



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento
de Sistemas Eletrônicos

André Gomes BOTAÖ
Flávio Assib JOÃO
Paulo Henrique D'Afonseca e SILVA

Caixa Acústica Bass Reflex de Três Vias

São Paulo
2010

André Gomes **BOTAO**

Flávio Assib **JOÃO**

Paulo Henrique D'Afonseca e **SILVA**

Caixa Acústica Bass Reflex de Três Vias

Monografia de Projeto de Conclusão de Curso
apresentada à Escola Politécnica da USP.

Disciplina: Projeto de Formatura II – PSI-2594

São Paulo
2010

André Gomes BOTAO
Flávio Assib JOÃO
Paulo Henrique D'Afonseca e SILVA

Caixa Acústica Bass Reflex de Três Vias

Monografia de Projeto de Conclusão de Curso
apresentada à Escola Politécnica da USP.
Disciplina: Projeto de Formatura II – PSI-2594

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Flávio Cipparrone

São Paulo
2010

RESUMO

No projeto descrito por este documento inicialmente foi projetada uma caixa Bass-Reflex dimensionada a partir dos parâmetros eletroacústicos dos alto-falantes escolhidos, medidos através de softwares e métodos específicos descritos ao longo do documento. Com isso foi construída a caixa acústica e levantada sua resposta em freqüência com o intuito de verificar as especificações definidas no projeto e realizar seu estudo para a construção de filtros digitais. Está descrita uma breve introdução sobre a teoria e técnicas de filtragem digital que foram utilizadas para a construção e implementação dos filtros digitais. Para a construção de tais filtros digitais foi utilizado o algoritmo de Parks Maclellan para projetar os filtros planos otimizados de acordo com a resposta em freqüência de cada alto-falante. Além disso, com a medição da resposta em freqüência da caixa acústica utilizando um crossover analógico notou-se grandes níveis de variação no sinal de saída, portanto, o texto também trata um equalizador desenvolvido pela técnica de janelamento ajustável, mais especificamente utilizando a janela de Kaiser. Foram utilizadas funções do Matlab para gerar os coeficientes dos filtros digitais, estes em conjunto com o código do programa de processamento na placa ADSP utilizam os coeficientes gerados pelo projeto no Matlab para realizar a filtragem do sinal de áudio em tempo real. Os resultados obtidos, portanto, fazem referência ao projeto da caixa acústica somado a filtragem digital que além de selecionar as freqüências de corte e passagem, corrige variações de ganho equalizando o sinal.

Palavras-chave: filtro digital, crossover, caixa acústica, equalizador digital, janela de Kaiser, algoritmo de Parks McClellan, filtro FIR, acústica, filtros elétricos digitais, equalização, equipamentos de som

ABSTRACT

In the project described in this document it was initially designed a Bass-Reflex box appropriated dimensioned to the electro-acoustic loudspeaker parameters from the loudspeakers chosen by the group. After the designing project it was constructed raising its frequency response and analyzing the required specifications in the design of digital filters. There is a brief introduction to the theory of digital filtering techniques used in which the implementation is based. There was also used the Parks McClellan algorithm to perform optimized flat filters according to the frequency response of each loudspeaker. Furthermore, by measuring the loudspeaker frequency response using an analog crossover there was noted large signal distortions, so the text also addresses a technique developed by the equalizer using an adjustable windowing, specifically the Kaiser window. There was used some MatLab functions that implement such techniques for generating the filters coefficients. This associated with the program code loaded on the DSP board mean a real time audio signal filtering. The results therefore refer to the design of the loudspeaker enclosure added to a digital filtering in order to select the correct frequency and equalize the signal variation.

Key words: digital filter, crossover, speaker, digital equalizer, Kaiser Window, Parks McClellan algorithm, FIR filter, acoustic, electric digital filters, equalization, sound equipment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Resposta de Caixa Acústica com Crossover Passivo e Filtro Ativo.....	18
Figura 2 - Relação entre as formas de caixa e as suas respectivas curvas de resposta em freqüência para um mesmo alto falante	25
Figura 3 – Resposta em freqüência do crossover analógico	29
Figura 4 – Fase do crossover analógico	29
Figura 5 – Circuito do Woofer	30
Figura 6 – Circuito do Mid Range	30
Figura 7 – Circuito do Tweeter	30
Figura 8 - Resposta em freqüência generalizada de um sistema discreto – no caso um passa baixa.....	38
Figura 9 - Resposta de um filtro Butterworth.....	39
Figura 10 - Resposta de um filtro Chebyshev Tipo 1 e Tipo 2.....	40
Figura 11 – Resposta ideal em freqüência	42
Figura 12 – Resposta em freqüência filtro com método de janelas.....	47
Figura 13 - Resposta em amplitude das funções janela fixa, (a) Retangular, (b) Triangular, (c) Hann, (d) Hamming, (e) Blackman.	48
Figura 14 - Resposta em Ganho das funções janela ajustáveis.....	50
Figura 15 – Fluxograma do algoritmo de Parks McClellan	52
Figura 16- Impedância do Woofer com e sem massa.....	54
Figura 17 – Dimensões da parte frontal da caixa acústica	58
Figura 18 - Dimensões da parte lateral da caixa acústica	58
Figura 19 – Início da etapa de construção da caixa acústica	60
Figura 20 – Corte da madeira para o encaixe de alto falantes.....	61
Figura 21 – Resultado da frente da caixa acústica	61
Figura 22 – Caixa acústica montada	62
Figura 23 – Resultado final da construção da caixa acústica	63
Figura 24 – Diagrama de blocos do funcionamento do programa	71
Figura 25 – Relação entre vetores f e a	75
Figura 26 – Resposta em freqüência e fase do filtro passa baixa.....	76
Figura 27 - Resposta em freqüência e fase do filtro passa alta	77
Figura 28 – Resposta em freqüência e fase do filtro passa banda	78
Figura 29 – Resposta em freqüência da caixa com crossover analógico	78
Figura 30 – Resposta em freqüência do filtro corretor.....	80
Figura 31 – Detalhamento do filtro corretor	80
Figura 32 – Resposta do Woofer em dB	81
Figura 33 – Resposta do Mid Range em dB.....	82
Figura 34 – Resposta do Tweeter em dB	83
Figura 35 – Resposta do Super Tweeter em dB	84
Figura 36 – Resposta dos três Alto Falantes em dB	84
Figura 37 – Resposta da caixa em dB	85
Figura 38 – Resposta em freqüência do Mid Range	86
Figura 39 – Resposta em freqüência do Woofer	87
Figura 40 – Resposta em freqüência do Tweeter	87
Figura 41 – Resposta em freqüência do woofer com o filtro passa baixa.....	88
Figura 42 - Resposta em freqüência do mid range com o filtro passa banda.....	89
Figura 43 - Resposta em freqüência do tweeter com o filtro passa alta.....	90
Figura 44 – Resposta em freqüência dos três alto falantes	90
Figura 45 - Resposta em freqüência da caixa com crossover analógicos	91
Figura 46 – Resposta em freqüência da caixa com crossover analógico e filtro corretor	92
Figura 47 – Placa ADSP-21061 SHARC	97
Figura 48 – Diagrama de blocos da placa	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Thiele-Small	22
Tabela 2 - Variações de ganho em dB SPL de um alto-falante para diferentes formatos de caixas acústicas	28
Tabela 3 - Variações de ganho em dB SPL de um alto-falante para diferentes formatos de caixas acústicas em toda a faixa de freqüência	55
Tabela 4 – Comparativo dos parâmetros Thiele-Small do Woofer.....	56
Tabela 5 - Parâmetros de projeto da caixa acústica dimensionados pelo Perfectbox.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IIR – Infinite Impulse Response – Filtro de resposta ao impulso infinita

FIR – Finite Impulse Response – Filtro de resposta ao impulso finita

FFT – Fast Fourier Transform – Transformada rápida de Fourier

DSP – Digital Signal Processor – são microprocessadores especializados em processamento digital de sinal e utilizados para processar sinais de áudio, vídeo, etc., seja em tempo real ou em *off-line*.

LMS – Loudspeaker Measurement System – Sistema de Medição de Auto-falantes

SPL – Sound Pressure Level – Pressão Sonora do Som

SHARC – Super Harvard Architecture Single-Chip Computer – Arquitetura do computador baseado em um chip único desenvolvida em Harvard

CODEC – Code/Decode – Acrônimo de Codificador/Decodificador

ROM – Read Only Memory - Memória apenas de leitura

REMEZ – Nome do algoritmo publicado por Evgeny Yakovlevich Remez

SPORT – Porta pertencente à placa ADSP-21061 SHARC (S refere-se à SHARC e PORT significa porta)

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – Receptor/transmissor assíncrono universal

DMA – Direct Memory Access - Acesso direto à memória

GPIB – General Purpose Interface Bus – Barramento de comunicações digitais de curto alcance.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	16
OBJETIVOS	17
Objetivos específicos	18
JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	19
ROTEIRO DE PROJETO	19
1 REFERENCIAL TEÓRICO	21
1.1 PROJETO DA CAIXA	21
1.2 CROSSOVER ANALÓGICO	28
1.3 DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÕES UTILIZANDO O ADSP 21061	30
1.3.1 Por que usar ponto flutuante	31
1.3.2 Ponto Fixo	32
1.4 TEORIA APLICADA A FILTROS DIGITAIS	32
1.4.1 Filtros	33
1.4.2 Representações Discretas do Sinal de Áudio	33
1.4.3 Conceitos Gerais	34
1.4.4 Técnica de Projeto de Filtros	37
1.5 TEORIA DE FILTROS DIGITAIS	41
1.5.1 Fase linear em filtro digital	42
1.5.2 Cálculo da ordem do filtro digital	43
1.5.3 Algoritmo de Parks McClellan	51
2 MÉTODO E MATERIAIS	54
2.1 CONSTRUÇÃO DA CAIXA	54
2.2 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA IMPLEMENTADO NA PLACA	63
2.2.1 O Programa	66
2.3 PROJETO DE FILTROS NO MATLAB	73
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
3.1 RESULTADOS PRELIMINARES	81
3.2 RESULTADOS FINAIS	86
4 CONCLUSÕES	93
4.1 TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE 1	97
ESTUDO DA PLACA ADSP 21061	97
APÊNDICE 2	100
CRONOGRAMA	100
Tarefas	101
APÊNDICE 3	103
ORÇAMENTO ESTIMADO	103
APÊNDICE 4	104
GESTÃO DE RISCOS	104

INTRODUÇÃO

Com a evolução das tecnologias aplicadas ao processamento digital de sinais e desenvolvimento da microeletrônica, foi possível uma larga utilização de filtros digitais na filtragem de sinais de áudio. Trazendo dessa forma a possibilidade de execução de algoritmos com características que não são viáveis de implementar através das tecnologias que utilizam componentes analógicos.

Na filtragem digital existem vantagens quando comparados com a filtragem analógica, por exemplo, repetibilidade, programabilidade, confiabilidade, funcionamento sobre uma gama de freqüência diferente por uma alteração da freqüência de amostragem, desempenho superior (fase linear), independência face à variabilidade dos componentes, e podem ser utilizados em baixas freqüências onde é impraticável para filtros analógicos.

Uma das desvantagens dos filtros digitais é a imprecisão dos cálculos numéricos, ocasionando imperfeições no sinal de saída e, portanto, a correção de tais erros fica limitada a menores larguras de banda devido à limitação de velocidade de processamento em tempo real. Portanto, com a evolução na velocidade dos processadores, consegue-se minimizar os erros de cálculo viabilizando a realização de filtros capazes de funcionar em tempo real para diversas aplicações e também a arquitetura dos processadores específicos para processamento digital otimizam esse tipo de operação.

As técnicas de processamento digital são muito importantes quando aplicadas à equalização de áudio, esses sinais exigem uma resposta em freqüência específica para diversas faixas de freqüência, tornando a filtragem digital mais adequada. A equalização é fundamental para uma reprodução mais fiel do som, corrigindo assim, as imperfeições para o sistema de captura e reprodução.

Ainda nesse trabalho é abordada importância do projeto de caixas acústicas, que se baseia no fato de que a caixa, em tipo e formato, modifica significativamente a resposta em freqüência do alto-falante. Os tipos mais comuns de caixas acústicas são selada, ou fechada e bass-reflex, ou refletora de graves. A principal diferença entre estes dois tipos de caixas é o fato de que, como o próprio nome já diz, a caixa selada é completamente vedada para a entrada ou saída de ar, o que eleva o ganho de resposta em freqüência do woofer. A caixa bass reflex, além de mais complicada de projetar e analisar gera um reforço na resposta do woofer em baixas freqüências de acordo com o projeto de canos abertos na face frontal da caixa, chamados dutos, projetados de acordo com uma freqüência de sintonia para a qual a resposta

da caixa é melhorada, ou seja, possibilita o projeto de dutos em uma freqüência escolhida de acordo com a necessidade da curva de resposta em freqüência do alto-falante ser ajustada.

Os diferentes formatos de caixas acústicas influenciam bastante na resposta em freqüência do woofer, introduzindo distorções e ressonâncias em diferentes freqüências de acordo com a necessidade de volume de ar interno à caixa e freqüências de ressonâncias variadas de diferentes woofers.

O formato de caixa acústica ideal é o formato de esfera, porém por dificuldades enormes de construção de uma esfera perfeita não foi o formato escolhido. A caixa retangular ou em formato de paralelepípedo é o formato mais comumente utilizado e foi o escolhido pelo grupo.

Neste contexto, o trabalho irá descrever todo o processo de projeto de caixa acústica e a implementação e desenvolvimento da filtragem digital para fins de comparação e otimização do sinal de saída.

Objetivos

Ao final do projeto a equipe terá desenvolvido uma caixa acústica do tipo bass-reflex acompanhada de filtro digital ativo em tempo real que terá alta confiabilidade e resposta em freqüência o mais linear possível perante o sinal de entrada, o que significa a reprodução exata do sinal de entrada amplificado.

Espera-se atingir um resultado de curva de resposta em freqüência com o formato da figura 1 abaixo, desenhada como parâmetro de comparação.

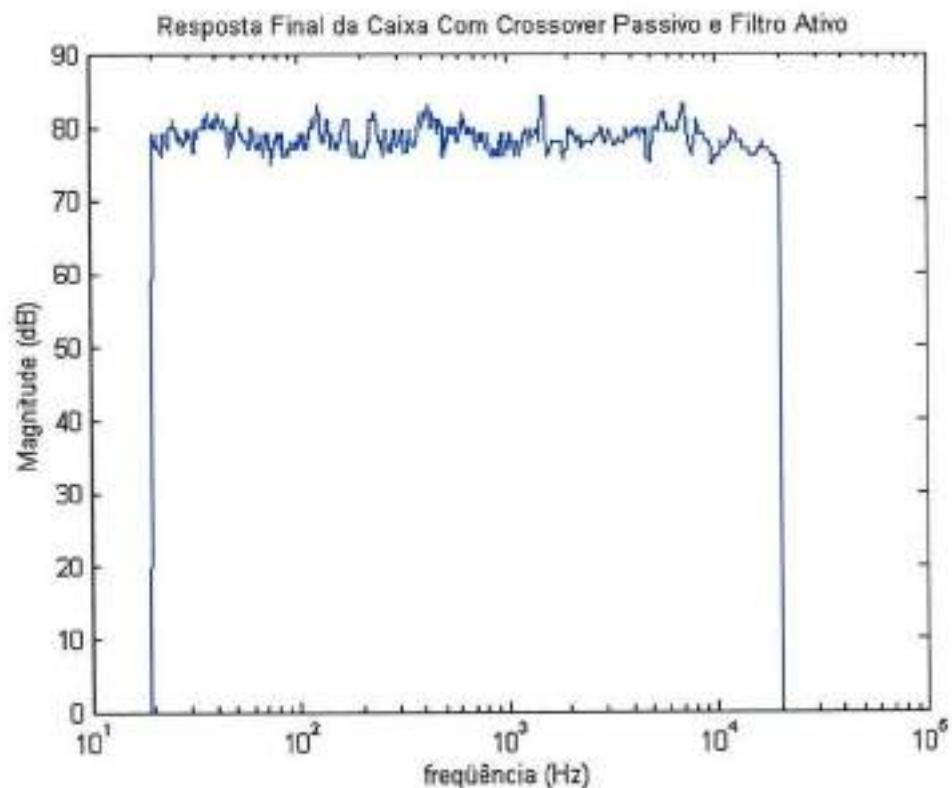


Figura 1 – Resposta de Caixa Acústica com Crossover Passivo e Filtro Ativo

Objetivos específicos

São objetivos específicos deste projeto os seguintes itens:

- Construção de dois protótipos de caixa acústica do tipo Bass-Reflex afim obter um dispositivo de reprodução de áudio estéreo;
- Projeto de um filtro crossover digital a ser implementado em uma placa DSP e posteriormente comparado a um crossover analógico;
- Projeto de um filtro corretor para uma caixa acústica juntamente a um crossover analógico afim de corrigir sua resposta em freqüência;
- Implementação de filtro digital na placa DSP;
- Adquirir experiência na construção de caixas acústicas através de pesquisas e práticas da realização do projeto;

Justificativa e motivação

A motivação reside no fato de ser um projeto no qual é possível colocar em prática os conhecimentos teóricos adquiridos durante a graduação como, por exemplo, os conhecimentos específicos com relação a filtros, linguagens de programação, processamento de sinais, entre outros.

A prioridade do grupo ao desenvolver essa pesquisa é aperfeiçoar a construção do par de caixas acústicas para que tenham resposta em freqüência de acordo com o projeto e com os alto-falantes e os parâmetros do filtro digital. O intuito também é documentar a análise feita como projeto de alto nível exaltando a área de pesquisa em áudio pobremente explorada no Brasil.

Roteiro de projeto

Inicialmente será abordado todo referencial teórico de projeto de caixa acústica, escolha de alto falantes, dimensionamento dos parâmetros de construção, medição de parâmetros eletroacústicos e formatos de caixas acústicas. E também um estudo sobre a placa ADSP 21061 listando suas características físicas e de funcionamento, diagrama de funcionamento, utilização de ponto flutuante, arquitetura. Por fim, todo o estudo de filtros pelos quais se fundamentam as escolhas das técnicas de implementação utilizadas no projeto de filtros digitais, freqüência de amostragem, ordem do filtro, técnicas de janelamento, algoritmo de Parks McClellan.

A parte de métodos e materiais expõe os parâmetros eletroacústicos medidos, as especificações de dimensões obtidas, a forma de construção do par de caixas acústicas. Também é abordado o programa implementado na placa, explicando suas linhas de comando e declarações de variáveis e registradores, mostrando a forma como é feita a filtragem do sinal de áudio e a transmissão para aos dispositivos de saída. Ainda nesse tópico, temos o projeto de filtros em MatLab, as técnicas de construção de filtros utilizadas e as linhas de comando explicadas.

Por fim, os resultados das medições realizadas, levantamento da resposta em freqüência dos alto-falantes individualmente, da implementação do filtro digital, filtro

crossover analógico comercial e filtro corretor, são discutidos, tanto os preliminares como os finais.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Projeto da Caixa

A construção da caixa começa pela escolha dos alto-falantes, depois a medição dos parâmetros dos alto-falantes escolhidos, a escolha do amplificador utilizado, os cálculos das dimensões da caixa e dos dutos, o cálculo e a confecção do crossover que melhor atende às necessidades do projeto, a escolha do tipo de filtro a ser utilizado, a confecção de tal filtro, os testes da caixa filtrada e as correções de construção e parâmetros do filtro para se ajustarem melhor ao projeto proposto.

Para se ter uma idéia do rendimento e do desempenho de cada um desses componentes mede-se suas respostas em freqüência utilizando o programa LMS e são obtidos alguns de seus parâmetros.

As dimensões da caixa acústica alteram a resposta em freqüência do alto-falante no sentido de que se mal projetados o volume e o duto de ar podem influenciar negativamente no nível de ganho do woofer. Todo fabricante importante de alto-falantes coloca no manual do produto os chamados parâmetros de Thiele-Small, que servem de orientação para a construção das medidas da caixa e o volume necessário para se obter uma determinada resposta de freqüência.

Tabela 1 – Parâmetros de Thiele-Small [10]

PARÂMETROS DE THIELE-SMALL

Fs (freqüência de ressonância)	37	Hz
Vas (volume equivalente do falante)	202	l
Qts (fator de qualidade total)	0,46	
Qes (fator de qualidade elétrico)	0,47	
Qms (fator de qualidade mecânico)	17,35	
η_0 (eficiência de referência em meio espaço)	2,15	%
Sd (área efetiva do cone)	0,08605	m^2
Vd (volume deslocado)	387,0	cm^3
Xmáx (deslocamento máx. (pico) c/ 10% distorção)	4,5	mm
Xlím (deslocamento máx. (pico) antes do dano)	21	mm

Condições atmosféricas no local de medição dos parâmetros TS:

Temperatura	25	°C
Pressão atmosférica	1.016	mb
Umidade relativa do ar	51	%

Parâmetros de Thiele-Small medidos após amaciamento de 2 horas com metade da potência NBR.

É admitida uma tolerância de $\pm 15\%$ nos valores especificados.

As dimensões da caixa de som influenciam no resultado obtido e somente fabricantes de alto-falantes preocupados com a correta utilização de seus produtos e entusiastas de pesquisas científicas é que vão disponibilizar parâmetros eletroacústicos de seus produtos ou testar e sugerir uma utilização otimizada de seus alto-falantes. O volume é a medida em litros do ar encerrado no interior da caixa que será deslocado pela movimentação do cone do woofer. Para um dado volume o woofer responderá em determinadas faixas de freqüência.

Caixas que respondam em freqüências próximas a 20Hz são de grande dimensão tanto por causa do tamanho do woofer quanto por causa do volume de ar necessário, uma vez que quanto maior o cone do woofer melhor sua resposta em baixas freqüências e maior o volume de ar necessário no interior da caixa.

As caixas precisam ser muito bem construídas. Não basta fixar as peças com pregos, sendo necessário fazer uma boa vedação nas juntas. Não deve haver a menor saída de ar que não a desejada. A construção precisa ser bem rígida, porque o que precisa vibrar é o falante, não a caixa. No caso deste projeto, caixas acústicas do tipo Bass-Reflex, existirão dois buracos na face frontal da caixa chamados dutos.

“Caixas acústicas dos tipos Bass-Reflex utilizam uma abertura, denominada duto, para alterar suas características de funcionamento em torno da freqüência de sintonia.

O volume de ar encerrado dentro da caixa acústica tem um comportamento capacitivo

enquanto que o duto atua como um indutor, de modo que o termo sintonizar está perfeitamente aplicado, uma vez que se tem um circuito equivalente composto por um capacitor em paralelo com um indutor.

Esta combinação é denominada ressonador de Helmholtz, em homenagem ao físico que estudou este dispositivo, encontrado em muitas situações comuns ao nosso mundo, como cavernas e instrumentos musicais, sendo esses os dotados de caixas de ressonância, como violão, bumbo, berimbau, etc.

Sob o ponto de vista didático, o ressonador de Helmholtz costuma ser representado por uma garrafa, onde o volume de ar está confinado, com um gargalo, onde comprimento e diâmetro são as variáveis de interesse, além do volume, ao qual já foi referido.

Essas variáveis combinam-se de modo a gerar uma freqüência de ressonância, que pode ser ouvida aos soprarmos na boca da garrafa. Alterando qualquer uma das mencionadas variáveis, provoca-se uma mudança na freqüência de ressonância, o que facilmente se consegue através do preenchimento com água de parte do volume da garrafa.” Retirado do artigo “Dimensionamento de Dutos Para Caixas Acústicas” do professor Homero Sette Silva [9].

Essas palavras do professor Homero S. Silva descrevem sucinta e objetivamente o que são e para que servem os dutos de ar em caixas acústicas.

Uma caixa acústica conhecida como refletora de graves, ou seja, com aberturas frontais pré dimensionadas que permitem a passagem de ar dentro e fora da caixa, chamadas dutos, é análoga a um filtro passa alta com decaimento de 24dB/oitava. Em baixas freqüências os dutos contribuem significativamente com o aumento do ganho de resposta em freqüência perto da freqüência de sintonia em que foram projetados.

Comparado com caixas seladas, as caixas refletoras de graves têm algumas vantagens e desvantagens, tais como a menor excursão de sinal perto da freqüência de ressonância para a qual foi projetada resultando em uma maior potência e menor distorção de modulação, porém em freqüências bem mais baixas que a de sintonia existe uma altíssima excursão de sinal que pode ser facilmente resolvida por um filtro passa alta. Possui uma freqüência de corte inferior muito mais baixa que a caixa selada, aproveitando a resposta em baixas freqüências comparando o mesmo alto-falante montado nos dois gabinetes, refletor e selado. Em contraponto caixas refletoras de graves são muito mais suscetíveis a erros de dimensionamento e pequenas diferenças em parâmetros o que torna seu projeto mais difícil para construtores inexperientes.

Muitos pesquisaram e escreveram artigos sobre caixas acústicas, tais como Thiele, Small, Beranek, Nomura, Locanhi, de Boer, van Leeuwen, e devem seu prestígio a tais publicações em grandes meios comunicativos, o principal da área de áudio é o JAES – Journal of Audio Engineering Society, porém a maioria de suas teses foram desenvolvidas e publicadas nas décadas de 1930 a 1970, fundamentadas em teorias e modelos matemáticos extremamente complexos. Atualmente existe um brasileiro muito bem conceituado estudando a teoria de caixas acústicas e publicando muitos artigos na área, o professor e pesquisador de uma grande empresa de áudio Homero Sette Silva. Algumas partes deste projeto têm como base teórica as publicações e artigos deste professor.

Toda caixa acústica do tipo refletora de graves possui alguns parâmetros conhecidos como alinhamentos. Este é uma classificação de uma combinação particular de volume de ar interno à caixa e freqüência de sintonia, produzindo uma resposta em freqüência realizável que é mais ou menos útil, ou seja, linear [13]. Para uma dada freqüência que se escolhe, ou se deseja ter uma resposta em nível elevado de ganho, deve-se projetar o volume interno de ar e os dutos da caixa seguindo algumas teorias e leis descobertas e desenvolvidas muitos anos atrás, mas que até hoje servem e funcionam perfeitamente, tais como o dimensionamento dos dutos que seguem algumas expressões matemáticas dispostas a seguir [13]:

$$L_v = \frac{1.463 \times 10^7 R^2}{f_B V_B} - 1.463 R$$

[Equação 1]

Onde L_v é o comprimento do duto, em polegadas,

R é o raio do duto, em polegadas,

f_B é a freqüência de ressonância do duto, em Hertz

V_B é o volume de ar interno à caixa, em polegadas cúbicas.

$$d_v \geq 39.37 \left(\frac{411.25 V_d}{\sqrt{f_B}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

[Equação 2]

Onde d_v é o diâmetro mínimo do duto, em polegadas,

V_d é o volume de ar deslocado pela movimentação do cone do woofer, em metros cúbicos,

f_d é a freqüência de sintonia do duto, em Hertz.

A seguir é mostrado o famoso estudo de Harry F. Olson de 1951, chamado 'Direct Radiator Loudspeaker Enclosures' sobre a influência do formato da caixa acústica sobre a

curva de resposta em freqüência para um mesmo volume de ar dois alto-falantes distintos, além de analisar os desvios de ganho causados por cada formato de caixa acústica.

