

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

FERNANDO ESTEVAM GAZZONI

MEDIDOR DE PRESSÃO E DOSE SONORA

Curitiba,
Fevereiro - 2009

FERNANDO ESTEVAM GAZZONI

MEDIDOR DE PRESSÃO E DOSE SONORA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia Biomédica..

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia

Co-Orientador: Prof. Dr. Humberto R. Gamba

Curitiba

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

G291m Gazzoni, Fernando Estevam
Medidor de pressão e dose sonora / Fernando Estevam Gazzoni. —
2009.
96 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Joaquim Miguel Maia

Co-orientador: Humberto R. Gamba

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.
Área de concentração: Engenharia Biomédica, Curitiba, 2010.

Bibliografia: f. 93-6

1. Analisadores de som. 2. Ruído – Medição. 3. Poluição sonora. 4. Som – Medição – Equipamento e acessórios. 5. Fourier, Transformações de. 6. Instrumentos de medição. 7. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Maia, Joaquim Miguel, orient. II. Gamba, Humberto R., co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 610.28



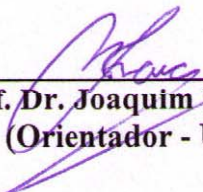
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG^a ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

“Medidor de Pressão e Dose Sonora”


Por

Fernando Estevam Gazzoni

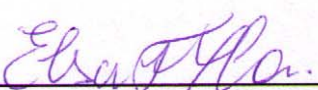
Esta Dissertação foi apresentada no dia 26 de fevereiro de 2009, como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia Biomédica. Aprovada pela Banca Examinadora composta pelos professores:



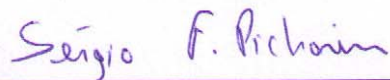
Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia
(Orientador - UTFPR)



Prof. Dr. Humberto Remígio Gamba
(Co-orientador - UTFPR)

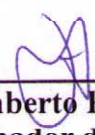


Prof. Dr. Elisângela Ferretti Manffra
(PUCPR)



Prof. Dr. Sergio Francisco Pichorim
(UTFPR)

Visto e aprovado para impressão:



Prof. Dr. Humberto Remígio Gamba
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos orientadores Humberto R. Gamba e Joaquim M. Maia pela orientação e paciência durante o desenvolvimento do trabalho.

À Lucia, Ronaldo, CAPES e CNPq pelo patrocínio e apoio ao projeto.

Aos amigos de laboratório pela ajuda no desenvolvimento e por deixar que eu usasse equipamentos sonoros durante o ambiente de trabalho.

Aos familiares e à Talita por me apoiar nos momentos de dificuldade e principalmente a Deus por ter me ajudado em tudo.

“Aplica teu coração ao ensino e
teus ouvidos às palavras que trazem conhecimento”

Provérbios 22,12

RESUMO

GAZZONI, Fernando. Medidor de pressão e dose sonora. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Federal Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

O estudo dos sons e a influência que ele exerce nos seres humanos foi intensificado nas últimas décadas devido ao grande número de veículos e indústrias nos centros das grandes cidades. O equipamento usado para caracterizar o som e verificar se ele está dentro dos padrões técnicos é o medidor de intensidade sonora ou sonômetro. As normas permitem que sejam comercializados desde equipamentos que medem apenas o nível de pressão sonora até equipamentos que além do nível de pressão sonora mostram seu espectro em frequência e pressão média a que um operador foi exposto durante a jornada de trabalho. No Brasil, a maioria dos sonômetros comercializados que não medem apenas a pressão sonora normalmente são importados. O presente trabalho visa criar um protótipo de sonômetro capaz de medir a pressão sonora, caracterizar o sinal medido na frequência e calcular a dose a que um indivíduo é exposto. Foi desenvolvido um sonômetro do tipo 2 com curvas de resposta lenta, rápida e impulsiva, com análise espectral em frequência usando filtros de banda de oitava e com curvas de ponderação A e C. Os testes do software desenvolvido e da resposta do circuito montado foram realizados usando a curva de ponderação C, que é quase linear e por isso melhor para verificar a resposta em frequência do circuito eletrônico projetado. A captura das medidas com curvas de ponderação A. Nos testes de dose de ruído foi usada a curva de ponderação A. Para testes usando ondas periódicas os resultados obtidos com o sonômetro usando as curvas de resposta lenta, rápida e impulsiva apresentaram resultados iguais, conforme esperado pela norma IEC 651. O *firmware* apresentou boa resolução em frequência nos testes e respondeu de forma eficiente à variação de amplitude e frequência do sinal sonoro de entrada. Os testes de bancada foram realizados comparando o resultado do protótipo com um sonômetro comercial e a medida de alguns sinais sonoros apresentou diferença elevada entre seus valores mínimo e máximo. Esse erro deve-se ao ruído de fundo da sala de testes, do microfone utilizado e dos erros intrínsecos ao processo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), tais como espalhamento espectral devido à descontinuidade do

início e fim da janela de amostragem, número de amostras da janela. O uso do filtro de decimação intensificou os erros ao redor da frequência de 250Hz. A dose de ruído calculada pelo sonômetro foi proporcional ao aumento da intensidade sonora da fonte, conforme registrado pelo dosímetro comercial, porém sempre registrando um valor maior que o esperado.

Palavras-chave: Ruído. Sonômetro. Dosímetro. Transformada Rápida de Fourier. Curvas de Ponderação.

ABSTRACT

GAZZONI, Fernando. Medidor de pressão e dose sonora. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Federal Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

The study of sounds and the influence it exerts in humans has intensified in recent decades due to the large number of vehicles and industries in the centers of large cities. The equipment used to characterize the sound and compare if it is within the technical standards is the sound intensity meter or sound level meter. The standards allow marketed since equipment that only measure the sound pressure level to equipment that show pressure level spectrum in frequency and mean pressure to which an operator was exposed during the workday. In Brazil, most sound level meters marketed that measure the sound pressure, the others are usually imported. The present work aims to create a prototype of sound level meters capable of measuring the sound pressure, characterize the signal measured in the frequency and calculate the dose to which an individual is exposed. We developed a sonometer type 2 with slow, fast and impulsive response curves, with spectral analysis using frequency filters and octave band weighting curves A and C. The testing software developed and the response of the developed circuit were performed using the C weighting curve, which is almost linear and therefore best to check the frequency response of the electronic circuit designed. In tests of noise dose and sound pressure level was used weighting curve A. For tests using periodic waves the results obtained with the sound level meter using the response curves of slow, fast and impulsive showed similar results, as expected by IEC 651. The firmware had good resolution in frequency in testing and responded efficiently to fluctuations in the amplitude and frequency of the sound signal input. The bench tests were performed comparing the results of the prototype with a marketed sonometer and some measure of sounds presented high difference in their minimum and maximum values. This error is due to the background noise of the testing room, the microphone used and the errors inherent to the process of fast Fourier transform (FFT), such as spread spectrum due to the discontinuity at the beginning and end of the sampling window, number of samples of the window. The use of the decimation filter intensified errors around the frequency of 250Hz. The calculated noise

dose meter reading was proportional to the increase in the intensity of the sound source, as recorded by the marketed dosimeter, but recording a value greater than expected.

