua representação em biquadráticas

[B,A]=butter(4,2023.2,'high','s')
Gw1=tf(B,A)
raizes=roots(A)
p1=poly([raizes(1),raizes(2)])
p2=poly([raizes(3),raizes(4)])
figure (3)
bode(Gw1)
grid on
Uw1=tf([1 0 0],p1)
Vw1=tf([1 0 0],p2)
```

```
%obtenção da função Gw2, seu diagrama de bode e  
%sua representação em biquadráticas
```

```
[B,A]=butter(4,9782.9,'low','s')  
Gw2=tf(B,A)  
raizes=roots(A)  
p1=poly([raizes(1),raizes(2)])  
p2=poly([raizes(3),raizes(4)])  
figure (4)  
bode(Gw2)  
grid on  
Uw2=tf([0 0 p1(3)],p1)  
Vw2=tf([0 0 p2(3)],p2)
```

```
%obtenção da função Gd1, seu diagrama de bode e  
%sua representação em biquadráticas
```

```
[B,A]=butter(4,9782.9,'high','s')  
Gd1=tf(B,A)  
raizes=roots(A)  
p1=poly([raizes(1),raizes(2)])  
p2=poly([raizes(3),raizes(4)])  
figure (5)
```

```
bode(Gd1)
```

```
grid on
```

```
Ud1=tf([1 0 0],p1)
```

```
Vd1=tf([1 0 0],p2)
```

```
%obtenção da função Gd2, seu diagrama de bode e
```

```
%sua representação em biquadráticas
```

```
[B,A]=butter(4,34061.1,'low','s')
```

```
Gd2=tf(B,A)
```

```
raizes=roots(A)
```

```
p1=poly([raizes(1),raizes(2)])
```

```
p2=poly([raizes(3),raizes(4)])
```

```
figure (6)
```

```
bode(Gd2)
```

```
grid on
```

```
Ud2=tf([0 0 p1(3)],p1)
```

```
Vd2=tf([0 0 p1(3)],p2)
```

```
%obtenção da função Gt, seu diagrama de bode e
```

```
%sua representação em biquadráticas
```

```
[B,A]=butter(4,34061.1,'high','s')
```

```
Gt=tf(B,A)

raizes=roots(A)

p1=poly([raizes(1),raizes(2)])

p2=poly([raizes(3),raizes(4)])

figure (7)

bode(Gt)

grid on

Ut=tf([1 0 0],p1)