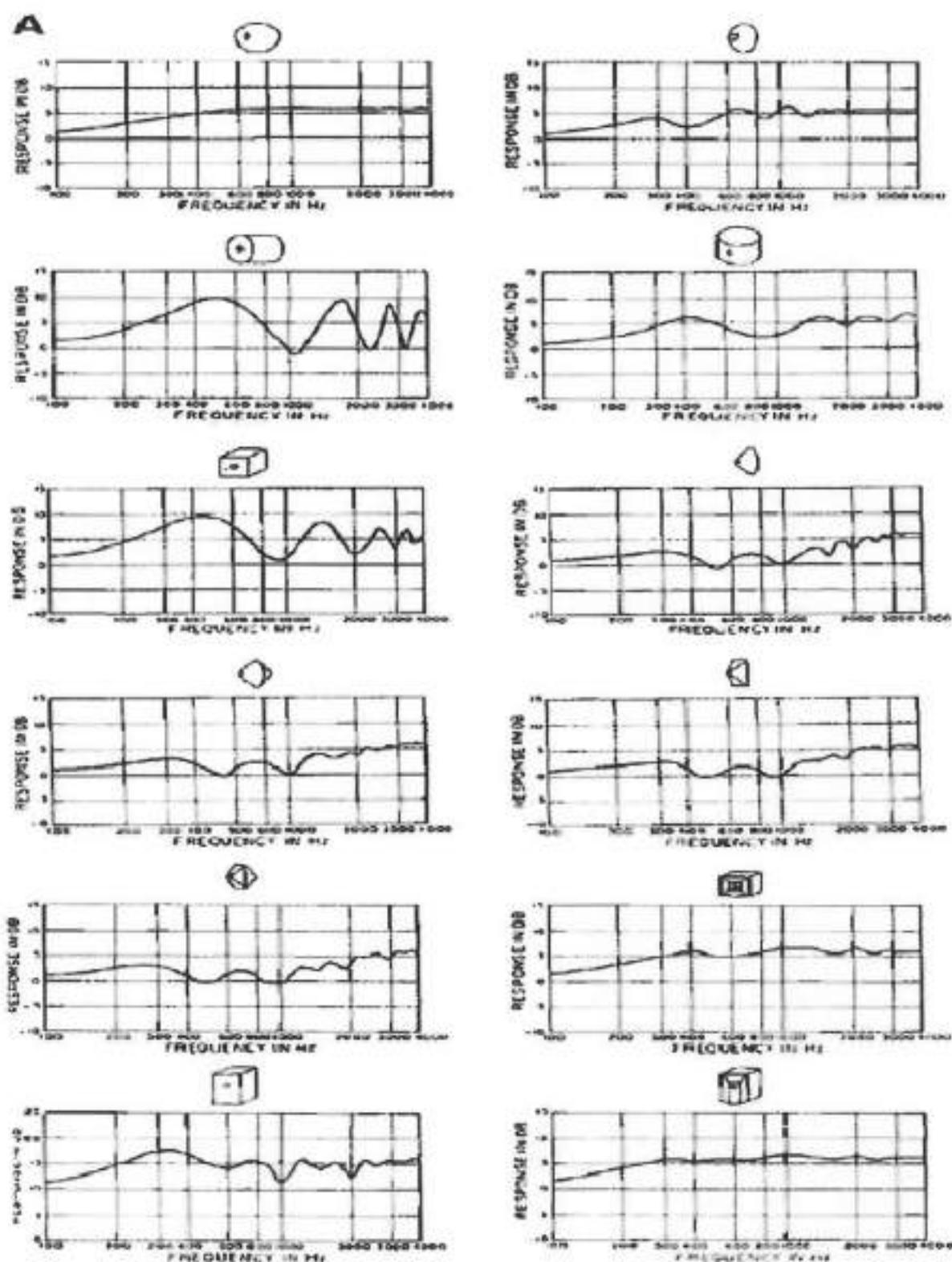


Figura 2 - Relação entre as formas de caixa e as suas respectivas curvas de resposta em freqüência para um mesmo alto falante [24]

Todas as curvas de resposta em freqüência descritas por esse artigo foram obtidas por um microfone colocado no eixo de irradiação sonora do alto-falante, combinado com o formato da caixa acústica. Cada resposta em freqüência está relacionada na figura 2 com o formato de caixa acústica relacionada.

Para a caixa esférica, tem-se que a resposta em freqüência característica da caixa mostrada na figura 2 foi corrigida, para que o volume de ar produzido pelo mecanismo formado pela caixa e o alto-falante fosse inversamente proporcional à freqüência. Percebe-se que a resposta em freqüência é livre de picos ou vales devido ao fato de que a caixa não possui nenhum canto ou descontinuidades que possam difratar ondas sonoras em fase com a radiação direta do alto-falante, não causando assim nenhuma interferência.

Para a caixa com formato de hemisferio tem-se uma resposta em freqüência marcada pela interferência sonora causada por uma onda difratada na junção da face interna da cunha esférica com a parede reta onde a caixa é fechada em sua parte traseira. Nota-se uma diferença de fase entre a onda sonora principal irradiada pelo alto-falante e as ondas difratadas, que resultam em picos e vales salientes na curva de resposta em freqüência como mostrada e relacionada com o formato de caixa acústica na figura 2. Uma explicação física para o fenômeno seria que o som flui em todas as direções, sendo irradiado da fonte, ou seja, o alto-falante. A onda que segue o contorno da superfície esférica encontra uma grande variação de impedância acústica quando encontra a junção da superfície esférica com a superfície plana, gerando assim ondas sonoras difratadas em todas as direções.

A mesma explicação pode ser considerada em todos os formatos de caixas demonstrados de acordo com distâncias entre superfícies refletoras de ondas sonoras e o centro de irradiação do alto-falante, com suas variações, picos e vales, repetidos com diferentes magnitudes em suas respectivas oitavas.

O principal motivo da presença desse artigo no presente trabalho é o estudo da caixa acústica com formato de paralelepípedo, ou seja, o formato escolhido para o produto do estudo realizado.

A caixa em forma de paralelepípedo com todas as possíveis dimensões é a caixa acústica com o formato mais comum utilizado. A principal razão é a facilidade de construção. Em uma rápida análise de sua curva de resposta em freqüência percebe-se a interferência de ondas difratadas, em grande número de interferência, pelo formato da caixa cheio de encontros entre superfícies planas formando ângulos de 90 graus gerando variações da ordem de seis e sete dB. Segundo o autor do artigo, Olson, esse formato de paralelepípedo é

altamente não recomendado por inserir muitas variações em diferentes freqüências na resposta do alto-falante.

A conclusão tirada por Olson é a de que o formato da caixa acústica pode diminuir ou aumentar a quantidade de ondas sonoras difratadas que interferem na curva de resposta em freqüência do alto-falante sempre negativamente, pois por mais que as interferências sejam construtivas representam variações indesejadas na resposta em freqüência do alto-falante. O modo mais eficiente de eliminar tais interferências é eliminar confrontos angulares entre faces internas da caixa acústica de modo a reduzir difrações de ondas sonoras provenientes da irradiação principal do alto-falante.

Abaixo uma tabela comparativa das variações de ganho de um mesmo alto-falante para os diferentes formatos de caixa acústica e duas faixas de freqüências, 1KHz a 10KHz e 2KHz a 10KHz.

Pode-se notar com clareza que o formato de caixa acústica que gera a menor variação de ganho em qualquer faixa de freqüência é a esfera, porém é o formato mais difícil de ser construído, por isso não são encontradas caixas acústicas nesse formato a venda no mercado. O formato utilizado no projeto, ou seja, retangular, é um dos formatos que mais gera variações de ganho na resposta em freqüência do alto-falante, porém é o formato mais versátil e mais didático, por isso foi o escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa.

A seguir uma tabela comparativa dos valores de desvios de ganho do alto-falante para os diferentes formatos de caixas acústicas em uma faixa de freqüência mais ampla e próxima da estudada, novamente pode-se notar que os menores desvios são os gerados pela caixa esférica.

Tabela 2 - Variações de ganho em dB SPL de um alto-falante para diferentes formatos de caixas acústicas
[24]

"Dome SPL dB Variations for Different Enclosure Shapes.

	1" Soft Dome 1kHz-10kHz		1" Soft Dome 2kHz-10kHz	
	Center	Top	Center	Top
Cube	4.73	3.29	1.99	1.15
Cube 2" Bev	3.33	2.77	3.33	1.32
Cube 4" Bev	2.54	2.65	2.54	0.92
Rectangle	3.09	2.22	1.64	1.84
Rect. 2" Bev	2.33	2.72	1.90	1.83
Rect. 4" Bev	3.05	3.89	1.71	1.38
Pyramid	1.76	2.78	1.49	1.18
Cylinder	2.82	2.60	0.81	0.78
Sphere	2.72	NA	1.11	NA
Egg	2.18	NA	0.55	NA

1.2

Crossover analógico

O filtro crossover analógico comercial utilizado é o modelo lc8123 da Selenium, possui três vias, feito para utilização em alto-falantes com impedâncias de oito ohms, oferece atenuação de 12 dB por oitava e cortes de freqüência em aproximadamente 500 e 5000 HZ como mostrado nas curvas de resposta em freqüência obtidas com uma excitação senoidal na entrada do crossover e pela medição da curva senoidal obtida em cada uma das três saídas separadamente comparando-se amplitudes das duas curvas para definição de ganho e comparando-se defasagem das duas curvas para obtenção da fase de cada canal do circuito divisor de freqüências.

Para tais medições e levantamentos de curvas de respostas em freqüência foram utilizados alguns programas didáticos utilizados em disciplinas de graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, desenvolvidos com a utilização do programa LabVIEW, que controla um gerador de funções e um osciloscópio através do barramento GPIB.

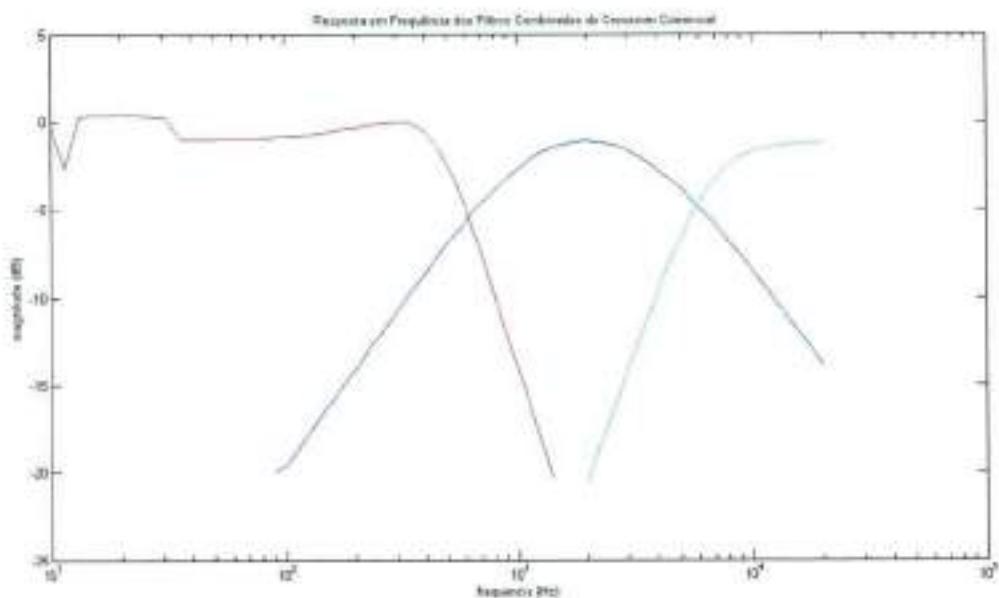


Figura 3 – Resposta em frequência do crossover analógico

Abaixo pode-se ver as curvas de fases referentes aos canais do filtro crossover, obtidas pelo procedimento acima descrito.

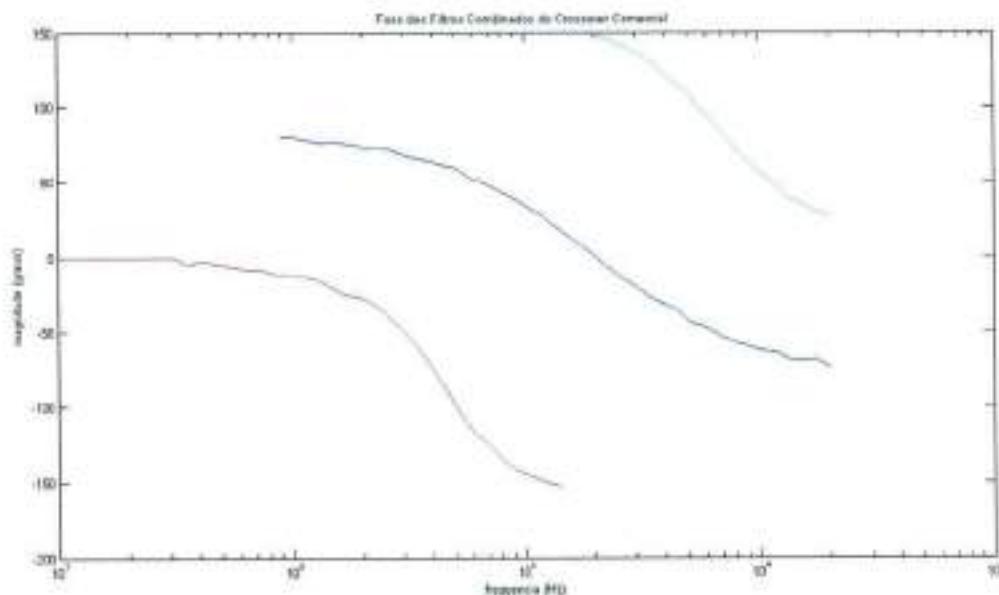


Figura 4 – Fase do crossover analógico

Para ilustrar melhor os canais de filtragem do crossover analógico seguem os diagramas elétricos de cada relação de entrada e saída individualmente.

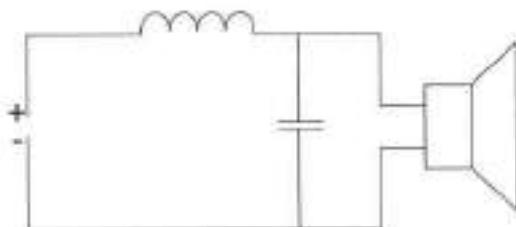


Figura 5 – Circuito do Woofer

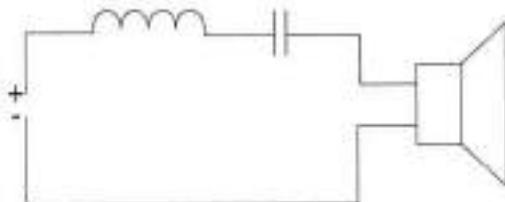


Figura 6 – Circuito do Mid Range

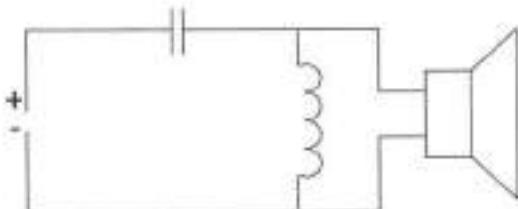


Figura 7 – Circuito do Tweeter

1.3

Desenvolvimento de aplicações utilizando o ADSP 21061

O ADSP 21061 possui algumas características particularmente úteis do ponto de vista de programação. Estas características permitem ao programador abstrair-se de alguns problemas encontrados em muitos outros DSP de uso genérico, particularmente nos DSP de ponto fixo.

A arquitetura do ADSP 21061 foi concebida para suportar linguagens de alto nível. Várias características permitem a utilização de compiladores de linguagem de alto nível e sistemas operativos. Entre elas destacam-se:

- Registro de dados de uso genérico;
- Tipos de dados nativos de 32 bits;

- Grande espaço de memória endereçável;
- Endereçamento com pré e pós modificação;
- Buffers de memória circulares sem limitações de endereçamento;

A sua arquitetura é concebida para suportar ANSI C standard. A Analog Devices dispõe de um sistema, o VisualDSP, para o desenvolvimento e correções de aplicações. Este sistema permite não só a compilação de código C e C++, mas também de código Assembly.

O ADSP 21061 suporta o padrão IEEE P1149.1, Joint Test Action Group, JTAG, para teste de sistemas. Este padrão define um método de pesquisa série do status de cada componente do sistema (registros, memória, etc.). Ele suporta também formatos de ponto flutuante do IEEE, o que significa que algoritmos desenvolvidos em processadores IEEE compatíveis podem ser transportados entre diferentes processadores, sem receio de instabilidade introduzida por arredondamentos e ou por manipulação de erro inconsistente.

1.3.1 Por que usar ponto flutuante

O formato de dados suportado por um processador de sinal determina sua capacidade de lidar com sinais de diferentes tipos de precisão, gama dinâmica e SNR (Signal to Noise Ratio). São diversas as vantagens de uma arquitetura de ponto flutuante:

- Gama dinâmica – Os algoritmos tradicionais trabalham com sinais de gama dinâmica conhecida. No entanto, a tendência atual no desenvolvimento de algoritmos é de reduzir as limitações de gama dinâmica, ou seja, utilizar maior gama dinâmica nos cálculos de intermédios.
- Relação sinal ruído, SNR – Aplicações de áudio, como é o caso, exigem elevada gama dinâmica de forma a permitir uma inquestionável separação de sinais que ocorrem em ambientes ruidosos.
- Facilidade de utilização – De forma geral, os DSP de arquitetura de ponto flutuante de 32 bits são mais fáceis de usar do que processadores de 16 bits de ponto fixo. Na programação de linguagem de alto nível, uma vasta área endereçável e uma gama dinâmica elevada permitem ao programador concentrar-se no desenvolvimento do algoritmo em si, preocupando-se apenas com questões de processamento de sinal, e não com a dificuldade inerente da programação em Assembly e correção de erros.

1.3.2 Ponto Fixo

A técnica de ponto fixo consiste na representação numérica utilizando a base binário tendo o primeiro bit fixado para informar o sinal do número. Esta representação fixa a posição do ponto e todos os dígitos são utilizados como informação do número em questão.

Uma desvantagem desta técnica é a falta de precisão quando tem-se grande quantidade de operações aritméticas. Essa falta de precisão ocorre pelo motivo de estouro de bits para representação numérica e com isso o resultado de uma operação aritmética é arredondado, com excessivos estouros em seqüência tem-se uma distorção considerável da saída produzida com a esperada.

Uma vantagem de se utilizar o ponto fixo é a simplificação de implementação das operações aritméticas, consumindo um menor espaço e menos energia. Portanto em projetos cuja imprecisão não for crucial para o desempenho das operações aritméticas o ponto fixo é mais adequado.

1.4 Teoria Aplicada a Filtros Digitais

A proposta de criação de um filtro digital nesse projeto tem a finalidade de equalizar o sinal de áudio reproduzido pelos alto-falantes quando excitados por um sinal amplificado proveniente de uma reprodução musical.

Por equalização pode-se entender o ajuste dos graves, médios e agudos no contexto do espectro de freqüências de um determinado sinal de áudio. Existem variadas maneiras de realizar uma equalização de um sinal de áudio. Uma equalização pode ser feita por uma mesa de som ou pelo controle de equipamentos como equalizadores gráficos que para determinadas faixas de freqüências do sinal alteram valores de ganhos que devem ser dados a diferentes bandas, ou seja, as diferentes faixas de freqüência.

Um fator importante que deve ser apontado é a resposta em freqüência de sistemas de aquisição e sistemas de reprodução. Uma música ou outro sinal de áudio qualquer bem gravado e devidamente equalizado durante o processo de gravação pode ser mal executado por um sistema de reprodução. Assim o sinal gerado poderá apresentar características diferentes do originalmente gravado, no domínio da freqüência, quando comparado com o

sinal de áudio original executado em um sistema de reprodução com resposta em freqüência ideal, ou seja, sem modificar o ganho ou fase em alguma faixa de freqüência.

Sistemas de aquisição com uma resposta em freqüência diferente da ideal também podem distorcer o sinal de áudio que recebem e, assim, gerar uma gravação com um espectro de freqüências diferente do sinal original emitido. O exemplo mais comum de um sistema de aquisição de sinal sonoro é o microfone.

Este projeto se baseia na equalização do sinal de áudio utilizando um filtro digital programado na placa DSP que interage com o sinal de entrada e corrige eventuais variações de ganho aumentado ou diminuído na curva de resposta em freqüência atuando em bandas de freqüência fixas.

A seguir o texto irá percorrer pelos aspectos teóricos gerais que envolvem a filtragem em freqüências de sinais de áudio, assim sendo mostrará modelos matemáticos que dão embasamento para as técnicas que serão apresentadas. Serão mostradas, além da técnica escolhida, outras que são comuns para o mesmo propósito.

1.4.1 Filtros

Como os sinais de áudio são contínuos a primeira etapa é transformá-lo em um sinal discreto no tempo. Os conversores A/D são a peça fundamental para tal função amostrando o sinal contínuo no tempo. No próximo tópico será abordado esse assunto com maior profundidade.

1.4.2 Representações Discretas do Sinal de Áudio

Sinais de tempo contínuo podem ser amostrados para gerar sinais de tempo discreto que são valores do sinal original, igualmente espaçados no tempo, quantizando o sinal contínuo. Esta quantização proporciona dados para o processamento de filtragem e correção de ganhos a ser realizado.

1.4.2.1 Processo de Amostragem

Em uma seqüência, o valor de uma amostra pode ser representado por $x[n]$, sendo n um inteiro. Tendo uma seqüência $x[n]$ amostrada por um sinal contínuo, $x_a(t)$, temos

$$x[n] = x_a(t)|t = nT = x_a(nT).$$

[Equação 3]

O intervalo entre as amostras é representado por T e chamado de período de amostragem, e portanto o seu inverso F_T é a freqüência de amostragem

$$F_T = \frac{1}{T} \text{ (Hz)}.$$

[Equação 4]

A variável do tempo correspondente a cada amostra pode ter definida por:

$$t_n = nT = \frac{n}{f_T} = \frac{2\pi n}{\omega_T}.$$

[Equação 5]

onde $\omega_T = 2\pi f_T$ é denominada por freqüência angular de amostragem.

Para que o processo de amostragem ocorra de forma consistente devemos ter $\omega_T > 2\omega_{\max}$, onde ω_{\max} é a maior freqüência do sinal a ser amostrado. Com isso evitamos o fenômeno de *aliasing* que consiste numa representação no tempo discreto que não corresponde ao sinal em tempo contínuo.

Depois do processo de amostragem tem-se o sinal em tempo discreto que será utilizado para a implementação do filtro, uma base teórica sobre o mesmo será descrito a seguir.

1.4.3 Conceitos Gerais

O filtro digital é representado pela resposta impulsiva da função de transferência que o caracteriza, desta forma considerando o sistema a seguir:

$$y[n] = a_1x[n] + a_2x[n-1] + a_3x[n-2].$$

[Equação 6]

Agora assumindo $x[n] = \delta[n]$, temos a resposta ao impulso, caracterizada por $h[n]$,

$$h[n] = a_1\delta[n] + a_2\delta[n-1] + a_3\delta[n-2]$$

[Equação 7]

Admitindo um sinal discreto, linear e invariante no tempo temos que a saída é uma convolução do sinal de entrada com a função da resposta impulsiva.

$$y[n] = a_1h[n] + a_2h[n-1] + a_3h[n-2].$$

[Equação 8]

Generalizando o sinal de entrada de acordo com o impulso pode-se escrever

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]\delta[n-k]$$

[Equação 9]

E como a resposta do sistema para a seqüência $x[k]\delta[n-k]$ pode ser representada por $x[k]h[n-k]$ temos

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k].$$

[Equação 10]

Representando esta operação com o sinal de convolução obtém-se a expressão abaixo.

$$y[n] = x[n] * h[n].$$

[Equação 11]

Portanto tem-se a relação entre a resposta impulsiva, sinal de entrada e sinal de saída no domínio do tempo. Como em projeto de filtros de áudio geralmente há interesse maior na análise no domínio da freqüência aplica-se a Transformada Discreta de Fourier à resposta impulsiva, teremos então

$$H[\omega_k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h[n] e^{-i2\pi nk/N}.$$

[Equação 12]

Para facilitar a manipulação matemática em relação a cálculos no domínio da freqüência é utilizada a Transformada Z, aplicando essas mudanças na equação 12 temos a função de transferência do filtro digital

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}.$$

[Equação 13]

Para uma generalização ainda maior defini-se a seguinte relação entre a entrada e saída

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \cdots + b_M x(n-M) - a_1 y(n-1) - \cdots - a_N y(n-N)$$

[Equação 14]

Aplicando-se a transformada Z para este sistema chega-se a

$$Y(z) [1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_N z^{-N}] = X(z) [b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_M z^{-M}]$$

[Equação 15]

Finalmente pode-se especificar a função de transferência por $Y(z)/X(z)$ resultando em

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_N z^{-N}}$$

[Equação 16]

A equação 16 é a base do projeto de filtros digitais, pois nela percebe-se as variáveis a serem definidas no projeto. O primeiro desafio é determinar a ordem do filtro que vai definir a quantidade de processamento utilizada, as outras variáveis são os coeficientes do filtro que irá determinar o tipo do filtro. O maior desafio do projeto consiste em melhorar ao máximo o filtro, para isto deve-se reduzir ao máximo a ordem do filtro respeitando as especificações do projeto com as aproximações toleráveis. Assim sendo, consegue-se diminuir erros por arredondamento nas contas e poupar processamento.

1.4.4 Técnica de Projeto de Filtros

Para a realização de um filtro digital deve-se seguir alguns passos que ajudarão a obter resultados otimizados. Uma condição imposta pelo projeto de filtros digitais é a de que nunca se conseguirá o filtro ideal de acordo com a correção desejada, porém as aproximações obtidas são satisfatórias. Alguns passos de projeto e confecção de filtros digitais estão exibidos e descritos abaixo.

Especificação da resposta em freqüência idealmente desejada – nesta etapa deve-se definir qual resposta ideal que o filtro deve ter depois de pronto. Desta maneira obtém-se o poder de decisão sobre qual técnica de projeto utilizar. Esta especificação é determinada pela aplicação e pela forma do sinal de áudio a se processar.

Aproximações - a partir da resposta ideal é necessário decidir qual erro é admissível nas faixas de freqüências abordadas, tais como o desvio aceitável de ganho na banda útil, desvio da banda de corte, queda mínima da banda de corte, ordem e número de coeficientes do filtro além de freqüência de amostragem e índice de mérito do filtro, que seria o valor da freqüência central da banda de correção dividido pela largura de banda em freqüência do filtro a ser projetado.

A implementação consiste na programação propriamente dita, em caso de software e construção do hardware se for o caso. Para o caso de se programar o filtro digital em placa ADSP, deve-se conhecer e configurar as variáveis de ambiente referentes à placa e as entradas e saídas de registradores para admitir o formato do sinal de entrada, processá-lo e enviá-lo ao registrador de saída no formato corretamente descrito para que seja reproduzido de maneira a não causar distorções nem desvios de fase e freqüência no sinal de saída. No caso do filtro analógico é necessário calcular os valores de resistores, capacitores e indutores além dos tipos de associações necessárias dos componentes resistivos e capacitivos de forma a se obter o valor correto do componente final devido aos valores disponíveis no mercado. Os indutores devem ser construídos de acordo com o núcleo, de ar, ferrite, etc., e a espessura do fio a ser utilizado em seu enrolamento deve seguir um padrão para que sua resistência não seja mais alta que a desejada, além de se determinar e seguir o numero de voltas a serem dadas com o fio no enrolamento para que o fluxo magnético do componente seja o necessário e o projeto funcione na prática de acordo com o determinado anteriormente.

1.4.4.1 Aproximações Aspectos Teóricos

Como foi dito no projeto do filtro é necessário quantificar qual o erro máximo em cada banda aceitável para a aplicação em questão e assim realizar as aproximações necessárias. Há diferentes maneiras de aproximar a resposta em freqüência, este tópico vai discorrer sobre as características das aproximações mais comumente usadas.

A aproximação mais básica na literatura é feita a partir do truncamento da resposta em freqüência com a função *sinc* (janela retangular), nela é produzido ondulações tanto na banda de passagem como na banda de rejeição, além de inserir uma banda de transição na resposta ideal. Esta é a aproximação mais simples, porém, a que mais introduz erros na resposta em freqüência.