Keywords: *Noise. Sound Level Meter. Dosimeter. Fast Fourier Transform. Weighting Curve.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Onda sonora no ar. a) Visualização das regiões de rarefação e compressão. b) Região de compressão com valores de pressão acima da atmosférica e região de rarefação com valores de pressão abaixo da atmosférica.	20
Figura 2 – Timbre e ondas que o formam. A) Tom de frequência fundamental igual a f_1 ; B) Harmônica de frequência $f_2=2.f_1$; C) Harmônica de frequência $f_3=3.f_1$; D) Timbre formado por $f_1+f_2+f_3$	23
Figura 3 – Espectro de frequência para 4 formas de onda.....	24
Figura 4 – Tipos de Ruído.	25
Figura 5 – Anatomia do ouvido humano.	26
Figura 6 – Funcionamento do ouvido humano. a) Sem incidência de som; b) Instante em que a onda sonora atinge o tímpano e inicia o deslocamento da membrana do tímpano, dos ossículos e da janela oval; c) O deslocamento da janela oval vibrando a membrana basilar; d) Término da vibração.....	27
Figura 7 – Anatomia da Cóclea.	28
Figura 8 – Sentido da onda de pressão, desde a vibração da janela oval até sua chegada na janela redonda.....	28
Figura 9 – Membrana basilar desenrolada e amplitude de oscilação para diferentes frequências.....	29
Figura 10 – Limites de audibilidade.	30
Figura 11 – Curvas de Fletcher e Munson.....	30
Figura 12 – Relação entre fon e nível de pressão sonora.	31
Figura 13 – Partes constituintes do microfone tipo dinâmico.	32
Figura 14 – Partes constituintes do microfone tipo condensador.....	33
Figura 15 – Conectores. a) Balanceado; b) Não balanceado.....	35
Figura 16 – <i>Phantom Powe</i>	36
Figura 17 – Microfone cardióide. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.....	38
Figura 18 – Microfone hipercardióide. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.....	39
Figura 19 – Microfone bidirecional. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.....	39
Figura 20 – Microfone onidirecional. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.....	40
Figura 21 – Resposta em frequência. a) Microfone modelo ECM8000 (linear); b) Microfone modelo XM8500 (não linear).	40
Figura 22 – Efeito proximidade.....	41

Figura 23 – Curvas de Ponderação.....	42
Figura 24 – Resposta em freqüência para filtros de banda de oitava classe II.....	44
Figura 25 – Diagrama em blocos do medidor de intensidade sonora.....	49
Figura 26 - Microfone ECM8000.....	49
Figura 27 – Dados do microfone ECM8000. a) Resposta em Freqüência; b) Resposta Espacial.....	50
Figura 28 – Ganho banda do PGA2500.....	50
Figura 29 – Diagrama em blocos do circuito de aquisição de sinal.....	51
Figura 30 – Diagrama em blocos do circuito de conversão dos sinais.....	52
Figura 31 – Interface IHM. a) Placa de circuito impressa; b) Exemplo de bastidor.....	52
Figura 32 – Exemplos de tela da interface IHM. a) Tela inicial; b) Resultado gráfico do sonômetro com análise de freqüências; c) Resultado descritivo do sonômetro com análise de freqüências.....	53
Figura 33 – Esquema de conexões do DSP.....	54
Figura 34 – Layout final da placa de circuito impresso. A seta superior indica o ponto de separação entre o bloco analógico de entrada e o bloco analógico; A seta inferior indica a separação entre o bloco analógico e o bloco digital.....	56
Figura 35 – Fluxograma do <i>software</i> usado na comparação com as normas.....	58
Figura 36 – Fluxograma do programa de teste de recepção.....	60
Figura 37 – Fluxograma para o cálculo da FFT.....	61
Figura 38 – Fluxograma para cálculo do nível de pressão sonora.....	61
Figura 39 – Curvas de resposta do circuito com gerador de sinais e alto falante.....	62
Figura 40 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 32 Hz.....	65
Figura 41 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 32 Hz (raias de baixa freqüência).	65
Figura 42 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 100 Hz.....	66
Figura 43 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 100 Hz (raias de baixa freqüência).....	66
Figura 44 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 350 Hz.....	67
Figura 45 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 350 Hz (raias de baixa freqüência).....	67
Figura 46 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 1000 Hz.....	68
Figura 47 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 1500 Hz.....	68
Figura 48 – Espectro de freqüência para a onda senoidal de 8000 Hz.....	69

Figura 49 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 16000 Hz.....	69
Figura 50 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz.	70
Figura 51 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz e nível contínuo de $600 V_0$	70
Figura 52 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz (raias de baixa frequência).	71
Figura 53 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz com nível contínuo de $600V_0$ (raias de baixa frequência).	71
Figura 54 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz.	72
Figura 55 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz e nível contínuo de $600V_0$	72
Figura 56 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz (raias de baixa frequência).	73
Figura 57 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz com nível contínuo de $600V_0$ (raias de baixa frequência).	73
Figura 58 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz.	74
Figura 59 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz e nível contínuo de $600V_0$	74
Figura 60 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz (raias de baixa frequência).....	75
Figura 61 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz com nível contínuo de $600 V_0$ (raias de baixa frequência).	75
Figura 62 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 125 Hz.....	77
Figura 63 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 250 Hz.	78
Figura 64 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 500 Hz.	78
Figura 65 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 1000 Hz.	79
Figura 66 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 2000 Hz.	79
Figura 67 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 4000 Hz.	80
Figura 68 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 8000 Hz.	80
Figura 69 – Ondas sonoras mostradas no <i>display</i> LCD. a) Onda com frequência de 3 kHz e pressão sonora de 80dB; b) Onda com frequência de 1,5 kHz e pressão sonora de 80dB.....	81
Figura 70 – Espectro de frequência teórico da FFT para as raias de alta frequência.	82
Figura 71 – Espectro de frequência experimental para as raias de alta frequência.	82
Figura 72 – Raias de maior amplitude (resultado teórico).	83