Vt=tf([1 0 0],p2)
```

ANEXO 2 – APLICATIVO AUDACITY

Para se realizar o teste sonoro, com e sem o uso do crossover projetado, foi utilizado o aplicativo Audacity. A seguir são mostrados os passos necessários para se gravar o som e gerar o espectro de frequência do som gravado.

A tela inicial do aplicativo é mostrada na figura A2.1. Para fazer a gravação o computador deve possuir um microfone. O primeiro passo é clicar no botão indicado pela seta 1 para iniciar a gravação do som. Após o término da reprodução do som a ser gravado vem o segundo passo que é clicar no botão indicado pela seta 2 para encerrar a gravação.

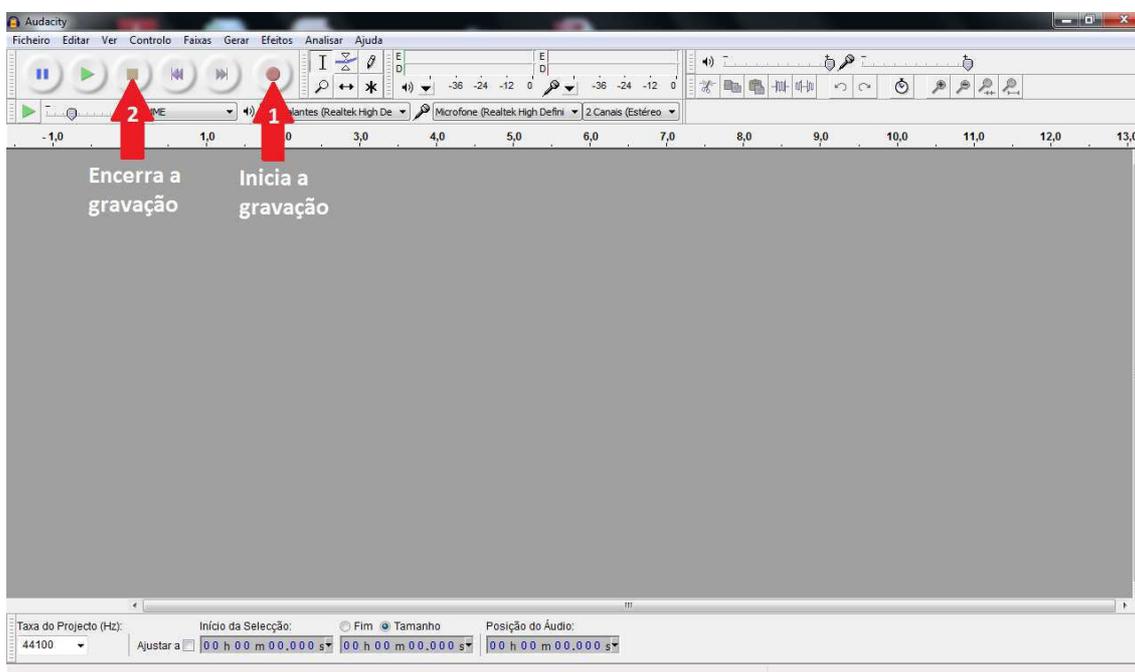


Figura A2.1 – Tela inicial do aplicativo Audacity.

Terminada a gravação, vai haver dentro da tela do aplicativo uma janela com o gráfico, no tempo, do som gravado, como mostra a figura A2.2. Com um duplo clique sobre o gráfico a gravação é selecionada e o terceiro passo é clicar em ‘desenhar espectro de frequência’, no menu ‘analisar’, como mostra a seta 3.

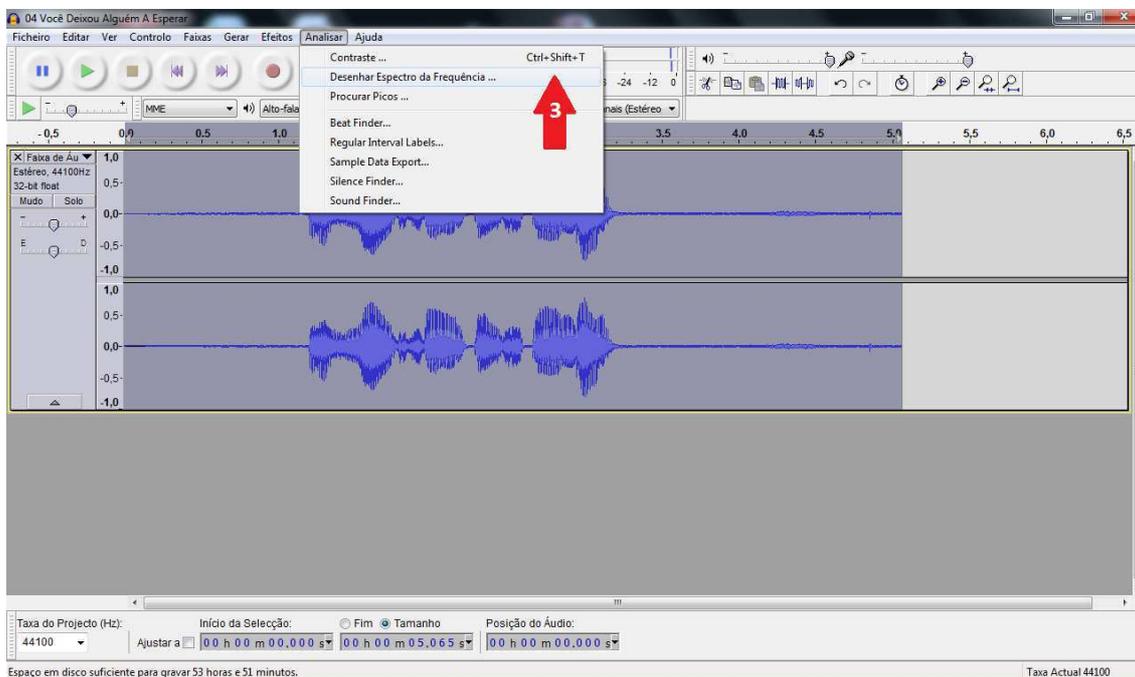


Figura A2.2 – Gráfico, no tempo, do som gravado.

Automaticamente se abre uma janela com o espectro de frequência do som gravado, como mostra a figura A2.3.

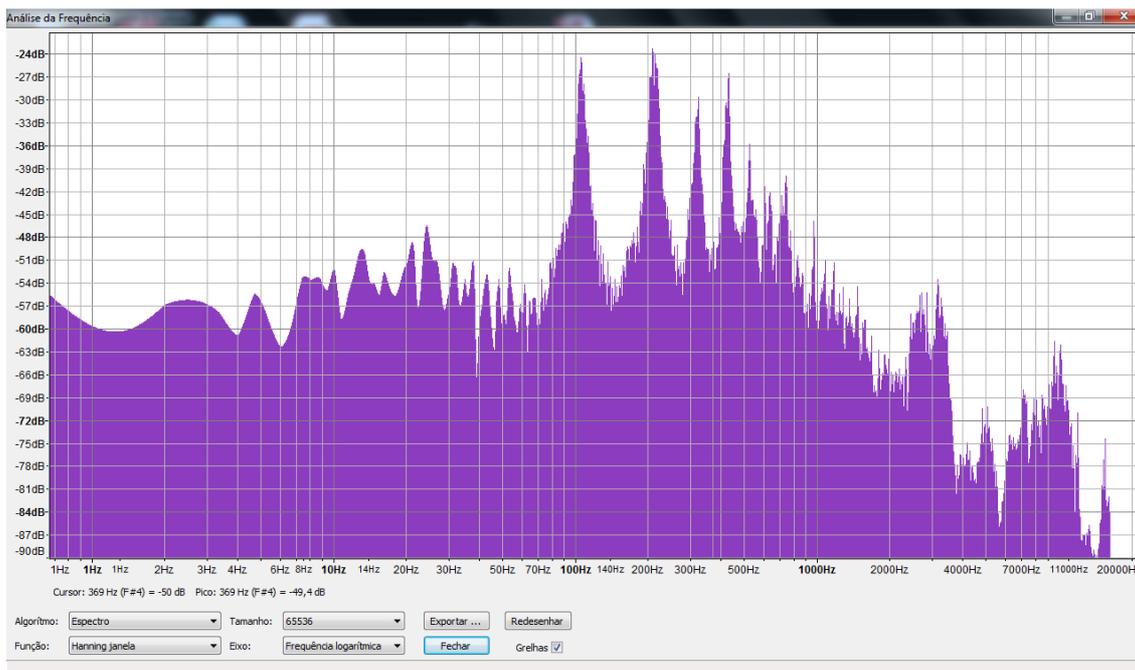


Figura A2.3 – Espectro de frequência do som gravado.