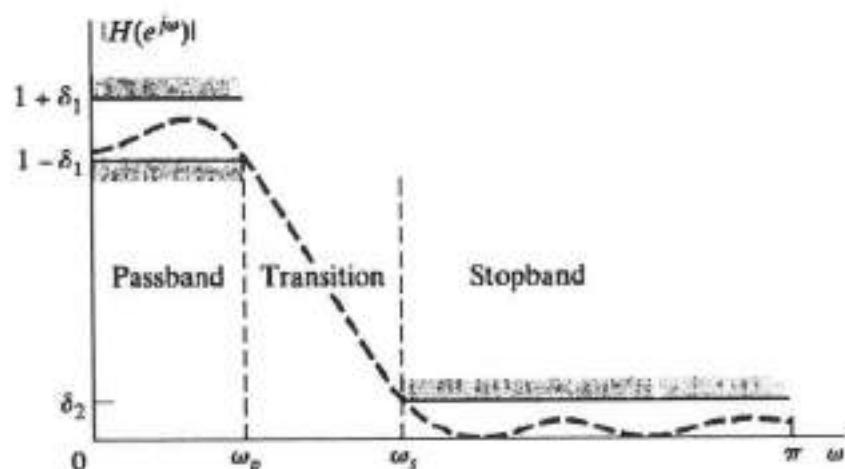


Figura 8 - Resposta em freqüência generalizada de um sistema discreto – no caso um passa baixa. [21]

Outra aproximação é a de Butterworth, nela as oscilações nas bandas de passagem e rejeição são minimizadas ao máximo, mas em troca disso a faixa de transição entre as bandas se alarga. Portanto se a aplicação for sensível a oscilações nas bandas de passagem ou transição e não for importante uma transição abrupta entre as bandas esta aproximação seria a mais adequada.

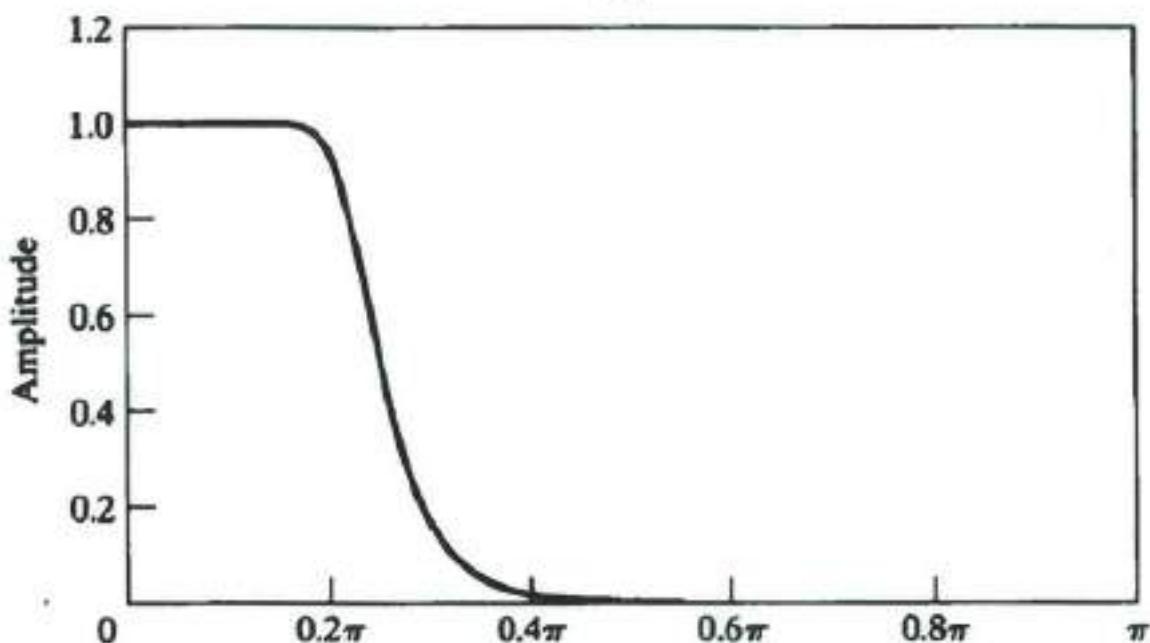


Figura 9 - Resposta de um filtro Butterworth. [21]

A função de transferência tem uma resposta em freqüência dada por:

$$G_n(\omega) = |H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}}$$

[Equação 17]

Onde ω_c é a freqüência de corte do sinal.

A última aproximação a ser tratada neste tópico é a de Chebyshev. Nas aproximações em geral tem-se uma relação inversa entre as ondulações nas bandas (passagem/rejeição) e a largura de transição entre elas. Existem dois tipos de aproximações de Chebyshev:

Tipo 1: Permitido oscilações na banda de passagem, porém as oscilações na banda de rejeição são minimizadas.

Função de transferência é dada por:

$$G_n(\omega) = |H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + c^2 T_n^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}}$$

[Equação 18]

Tipo 2: Há oscilações na banda de rejeição e pouca ou nenhuma oscilação na banda de passagem.

Função de transferência é dada por:

$$G_n(\omega) = |H(\omega)|^2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\epsilon^2 T_n^2(\omega/\omega_c)}}}$$

[Equação 19]

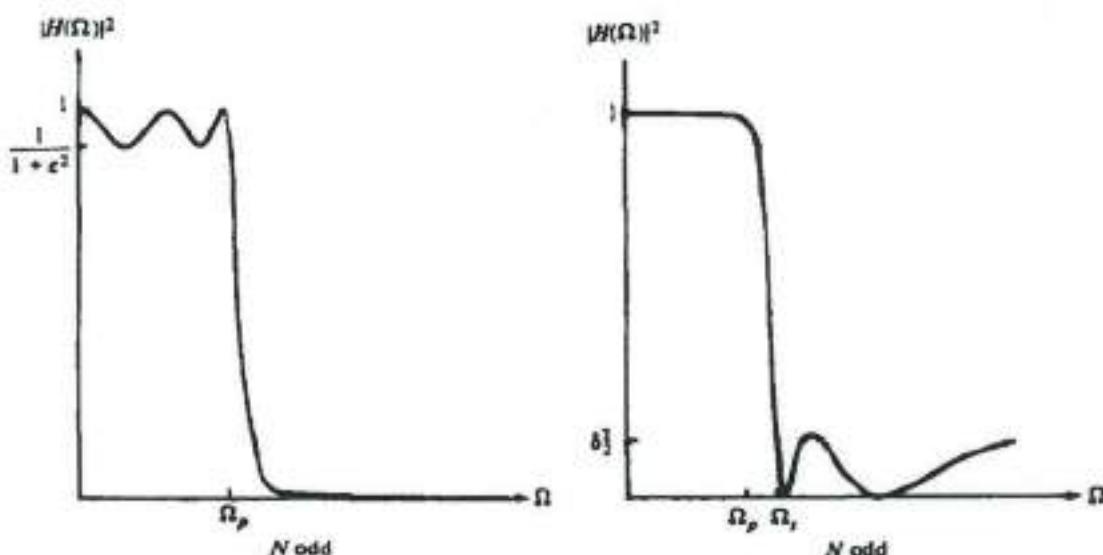


Figura 10 - Reposta de um filtro Chebyshev Tipo 1 e Tipo 2. [22]

Esta aproximação tem uma largura de transição menor do que a de Butterworth, além disso, a ordem do filtro produzida é menor. Outro aspecto importante é que os dois tipos da aproximação de Chebyshev geram a mesma ordem do filtro dados as mesmas especificações, portanto a escolha de um tipo ou outro é feita com base apenas na aplicação em o filtro é usado em questão.

As oscilações nas bandas de passagem e de rejeição para o projeto de filtro de áudio são importantes parâmetros, estes devem estar dentro do limiar admissível para cada projeto. Para sinais de áudio os limiares são definidos para que a saída não apresente distorções perceptíveis ao ouvido humano, assim garantindo a qualidade do som reproduzido pelos alto-falantes.

Outro parâmetro que deve ser cuidadosamente analisado é a largura de transição, no projeto de filtros digitais é realizada a filtragem para selecionar mais de uma freqüência que

será distribuída entre os falantes. Assim se a resposta em freqüência de cada filtro tiver uma larga faixa de transição, duas bandas diferentes podem ser sobrepostas causando distorções no ganho. Portanto, para projetos de filtros digitais aplicados a áudio, quanto maior for a largura da faixa de transição maiores serão as distorções.

1.5 Teoria de filtros digitais

Um filtro digital deve ser capaz de processar certas partes do sinal de áudio sem alterá-lo, conforme seu projeto, mas basicamente um filtro digital é constituído de uma banda passante e uma banda de corte. A banda passante é definida pelo usuário de acordo com a faixa de freqüência do sinal que deve permanecer intacta e as faixas de freqüência onde o sinal de áudio deve ter seu ganho reduzido a ponto de não interferir de maneira negativa ou indesejada na curva de resposta em freqüência final que se deve obter.

Um filtro digital deve introduzir um ganho de magnitude um nas bandas de passagem e um ganho próximo de zero nas bandas de corte, afim de que apenas a faixa de ganho do sinal de entrada correspondente a faixa de freqüências desejada deve permanecer inalterada na resposta final e as faixas de ganho referentes às bandas de corte do sinal de entrada sejam nulas ou algo próximo a zero. Para isso, deve-se construir um filtro com resposta em freqüência parecida com a da figura 11, onde se podem determinar freqüências centrais de banda, larguras de banda, desvios de ganho máximos e corte mínimo na resposta do sinal de saída do filtro.

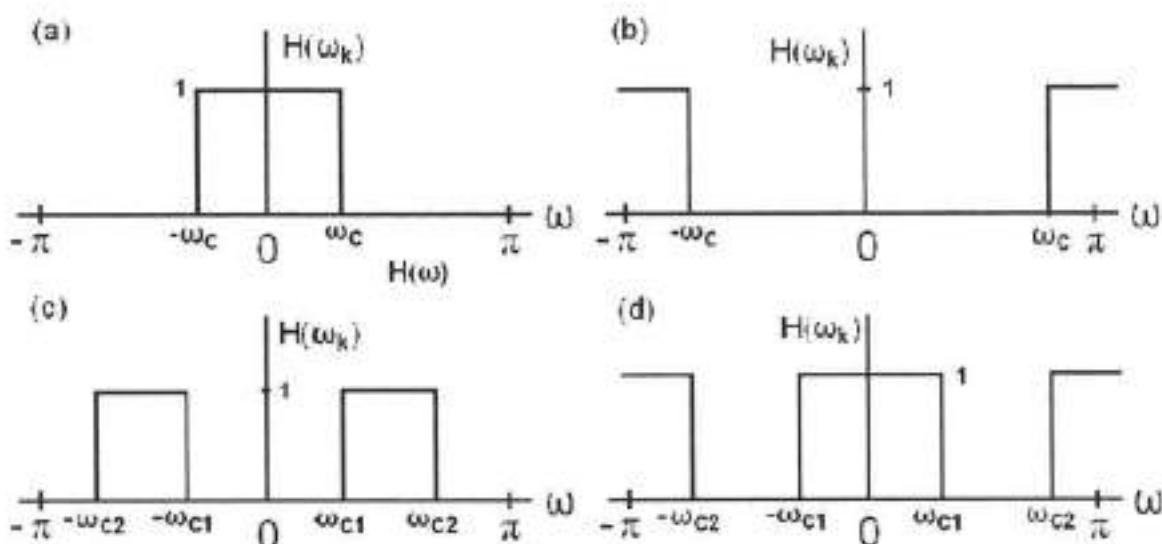


Figura 11 – Resposta ideal em freqüência [21]

- a) resposta ideal de um filtro passa baixa, b) resposta ideal de um filtro passa alta, c) resposta ideal de um filtro passa banda, d) resposta ideal de um filtro rejeita faixa.

1.5.1 Fase linear em filtro digital

Outra preocupação importante é que o filtro digital deve apresentar fase linear. O primeiro conceito que se deve ter em mente é o de que o ouvido humano não processa a fase de um sinal de áudio e sim sua amplitude por freqüência. Ao se fazerem alterações na fase de um sinal, tais como atraso, adiantamento ou inversão e reproduzir novamente o sinal alterado não é possível perceber diferença alguma do som original, porém sinais com fases diferentes em uma mesma freqüência causam interferências construtivas e destrutivas uns nos outros, alterando a magnitude do sinal e consequentemente tornando-se perceptível ao ouvido.

Um equalizador de fase linear não altera a fase do sinal processado, dando ao usuário a possibilidade de recombinar o sinal processado com outros sinais sem causar interferências indesejadas nem alterações destrutivas de ganho comprometendo a fidelidade de reprodução do sinal obtido.

Pode-se projetar um filtro digital que, por exemplo, que tenha uma característica passa baixas com corte de 1KHz de freqüência, porém, quando medida a resposta em freqüência do sinal processado, constata-se que o alto-falante responsável pela reprodução desta faixa do

sinal tenha uma perda de ganho significativa na faixa de freqüências de 300Hz a 450Hz, portanto é possível que tal filtro digital seja projetado para ter uma elevação de ganho nesta faixa de freqüências de modo a anular a queda fornecida pelo alto-falante. No momento em que o filtro digital faz alterações de ganho por faixa de freqüência em diferentes níveis e valores de ganho, este filtro se torna um equalizador digital que no exemplo dado teria ganho unitário na faixa de 20Hz a 300Hz e na faixa de 450Hz a 1KHz, zero na faixa de 1KHz a 20KHz e um ganho maior que um na faixa de 300Hz a 450Hz.

No caso de equalizar o sinal de saída, um filtro digital funcionando como crossover, ou divisor de freqüência, torna-se um conjunto de filtros digitais com menores faixas de operação e diferentes ganhos nas bandas de passagem alinhados de forma a fazer a correção pretendida do sinal de entrada para que o sinal de saída tenha um ganho constante, ou seja, com poucas e pequenas variações em sua resposta em freqüência.

Pode-se também projetar equalizadores que, além de aumentar o ganho em certas faixas de freqüência onde existam quedas de ganho na resposta, diminuir o ganho de certas faixas de freqüência onde existam picos na resposta, causadas por interferência externa ou ressonância de alto-falantes e picos de impedância.

1.5.2 Cálculo da ordem do filtro digital

Estimar a ordem do filtro significa calcular uma aproximação para o comprimento da resposta ao impulso unitário na entrada do sistema usado para filtragem. Para um projeto de um filtro, muitos autores têm fórmulas avançadas que estimam o valor mínimo do tamanho de um filtro, N , pelas especificações do filtro digital, entre elas a banda de passagem com freqüência angular, a banda de corte ou banda bloqueada com freqüência angular, a variação da ondulação na banda de passagem e a variação da ondulação na banda de corte.

Uma fórmula simples desenvolvida por Kaiser é dada pela formula 19 a seguir.

$$N \cong \frac{-20 \log 10(\sqrt{\delta_p \delta_b}) - 13}{14.6(\omega_p - \omega_b)/2\pi}$$

[Equação 20]

Onde δ_p é a oscilação na banda de passagem, δ_b oscilação na banda de rejeição e $(\omega_p - \omega_b)$ a faixa de transição.

Pode-se notar através desta equação que a ordem de um filtro é inversamente proporcional ao tamanho da banda de transição, ou seja, a faixa de freqüências destinada à queda de ganho do filtro da banda de passagem à banda de corte. Desta maneira, quanto menor a banda de transição, mais alta será a ordem do filtro, e melhor será a aproximação desse filtro ao desejado.

Entretanto, a equação 20 não gera uma boa estimativa para o caso de filtros com uma banda de passagem moderadamente grande, ou muito pequena. Para uma estimativa da ordem (N) de um filtro com uma banda de passagem grande usa-se a aproximação descrita na equação 21.

$$N \cong \frac{-20 \log 10(\sqrt{\delta_p}) + 0.22}{(\omega_p - \omega_b)/2\pi}$$

[Equação 21]

E por outro lado, em um filtro com banda de passagem pequena, a ondulação da banda de corte predomina, portanto usa-se a equação 21.

$$N \cong \frac{-20 \log 10(\sqrt{\delta_b}) + 5.94}{27(\omega_p - \omega_b)/2\pi}$$

[Equação 22]

1.5.2.1 Filtro FIR Janelas Fixas

Uma forma bastante direta de obter um filtro de duração finita é truncando a resposta ao impulso infinita de um filtro ideal. Seja $h_d[n]$ a resposta à amostra unitária de um filtro seletivo de freqüência ideal de fase linear, então sua transformada de Fourier é apresentada por:

$$H(e^{j\omega}) = A(e^{j\omega})e^{-j\alpha\cos(\theta)}$$

[Equação 23]

Como em geral o comprimento de $h_d[n]$ é infinito, é necessário encontrar uma aproximação FIR para $H_d(e^{j\omega})$. Usando o método das janelas, o filtro é projetado multiplicando-se a resposta à amostra unitária por uma janela,

$$h[n] = h_d[n]\omega[n]$$

[Equação 24]

Em que $\omega[n]$ é uma janela de comprimento finito que é zero fora do intervalo $0 \leq n \leq N$ e é simétrica a seu ponto médio

$$\omega[n] = \omega[N-n]$$

[Equação 25]

E o efeito resultante da janela sobre a resposta em freqüência pode ser visto com o teorema da convolução complexa, dado por

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} H_d(e^{j\omega}) * W(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\theta}) W(e^{j\omega-\theta}) d\theta$$

[Equação 26]

Assim, a resposta em freqüência ideal é obtida pela transformada de Fourier de tempo discreto da janela, $W(e^{j\omega})$. As equações a seguir mostram respectivamente alguns tipos de janelas viáveis ao projeto de filtros digitais não recursivos.

Janela Retangular:

$$\omega[n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N \\ 0, & \text{demais casos} \end{cases}$$

[Equação 27]

Janela de Hann:

$$w[n] = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), & 0 \leq n \leq N \\ 0, & \text{demais casos} \end{cases}$$

[Equação 28]

Janela de Hamming:

$$w[n] = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), & 0 \leq n \leq N \\ 0, & \text{demais casos} \end{cases}$$

[Equação 29]

Janela de Blackman:

$$w[n] = \begin{cases} 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right), & 0 \leq n \leq N \\ 0, & \text{demais casos} \end{cases}$$

[Equação 30]

O quanto a resposta em freqüência de um filtro projetado utilizando-se o método das janelas se aproxima da resposta desejada, $H(e^{j\omega})$, é determinado por dois fatores:

- 1 – Pela largura do lóbulo principal.
- 2 – Pela amplitude do lóbulo lateral de pico.

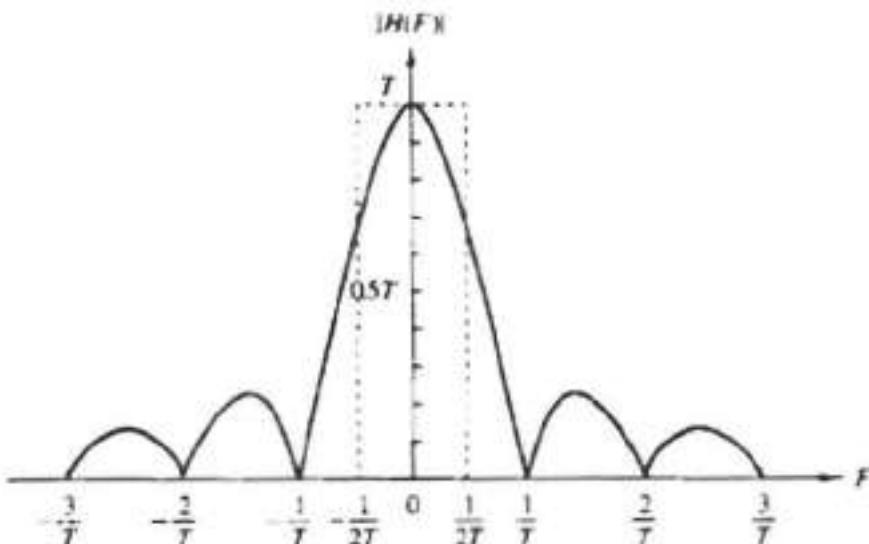


Figura 12 – Resposta em freqüência filtro com método de janelas. [22]

Idealmente, a largura do lóbulo principal deve ser estreita e a amplitude do maior lóbulo lateral, o chamado lóbulo lateral de pico, deve ser pequena. Entretanto, no caso de uma janela de comprimento fixo, elas não podem ser minimizadas independentemente. Algumas propriedades gerais das janelas são as seguintes:

À medida que o comprimento N da janela aumenta, a largura do lóbulo principal diminui, resultando uma diminuição da largura de transição entre a faixa de passagem e a de rejeição. Essa relação é dada aproximadamente por

$$N\Delta f = c$$

Onde Δf é a largura de transição e c é um parâmetro que depende da janela.

A amplitude do lóbulo lateral de pico é determinada pela forma da janela, e basicamente independe de seu comprimento.

Se a forma da janela for alterada para que a amplitude do lóbulo lateral diminua, então em geral a largura o lóbulo principal aumenta.

A aplicação da função janela tem como efeito tornar a transição da banda de passagem para a banda de rejeição mais suave, além de adicionar uma ondulação na banda passante. A queda em ω_c será tão mais abrupta quanto mais alta for a ordem N do filtro. A largura da banda de transição está, portanto, diretamente ligada à ordem do filtro.

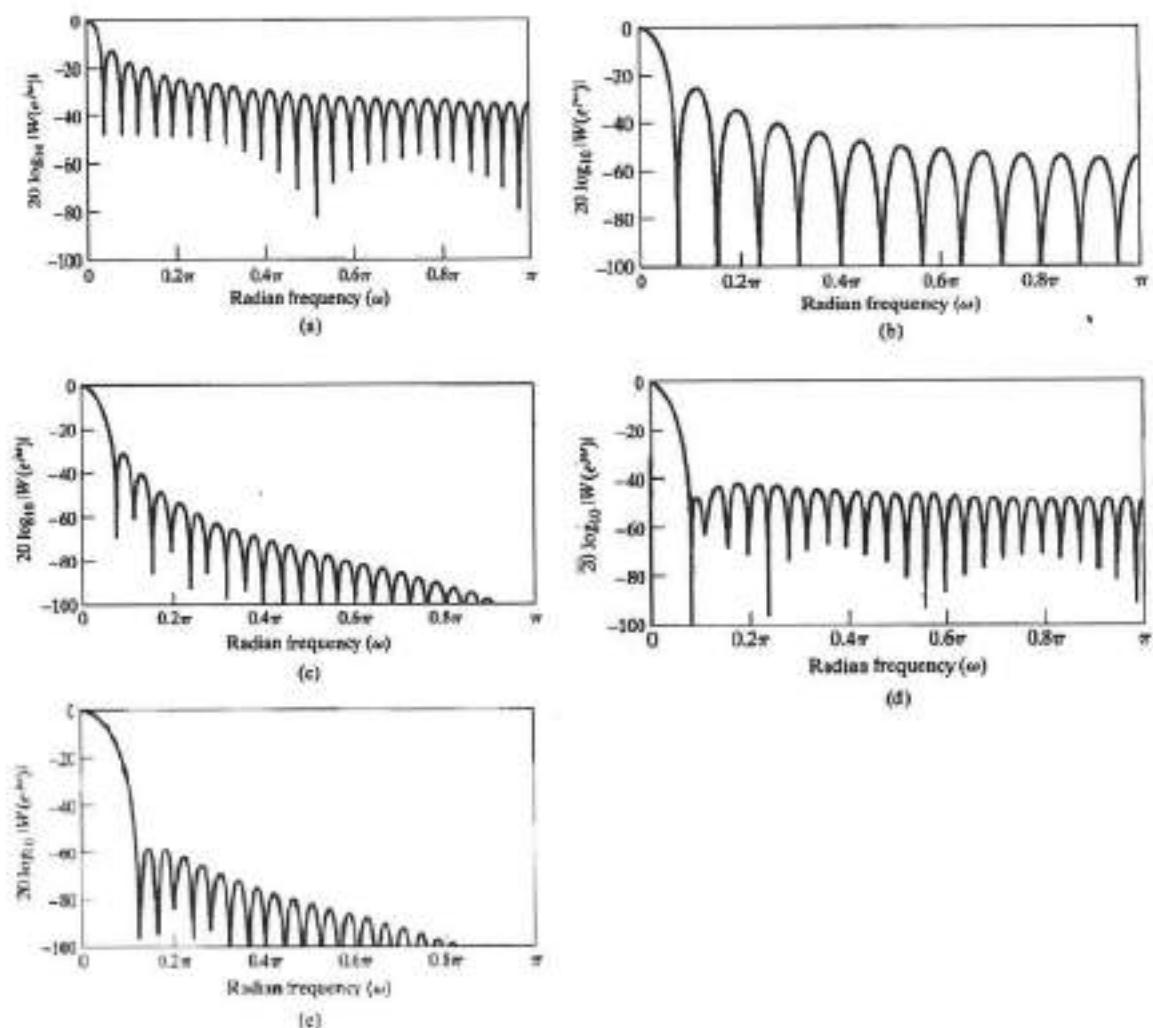


Figura 13 - Resposta em amplitude das funções janela fixa, (a) Retangular, (b) Triangular, (c) Hann, (d) Hamming, (e) Blackman. [21]

1.5.2.2 Filtro FIR Janelas Ajustáveis

As janelas ajustáveis têm como função controlar as oscilações tanto na banda de passagem como na banda de rejeição, alterando assim a forma da janela de acordo com parâmetros utilizados ao contrário de janelas fixas. A seguir será explicado com mais detalhes as duas janelas ajustáveis mais comuns.

Janela de Dolph-Chebyshev

$$w_{DC}(k) = \begin{cases} (-1)^k \frac{\cos\left[N \cos^{-1}\left[\beta \cos\left(\frac{\pi k}{N}\right)\right]\right]}{\cosh\left[N \cosh^{-1}(\beta)\right]}, & 0 \leq |k| \leq N-1 \\ 0, & \text{senão} \end{cases}$$

[Equação 31]

Com $\beta = \frac{1}{N} \cosh^{-1} 10^\alpha$. O parâmetro α representa o logaritmo da razão entre o nível de atenuação do lóbulo lateral e o nível de atenuação do lóbulo principal. Por exemplo, um valor de $\alpha=3$ implica lóbulos laterais de -60dB abaixo do lóbulo principal. As amostras de $w(n)$ são determinadas por aplicação da transformada discreta de Fourier às amostras em freqüência de $w(k)$.

Janela de Kaiser

$$w_{Kaiser} = \frac{I_0 \beta \sqrt{1 - (n/M)^2}}{I_0(\beta)}, \quad -M \leq n \leq M,$$

[Equação 32]

A variável β é um parâmetro ajustável e $I_0(u)$ é a função de Bessel de ordem zero modificada que pode ser expressa em uma forma de série de potências

$$I_0 = 1 + \sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{(u/2)^r}{r!} \right]^2$$

[Equação 33]

Observa-se que esta série de potência é positiva para todos os valores reais de u . Portanto, na prática, é suficiente pegar apenas os primeiros 20 termos do somatório para se obter uma aproximação razoável de $I_0(u)$.

O parâmetro β controla a atenuação mínima α_s , como por exemplo, o pico de ondulação δ , na banda rejeitada da resposta do filtro que usa janela.