Figura 73 – Raias de maior amplitude (resultado experimental).....	83
Figura 74 – Resultado teórico da FFT de baixa frequência.....	84
Figura 75 – Resultado experimental da FFT de baixa frequência.....	84
Figura 76 – Dados da onda com frequência de 1 kHz e potência de 88,8 dBA.....	86
Figura 77 – Dados da onda com frequência de 4 kHz e potência de 88,4 dBA.....	86
Figura 78 – Dados da a onda com frequência de 10 kHz e potência de 91,9 dBA.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Transdutores e seus princípios de operação.....	32
Tabela 2 – Valores de resistência e tensão para alimentação <i>phantom power</i>	37
Tabela 3 – Tipos de Sonômetro.....	41
Tabela 4 – Ponderação para as oitavas audíveis.....	43
Tabela 5 – Frequências centrais para os filtros de banda de oitava.....	43
Tabela 6 – Constantes de Tempo.....	44
Tabela 7 – Limites de exposição diária ao ruído.....	47
Tabela 8 – Níveis de tensão para os componentes da placa.....	54
Tabela 9 – Tensão de ondas senoidais com amplitude de pico igual a $600.V_0$ em relação a onda com tensão RMS igual a V_0	63
Tabela 10 – Tensão relativa de ondas senoidais com diferentes amplitudes de pico.....	64
Tabela 11 – Tensão relativa de ondas quadradas com amplitude de pico igual a $600.V_0$	64
Tabela 13 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 32 Hz.....	76
Tabela 14 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 100 Hz.....	76
Tabela 15 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 250 Hz.....	76
Tabela 16 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 350 Hz.....	76
Tabela 17 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 1000 Hz.....	76
Tabela 18 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 2500 Hz.....	77
Tabela 19 – Valores das frequências usadas no teste.....	81
Tabela 21 – Resultados medidos pelo sonômetro.....	85
Tabela 20 – Doses obtidas nos testes de 5 minutos com o dosímetro comercial e o protótipo.....	87
Tabela 21 – Doses obtidas nos testes de 10 minutos com o dosímetro comercial e o protótipo.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	–	Conversor Analógico Digital
ANSI	–	<i>American National Standards Institute</i>
dB	–	Decibel
DSP	–	Processador Digital de Sinais
FFT	–	Transformada Rápida de Fourier
LCD	–	<i>Display</i> de Cristal Líquido
NPS	–	Nível de Pressão Sonora
PCI	–	Placa de Circuito Impresso
PGA	–	Amplificador de Ganho Programável
RAM	–	<i>Random Access Memory</i>
RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
ROM	–	<i>Read Only Memory</i>
SIL	–	<i>Sound Intensity Level</i>
SPL	–	<i>Sound Pressure Level</i>
STFT	–	<i>Short-Time Fourier Transform</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÕES	17
1.2 OBJETIVO GERAL	18
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.2 SOM	20
2.2.1 Grandezas Objetivas do Som.....	20
2.2.1.1 Valor Eficaz.....	22
2.2.2 Frequência	22
2.2.3 Oitavas.....	23
2.2.4 Tons e Timbres	23
2.2.5 Análise Espectral	24
2.2.6 Ruído e Barulho.....	24
2.3 SISTEMA AUDITIVO	25
2.3.1 Psicoacústica.....	29
2.3.1.1 Sensibilidade do Ouvido.....	31
2.4 MICROFONES	32
2.4.1 Microfone Dinâmico (Eletromagnético)	32
2.4.2 Microfone Condensador (Eletrostático)	33
2.4.3 Impedância de Saída.....	35
2.4.4 <i>Phantom Power</i>	36
2.4.5 Sensitividade.....	37
2.4.6 Direcionalidade.....	37
2.4.6.1 Cardióide	38
2.4.6.2 Hipercardióide	38
2.4.6.3 Bidirecional	39
2.4.6.4 Onidirecional	39
2.4.7 Resposta em Frequência	40
2.4.7.1 Efeito Proximidade	40
2.5 MEDIDOR DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (SONOMETRO)	41
2.5.1 Ponderação em Frequência.....	42
2.5.2 Filtros de oitava	43
2.5.3 Constantes de Tempo	44
2.5.4 Medições.....	45
2.5.4.1 Ruído Contínuo	45
2.5.4.2 Ruído Flutuante	45
2.5.4.3 Ruído Impulsivo	46
2.6 DOSÍMETRO	46
2.7 APARELHOS COMERCIAIS	48
3. METODOLOGIA.....	49
3.1 DEFINIÇÃO DO CIRCUITO	49
3.1.1 Aquisição de áudio	49

3.1.2 Conversão do Sinal.....	51
3.1.3 Interface Homem Máquina (IHM)	52
3.1.4 CONTROLE E PROCESSAMENTO DO SINAL	53
3.1.5 Alimentação.....	54
3.2 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI).....	55
3.3 TESTES.....	56
3.3.1 Comparação do Resultado Teórico com os Requeridos pelas Normas	57
3.3.1.1 Teste de acordo com a norma IEC 651.....	58
3.3.1.2 Teste de Acordo com a Norma ANSI S1.11	59
3.3.2 Teste de Recebimento do Sinal e interface Homem Máquina.....	59
3.3.3 Teste entre FFT Teórica e Prática.....	60
3.3.4 Curva de Resposta do Auto Falante com o Gerador de Sinais.....	62
3.3.5 Comparação entre o Equipamento Projetado e um Comercial.....	62
4. RESULTADOS	63
4.1 TESTE TEÓRICO DO SOFTWARE.....	63
4.1.1 Testes de acordo com a norma IEC 651	63
4.1.2 ANSI S1.11.....	75
4.2 TESTES DE RECEBIMENTO DO SINAL	81
4.3 COMPARATIVO ENTRE FFT TEÓRICA E EXPERIMENTAL.....	81
4.4 SONÔMETRO PROJETADO EM RELAÇÃO AO SONÔMETRO COMERCIAL	84
4.5 DOSÍMETRO PROJETADO EM RELAÇÃO AO DOSÍMETRO COMERCIAL	87
5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	89
5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
5.2 CONCLUSÕES	91
5.3 TRABALHOS FUTUROS.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

Com a revolução industrial teve início um dos mais graves problemas urbanos: a poluição sonora. Ela é gerada principalmente pela circulação de veículos e má localização de indústrias, comércios e aeroportos. Em centros urbanos quase não há locais livres do excesso de ruído, seja nos ambientes de trabalho, nas ruas ou nas residências (MOSCI e DINIZ, 1997).

A exposição do indivíduo a elevados níveis de ruído pode causar fadiga, pressão alta, nervosismo, perda da capacidade auditiva, entre outros efeitos nocivos. O efeito causado pelo ruído pode ser relacionado a três parâmetros: tipo de ruído, tempo de exposição e nível de intensidade (CARMO, 1999).

Para evitar o efeito nocivo da poluição sonora foram criadas normas que limitam os valores de intensidade sonora e tempo de exposição ao ruído. Para verificar se os valores de amplitude estão dentro da faixa estipulada pela norma usa-se o medidor de intensidade sonora, popularmente conhecido como decibelímetro. Já a avaliação do tempo de exposição é feito pelo uso de um aparelho chamado dosímetro (MOSCI e DINIZ, 1997).

Existem diversos modelos de medidores de intensidade sonora no mercado, desde os mais básicos que medem apenas a intensidade sonora até os mais complexos que traçam o perfil do sinal sonoro através de sua intensidade e sua distribuição em frequência. Os medidores com opções de análise em frequência normalmente são importados e sua manutenção é realizada somente em assistências técnicas existentes em grandes centros urbanos, como as cidades de São Paulo e Curitiba.

Para regiões localizadas longe desses centros, como o norte do Paraná, o tempo do equipamento em manutenção e o custo da mesma tornam-se elevados. Os fabricantes não disponibilizam contratos para serviços autorizados de manutenção fora dos grandes centros e empresas situadas em regiões como Londrina, no norte do Paraná, acabam tornando-se apenas vendedores dos equipamentos.

Para muitas empresas esse tipo de representação não é vantajosa e por isso sobra a possibilidade de desenvolver um produto com as mesmas qualidades técnicas dos já

comercializados. O desenvolvimento pode ser feito por funcionários diretamente ligados à empresa ou através de parceria com uma universidade.