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(\alpha_s - 8.7), & \text{para } \alpha_s > 21, \\ 0.5842(\alpha_s - 21)^0.4 + 0.07886(\alpha_s - 21), & \text{para } 21 \leq \alpha_s \leq 50, \\ 0, & \text{para } \alpha_s < 21. \end{cases}$$

[Equação 34]

O tamanho do filtro é estimado pela fórmula

$$N \approx \begin{cases} \frac{\alpha_s - 7.95}{14.36\Delta f} + 1, & \text{para } \alpha_s > 21, \\ \frac{0.9222}{\Delta f} + 1 & \text{para } \alpha_s \leq 21. \end{cases}$$

[Equação 35]

Nota-se que a janela de Kaiser não provê controle independente sobre δ_P da banda de passagem. Entretanto, na prática, δ_P é aproximadamente igual a δ_S . Pode-se observar a resposta em ganho dessas janelas na figura 14, onde para a janela de Dolph-Chebyshev o nível do lóbulo lateral relativo é de 50 dB.

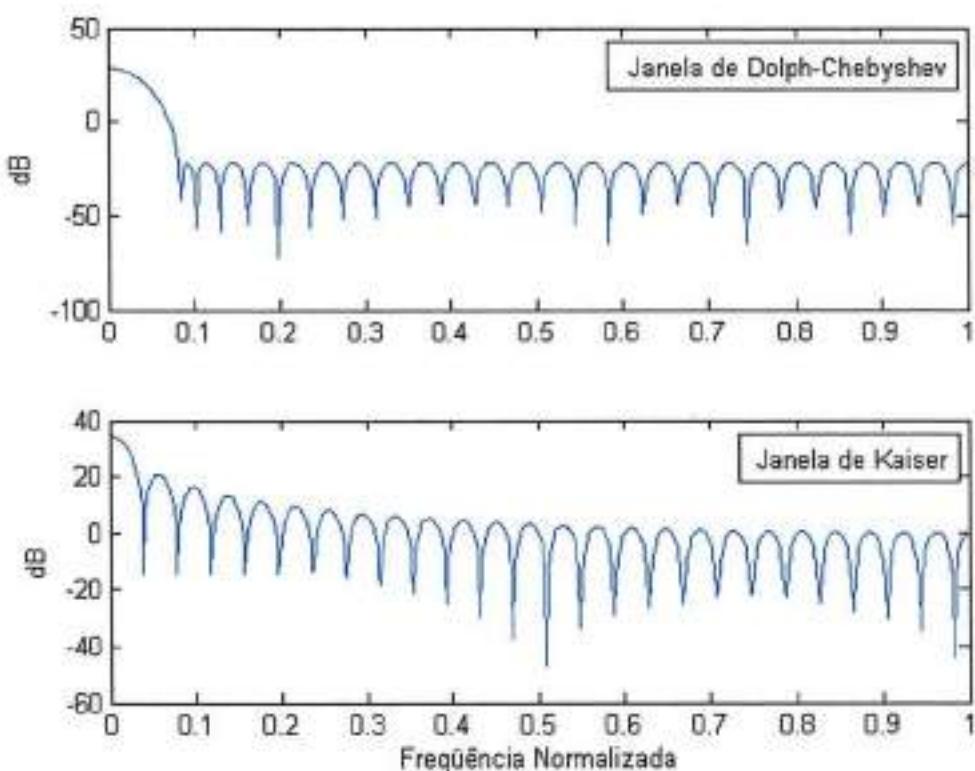


Figura 14 - Resposta em Ganho das funções janela ajustáveis. [25]

1.5.3 Algoritmo de Parks McClellan

O algoritmo de Parks McClellan é bastante utilizado para a obtenção de aproximações por filtros FIR com fase linear generalizada, tendo como base o algoritmo de troca de Remez. Este algoritmo formula o problema da aproximação como se fosse uma aproximação polinomial, assim sendo permite determinar as aproximações ótimas, onde o erro de aproximação alterna, na banda de interesse, entre os limites constantes e diferentes entre si para as várias bandas.

Um fluxograma para o algoritmo de Parks-McClellan é mostrado na Figura 15. Nesse algoritmo, todos os valores de resposta ao impulso são implicitamente variados em cada iteração para obter a aproximação desejada e ideal, mas os valores de resposta ao impulso nunca são explicitamente calculadas. Depois que o algoritmo converge, a resposta ao impulso pode ser calculada a partir de amostras da representação polinomial usando a transformada inversa discreta de Fourier.

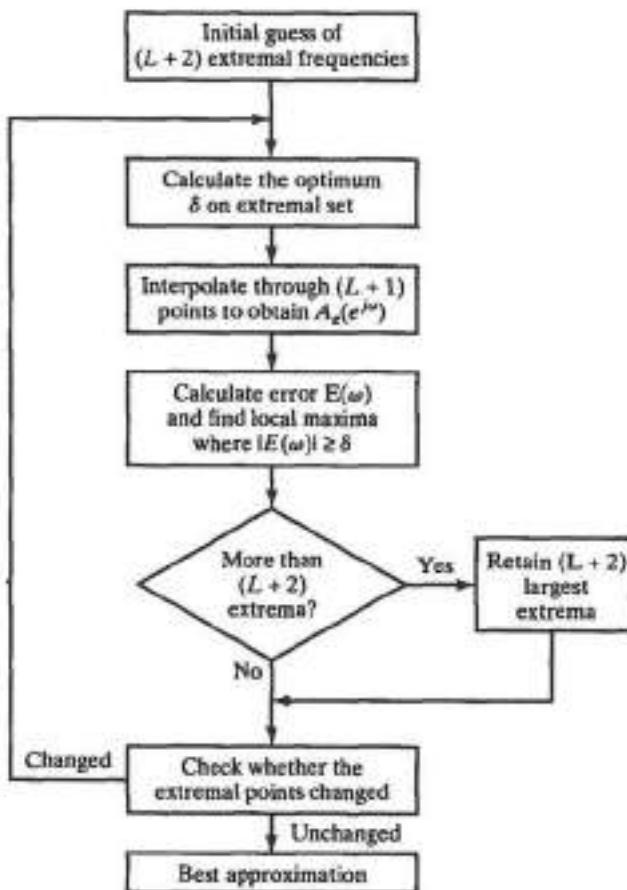


Figura 15 – Fluxograma do algoritmo de Parks McClellan [21]

Como apresentado na figura 15, o algoritmo de Parks McClellan inicia o processo iterativo com uma estimativa inicial para as freqüências extremas, que são depois iterativamente ajustadas (por uma rotina REMEZ “multiple exchange”), de forma a observar o teorema da alternância e a minimizar o valor de $|\delta|$. Um aspecto curioso de todo o procedimento é que as verdadeiras incógnitas que são os coeficientes da resposta ao impulso do filtro discreto não são explicitamente avaliadas. De fato, no caso de haver convergência do processo, só no final é que a resposta ao impulso do filtro ótimo é obtida através da transformada de Fourier inversa de uma amostragem da resposta em freqüência ótima normalizada.

Vantagens de sua utilização:

- projeta filtros ótimos de qualquer um dos quatro tipos de filtros FIR de fase linear (incluindo diferenciadores e transformadores de Hilbert)
- permite controlar individualmente o erro de aproximação em cada banda

- permite aproximar qualquer forma de resposta em freqüência (e não simplesmente do tipo plana), o que é conveniente para projetar filtros incorporando a compensação $\text{seno}(x)/x$
- permite o projeto de filtros multibanda,
- dispõe de expressões empíricas que estimam a ordem necessária para satisfazer as especificações pretendidas
- é de convergência rápida

2 MÉTODO E MATERIAIS

2.1

Construção da caixa

A fabricação de uma caixa acústica é algo que pode ser bem complicado levando-se em conta os detalhes envolvidos. Um bom projeto envolve muitos testes. Testes não só com alto-falantes diferentes, mas com gabinetes também diferentes, até se encontrar a melhor sonoridade. Muitas vezes, essa é a grande diferença entre uma caixa de renome comercial e outra feita em casa, ainda que ambas contenham com os mesmos alto-falantes.

A figura 16 a seguir mostra a impedância do woofer medida em dois casos diferentes, que seriam a medida direta sem massa adicional no cone do alto-falante e a medida realizada com 60g de massa depositada no cone de vibração do woofer. Tais medidas são processadas pelo programa LMS para a obtenção dos parâmetros eletroacústicos, Thiele-Small, do woofer, que definirão posteriormente as dimensões dos dutos e o volume de ar interno à caixa.

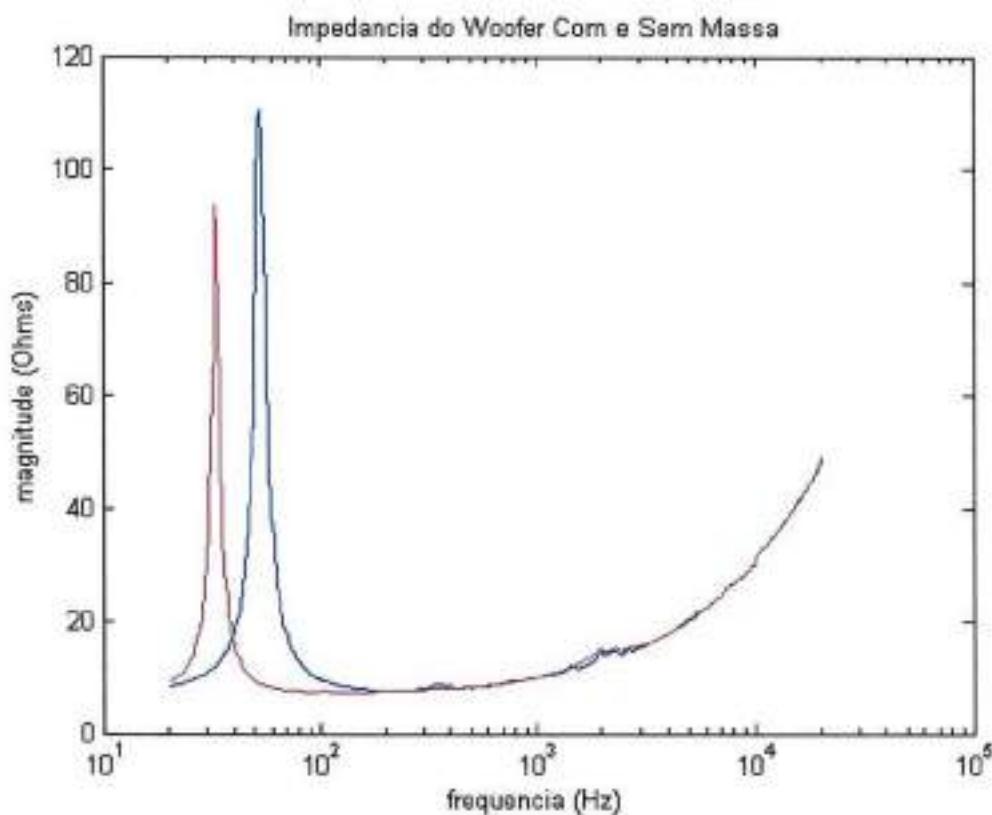


Figura 16– Impedância do Woofer com e sem massa

Tabela 3 - Variações de ganho em dB SPL de um alto-falante para diferentes formatos de caixas acústicas em toda a faixa de freqüência [24]

" Full-Range SPL dB Variations for Different Enclosure Shapes.

	<i>2" Full-Range 500Hz-10kHz</i>	
	<i>Center</i>	<i>Top</i>
Cube	4.35	2.22
Cube 2" Bev	3.22	1.92
Cube 4" Bev	2.82	1.20
Rectangle	3.03	2.26
Rect. 2" Bev	2.05	2.28
Rect. 4" Bev	1.13	1.60
Pyramid	2.71	2.30
Cylinder	1.29	1.15
Sphere	1.08	NA
Egg	1.51	NA

A seguir, é mostrada uma tabela comparativa de valores de parâmetros eletroacústicos do woofer utilizados na construção e otimização da caixa. Tais parâmetros foram obtidos através da medição do alto-falante utilizando o programa LMS, que gera o sinal de excitação para o alto falante e através de um microfone mede sua resposta por freqüência.

Outro programa utilizado foi o Perfectbox que calcula o volume de ar necessário à resposta otimizada do alto-falante além de dimensionar os dutos de ar necessários a uma sintonia de resposta em baixas freqüências necessária à melhora dos níveis de resposta em tais freqüências.

Tabela 4 – Comparativo dos parâmetros Thiele-Small do Woofer

Comparativo dos parâmetros Thiele-Small do woofer			
Parâmetro	Descrição	Fornecido pelo fabricante	Medido pelo programa LMS
Re	Resistência da Bobina	6,4 ohm	7,1 ohm
fs	Freqüência de Ressonância	50 Hz	52,4Hz
n0	Eficiência de Referência em Meio Espaço	1,62%	2,07%
SPL0	Sensibilidade com 2,83v de Entrada Medida a 1m de Distância	97,00 dB SPL	95,78 dB SPL
Qms	Fator de Qualidade Mecânico	7,95	8,82
Qts	Fator de Qualidade Total	0,69	0,57
Qes	Fator de Qualidade Elétrico	0,75	0,61
Vas	Volume Equivalente do Falante	97,00 Litros	90,14 Litros
Mms	Massa Móvel	36,90 g	37,77 g

Através dos parâmetros Thiele-Small do woofer obtidos através do programa LMS pode-se utilizar outro programa, o Perfectbox, que calcula o volume de ar interno à caixa e dimensiona os dutos de ar dando ao usuário algumas opções de diâmetro e comprimento, para que sejam escolhidos de acordo com as possibilidades de projeto e a freqüência de sintonia calculada e mostrada pelo programa em questão.

O manual do woofer traz consigo os parâmetros Thiele-Small medidos pelo fabricante em câmara anecóica e utilizando-se de softwares específicos e não explicitados que, quando comparados na tabela 4 com os parâmetros medidos pelo grupo geram pequenas diferenças

que se encontram próximos das discrepâncias aceitas pelas medições que são da ordem de 15% de variação para cada parâmetro, erro este especificado pelo fabricante.

O grupo decidiu utilizar os parâmetros medidos e não os fornecidos para que o projeto se aproximasse do real e não do ideal especificado pelo fabricante, uma vez que o som reproduzido pela caixa não será ouvido dentro de uma câmara anecóica e sim em uma casa, auditório ou sala.

Os parâmetros obtidos pela utilização do programa Perfectbox estão descritos na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Parâmetros de projeto da caixa acústica dimensionados pelo Perfectbox.

Projeto da caixa acústica utilizando o Perfectbox		
Variável	Opção	Recomendação
Volume interno de ar	Única	79,28 Litros
Freqüência de sintonia dos dutos	Única	33,44 Hz
Diâmetro X Comprimento dos dutos	1	5,08 cm X 10,11 cm
Diâmetro X Comprimento dos dutos	2	7,62 cm X 25,56 cm
Proporção da caixa (Altura X Largura X Profundidade)	Única	69,52 cm X 42,90 cm X 26,00 cm

As dimensões frontais da caixa estão demonstradas em escala na própria caixa como mostradas na figura 17 a seguir. As dimensões laterais da caixa estão demonstradas na figura 18 a seguir. Os valores das dimensões da caixa foram levemente alterados de modo a não alterar o volume interno de ar e facilitar as medições para os cortes da madeira.

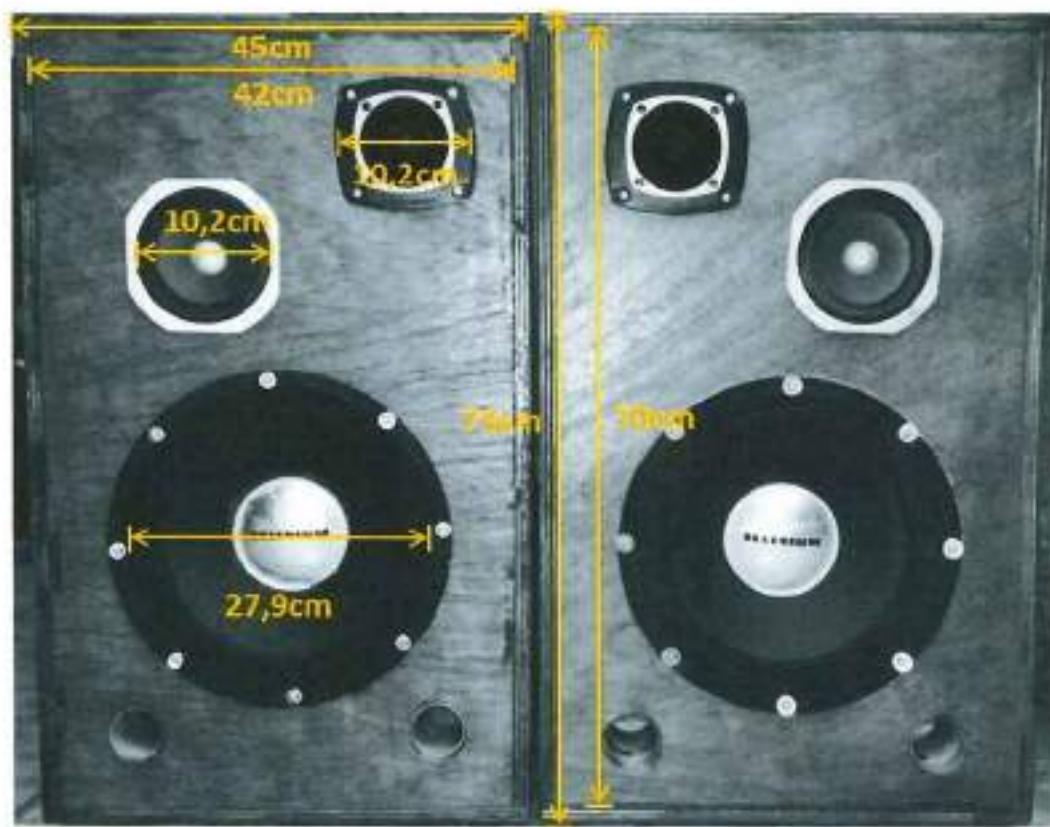


Figura 17 – Dimensões da parte frontal da caixa acústica



Figura 18 - Dimensões da parte lateral da caixa acústica

Seguindo as especificações tais especificações as caixas acústicas foram construídas, medidas e afinadas, de modo a ficarem exatamente com as dimensões projetadas.

Os custos envolvidos em projetos com objetivo de alta fidelidade tornam as caixas muito caras. Custos estes podem ser de natureza de matéria-prima, como madeira, parafusos, cola, pregos até de natureza prática, como o tipo de alto-falante a ser utilizado, espessura da madeira de modo que esta não vibre junto com o alto-falante e também softwares de medidas de respostas em freqüência, como o LMS, simulação de formato e volume de caixas acústicas, dimensionamento de dutos e volume interno de ar. Por isso, muitos preferem fabricar as suas próprias caixas, de forma a baratear o custo. Pensando nisso, muitos fabricantes de falantes disponibilizam projetos gratuitos e que já levam em conta os parâmetros Thiele-Small dos alto-falantes que disponibilizam no mercado e dizem o formato recomendado para a caixa acústica de modo a aproveitar melhor o volume interno de ar.

Um par de caixas retangulares foi construído seguindo cálculos de volume de ar e dimensionamento de dutos realizados no programa Perfectbox, a partir de parâmetros medidos e calculados utilizando o programa LMS, de modo a testar e aferir as diferenças de respostas em freqüência do conjunto de alto-falantes montados na caixa e corrigidos por filtros digitais ou simplesmente por divisores de freqüência analógicos para facilitar, devido a maior facilidade de construção, otimização e medição dos parâmetros desse tipo de caixa e versatilidade do filtro digital se ajustar aos parâmetros de qualquer caixa, conhecidos seus parâmetros eletroacústicos.

A fase de montagem de caixas acústicas envolve muitas etapas. A primeira é o dimensionamento da caixa através dos parâmetros eletroacústicos do woofer, pois ele é o único que precisa de um gabinete e de um certo volume de ar para ter sua resposta melhorada. Após dimensionada, são cortadas as tábuas de madeira que irão formar a caixa.

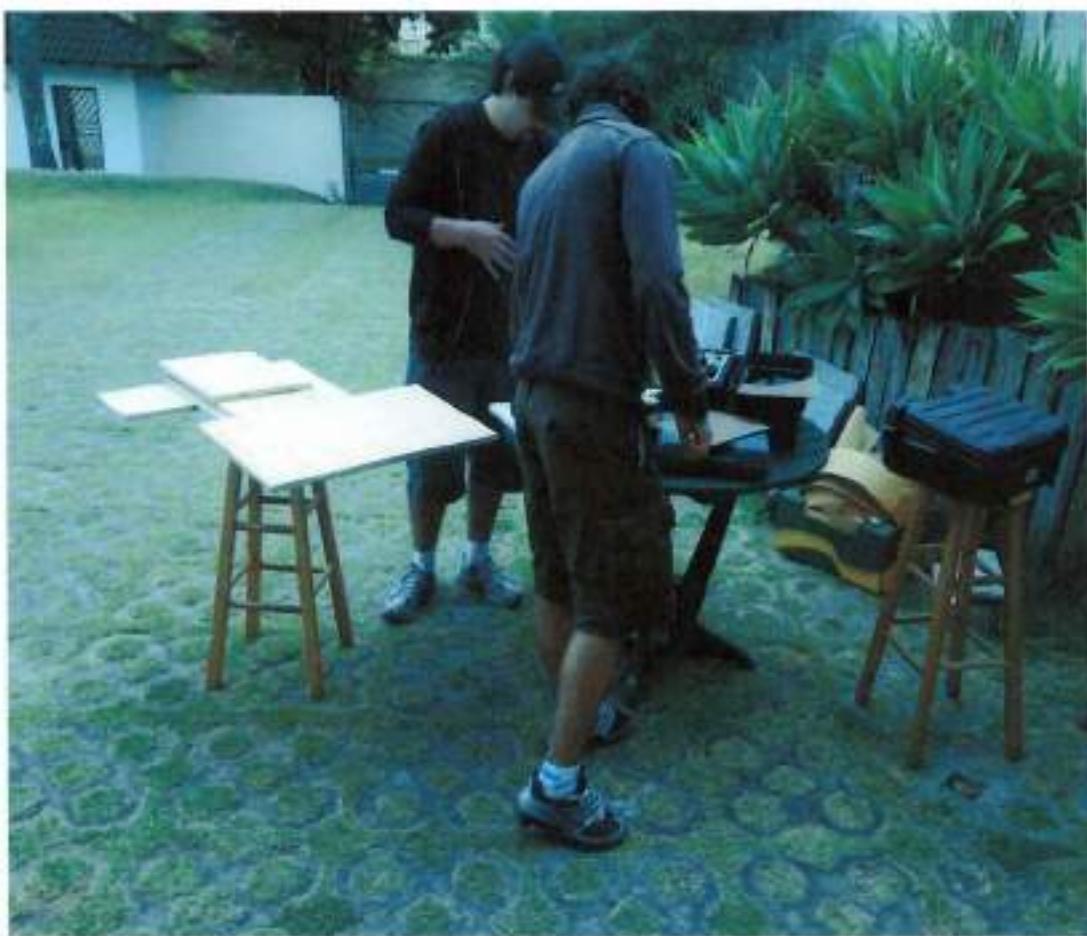


Figura 19 – Início da etapa de construção da caixa acústica

Depois de cortadas, são medidos os diâmetros dos alto-falantes de maneira a fazer exatamente os cortes na face frontal da caixa de modo a encaixá-los perfeitamente sem permitir o vazamento de ar na junção com a madeira. Depois de instalados os alto-falantes são vedados internamente para que realmente não exista nenhum vazamento indesejado.

Fazer os cortes manualmente requer muita prática e destreza com o maquinário, pois um erro em grande escala pode fazer com que precise jogar fora todo o painel frontal da caixa e começar a cortar um novo painel.



Figura 20 – Corte da madeira para o encaixe de alto falantes

Depois de feitos os furos no painel deve-se lixar a superfície de maneira a deixá-la sem rugosidades exageradas de maneira a não permitir o encaixe mal feito dos alto-falantes.



Figura 21 – Resultado da frente da caixa acústica

O passo seguinte é a montagem da caixa sem os alto-falantes de maneira a corrigir certas imperfeições e encaixes das partes a serem montadas.

Então, finalmente depois de montada, vedada e bem encaixada, a caixa é carregada com os alto-falantes possibilitando a medição das curvas de resposta em freqüência de cada alto-falante separadamente ou a resposta da caixa completa de forma a verificar se os dutos de ar estão bem sintonizados ou se existe alguma freqüência para a qual os alto-falantes deixem uma falha de junção na resposta ou uma grande falha devida ao fato de a impedância na tal freqüência estar em um pico muito alto reduzindo a potência de saída a valores de amplitude do sinal de entrada constante.



Figura 22 – Caixa acústica montada



Figura 23 – Resultado final da construção da caixa acústica

2.2

Funcionamento do programa implementado na placa

Este projeto utiliza um codec de áudio AD1847 para realizar conversões A/D e D/A. O AD1847 é conectado à porta serial 0 (SPORT0) sobre o SHARC. A memória interna da ADSP-21061 (1 Megabit) é suficiente para que nenhum de memória externa seja conectada. O sistema do UART 16550 é usado para a comunicação, através da interface RS-232, entre o processador com o PC host.

Ao utilizar as ferramentas de desenvolvimento da família ADSP-21000, deve-se descrever o sistema de hardware em um arquivo de descrição de arquitetura. O principal objetivo deste arquivo é definir o mapa SHARC de memória para vinculá-lo. Um arquivo chamado ezkit.ach está incluído no software EZ-KIT Lite. O arquivo de texto abaixo é o

conteúdo desse arquivo arquitetura:

!

.SYSTEM SHARC_EZKIT_Lite;

!

! This architecture file is required for use with the SHARC EZ-KIT

! Lite development software. It is structured for use with the C

! compiler but also can be used with assembly code.

!

! This architecture file allocates:

! Internal 133 words of 48-bit run-time header in memory block 0

! 16 words of 48-bit initialization code in memory block 0

! 619 words of 48-bit kernel code in memory block 0

! 7424 words of 48-bit C code space in memory block 0

! 4K words of 32-bit PM C data space in memory block 0

!

! 8K words of 32-bit C DM data space in memory block 1

! 4K words of 32-bit C heap space in memory block 1

! 3712 words of 32-bit C stack space in memory block 1

! 384 words of 32-bit kernel data in memory block 1

.PROCESSOR = ADSP21061;

!

! Internal memory Block 0

!

.SEGMENT/RAM/BEGIN=0x00020000 /END=0x00020084 /PM/WIDTH=48 seg_rth;

.SEGMENT/RAM/BEGIN=0x00020085 /END=0x00020094 /PM/WIDTH=48 seg_init;

.SEGMENT/RAM/BEGIN=0x00020095 /END=0x000202ff /PM/WIDTH=48 seg_knlc;

.SEGMENT/RAM/BEGIN=0x00020300 /END=0x00021fff /PM/WIDTH=48 seg_pmco;

.SEGMENT/RAM/BEGIN=0x00023000 /END=0x00023fff /PM/WIDTH=32 seg_pmda;

!

! Internal memory Block 1

!

.SEGMENT/RAM/BEGIN=0x00024000 /END=0x00025fff /DM/WIDTH=32 seg_dmda;

.SEGMENT/RAM/BEGIN=0x00026000 /END=0x00026fff /DM/WIDTH=32 /cheap

```

seg_heap;
SEGMENT/RAM-BEGIN=0x00027000 /END=0x00027e7f /DM/WIDTH=32 seg_stak;
SEGMENT/RAM-BEGIN=0x00027e80 /END=0x00027fff /DM/WIDTH=32 seg_knlid;
! -----
! External Memory Select 1 is reserved for the UART.
! -----
.ENDSYS;

```

Esta arquitetura pressupõe que você estará usando o kernel construída no EZ-KIT Lite para fazer o download e iniciar o programa. O kernel usa certas regiões da memória (seg_knlc e seg_knlid) que o programa deve evitar. Os segmentos de memória restantes estão disponíveis.