Para desenvolvimento dentro da empresa é preciso funcionários contratados apenas para esse fim, o que torna-se difícil para empresas de pequeno porte. Nessas situações a parceria entre empresa privada e universidade é vantajosa porque a universidade ganha com o investimento da empresa na compra de novos equipamentos, o aluno ganha com a experiência e conteúdo adquirido durante o desenvolvimento e a empresa ganha com o produto desenvolvido e os subsídios governamentais para o desenvolvimento.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um medidor de intensidade e dose sonora com curvas de ponderação A e C e com resposta rápida, lenta e impulsiva.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Especificar e conceber um protótipo que atenda as normas relativas à medição de som;
- Elaborar o circuito elétrico e a placa de circuito impresso para o protótipo do produto;
- Desenvolver um *firmware* que satisfaça as condições exigidas por normas internacionais para medidores de intensidade sonora;
- Desenvolver um *firmware* capaz de medir a intensidade sonora instantânea, magnitude do espectro em frequência e dose sonora.
- Comparar o protótipo com um produto comercial.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO DE LITERATURA

As normas para certificação de medidores de intensidade sonora contemplam vários modelos. Os mais simples apresentam duas curvas de ponderação: A e C, e duas constantes de tempo: lenta e rápida (FERNANDES, 2002).

Vários estudos na área de ruído ocupacional e ambiental são feitos utilizando o modelo mais simples de medidor, tais como estudos sobre a influência do ruído em pacientes internados em unidades de terapia intensiva (PEREIRA *et al*, 2003), estudos da intensidade sonora que trabalhadores de refeitórios estão expostos (OLIVEIRA, 2005) ou estudos sobre a intensidade sonora que motoristas de ônibus estão expostos (YAMADA, 2005).

Equipamentos mais complexos são usados em estudos que precisam de análises de ruídos mais abrangentes, tal como o estudo de Rios (2003) que usou um medidor que apresenta a distribuição em frequência do ruído para correlacioná-los com exames de audiometria. Podem ser usados também para ajudar na escolha de protetores auriculares, já que muitos deles são mais eficazes para determinadas faixas de frequência.

Valores importantes para a medicina do trabalho são: valor médio da intensidade que o trabalhador está exposto e dose de exposição diária. Existem medidores que realizam essas duas medidas ou apenas uma delas, mas a norma brasileira NBR 10151 apresenta um método para medir a intensidade média usando equipamentos mais simples e a norma regulamentadora NR15, que determina os limites diários de exposição a ruídos, não exige o uso de um dosímetro para medir a dose de ruído.

Como as normas brasileiras permitem o uso do medidor de intensidade sonora mais simples para realizar qualquer tipo de medida, praticamente todos os fabricantes nacionais comercializam apenas esse tipo de produto. Equipamentos que medem a dose de ruído, a intensidade média ou a distribuição do sinal na frequência normalmente são importados.

Alguns estudos teóricos quanto ao processamento de sinais de áudio foram realizados, como o uso da transformada de Karhunen-Loève ao invés da transformada de Fourier (YNOGUTI e JOAQUIM, 2002), comparações de diferentes métodos de processamento de sinais de áudio (MÜLLER e MASSARINI, 2002) ou o uso de novos métodos computacionais

para análise do espectro em frequência, como a STFT (*Short-Time Fourier Transform*) que foi desenvolvida especialmente para sinais de áudio (SMITH, 2007).

2.2 SOM

Som é “toda vibração mecânica que se propaga num meio elástico, desde que as frequências que a compõem encontrem-se dentro de uma determinada faixa audível de frequências ou audiofrequências” (NEPOMUCENO, 1968). O som pode ser definido também como “uma oscilação na pressão do ar ou de outro meio elástico capaz de ser percebida pelo ouvido humano” (EVEREST, 2001).

A Figura 1 apresenta esquematicamente uma onda sonora propagando-se no ar.

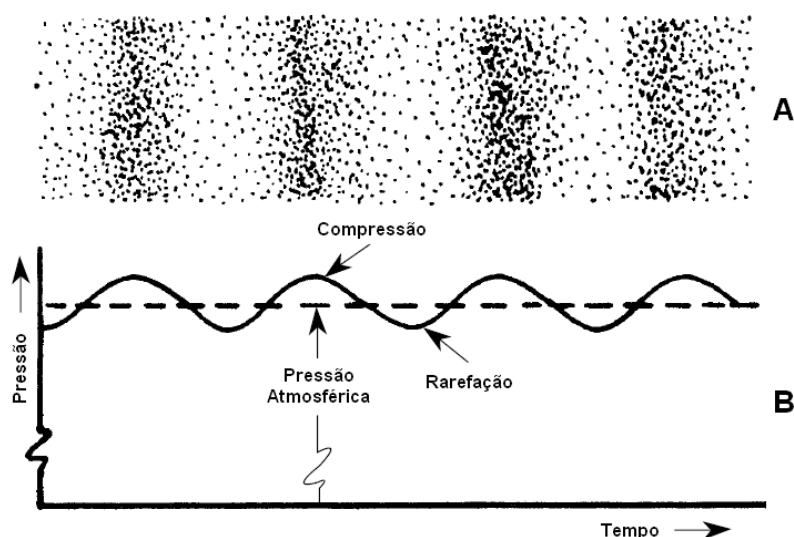


Figura 1 – Onda sonora no ar. a) Visualização das regiões de rarefação e compressão. b) Região de compressão com valores de pressão acima da atmosférica e região de rarefação com valores de pressão abaixo da atmosférica.

Fonte: EVEREST (2001).

2.2.1 Grandezas Objetivas do Som

O resultado da medição do som é expressa referente à sua intensidade ou em relação à sua pressão (NEPOMUCENO, 1968).

Intensidade sonora é “o fluxo médio de energia acústica por unidade de superfície, em direção normal à propagação” (NEPOMUCENO, 1968 apud I.S.O. 7.15.1), expressa em watts

por metro quadrado (W/m^2). Pressão sonora é o valor instantâneo do desvio de pressão devido a perturbação acústica (NEPOMUCENO, 1968 apud I.S.O. 7.7.2), expressa em newton por metro quadrado (N/m^2) ou pascal (Pa).

O limite inferior de audibilidade, também conhecido como limiar da audição humana, é o menor valor da energia sonora ou da pressão sonora que o sistema auditivo humano pode discriminar e equivale, respectivamente, a $20 \times 10^{-6} \text{ N}/\text{m}^2$ e $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ (BERANEK, 1993; NEPOMUCENO, 1968).

O limite superior de audibilidade, conhecido também como limiar de dor, representa a energia ou pressão sonora onde ocorre a sensação de dor no ouvido e equivale, respectivamente, a $2 \times 10 \text{ N}/\text{m}^2$ e $2 \times 10^2 \text{ W}/\text{m}^2$ (BERANEK, 1993; NEPOMUCENO, 1994).

A região audível sem desconforto acústico está entre o limiar de audição humana e o limiar de dor (BERANEK, 1993; NEPOMUCENO, 1968).

O ouvido humano responde às sensações de forma não linear. A Lei de Weber diz que o aumento do estímulo necessário para produzir o incremento mínimo perceptível de sensação é proporcional ao estímulo pré-existente. De acordo com essa lei, o que se pode medir não é a sensação do estímulo sonoro, mas a variação da sensação. (NEPOMUCENO, 1994).

O cálculo da intensidade e pressão sonora é feito em relação ao limite inferior de audibilidade, conforme equações (1) e (2):

$$SPL = 10 \log \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

$$SIL = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2)$$

Onde: *SPL* = *Sound Pressure Level* (Nível de Pressão Sonora);

P = Pressão sonora medida;

*P*₀ = Pressão sonora de referência (20 μPa);

SIL = *Sound Intensity Level* (Nível de Intensidade Sonora);

I = Intensidade da energia sonora;

*I*₀ = Intensidade sonora de referência ($10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$).

O resultado dessa equação é dado em decibel (dB) e é comum na literatura encontrar os termos SPL trocados por dB_{SPL} e SIL trocado por dB_{SIL} . O decibel, apesar de ser apenas

uma escala, é comumente confundido como unidade de medida do som. O plural de decibel é decibels e não decibéis, apesar do termo decibéis ser bastante utilizado (NEPOMUCENO, 1968; SOUZA, 2008).

2.2.1.1 Valor Eficaz

O valor eficaz ou RMS (*root mean square*) corresponde a medida estatística da magnitude de uma função variável. Em física o valor RMS de um sinal alternado corresponde ao nível contínuo que produz uma mesma potência sobre uma carga resistiva. O valor RMS de uma função periódica pode ser calculado pela seguinte equação (DAVIS, 1990):

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} \quad (3)$$

onde: T = período após o qual a onda volta a se repetir;

$f(t)$ = função periódica no tempo.

Para ondas senoidais, o valor pode ser calculado por:

$$f_{rms} = \frac{f_p}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

onde: f_p = valor de pico da onda senoidal.

2.2.2 Freqüência

“Freqüência é o número de oscilações por segundo de uma onda” (EVEREST, 2001).

A equação da freqüência pode ser escrita como:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (5)$$

onde: v = velocidade de propagação da onda no meio;

λ = comprimento de um ciclo da onda.

2.2.3 Oitavas

Segundo Nepomuceno (1968), oitava é todo intervalo de frequência que satisfaz a equação (6). A distribuição em frequência dos sinais sonoros é comumente apresentada em relação a 1 oitava, $\frac{1}{2}$ oitava ou $\frac{1}{4}$ de oitava das frequências audíveis em relação a frequência de 1 kHz.

$$\log_2\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = 1 \quad (6)$$

2.2.4 Tons e Timbres

Tom é um sinal sonoro formado por uma onda fundamental. Timbre é um sinal sonoro formado por uma onda fundamental e suas harmônicas. A Figura 2 apresenta o timbre D formado pela soma do tom A e as harmônicas B e C (EVEREST, 2001; NEPOMUCENO 1994).

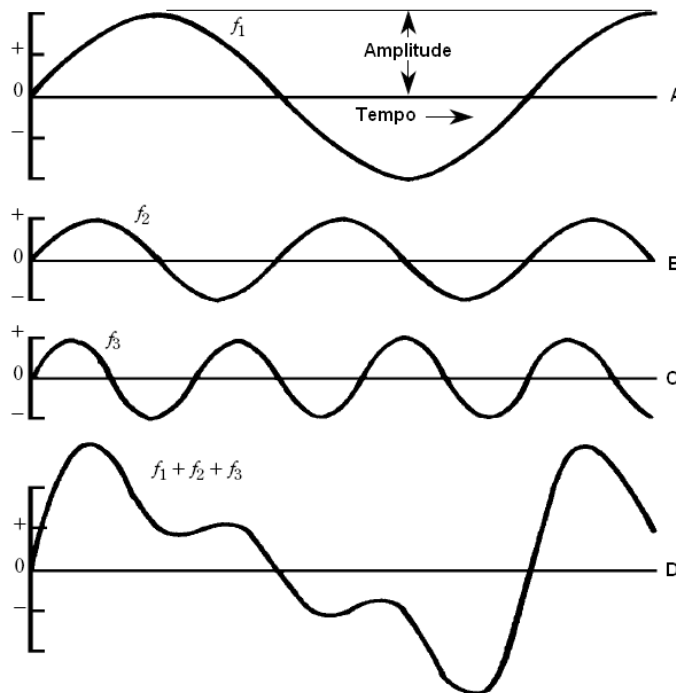


Figura 2 – Timbre e ondas que o formam. A) Tom de frequência fundamental igual a f_1 ; B) Harmônica de frequência $f_2=2.f_1$; C) Harmônica de frequência $f_3=3.f_1$; D) Timbre formado por $f_1+f_2+f_3$. Fonte: EVEREST (2001).

Sons cujas frequências que o compõe não apresentam entre si relação inteira são chamados de sons com timbres complexos (NEPOMUCENO, 1968).

2.2.5 Análise Espectral

O matemático Joseph Fourier (1768 - 1830) demonstrou que qualquer forma de onda pode ser decomposta em uma série de ondas senoidais de diferentes amplitudes. A análise espectral ou análise de Fourier consiste em estudar a amplitude e a frequência de cada senóide que compõe um sinal (BALLOU, 1988).

A Figura 3 apresenta a análise de Fourier aplicada a quatro formas de ondas. As três primeiras possuem frequência fundamental (f_1) com energia bem maior que as suas harmônicas (f_2, f_3, f_4 , etc). A quarta forma de onda (ruído branco) tem a energia distribuída ao longo do espectro de frequência. Esse tipo de sinal é definido como uma onda com frequência e amplitude variáveis no tempo (EVEREST, 2001).

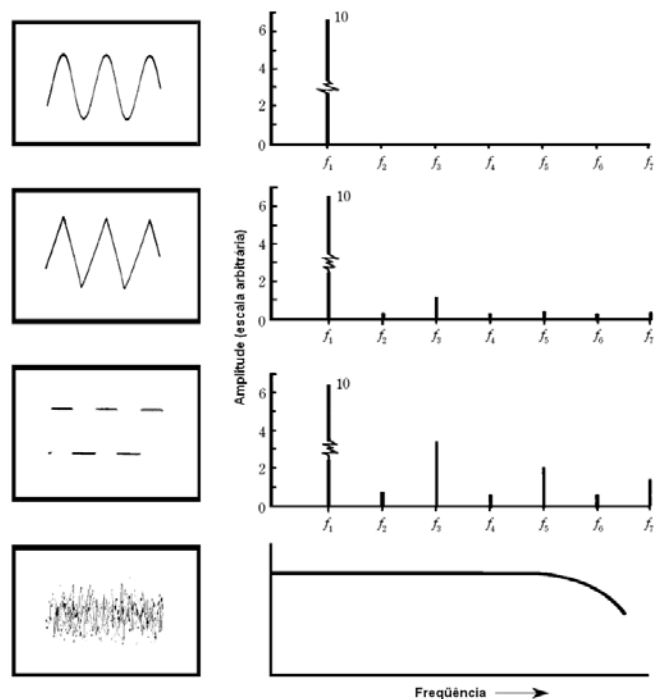


Figura 3 – Espectro de frequência para 4 formas de onda.
Fonte: EVEREST (2001).