Quando o hardware foi determinado, é possível desenvolver o software. Em primeiro lugar, determinar todos os requisitos de memória para variáveis e matrizes, juntamente com todas as interrupções necessárias para o sistema do ADSP-21061. Qualquer hardware ou registrador que precisam ser inicializados também deve ser planejado.

O programa pode ser escrito em C ou utilizando as instruções do SHARC da linguagem assembly. É escrito um programa (código C ou instruções em linguagem assembly) em um arquivo de texto e depois é processado com um compilador C ou assembly. O compilador C converte expressões C padrão para instruções de montagem nativa SHARC.

Depois de terminar de criar o arquivo de texto que contém o programa, é usado o compilador ou assembly para criar o arquivo objeto. Compilar um programa C realmente requer várias etapas. Analog Devices fornece uma ferramenta que pode realizar todas as etapas necessárias. Para compilar um programa chamado C myprog.c, pode digitar o seguinte comando:

g21k myprog.c

A ferramenta executa automaticamente todas as etapas necessárias para compilar o código fonte em linguagem assembly, montar a saída do compilador em um arquivo objeto realocável, e depois ligar o arquivo objeto com um arquivo binário executável. Por padrão, o arquivo resultante será nomeado myprog.exe.

O simulador permite que você execute o seu código em um ambiente de simulação para testar o software sem a utilização de um sistema de hardware real. Este passo opcional é

usado para garantir que o software funcione antes de executá-lo em seu hardware.

Muitas vezes um problema pode surgir quando você carregar o software para o hardware e ele não funciona. Sem verificar a operação do seu programa no simulador, você não pode ter a certeza se a falha está relacionada com hardware ou software. Se você verificar o funcionamento do software no simulador, fazendo o download do código para o seu hardware, e ele não funcionar, provavelmente é devido a falhas de hardware.

O SHARC EZ-KIT Lite tem uma placa de EPROM nele que contém código ADSP-21061. Quando a placa é ligada (ou reiniciada) o código é automaticamente transferida do EPROM para a memória interna da ADSP-21061. O código fornecido com o EZ-KIT Lite inclui um monitor do programa (kernel) que permite que o ADSP-21061 se comunique com a interface RS-232.

Quando iniciado o programa, o codec AD1847 digitaliza o sinal de entrada analógica e transmite os dados para a porta serial do SHARC. O SHARC lê os dados da porta serial e depois retransmite os dados de volta para o codec, que por sua vez converte os dados em um sinal analógico que é dirigido ao dispositivo de saída.

Pode-se alterar os parâmetros de operação do codec AD1847, selecionando uma taxa de amostragem entre as quatorze opções para a entrada do codec e a taxa de conversão de saída. Também é possível alterar o ganho de entrada, que é aplicado ao sinal de entrada antes de ser digitalizado. Escolhendo um dos dezesseis valores possíveis.

Há um algoritmo de filtro FIR para processar os dados do sinal digital antes ser retransmitido para o codec.

2.2.1 O Programa

Familiarizados com todo processo de criação e execução do programa e conhecendo a arquitetura interna, passamos a uma explicação do programa utilizado.

Segue abaixo trechos dos programas que utilizado para o aprendizado e comentários importantes, nos trechos alterações de parte dos códigos para testes ajudam a entender todas as características internas do processador e da placa.

```
*****  
/*  
*****  

/* ADSP-2106x System Register bit definitions */  

#include <def21060.h>  

#include <21060.h>  

#include <signal.h>  

#include <sport.h>  

#include <macros.h>  

#include <math.h>  

#include <filters.h>  

*****
```

Na inclusão das bibliotecas a serem utilizadas destaca-se aqui a filters.h, pois ela fornece as funções FIR e IIR que realizarão as contas para filtragem do sinal de entrada e fornecer a saída apropriada.

```
#define NUM_TAPS 256  

float pm coeffs[5][NUM_TAPS] =  

{  

#include "fir.h"  

};  

*****
```

Neste trecho tem-se a inclusão do arquivo que contém os coeficientes do filtro a ser utilizado, estes são parâmetros da função FIR utilizada posteriormente. Portanto vale ressaltar que os coeficientes devem estar previamente calculados e precisam ser via arquivos para a função calcular a saída.

Para gerar os coeficientes realizam-se testes com a caixa acústica para em conjunto com o MatLab ajustar com maior precisão o filtro e seus respectivos coeficientes.

```
#define SZ_regs_1847 16
```

```

int regs_1847[SZ_regs_1847] = {
    /* Note that the MCE bit is maintained throughout initial
       programming to hold off premature autocalibration. */
    0xc000,           /* index 0 - left input control */
    0xc100,           /* index 1 - right input control */
    0xc280,           /* index 2 - left aux 1 input control */
    0xc380,           /* index 3 - right aux 1 input control */
    0xc480,           /* index 4 - left aux 2 input control */
    0xc580,           /* index 5 - right aux 2 input control */
    0xc600,           /* index 6 - left dac control */
    0xc700,           /* index 7 - right dac control */
    0xc850,           /* index 8 - data format */
    0xc909,           /* index 9 - interface configuration */
    0xca00,           /* index 10 - pin control */
    0xcb00,           /* index 11 - no register */
    0xcc40,           /* index 12 - miscellaneous information */
    0xed00,           /* index 13 - digital mix control */
    0xce00,           /* index 14 - no register */
    0x8f00};          /* index 15 - no register */

int rx_buf[3];           /* receive buffer */
int tx_buf[3] = {0xcc40, 0, 0}; /* transmit buffer */

/*****************************************/

```

Nesta parte são definidos os parâmetros iniciais do programa, tais como a taxa de amostragem a ser utilizada na conversão analógica digital, portanto para modificar parâmetros da placa recorre-se a este registrador. Tem-se também a declaração dos buffers utilizados na comunicação serial, que nos buffers RX e TX são três bytes de tamanho.

```

/*****************************************/
/*
 * Serial port transmit DMA complete
 */

```

```
*****
void spt0_asserted( int sig_num )
{
    // Check if there are more commands left to transmit.
    if( xmit_count )
    {
        // If so, put the command into the transmit buffer and update count.
        tx_buf[0] = *xmit_ptr++;
        xmit_count--;
    }
}
*****
```

O trecho abaixo mostra, via código, como é feita a comunicação serial entre os componentes da placa.

```
*****
/*
 * Serial port receive DMA complete
 */
*****
void spr0_asserted( int sig_num )
{
    float filter_input;

    // Get sample from Codec or random noise.
    if( source == 0 )
    {
        filter_input = rx_buf[1];
    }
    else
    {
        filter_input = rand() & 0x00003fff;
    }
}
*****
```

```
// Filter sample and output.  
if( filter )  
    tx_buf[1] = fir( filter_input, &coeffs[filter][0], &state[0], (int)NUM_TAPS );  
else  
    tx_buf[1] = filter_input;  
tx_buf[2] = tx_buf[1];  
}  
*****
```

Este trecho é o mais importante de todo o código, pois é aqui que é produzida a saída do filtro digital passa banda. O conversor analógico digital recebe o sinal analógico oriundo de um aparelho de som que gera o sinal de áudio para a placa, a conversão para sinal digital é realizada utilizando parâmetros apropriadamente armazenados em registradores. Este sinal digital é enviado via porta serial para o DSP processar este e produzir a saída esperada, nos códigos acima esta parte é descrita.

No RX chega o sinal que o A/D envia e estes dados recebidos são como parâmetros da função fir que realizará todas as contas necessárias para produzir a saída, nota-se também que aqui é possível introduzir no filtro um ruído no lugar do sinal transmitido pelo CODEC. Esta função calcula a saída a cada byte recebido, e a transmite via sinal serial ao codec que agora fará o caminho inverso, convertendo o sinal digital em analógico e em seguida os transmite a saída de áudio. Como pode ser melhor compreendido pelo diagrama mostrado na figura 24, como segue.

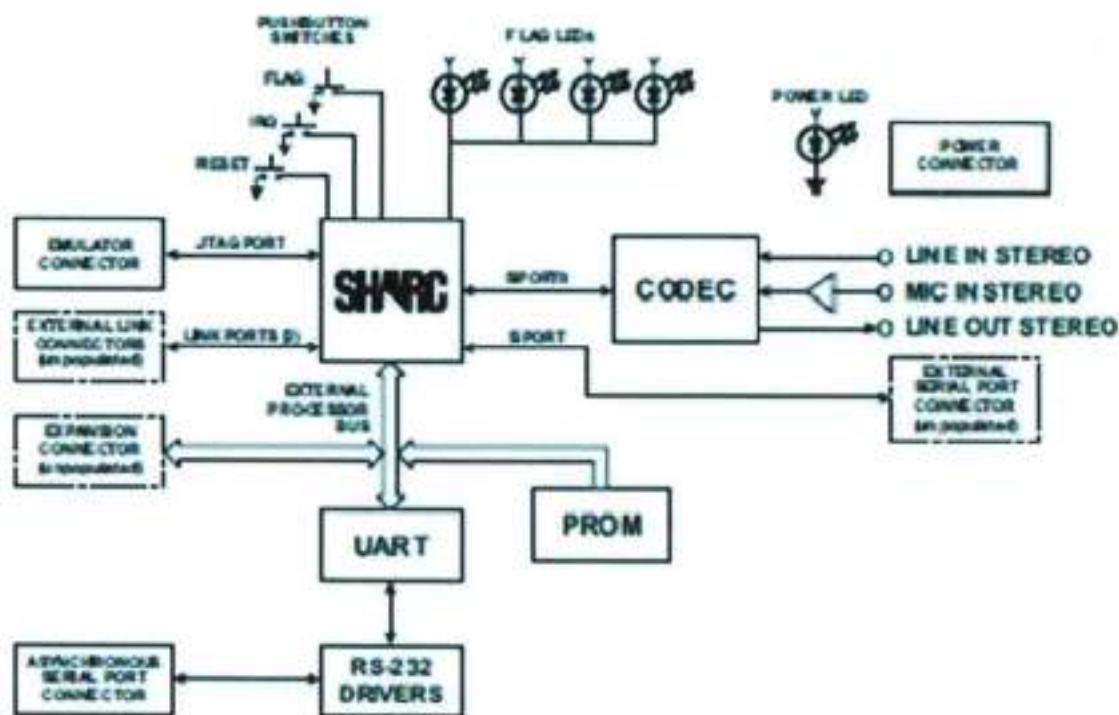


Figura 24 – Diagrama de blocos do funcionamento do programa

```
*****
*/
/*
*/
/*
*/
*****
```

```
void send_1847_config_cmds( void )
{
    // Set up pointer and counter to transmit commands.
    xmit_ptr = regs_1847;
    xmit_count = SZ_regs_1847;

    // Wait for all commands to be transmitted.
    while( xmit_count )
        idle();

    // Wait for AD1847 autocal to start.
    while( !(rx_buf[0] & 0x0002) )
        idle();
```

```

// Wait for AD1847 autocal to finish.

while( rx_buf[0] & 0x0002 )
    idle0;

return;
}

*****

```

As configurações iniciais definidas pelo vetor `regs_1847` são através da execução desse código transmitidos ao registrador que as armazenarão. Estes parâmetros podem ser alterados em qualquer outro momento caso seja necessária outra configuração como, por exemplo, a alteração da taxa de amostragem.

```

*****
/*
*/
/*
*/
/*
*/
void main ( void )
{
    int i;
    int x;

    // Initialize state array for FIR filter.
    for( i=0 ; i<NUM_TAPS+1 ; i++ )
        state[i] = 0.0;

    // Initialize some SHARC registers.
    init_21k();

    // Reset the Codec.
    set_flag( SET_FLAG0, CLR_FLAG ); /* Put CODEC into RESET */
    for( x=0 ; x<0xffff ; x++ ) /* Hold CODEC in RESET */
        ;

```

```

set_flag( SET_FLAG0, SET_FLAG ); /* Release CODEC from RESET */

// Configure SHARC serial port.
setup_sports();

// Send setup commands to CODEC.
send_1847_config_cmds();

// Turn on all LEDs.
set_flag(SET_FLAG2, CLR_FLAG);

// Turn on the timer.
timer_on();

// Loop forever.
for(;;)
{
    idle();
}
*****
```

O main estabelece uma ordem de execução necessária para o programa funcionar corretamente. Assim inicia primeiramente os registradores da placa, posteriormente reinicia o Codec e configura sua porta serial. Por fim, envia as configurações iniciais aos registradores e entra em um loop infinito, ficando a espera do recebimento de dados a serem calculados e produzir a saída a ser enviada de volta ao codec.

Todo o processo de análise do funcionamento do programa possibilitou a realização de testes efetivos. Tais testes foram constituidos basicamente na alteração das configurações iniciais da placa como alteração da taxa de amostragem utilizada pelo codec.

A geração de parâmetros dos filtros crossover digital e equalizador digital foram realizadas no MatLab utilizando-se algumas funções muito comuns no processamento digital de sinais de áudio.

O comando `firpmord` – estima a ordem mínima do filtro digital, que é o numero de coeficientes que o filtro digital irá possuir para sua confecção e geração de sua resposta em freqüência.

A função `[N, fo, ao, w] firpmord = (f, a, dev)` encontra a ordem mínima aproximada, bordas de bandas de passagem normalizadas para uma dada largura de banda de freqüência de operação do filtro digital, amplitude de banda de operação e os pesos que atendam às especificações de entrada `f, a, e dev`.

O parâmetro `f` é um vetor de freqüência de banda (entre 0 e `fs / 2`, onde `fs` é a freqüência de amostragem e `fs/2` a freqüência de Nyquist), `a` é um vetor que especifica a amplitude desejada para cada faixa de freqüência utilizada, sobre as bandas definidas por `f`.

O parâmetro `dev` é um vetor do mesmo tamanho que o vetor `a` e especifica o desvio máximo admissível ou ondulações entre a resposta em freqüência e amplitude desejada do filtro de saída para cada banda.

Usa-se o comando `firpm` com a ordem `n` resultante da função `firpmord`, vetor de freqüências `fo` que representa a porcentagem da freqüência de amostragem em relação a cada freqüência natural utilizada no projeto do filtro, amplitude `ao` e o vetor de resposta e pesos `w` para projetar o vetor de coeficientes do filtro digital, `b`, que satisfaz às especificações fornecidas pelo projeto definido na função `firpmord`.

A função `firpm` utiliza o algoritmo de Parks-McClellan para o projeto ótimo de filtro FIR seguindo as especificações geradas pelo projeto e pelas funções utilizadas e descritas anteriormente, além de projetar um filtro FIR de fase linear na faixa de operação utilizando o algoritmo de Parks-McClellan que por sua vez usa o algoritmo de troca de Remez e a teoria de aproximação de Chebyshev para projetar filtros com um encaixe perfeito entre as respostas de freqüência desejada e real. Os filtros são otimizados no sentido de que o erro máximo entre a resposta de freqüência desejada e a resposta real em freqüência é minimizado.

O comando `b = firpm (n, fo, ao)` retorna vetor contendo `n+1` coeficientes.

O parâmetro `fo` é um vetor de pares de pontos da freqüência normalizada, especificado no intervalo entre 0 e 1, onde 1 corresponde à freqüência de Nyquist, as freqüências devem estar em ordem crescente.

O parâmetro ao é um vetor contendo as amplitudes desejadas nos pontos especificados em fo . A relação entre os vetores f e a na definição de uma resposta de freqüência desejada é mostrado na figura 25 abaixo.

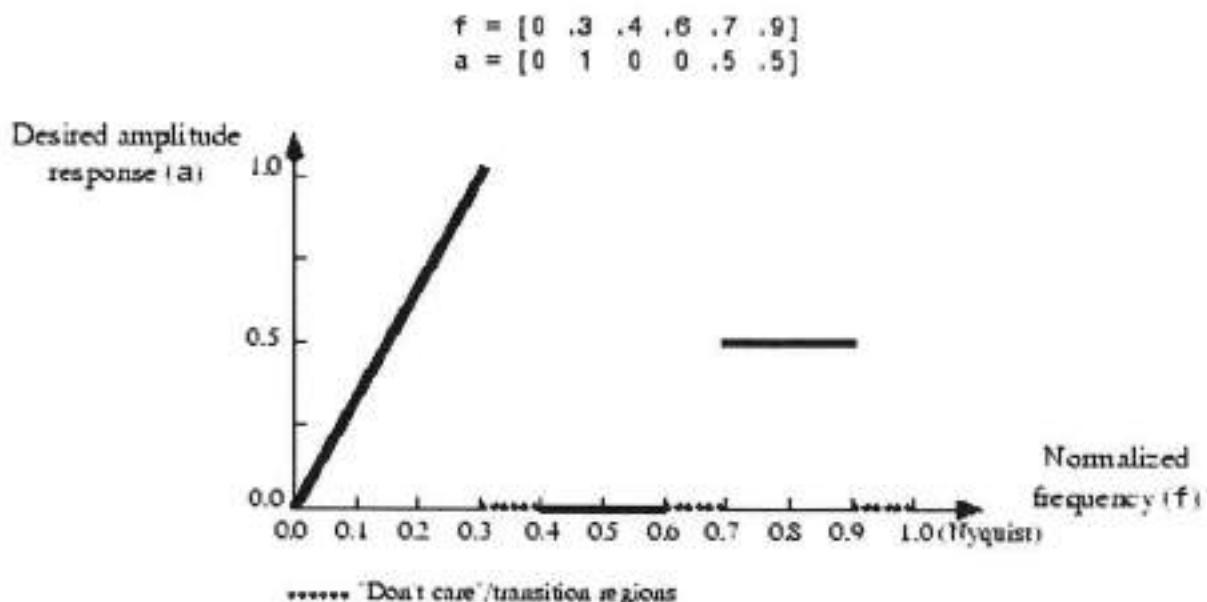


Figura 25 – Relação entre vetores f e a

Assim exposto, foram gerados três tipos de filtros, passa baixa, passa banda e passa alta definidos nos códigos como se seguem.

Projeto do filtro passa baixas:

```

rp = 3;      % ripple da banda de passagem em dB
rs = 40;     % ripple da banda de atenuação em dB
fs = 44100;   % freqüência de amostragem em Hz
f = [1200 1500]; % freqüências de corte em Hz
a = [1 0];    % amplitudes desejadas
dev = [(10^(rp/20)-1)/(10^(rp/20)+1) 10^(-rs/20)]; % cálculo dos desvios
[n,fo,ao,w] = firpmord(f,a,dev,fs);
b = firpm(n,fo,ao,w);

```

Tal filtro apresentou uma ordem de 159 e a resposta em freqüência e fase como demonstradas na figura 26.

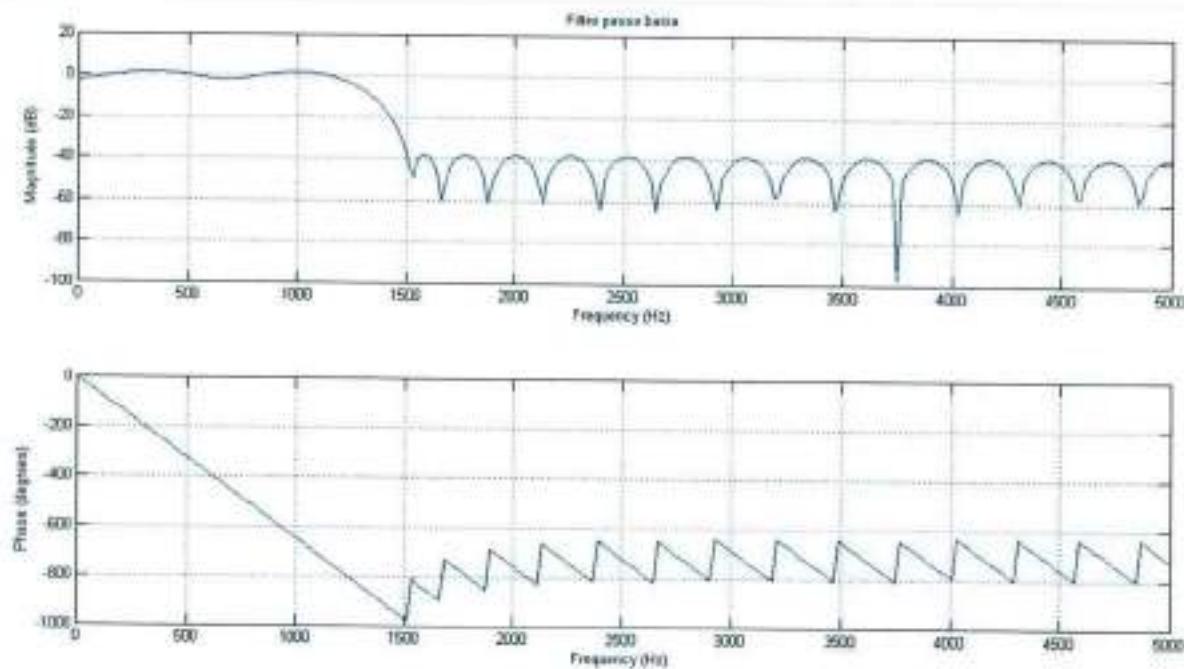


Figura 26 – Resposta em freqüência e fase do filtro passa baixa

Projeto do filtro passa altas:

```

rp = 3;      % ripple da banda de passagem em dB
rs = 40;      % ripple da banda de atenuação em dB
fs = 44100;    % freqüência de amostragem em Hz
f = [10000 10500]; % freqüências de corte em Hz
a = [0 0.5];    % amplitudes desejadas, neste caso há uma atenuação devida a magnitude da
                 % resposta do tweeter.
dev = [10^(-rs/20) (10^(rp/20)-1)/(10^(rp/20)+1)]; % calculo dos desvios
[n,fo,ao,w] = firpmord(f,a,dev,fs);
b = firpm(n,fo,ao,w);
freqz(b,1,1024,fs);
title('Filtro passa alta');

```

Tal filtro apresentou uma ordem de 92 e a seguinte resposta em freqüência e fase:

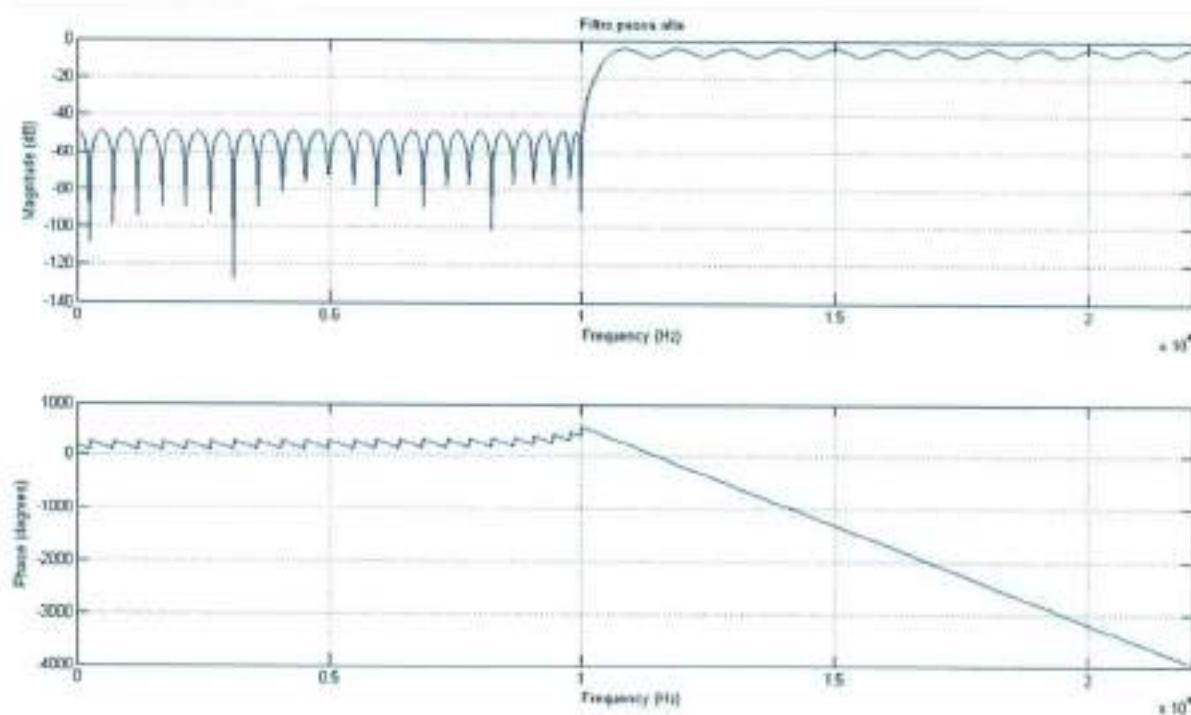


Figura 27 - Resposta em frequência e fase do filtro passa alta

Projeto do filtro passa banda:

$rp = 3$; % ripple da banda de passagem em dB

$rs = 40$; % ripple da banda de atenuação em dB

$fs = 44100$; % freqüência de amostragem em Hz

$f = [1000 \ 1300 \ 10500 \ 11000]$; % freqüências de corte em Hz

$a = [0 \ 1 \ 0]$; % amplitudes desejadas

$dev = [(10^{rp/20}-1)/(10^{rp/20}+1) \ 10^{(-rs/20)} \ (10^{(rp/20)-1})/(10^{(rp/20)+1})]$; % calculo dos desvios.

$[n, fo, ao, w] = firpmord(f, a, dev, fs);$

$b = firpm(n, fo, ao, w);$

Tal filtro apresentou uma ordem de 178 e a seguinte resposta em freqüência e fase:

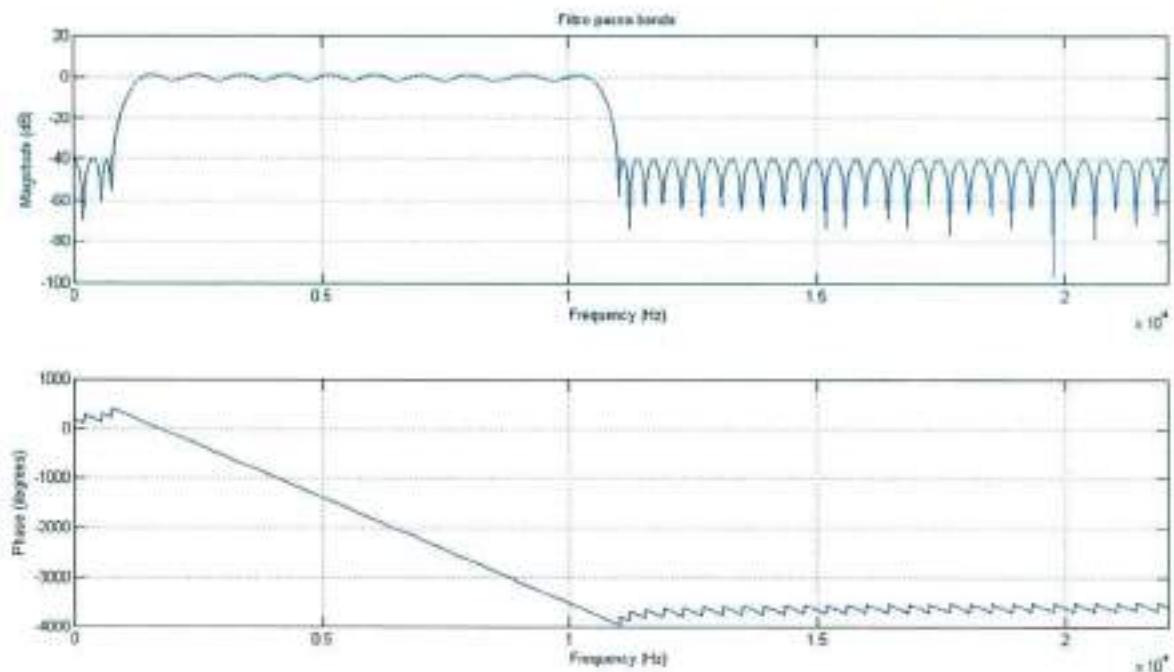


Figura 28 – Resposta em freqüência e fase do filtro passa banda

Projeto do filtro corretor:

Com o levantamento da resposta em freqüência da caixa e o filtro crossover analógico comercial decidiu-se implementar um filtro que corrigisse algumas imperfeições da resposta mostrada na figura 29.