2.2.6 Ruído e Barulho

Ruído é “o fenômeno audível cujas frequências não podem ser discriminadas porque diferem entre si por valores inferiores aos detectáveis pelo aparelho auditivo” e barulho é

“todo som indesejado” (NEPOMUCENO, 1994). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) usa o termo ruído tanto para ruídos como para barulhos (NBR 10151). No decorrer do texto será usado o termo ruído conforme a ABNT. Segundo a norma regulamentadora 15 (NR 15), o ruído pode ser classificado como contínuo, flutuante ou impulsivo.

Ruído contínuo ou permanente é o sinal sonoro que “manifesta-se do mesmo modo, sem interrupções e com flutuações inferiores a 5 dB” (CCDR, 2008). Ruídos gerados por motores elétricos, ventiladores e a chuva são exemplos de ruídos contínuos (NEPOMUCENO, 1994).

Ruído flutuante ou intermitente é um sinal sonoro “incharacterístico e que manifesta-se por flutuações superiores a 5dB”. Ruído do trânsito de veículos, de afiação de ferramentas e de soldagem são exemplos de ruídos flutuantes. (CCDR, 2008)

Ruído impulsivo ou de impacto é um sinal sonoro “que apresenta picos de energia acústica de duração inferior a 1 (um) segundo, a intervalos superiores a 1 (um) segundo” (NR15). Ruídos de tiro são exemplos de ruídos impulsivos.

A Figura 4 apresenta os três tipos de ruído de forma gráfica.

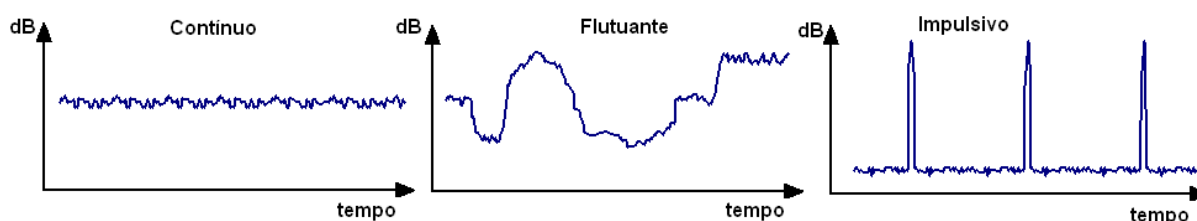


Figura 4 – Tipos de Ruído.

Fonte: Adaptado de FERNANDES (2006).

2.3 SISTEMA AUDITIVO

Segundo Purves *et al* (2004), o sistema auditivo de recém nascidos é capaz de identificar sons com frequências entre 20Hz e 20kHz, porém durante a infância e a adolescência o sistema auditivo perde a sensibilidade para as frequências mais altas e por isso indivíduos adultos identificam sons de no máximo 15 ou 17kHz.

O ouvido humano é dividido anatomicamente em três partes: ouvido externo, médio e interno. O tímpano separa o ouvido externo do médio e a janela oval separa o ouvido médio do interno. A Figura 5 mostra a anatomia do ouvido humano.

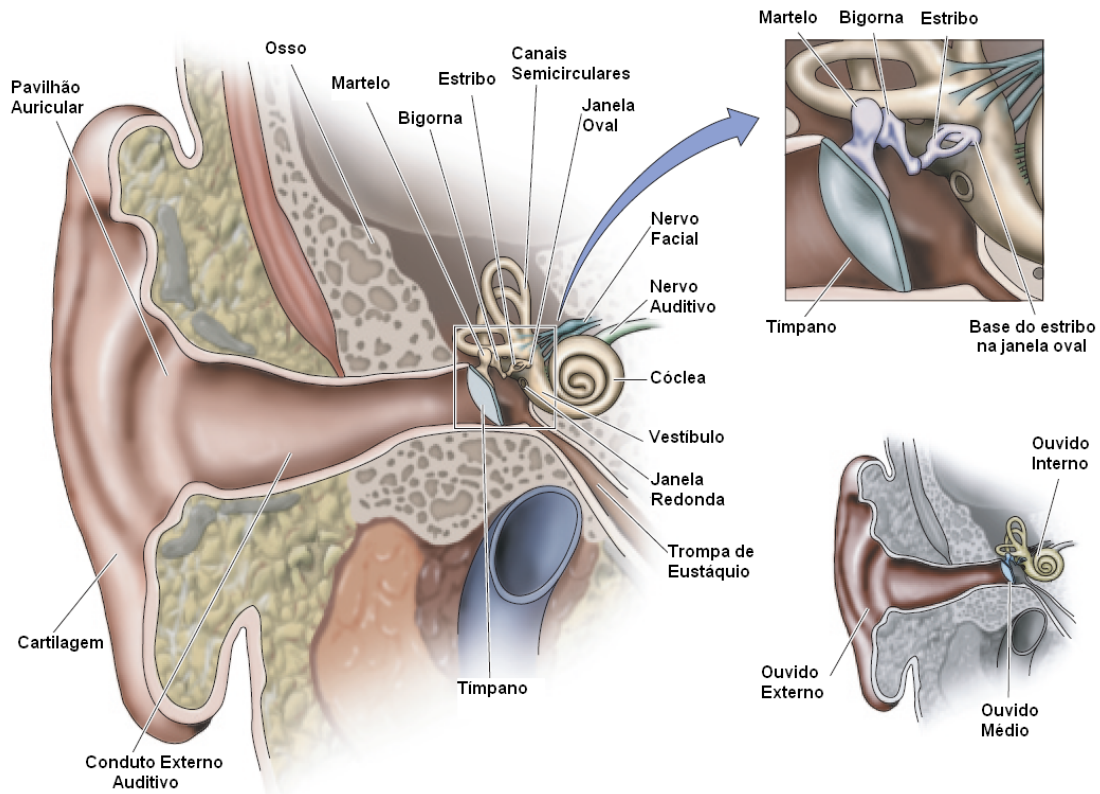


Figura 5 – Anatomia do ouvido humano.
Fonte: PURVES *et al* (2004).

O ouvido interno é preenchido por um líquido e por isso ocorre atenuação do sinal sonoro quando ele passa do meio aéreo, de baixa impedância acústica, para o meio líquido, com alta impedância acústica. Para compensar essa atenuação o ouvido humano tem três mecanismos de ganho (PURVES *et al*, 2004).

O primeiro mecanismo de ganho é a ressonância dentro do ouvido externo. Esse mecanismo é capaz de amplificar os sinais em torno de 3kHz (região onde se concentram os sons da fala). O segundo mecanismo, que proporciona o maior ganho de sinal, deve-se ao ganho por diferença de pressão. O sinal sonoro movimenta a membrana do tímpano que transmite a vibração por meio dos ossículos até a janela oval. Como o diâmetro do tímpano é maior que o da janela oval, a pressão sonora sobre esta é maior. O terceiro mecanismo é relativo ao ganho mecânico gerado pelos ossículos do ouvido (martelo, bigorna e estribo). Eles funcionam como uma alavanca, amplificando o sinal sonoro (PURVES *et al*, 2004).

Esses três mecanismos conseguem compensar em torno de 75% das perdas do sinal de entrada (LENT, 2001).

O sinal captado no ouvido externo é conduzido do ouvido médio ao ouvido interno como mostra a Figura 6.

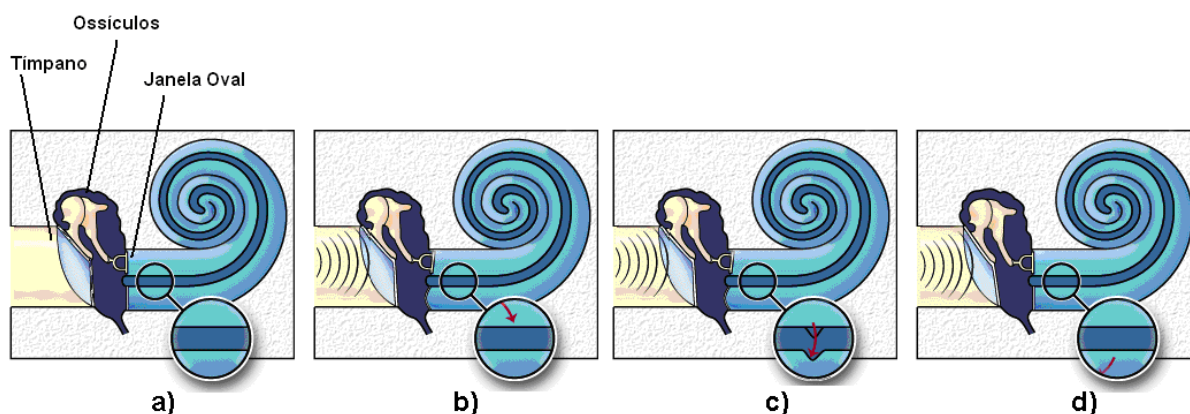


Figura 6 – Funcionamento do ouvido humano. a) Sem incidência de som; b) Instante em que a onda sonora atinge o tímpano e inicia o deslocamento da membrana do tímpano, dos ossículos e da janela oval; c) O deslocamento da janela oval vibrando a membrana basilar; d) Término da vibração.

Fonte: FONSECA (1994).

O ganho do sistema auditivo é reduzido quando o ouvido é exposto a ruídos de alta amplitude ou em uma conversa em ambiente ruidoso em que se faz necessário rejeitar o ruído de fundo. Essa redução do ganho é realizada por pequenos músculos ligados ao tímpano e ao estribo que são usados para tencioná-los e com isso mudar sua rigidez, diminuindo a amplitude das oscilações (PURVES *et al*, 2004).

No ouvido interno situa-se a cóclea, um órgão que possui o formato de caracol e quando desenrolado tem tamanho médio de 32mm desde sua base até o ápice. A cóclea funciona como um transdutor mecânico que converte a pressão sonora em sinal elétrico (PURVES *et al*, 2004; COSTA, CRUZ e OLIVEIRA, 2006).

A Figura 7 mostra um corte transversal da cóclea onde é possível visualizar as três escalas, ou canais, que fazem parte dela: Escala Vestibular, Timpânica e Média.

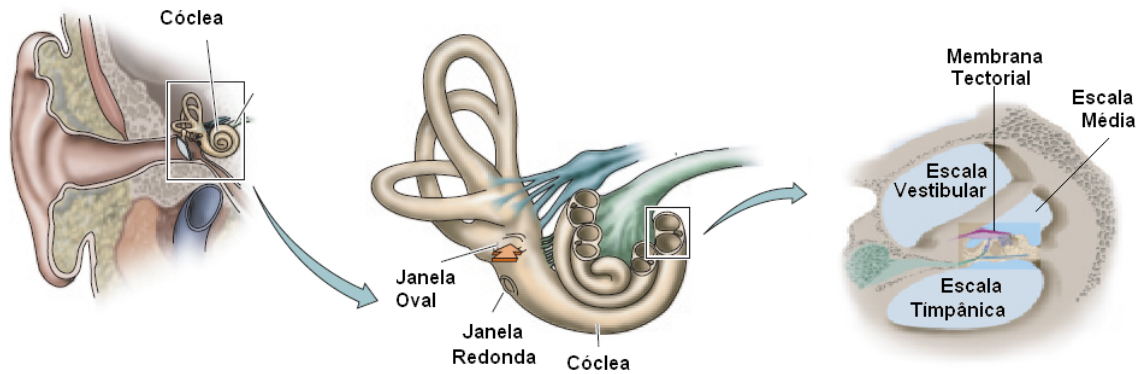


Figura 7 – Anatomia da Cóclea.
Fonte: PURVES et al (2004).

A escala vestibular fica de frente para a janela oval e se estende até o ápice (helicotrema) e de lá volta até a janela redonda formando a escala timpânica. Esse canal em U é preenchido pela perilinfa, rica em íons sódio (Na^+) e pobre em íons potássio (K^+). Entre os dois dutos encontra-se a escala média, que é um canal preenchido pela endolinfa, rica em íons potássio (NISHIDA, 2008).

A Figura 8 mostra o caminho que a onda sonora percorre após chegar ao tímpano.

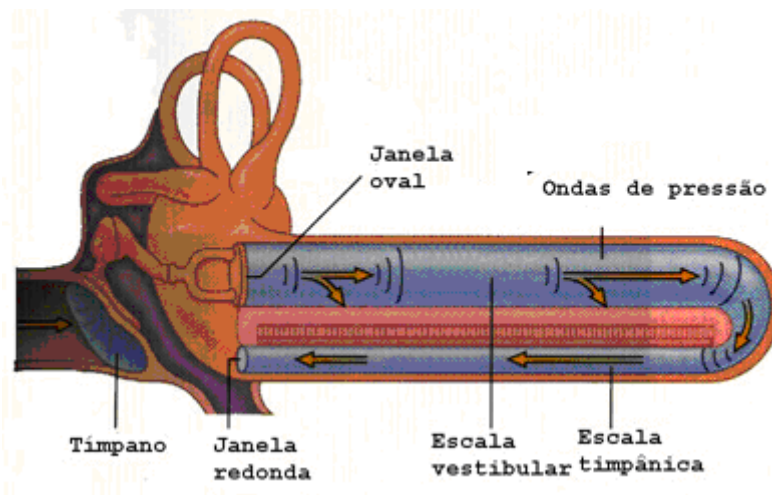


Figura 8 – Sentido da onda de pressão, desde a vibração da janela oval até sua chegada na janela redonda.
Fonte: NISHIDA (2008).

Quando a onda sonora chega ao estribo, esse faz vibrar o líquido perilinfático da escala vestibular. Essa vibração propaga-se pelos três canais até se dissipar na janela redonda. A membrana basilar, situada na escala média, é bastante sensível a vibrações mecânicas e por isso oscila quando a onda de pressão passa pelos canais da cóclea (NISHIDA, 2008).

George Von Békésy descobriu em 1928 que a amplitude das vibrações da membrana basilar é diferente ao longo de sua extensão quando o ouvido recebe tons puros (apenas uma

freqüência). Considerando o sentido base-ápice da membrana basilar, as medições de Békesy mostraram que a amplitude das vibrações aumenta ao longo da membrana até atingir um pico e depois passa a decrescer. Esse ponto de maior oscilação está relacionado com a freqüência do sinal: quanto maior a freqüência, mais próximo da base o pico de oscilação se encontra (LENT, 2001; PURVES *et al*, 2004).