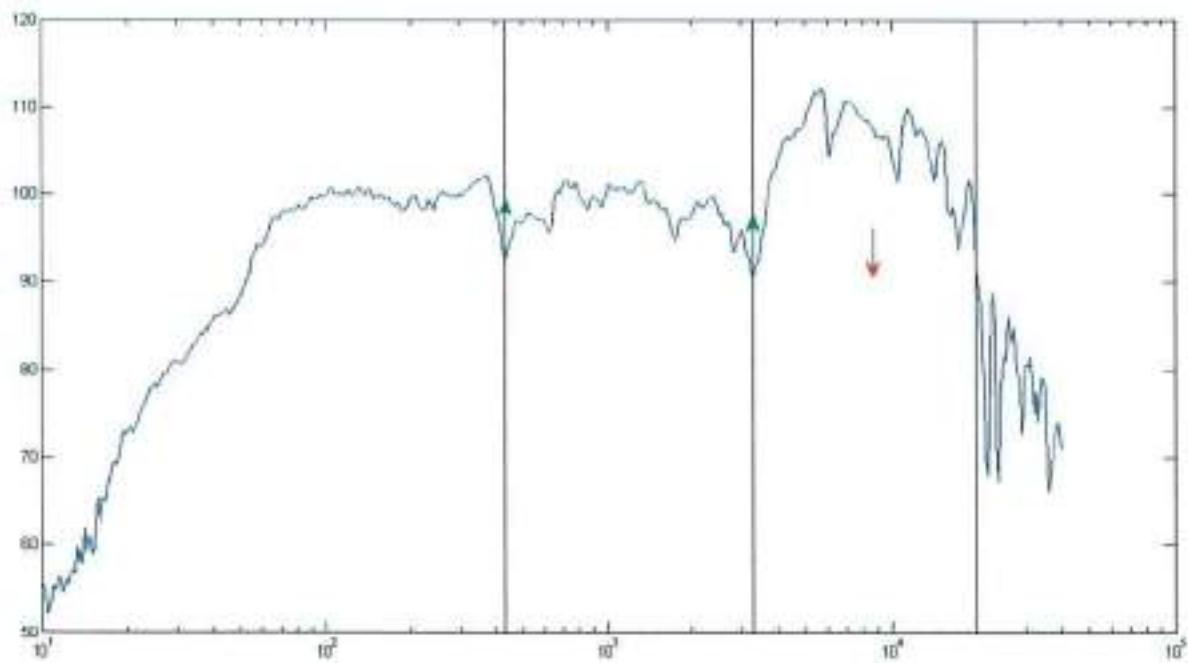


Figura 29 – Resposta em freqüência da caixa com crossover analógico

Pode-se notar que alguns pontos falhos que correspondem aos cortes de freqüência realizados pelo filtro analógico e também uma resposta de magnitude dez dB superior no caso da faixa correspondente ao tweeter, identificados esses pontos segue-se com a metodologia para a criação de um filtro para corrigi-los.

O comando freqsamp é constituído das etapas e parâmetros como exibidos e detalhados a seguir.

A função $hd = \text{janela}(\dots, \text{'design'}, a)$ projeta filtros usando a janela especificada pela seqüência na janela. É fornecida a janela como parâmetro de entrada.

O código utilizado para a construção do filtro equalizador é exibido e detalhado a seguir.

$f = [0 \ 300 \ 450 \ 600 \ 1500 \ 3000 \ 3300 \ 3500 \ 3600 \ 15000 \ 16000 \ 22050];$ % freqüências escolhidas com base nos dados levantados para a caixa com filtro analógico.

$fo=f/22050$ % normalização da freqüência.

$a=[1 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1 \ 0.5 \ 0.5 \ 1 \ 1]$ % vetor de amplitudes desejadas, ou seja, para cada freqüência especificada é atribuída uma amplitude desejada.

$n = 255;$ % para esse filtro é utilizada a maior ordem suportada pelo processamento da placa e determinada via testes práticos como a placa utilizando o programa criado.

$d = \text{fdesign.arbmag}('n,f,a',n,f,a);$ % especificações do objeto

$hd = \text{design}(d, \text{'freqsamp'}, \text{'window'}, \{@\text{kaiser}, .5\});$ % filtro utilizando a janela de Kaiser já explicada anteriormente.

A resposta em freqüência do filtro resultante das funções e parâmetros definidos anteriormente está demonstrada a seguir na figura 30.

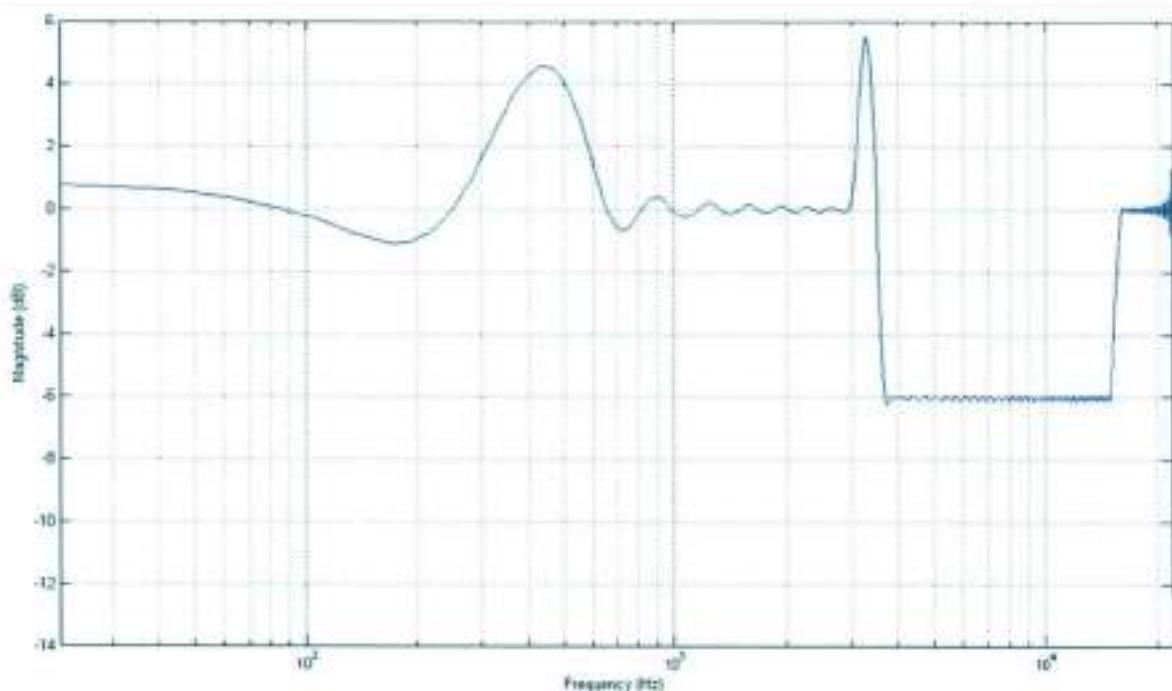


Figura 30 – Resposta em freqüência do filtro corretor

Esse filtro foi projetado para suprir duas quedas de magnitude da resposta observada na medição da figura acima da caixa com o filtro analógico nas freqüências de 450Hz e 3500Hz, e também atenua a resposta do tweeter em 6dB. Como explicado e detalhado a seguir na figura 31.

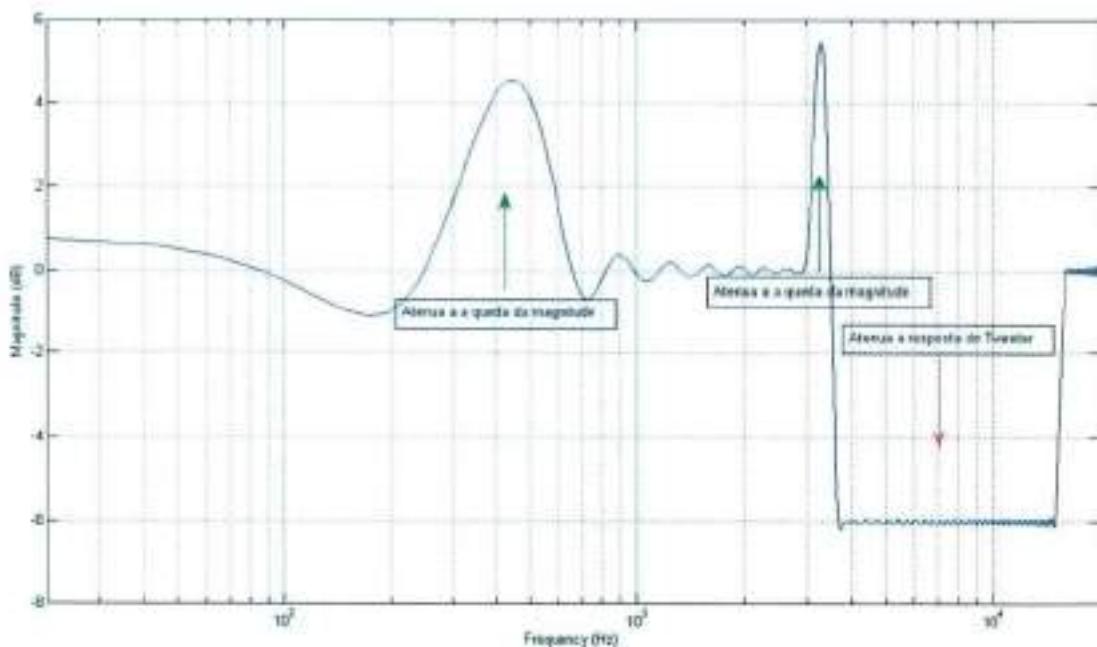


Figura 31 – Detalhamento do filtro corretor

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1

Resultados preliminares

Após a construção da caixa acústica foi possível realizar as medidas dos alto falantes e a partir das mesmas realizar análises para definir as especificações dos filtros digitais.

A seguir a curva de resposta em freqüência do woofer montado na caixa e associado aos dutos de ar anteriormente dimensionados por uma simulação computacional.

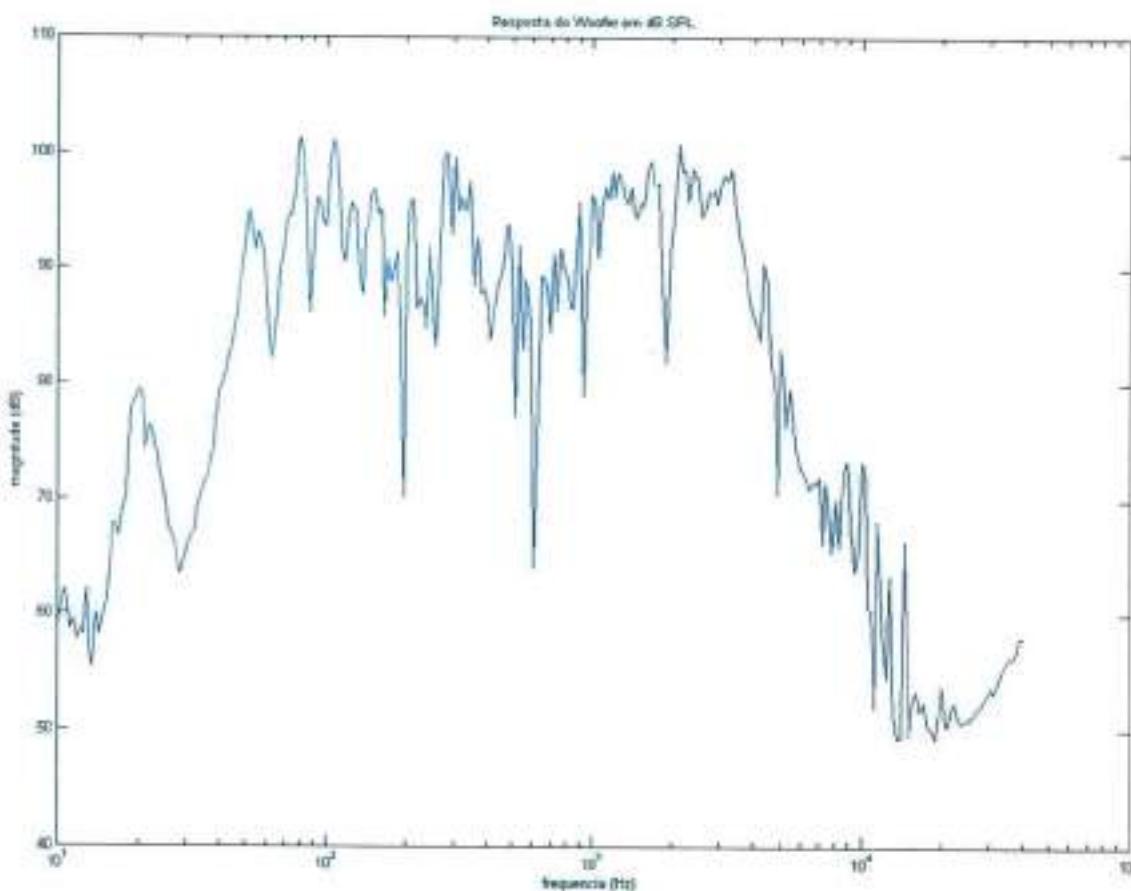


Figura 32 – Resposta do Woofer em dB

Pode-se notar que para freqüências cima de 2,5 kHz existe uma grande queda na resposta do woofer, o que era esperado já que tal alto-falante é feito para ter uma boa resposta em baixas freqüências.

A seguir a curva de resposta em freqüência do mid-range, que como o próprio nome já diz tem boa resposta para uma faixa de freqüências médias, que será determinada após a análise de sua curva.

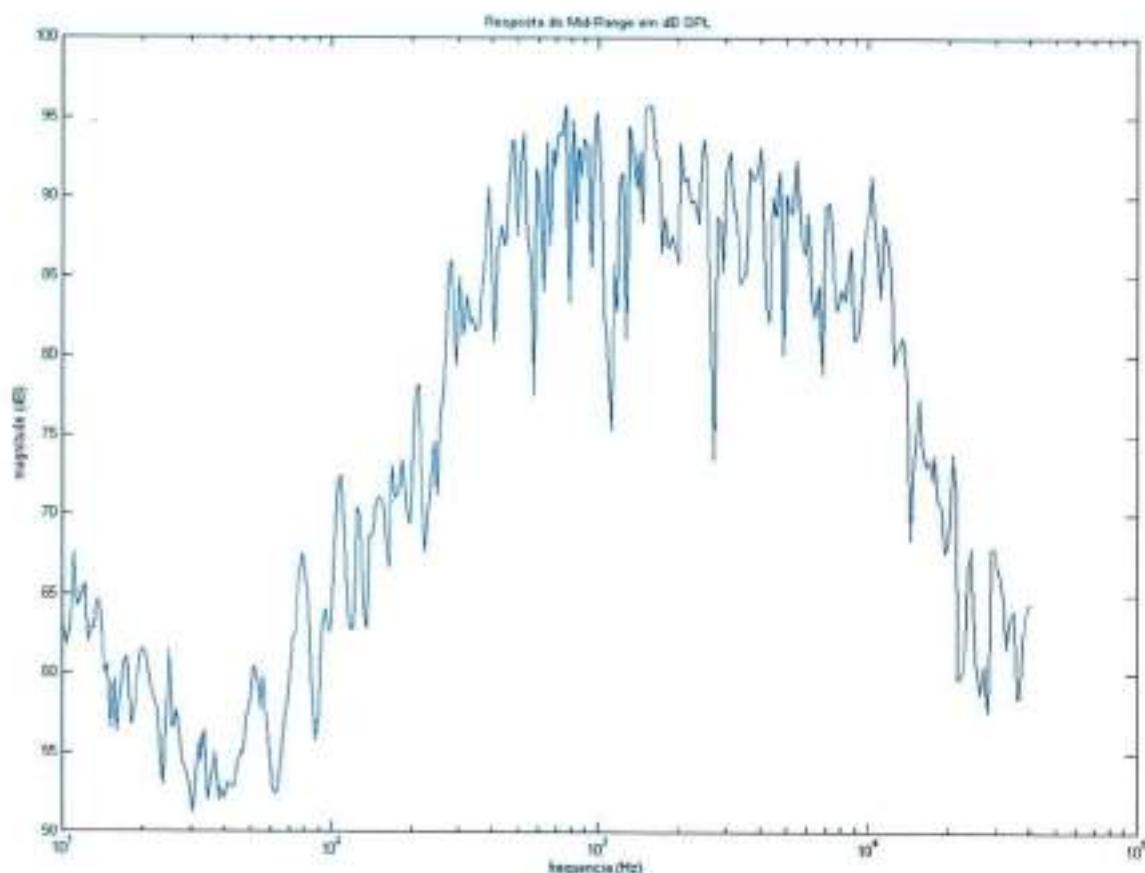


Figura 33 – Resposta do Mid Range em dB

Da curva acima pode-se inferir que a faixa de freqüências de resposta aceitável ao mid-range é de aproximadamente 700 Hz a 10 kHz, pois segundo o gráfico acima o nível de resposta em dB é alto e relativamente constante, ou dentro de uma faixa de valores aceitável.

O próximo alto-falante analisado ainda represente uma dúvida no curso do atual projeto, por isso foram feitos testes em dois diferentes, porém com a mesma finalidade, ou seja, o tweeter. A seguir os gráficos de resposta em freqüência de dois tweeters diferentes, um tweeter comum, o T - 70, de uma linha antiga e profissional e o outro conhecido como super tweeter, o ST - 300, que garante um alto nível de resposta em freqüência, mais elevado do que o comum.

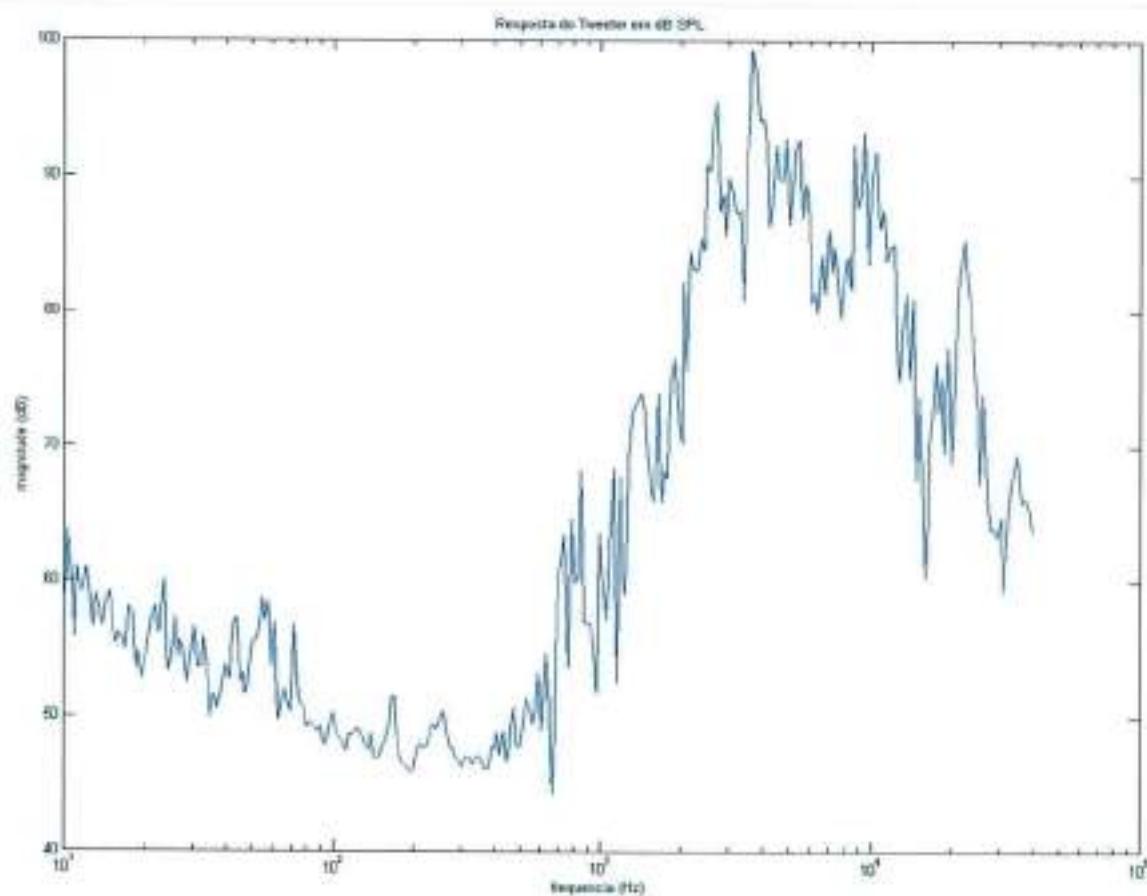


Figura 34 – Resposta do Tweeter em dB

Esta curva configura o tweeter, com sua resposta em alto nível na faixa de 4,5 kHz a aproximadamente 12 kHz, por isso a dúvida quanto à sua utilização no projeto, uma vez que é preza a alta qualidade sonora. Por esta razão, foram feitos testes com outro alto-falante desse tipo.

Pela análise da curva, pode-se perceber que a resposta realmente atinge níveis mais altos de resposta em freqüência, porém em uma faixa de freqüências mais estreita, aproximadamente de cinco kHz a 11 kHz, o que não resolve o problema do alto nível de resposta em freqüência perto dos 20 kHz, portanto provavelmente terão que ser feitas mudanças nessa parte do projeto.

Mesmo não satisfeitos com a resposta em altas freqüências ainda se pode utilizar este equipamento para testes e estudos de configuração do filtro digital, por isso continuamos com os testes e medimos a resposta da caixa completa, o que da uma idéia de como será a resposta da caixa antes de ser corrigida pelo filtro digital, que será mostrada a seguir logo após o gráfico das respostas em freqüência dos três alto-falantes juntos.

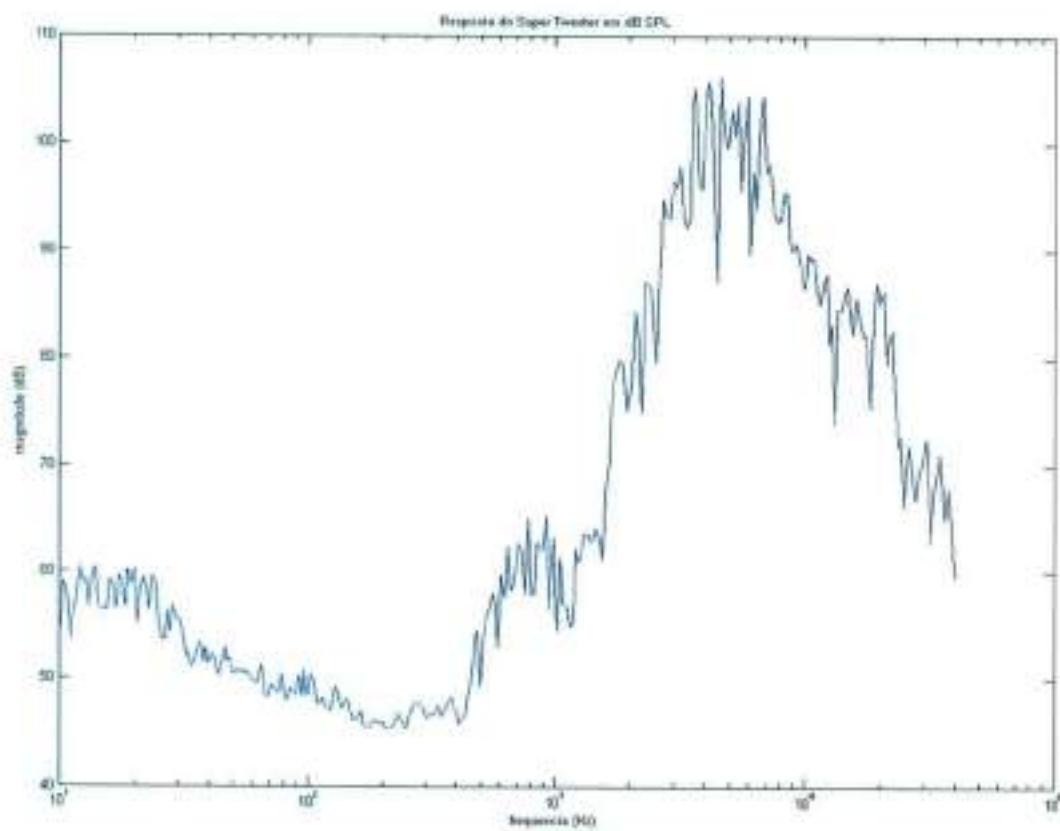


Figura 35 – Resposta do Super Tweeter em dB

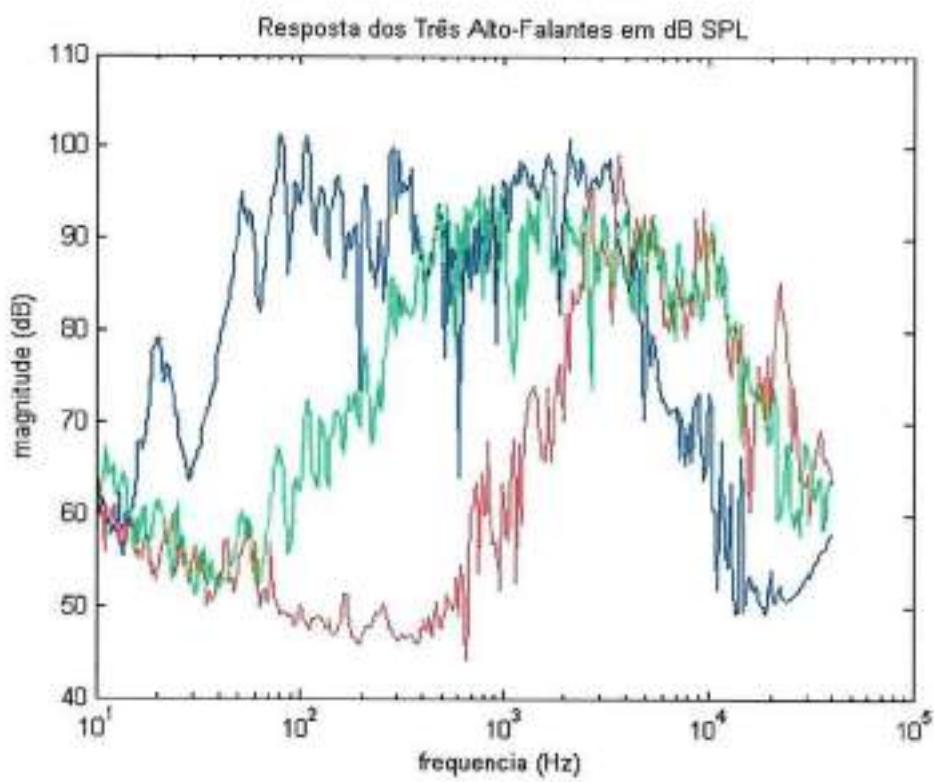


Figura 36 – Resposta dos três Alto Falantes em dB

Em azul a resposta do woofer 12 PW 3, em verde a resposta do mid-range M – 120 e em vermelho a resposta do tweeter T – 70. Como se pode notar o woofer possui uma resposta em freqüência com nível mais alto em baixas freqüências, porém as respostas do mid-range e do tweeter estão relativamente parecidas e as três possuem um nível de resposta parecido.

O gráfico fica confuso pela mistura das três curvas sem determinação de faixas de freqüência de operação, foi realizada uma medição simultânea dos três alto-falantes e resultou em uma resposta mais agradável e mais fácil de ser interpretada, mostrada a seguir.

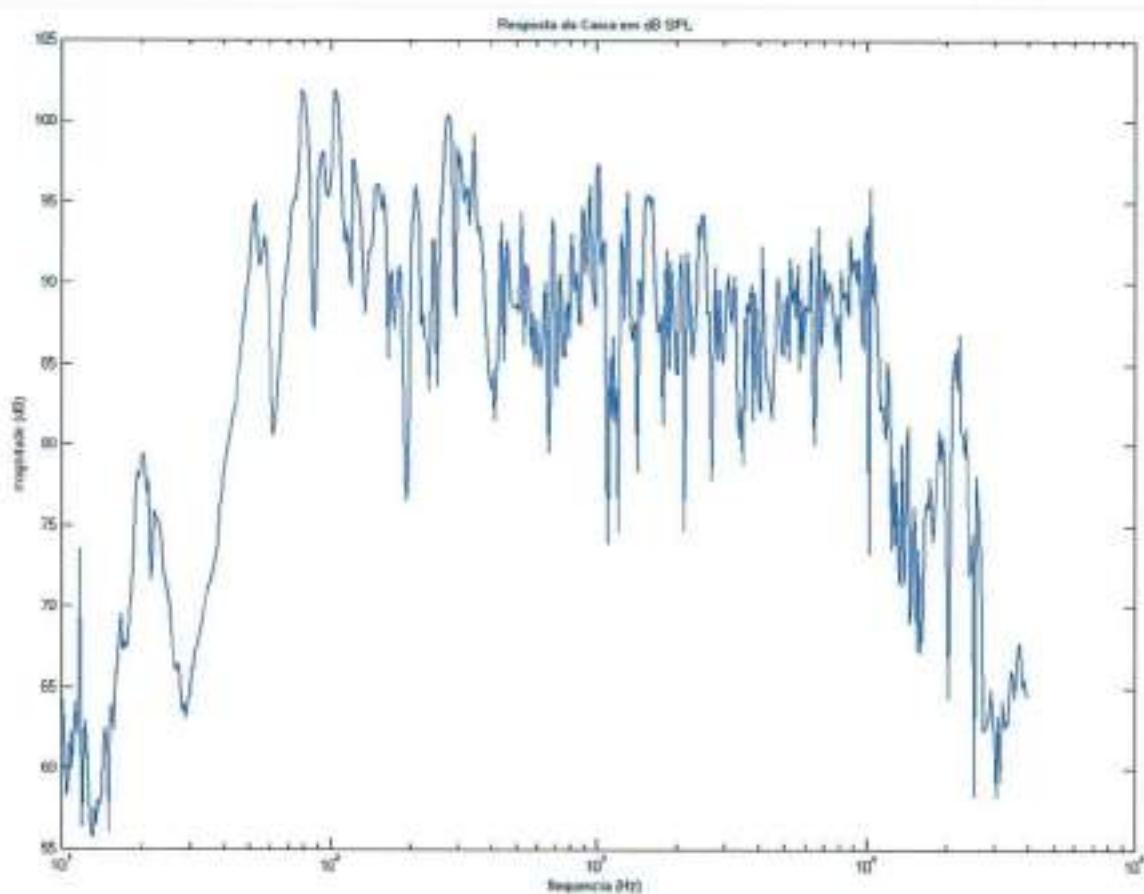


Figura 37 – Resposta da caixa em dB

Pela analise da curva pode-se notar que as junções entre faixas de freqüência de operação dos três alto-falantes ligados ao mesmo tempo são mais suaves e com níveis parecidos, o que facilita a correção da resposta em freqüência pelo filtro digital.

Todas as medições foram realizadas dentro da sala do orientador com um alto nível de ruído o que gera interferências indesejadas nas curvas de resposta em freqüência que serão refeitas em diferentes ambientes a fim de melhorar a obtenção dos dados acústicos da caixa.

3.2

Resultados finais

Depois de terminada a construção das caixas acústicas começou-se a fase de medições de suas respostas em freqüência, primeiro foram medidas as respostas de cada alto falante com uma tentativa de reprodução de maneira mais fiel, ou seja, sem reflexões de sinal ou ecos e sem interferências externas que possam influenciar nas medições e com um sinal de entrada no alto-falante de amplitude 2,83V rms, gerando 1 Watt rms na entrada do alto-falante a 8 Ohms, e com o microfone colocado a 1 metro de distância do centro do cone do alto-falante para que a resposta obtida seja em dB SPL, uma unidade de medida muito comum na área de áudio, como mostrados a seguir na figura 38.

As figuras 38 a 40 referem-se à resposta em freqüência dos alto falantes individualmente medidos, e estão aqui colocadas novamente, pois as medidas foram realizadas num ambiente diferente daquele para os resultados preliminares.

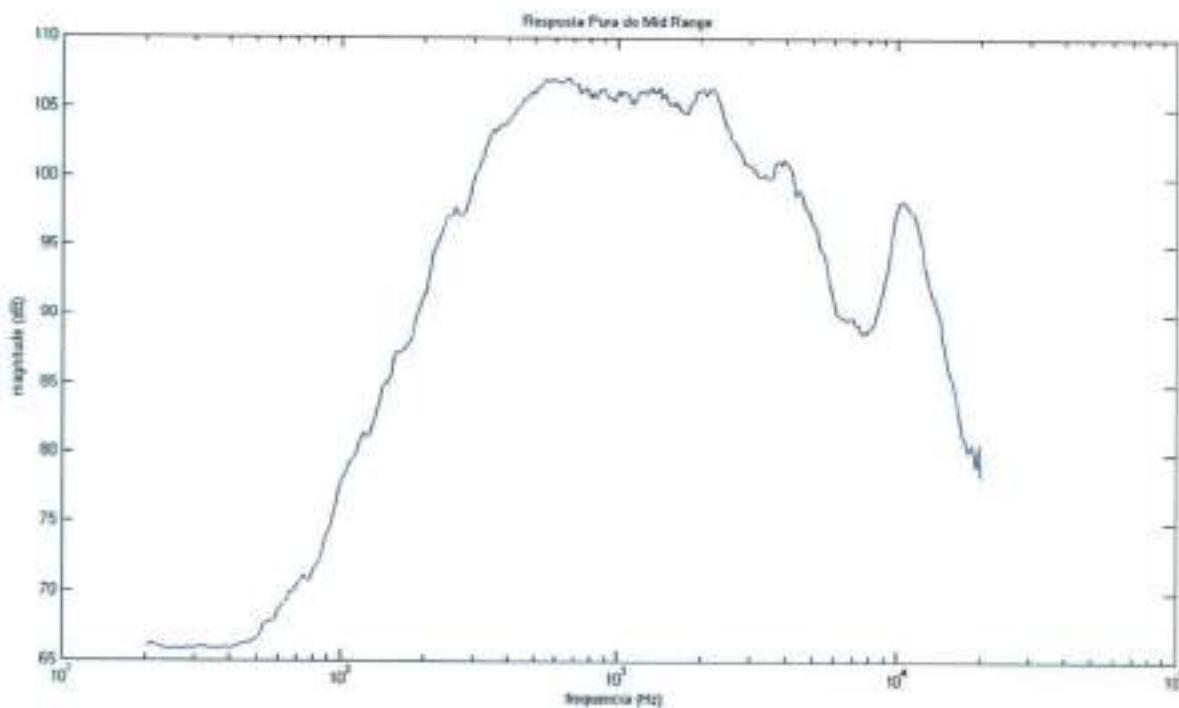


Figura 38 – Resposta em freqüência do Mid Range

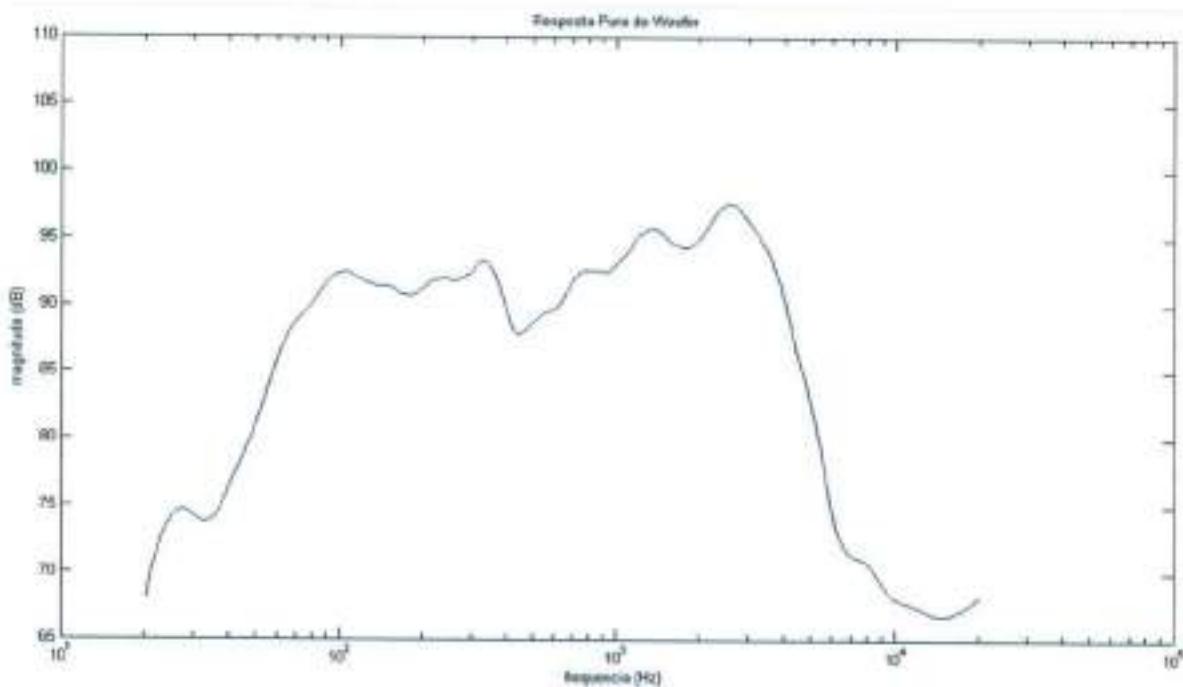


Figura 39 – Resposta em freqüência do Woofer

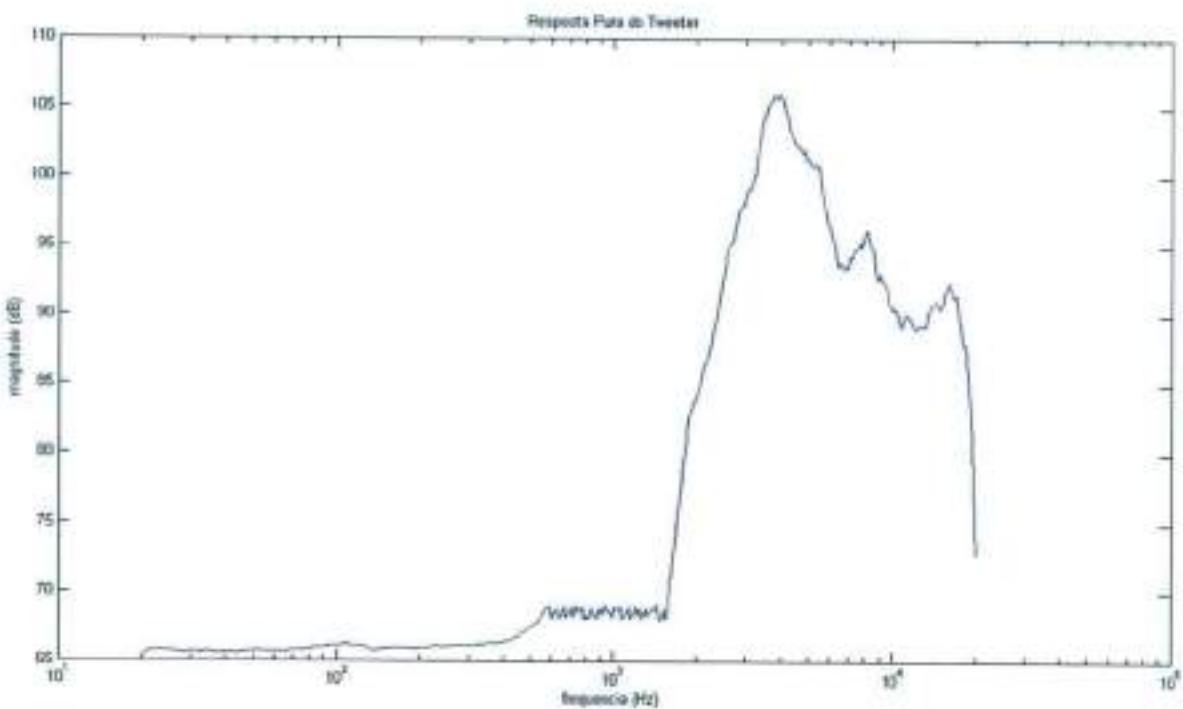


Figura 40 – Resposta em freqüência do Tweeter

Com esses dados em mãos definem-se as faixas de freqüências com a quais cada alto falante trabalhará e geram-se os filtros digitais para tal finalidade impondo os ganhos por faixas de freqüência devido às imperfeições de picos e vales formados nas curvas de resposta

em freqüência dos alto-falantes e freqüências de corte, obtendo-se as respostas mostradas nas figuras 41 a 43.

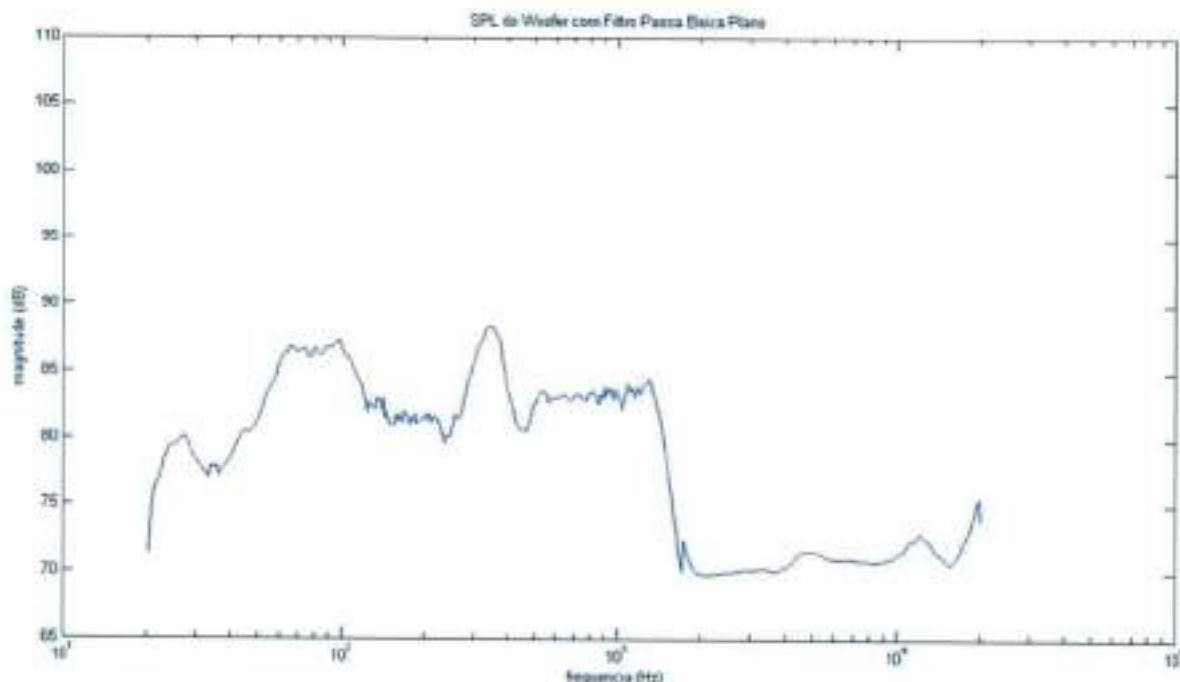


Figura 41 – Resposta em freqüência do woofer com o filtro passa baixa

Pode-se notar que após serem processados pela placa ADSP os níveis de resposta em freqüência dos alto-falantes são mais baixos, por isso foram definidos ganhos diferentes para cada alto-falante em seus respectivos filtros digitais a fim de manter um ganho de saída na resposta em freqüência constante em toda a faixa de freqüência utilizada, não tendo grandes diferenças de nível entre os três alto-falantes e obtendo conexões suaves entre as faixas de operação.

Outro ponto importante a ser discutido é o parâmetro de avaliação da curva de resposta em freqüência. Analisando as curvas obtidas pode-se ter a impressão de que as respostas dos alto-falantes têm desvios muito grandes com relação a um nível médio, porém deve-se levar em grande consideração que a avaliação deve ser feita pelo ouvido humano e não pelos olhos. Os olhos têm uma sensibilidade de avaliação diferente dos ouvidos. Ao olhar para uma curva composta por algumas imperfeições e desvios tem-se a certeza de que a resposta obtida não está perfeita e que tais variações de ganho podem arruinar a resposta final de uma caixa acústica. Em contraponto, o ouvido não possui essa sensibilidade crítica tão aguçada e sensível a variações pequenas de níveis de resposta em dB por faixas de freqüência, alem do fato de que a maioria das pessoas não tem sensibilidade auditiva em toda a faixa de

freqüências de 20 Hz a 20 kHz, portanto variações em freqüências perto dos limiares audíveis dificilmente são percebidas pelo ouvido humano.

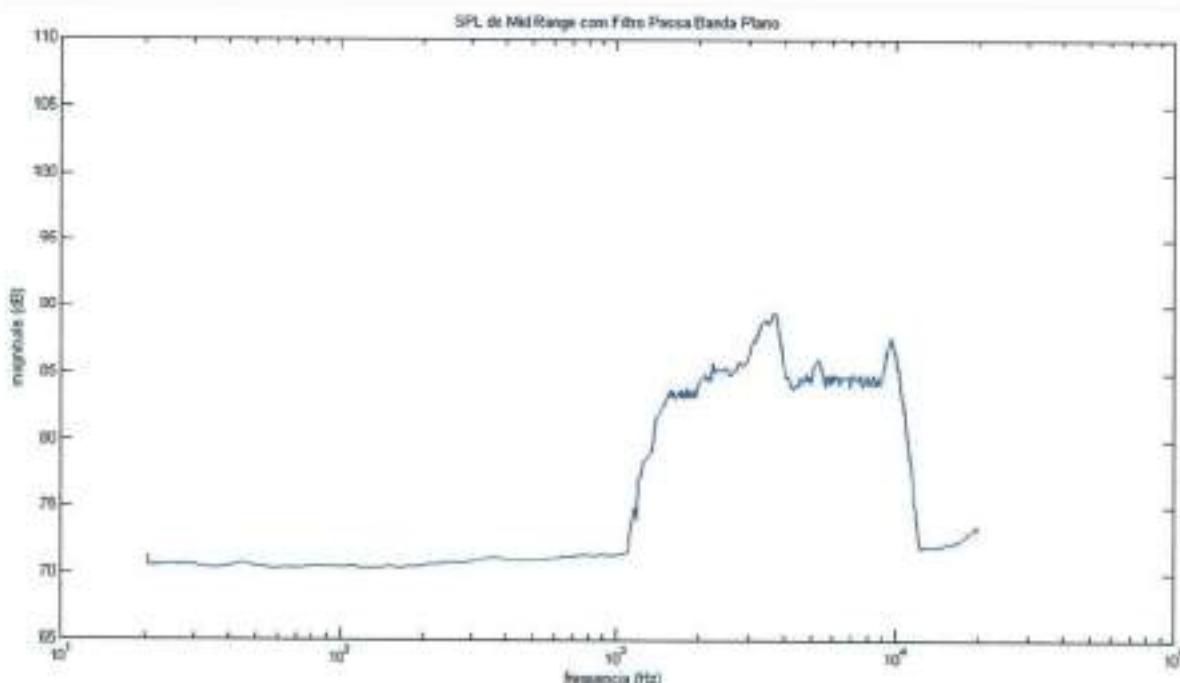


Figura 42 - Resposta em freqüência do mid range com o filtro passa banda

Avaliando a curva de resposta em freqüência fora da faixa de operação do alto-falante nota-se que o nível de resposta fica próximo a 70 dB, o que não é ideal. Tal nível de resposta indesejada é gerado por ruídos do ambiente ou interferências naturais de elementos ao redor da caixa e do microfone de obtenção de resposta dos alto-falantes, porém, ao avaliar a matemática por trás dessa queda de 20 dB entre a faixa de operação e a faixa de descarte deve-se conotar que a diferença real de nível sonoro é, na verdade, de dez vezes em relação ao alto nível, uma vez que o ganho de saída do alto-falante em dB SPL é calculado por $G=20 * \log^*(V_{saída} / V_{entrada})$, portanto não gera uma influência grande na audição da resposta da caixa.

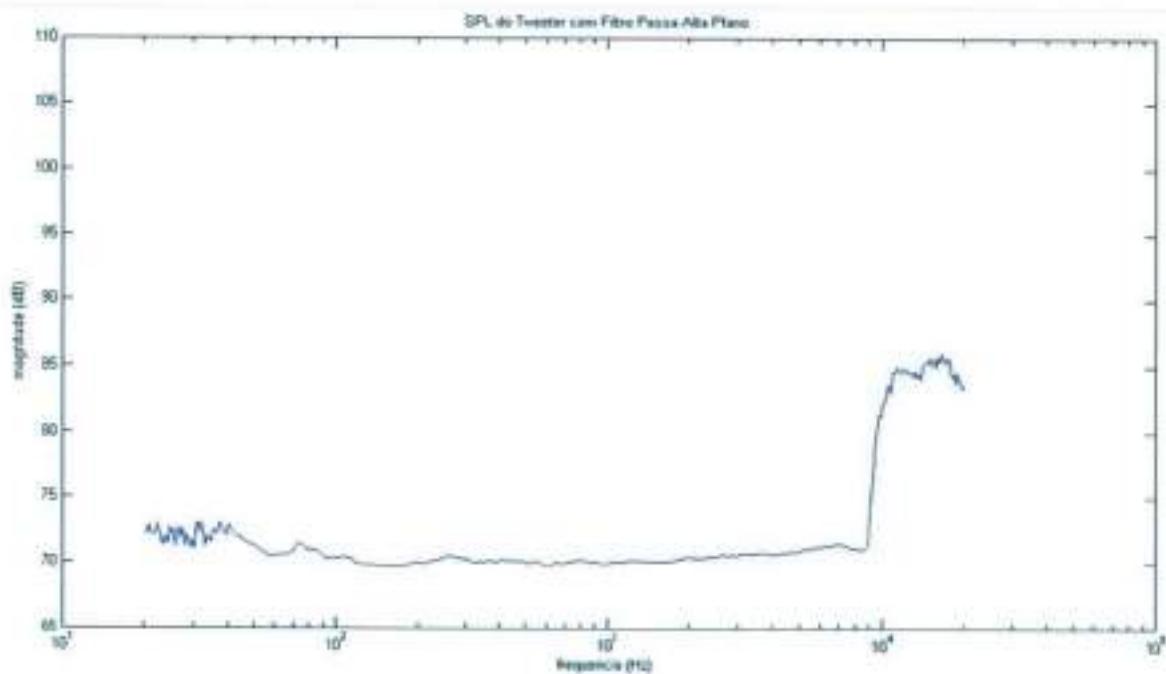


Figura 43 - Resposta em freqüência do tweeter com o filtro passa alta

Obtendo-se a resposta completa como exibida na figura 44.

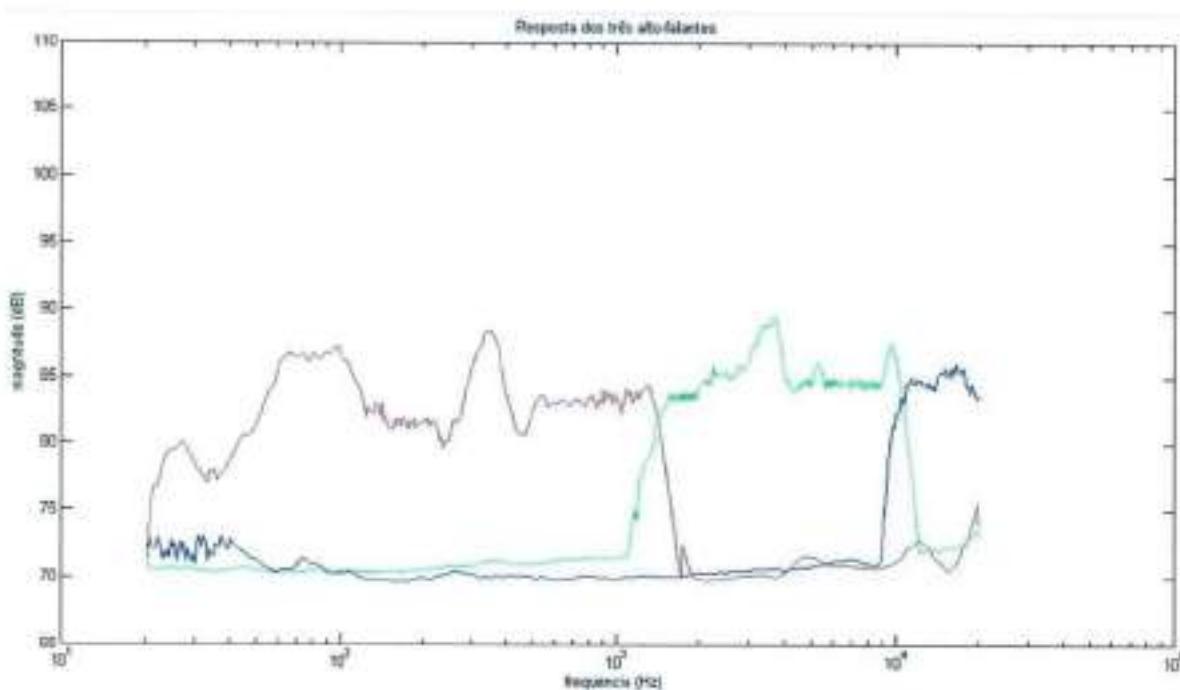


Figura 44 – Resposta em freqüência dos três alto falantes

Depois de obtidos esses resultados inicia-se uma abordagem diferente e realizando as medições das caixas acústicas com um crossover analógico, ou seja, um circuito composto por resistores, capacitores e indutores dispostos de tal forma a dividir um sinal de áudio na entrada em três outros na sua saída de modo que cada um desses sinais gerados corresponda a uma faixa de freqüência na qual cada um dos três alto-falantes utilizados no projeto tenha um melhor rendimento. O gráfico obtido pela curva de resposta em freqüência da caixa completa utilizando este crossover analógico como divisor de freqüências é mostrada a seguir na figura 45.

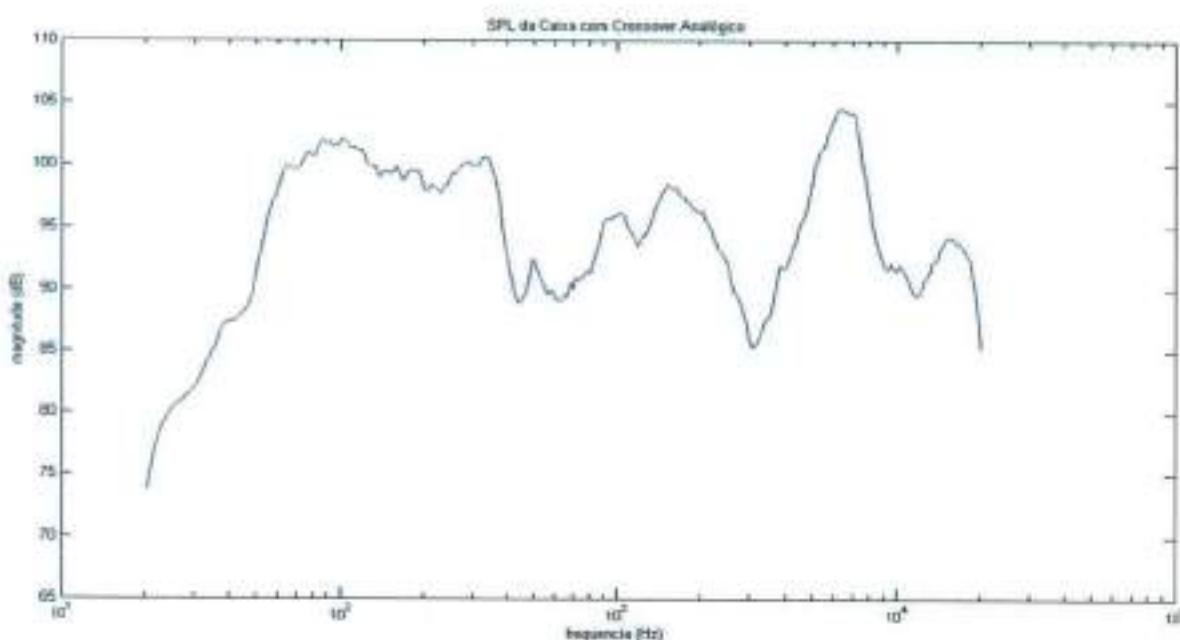


Figura 45 - Resposta em freqüência da caixa com crossover analógicos

Após a utilização do filtro digital corrector de amplitudes, obtém-se a curva mostrada na figura 46.

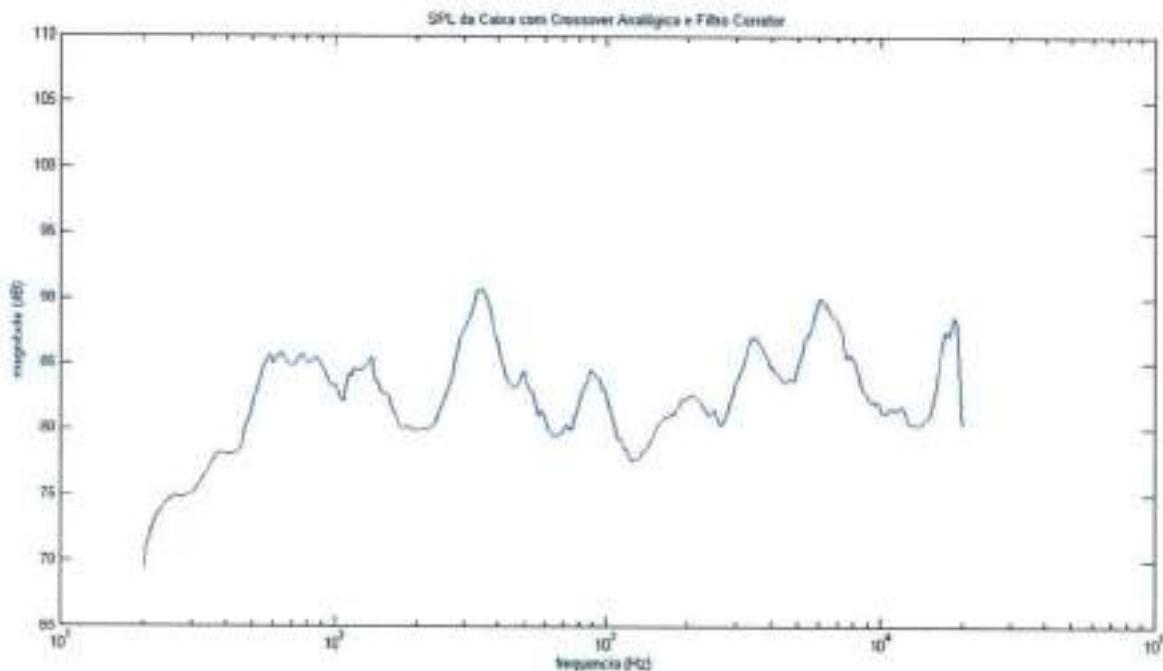


Figura 46 – Resposta em freqüência da caixa com crossover analógico e filtro corretor

Analisando-se os resultados finais da caixa com crossover analógico processado por equalizador digital, percebe-se a diminuição das variações de ganho na curva de resposta em freqüência final da caixa e uma maior média de ganho em toda a faixa de operação da caixa, o que satisfaz as condições impostas pelo projeto que eram obter uma melhora nas curvas de resposta processadas por filtro digital em relação ao filtro analógico e posteriormente obter uma curva com menores desvios da média de ganho geral após processamento do sinal de entrada por equalizador digital implementado na placa ADSP.

4 CONCLUSÕES

Todos os objetivos propostos foram atingidos durante o projeto, ou seja, foram escolhidos os alto-falantes a partir da pesquisa sobre linearidade de resposta em freqüência e alcance inferior de resposta, além da análise detalhada das características eletroacústicas dos mesmos, a caixa acústica foi dimensionada e construída de acordo com as especificações do projeto, a programação da placa ADSP foi estudada permitindo a implementação de filtros correctores e divisores de freqüências digitais, a variação do ganho e freqüência de amostragem do sinal de áudio de entrada na caixa e implementação de um filtro de acordo com a linguagem de programação da placa.

Os resultados da resposta em freqüência do conjunto completo, caixa mais o filtro digital, mostraram-se satisfatório quando comparado a filtragem utilizando o crossover analógico. Para isto foi aplicado diversas técnicas de filtragem, e numerosas medidas foram realizadas no domínio da freqüência determinando os melhores resultados que obtivemos.

Os resultados obtidos indicam a utilidade da filtragem digital em sinais de áudio. Com o aumento da velocidade dos processadores é possível obter um filtro em tempo real, mais versátil e eficiente. Uma das maiores vantagens encontradas em filtros digitais, é sua alta maleabilidade para modificar e melhor o projeto, não dependendo de circuitos analógicos, os quais são mais rígidos.

Como observação final, ficam os aspectos apontados durante a avaliação do projeto da caixa acústica, no qual foram levantados pontos de melhorias no que diz respeito ao seu dimensionamento, ou seja, variações nas especificações que poderiam melhorar a curva de resposta em freqüência da caixa.

4.1

Trabalhos futuros

Com o projeto detalhado nesse documento, pode-se ter uma visão mais ampla de futuros trabalhos que podem ser elaborados, entre eles estão o projeto de caixas acústicas com diversas geometrias distintas, ou seja, caixas construídas em formatos esféricos, cilíndricos, ovais, entre outros. Outro trabalho possivelmente derivativo desta monografia é o estudo de materiais ou elementos que possam melhorar a resposta em freqüência de uma caixa acústica,

por exemplo uma madeira com propriedades que melhorem a vibração da caixa ou alto-falantes fabricados com materiais que melhorem seu desempenho.

Ainda pode-se pensar na implementação de técnicas variadas de filtragem, tanto analógica como digital, tanto externa quanto embarcada, com o intuito de melhorar a resposta em freqüência. Mais um trabalho pode ser o estudo da influência do ambiente sobre o som, mostrando como a arquitetura do local onde é colocada a caixa acústica influencia no som produzido. Também se pode pensar no aperfeiçoamento de métodos para mensurar a resposta em freqüência dos alto-falantes, desenvolvendo técnicas e especificações para realizar medidas de maneira mais precisa.

Todos esses trabalhos são factíveis e podem tomar essa monografia como referência para sua realização, podendo ir muito além dessas sugestões com idéias criativas e inovadoras.

REFERÊNCIAS

- [1] Olson, H. F. *Acoustical engineering*. **Professional Audio Journals**, 1957.
- [2] Leach, Jr., W. M. On the specification of moving-coil drivers for low-frequency horn-loaded loudspeakers, **Journal Audio Engineering Society**, 1979.
- [3] Terman, F.E. *Radio engineering handbook*, McGraw-Hill, 1937
- [4] Small, R. H. Closed-box loudspeaker systems (Part I: Analysis). In: **Journal Audio Engineering Society**, 1972.
- [5] Small, R. H. Closed-box loudspeaker systems (Part II: Synthesis). In: **Journal Audio Engineering Society**, 1974.
- [6] Small, R. H. Direct-radiator loudspeaker system analysis. In: **Journal Audio Engineering Society**, 1972.
- [7] Beranek, L. L. *Acoustics*. New York, McGraw-Hill, 1954.
- [8] IES Recommendation, Methods of measurement for loudspeakers. In: **IEC Publ. 200**, Geneva, 1966.
- [9] Silva, H. S. Dimensionamento de dutos para caixas acústicas", **Artigo Revisado**, 2003.
- [10] Silva, H. S. Refletor de graves: ajuste fino do duto. In: **Antenna-eletrônica popular**, v. 102, n. 2 de Set-Out/91.
- [11] Silva, H. S. Caixa acústica - ajuste fino do refletor de graves. In: **Musica & tecnologia**, n. 47 de Set/Out 1994.
- [12] Silva, H. S. Análise e síntese de alto-falantes e caixas acústicas pelo método de thiele-small. H. Sheldon Serviços de Marketing, Julho de 1996.
- [13] Dickason, V. *Loudspeaker design cookbook*. **Audio Amateur Press**, Janeiro de 2006.
- [14] Jordan, E. J. *Loudspeakers*. Focal Press LTD, 1963.
- [15] Small, R. H. Vented-box loudspeaker systems. In: **JAES**, Junho a Outubro de 1973.
- [16] Thiele, A. N. Loudspeakers in vented-boxes. In: **JAES**, Maio a Junho de 1971.
- [17] Hoge, W. J. J. A new set of vented loudspeaker analigmnts. In: **JAES**, v. 25, 1977.
- [18] Engebretson, M. E. Low frequency sound reproduction. In: **JAES**, Maio de 1984.
- [19] Frankort, F. J. M. Vibration patterns and radiation behavior of loudspeaker cones. In: **JAES**, Setembro de 1978.
- [20] Kates, J. M. Loudspeaker cabinet reflection effects. In: **JAES**, Maio de 1979.
- [21] Oppenheim, A. V. *Discrete-time signal processing*. New Jersey. Prendice Hall, 2. ed., 1999.
- [22] Proakis, J. G. *Digital Signal Processing*, 3. ed., 1996.

- [23] Olson, H. F. Direct Radiator Loudspeaker Enclosures. In: **JAES**, 1951.
- [24] Analog Devices, Inc. Reference manual. Adsp-2106x sharc ez-kit lite. Norwood, MA, 1997.
- [25] Silva M. A.,Filtros digitais aplicados em sinais de áudio.Juiz de Fora.UFJF, 2001.

APÊNDICE 1

Estudo da placa ADSP 21061

Para o desenvolvimento do filtro digital utilizaremos a placa produzida pela SHARC™ ADSP-21061 ilustrada abaixo:

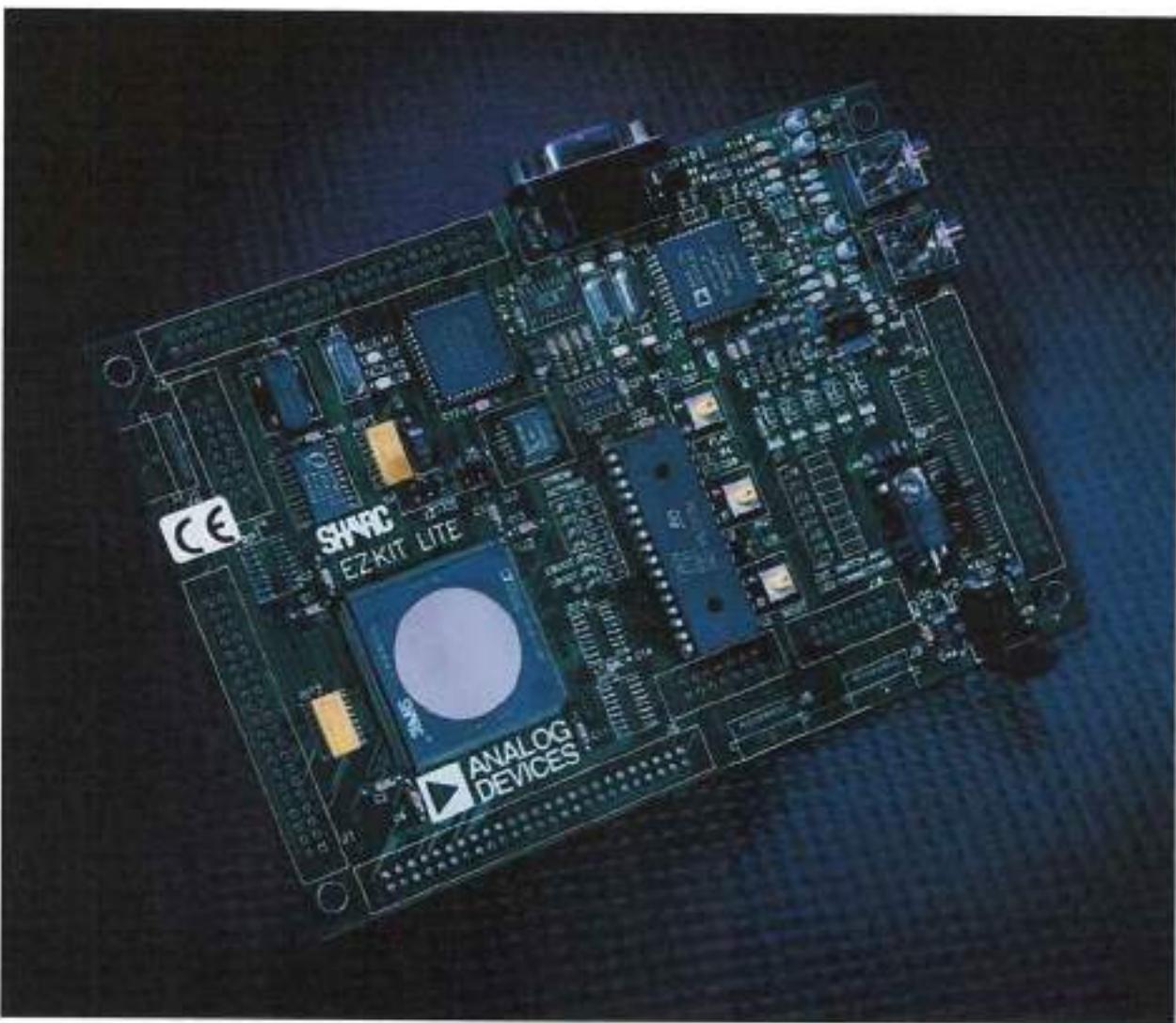


Figura 47 – Placa ADSP-21061 SHARC

Esta placa da Analog Devices se baseia no processador ADSP-21061 SHARC. A placa possui recursos que permitem explorar o potencial deste processador: tem acesso à

maioria dos pinos de sinal do SHARC, um CODEC estéreo analógico-digital/digital-analógico com condicionamento de sinal analógico para áudio estéreo, um link assíncrono para comunicações com o processador e um pequeno monitor ROM-based que fornece acesso não-invasivo para o processador de dados e as partições de memória de instruções.

Com o programa gestor, programas DSP que são desenvolvidos em um computador qualquer podem ser carregados na memória do DSP, executados, e a memória de dados podem ser sondados para os resultados dos cálculos, enquanto o programa DSP está em operação. Esta característica é indispensável para a depuração rápida de programas. A placa contém o seu próprio regulador de tensão e é alimentado por uma fonte de 12 volts.

Uma extensa documentação é fornecida com o kit em um CD-ROM. Os documentos discutem todos os aspectos do processador, da placa onde está disposto e do compilador C. Este é um compilador que vem com uma biblioteca de funções importantes para o DSP, que incluem funções da biblioteca C padrão e módulos completos DSP, como filtros FIR e FFTs. O software que é fornecido com a placa inclui também um conjunto de programas de exemplo operacional (filtros de áudio band-pass, FFT, etc.) e uma interface Windows que permite o usuário fazer o download dos programas, upload de dados locais conhecidos e verificação de resultados FFT por uma janela gráfica.

O kit EZ-Lite oferece todo o conhecimento necessário sobre o DSP SHARC, incluindo hardware, software e manuais de referência. A figura 48 a seguir mostra um diagrama de blocos do hardware fornecido no EZ-KIT Lite, com base em todo o ADSP-21061 Digital Signal Processor.

Trata-se uma placa de circuito 4 x 6 polegadas impresso, montado em isoladores de plástico para permitir que ele se apóie em uma mesa. Existem apenas quatro conexões: alimentação DC, uma conexão serial para o computador, e os sinais de entrada e saída.

Uma fonte de alimentação DC e cabo serial são fornecidos no kit. Os sinais de entrada e saída de áudio têm amplitude por volta de 1 volt. Alternativamente, um jumper na placa permite que um microfone possa ser diretamente ligado à entrada. A ideia é ligar um microfone na entrada, e anexar um conjunto de colunas amplificadas para a saída. Isto permite ouvir o efeito de vários algoritmos de DSP.

Três botões de pressão na placa permitem que o usuário gere uma interrupção, reinicie o processador e alterne um flag que pode ser lido pelo sistema. Quatro LEDs montados na placa podem ser ligados e desligados, alternando bits.

Quando a energia é aplicada, o processador inicia a operação a partir dos dados contidos em uma memória EPROM, e carrega um programa que estabelece a comunicação

serial com o computador. Em seguida, inicia-se o programa EZ-Lite Host no PC, permitindo o carregamento de programas e dados no compilador DSP.

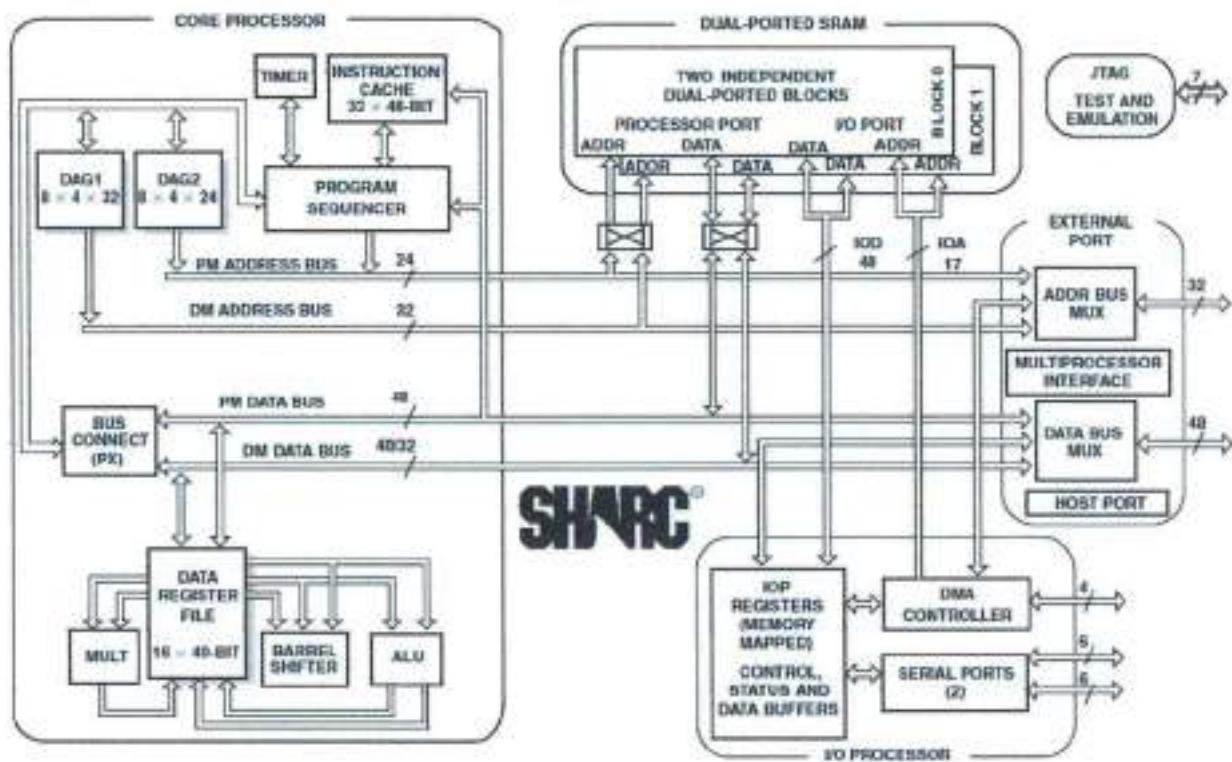


Figura 48 – Diagrama de blocos da placa

Vários programas vêm pré-gravados com o EZ-KIT Lite, que podem ser executados de acordo com a necessidade do usuário. Por exemplo, um programa gerador de filtro passa banda a partir de coeficientes calculados no MatLab permite que se fale no microfone e ouça o resultado depois de passar por esse filtro passa-banda. Estes programas são úteis por duas razões, primeiro permitem a obtenção rápida da resposta do programa executado e suas alterações no sinal de entrada para análise instantânea e segundo fornecem um modelo para o desenvolvimento de programas de preferência do usuário. A partir daí pode-se dar continuidade ao projeto e implementação do filtro digital para a caixa acústica, tendo explicado detalhes da placa utilizada como principal ferramenta para o sucesso do projeto, pode-se dizer que o projeto do filtro digital utilizando tal placa é viável no prazo estipulado [24].

APÊNDICE 2

Cronograma

Segue o cronograma atualizado do projeto:

Nº	Tarefa	Inicio	Fim	Linha de tempo
1	Obter a placa ADSP, manual, cabos e fonte	5/3/2010	12/3/2010	
2	Obter bibliografia sobre programação específica da placa	13/03/2010	5/4/2010	
3	Testar alto-falantes e decidir se será trocada a cometa por mid-range e, em caso positivo, decidir qual será comprado	6/4/2010	20/04/2010	
4	Comprar e medir os alto-falantes e calcular (obter) seus parâmetros eletroacústicos, além de utilizá-los para calcular os parâmetros da caixa, se necessário da subcaixa e dutos	21/04/2010	30/04/2010	
5	Construir a caixa	1/8/2010	20/08/2010	
6	Estudar a placa ADSP, ou seja, seus compiladores	6/4/2010	20/08/2010	
7	Entender a linguagem de programação utilizada	6/4/2010	20/08/2010	
8	Discussão e palestras sobre o estudado, deixando o time no mesmo nível de entendimento	21/08/2010	30/08/2010	
9	Iniciar teste e medição da caixa acústica e interpretar os resultados discutindo o tipo de filtro a ser utilizado	1/9/2010	1/10/2010	
10	Estudar a teoria de filtros digitais e fazer toda a documentação	1/9/2010	5/10/2010	
11	Ajustes técnicos, estudos em grupo e afinações da caixa	6/10/2010	15/10/2010	
12	Novas medições e definição dos parâmetros do filtro digital	16/10/2010	23/11/2010	
13	Medições finais afim de obter resultados para comparar nossa caixa acústica utilizando o filtro digital e um crossover analógico	23/11/2010	30/11/2010	
14	Documentação de todo material e resultados adquirido durante o projeto	1/11/2010	10/11/2010	
15	Escrita e revisão da monografia do projeto final para revisão do orientador e posterior avaliação da banca	11/11/2010	8/12/2010	
	Tarefa concluída			

Tarefas

- 1: A placa foi obtida através dos professores Phillip e Luiz Coelho por intermédio do professor Flavio Cipparrone. Juntamente com a placa obtivemos um CD com o manual de operação, que ajudou muito na compreensão do funcionamento e da programação da placa.
- 2: Além do manual da placa, obteve-se artigos e bibliografia em livros de programação específica, coleta feita por André e Paulo.
- 3: Após testes de medição de resposta em freqüência e testes auditivos do conjunto driver e corneta ficou decidido que tal conjunto não seria usado e seria trocado por um outro tipo de alto falante chamado mid-range. Não foi necessária a compra destes alto-falantes, pois o orientador já os possuía. Os testes foram realizados pelo professor Flávio e por Flavio.
- 4: Foi necessária a compra de woofers para a utilização na caixa, tarefa realizada por André e Flavio e os testes de obtenção de parâmetros e resposta em freqüência foram muito satisfatórios e realizados por Flavio e pelo professor Flávio.
- 5: A construção da caixa foi um processo gratificante e produtivo realizado por Paulo, André e Flavio. O resultado foi bastante satisfatório e o aprendizado adquirido com a construção e montagem da caixa são de grande valia.
- 6: A placa foi estudada e discernida para o melhor entendimento de seus compiladores e linguagens de programação a fim de facilitar o desenvolvimento do filtro digital na tal placa. Tarefa realizada por André e Paulo.
- 7: Os estudos da linguagem de programação foram realizados por André e Paulo.
- 8: Foram realizadas palestras e demonstrações sobre todo o material estudado e já conhecido pelos integrantes do time deixando assim todos no mesmo nível de entendimento do necessário ao desenvolvimento do projeto.

9: Os testes e medições das respostas em freqüência dos alto falantes montados na caixa foram realizados pelo professor Flávio e por Flávio. As discussões sobre o tipo de filtro foram realizadas por André, Paulo e Flávio, porém ainda estão em fase de testes.

10: A teoria de filtros foi estudada e discutida pelo time encontrando bastante teoria na área inclusive de disciplinas ministradas na USP.

11: As afinações da caixa foram executadas, se necessário, pelo grupo e pelo professor Flávio, a fim de corrigir possíveis variações de projeto. Estudos de possíveis melhorias no projeto para melhorar a curva de resposta em freqüência também serão executadas pelo time.

12: Depois de realizadas todas as correções possíveis o time realizou novamente todas as medidas obtendo os parâmetros do filtro digital a ser implementado, com a ajuda do professor Flávio.

13: Comparação das medidas realizadas com a caixa associada ao filtro digital e associada ao filtro divisor de freqüências comercial e analógico realizado pelo time assessorado pelo professor Flávio.

APÊNDICE 3

Orçamento estimado

A princípio os custos de projeto são baixos, uma vez que o Prof. Flávio já possui a maior parte do material utilizado no projeto, tais como amplificador, alguns alto-falantes e um programa computacional de medição de curvas de resposta em freqüência, que apesar de relativamente antigos, poderão ser utilizados na confecção do projeto, porém uma estimativa de custos pode ser listada a seguir em Reais:

Woofer: 350,00 o par

Mid Range: 200,00 o par

Tweeter: 180,00 o par

Material (madeira, parafusos, cola, etc.): 400,00

Amplificador: 1300,00

Cabos: 140,00

Total: 2570,00 por par de caixa

APÊNDICE 4

Gestão de riscos

Um projeto bem formulado de uma caixa acústica e de um filtro digital depende muito do empenho e da pesquisa feita pelo time que o está desenvolvendo. Como entusiastas do assunto, o grupo teve um grande desafio em satisfazer e exceder as expectativas impostas, atendendo às exigências do professor Ciparrone com um resultado além do esperado, juntamente com grandes possibilidades de uma boa colocação do produto da pesquisa no mercado como referência de qualidade e promessa de futuros projetos melhorados e mais inovadores.

Durante o andamento do projeto algumas barreiras foram encontradas, como a troca do modelo do tweeter na metade do prazo de entrega do projeto por não haver a possibilidade de conseguir um par para a outra caixa, dessa maneira foi utilizado um par de super tweeters de posse do professor Ciparrone. Tal troca acarretou em novas medições e ajuste de ganhos para que ele fosse compatível com o conjunto da caixa.

Outra barreira encontrada pelo grupo foram as dificuldades na realização de medições e testes com a placa, o primeiro caso se deve ao fato de que o aparato para a medição estava em poder do professor Ciparrone e as medições foram feitas na própria escola, portanto acarretou em um problema logístico para que fosse ajustado de acordo com os horários do grupo, além do transporte de caixas, computadores e amplificadores. No caso dos testes com a placa o problema se deu pela falta de um computador com porta serial, que era o caso de somente um integrante do grupo, mas a barreira foi contornada com reuniões semanais nos fins de semana.