A Figura 9 mostra o resultado de um experimento similar ao de Békesy

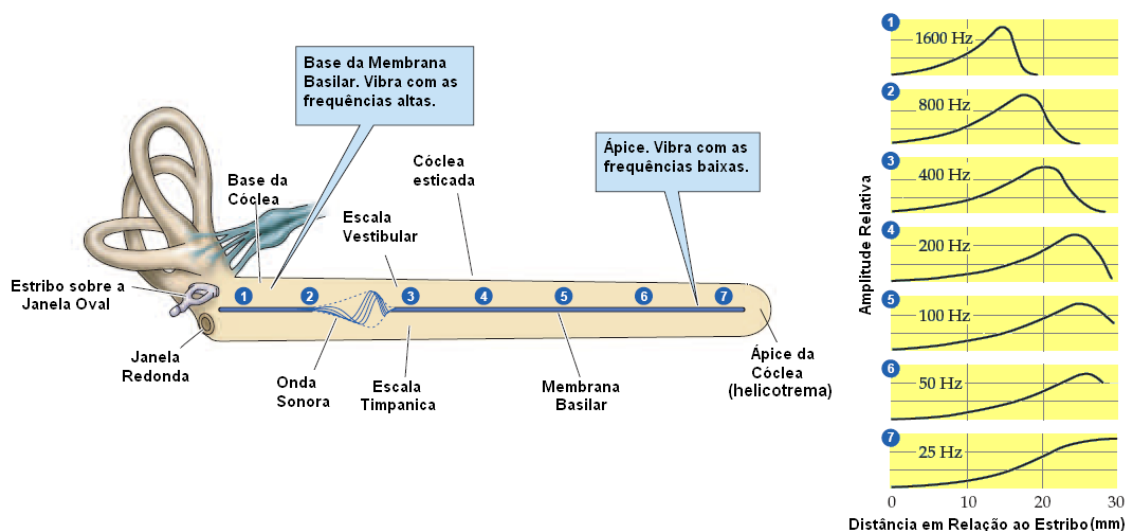


Figura 9 – Membrana basilar desenrolada e amplitude de oscilação para diferentes freqüências.
Fonte: PURVES et al (2004).

Ao longo da membrana basilar (± 30 mm) existem cerca de 5000 receptores que respondem cada um ao estímulo de apenas uma região da membrana. Como a região da membrana que vibra está relacionada à freqüência do sinal, é possível decodificar o sinal sonoro em freqüência pela análise dos receptores que foram acionados (FONSECA, 1994; PURVES *et al*, 2004).

2.3.1 Psicoacústica

A psicoacústica é a área de estudos que “procura interpretar como o sistema auditivo responde aos estímulos sonoros” (NEPOMUCENO, 1994).

Considera-se como faixa audível os sons que se encontram entre o limite inferior de audibilidade e o limite superior de audibilidade, como mostrado na Figura 10 (EVEREST, 2001; NEPOMUCENO, 1994).

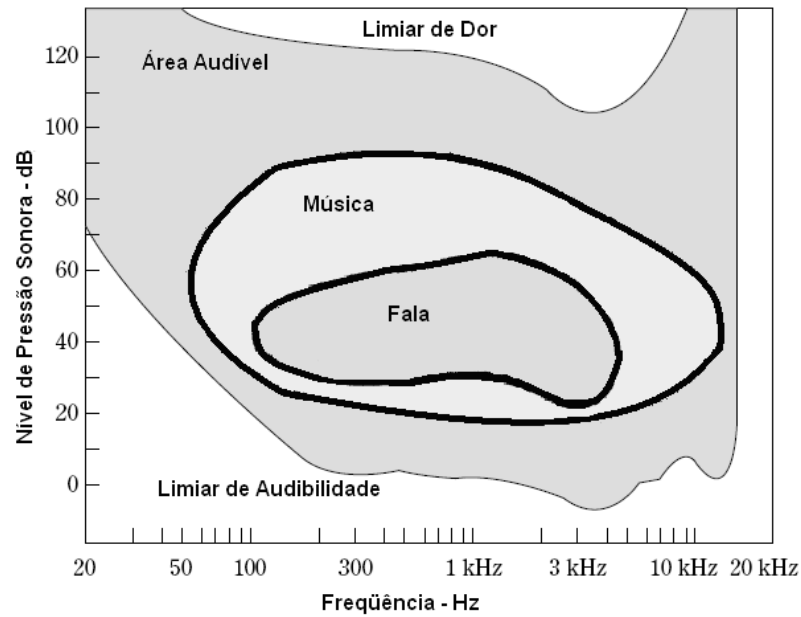


Figura 10 – Limites de audibilidade.
Fonte: EVEREST (2001).

Em 1933 Fletcher e Munson determinaram os limites sonoros audíveis e as curvas de audibilidade, que relacionam a intensidade sonora em que o ouvido é sensibilizado com a intensidade da fonte sonora (EVEREST, 2001). Essas curvas são apresentadas na Figura 11.

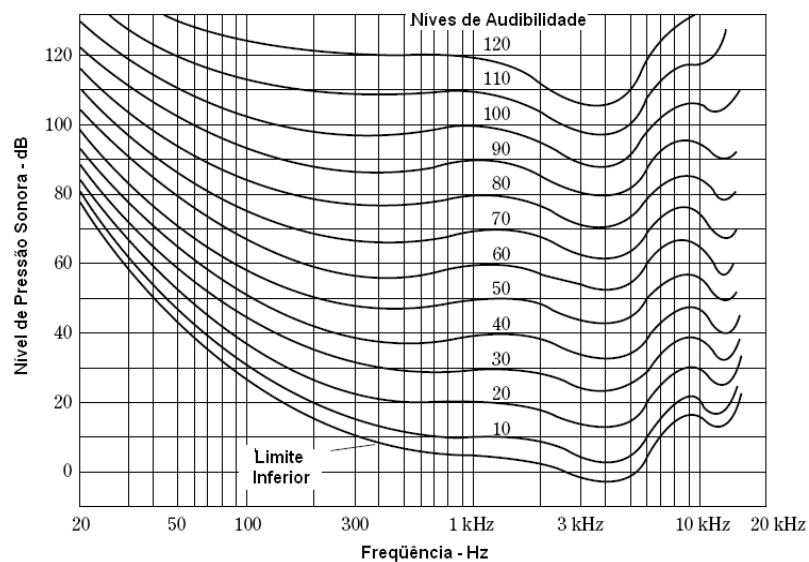


Figura 11 – Curvas de Fletcher e Munson.
Fonte: BERANEK (1993).

Fletcher e Munson usaram a unidade chamada fon para representar a intensidade sonora que chega à cóclea. Um fon é a sensibilização da cóclea para um sinal sonoro de intensidade 1dB e frequência de 1kHz (BERANEK, 1993).

O conceito de fons é apresentado na Figura 12. Pode-se observar através dela que para sensibilizar o ouvido com 30 fons é necessário uma fonte sonora com intensidade de 30dB e frequência de 1kHz ou uma fonte sonora com intensidade de 88dB e frequência de 20Hz, ou seja, uma diferença de 58dB de intensidade. Essa resposta não linear do ouvido é devido ao seu mecanismo de ganho ser mais efetivo para os sons na faixa de frequência da fala (BERANEK, 1993).

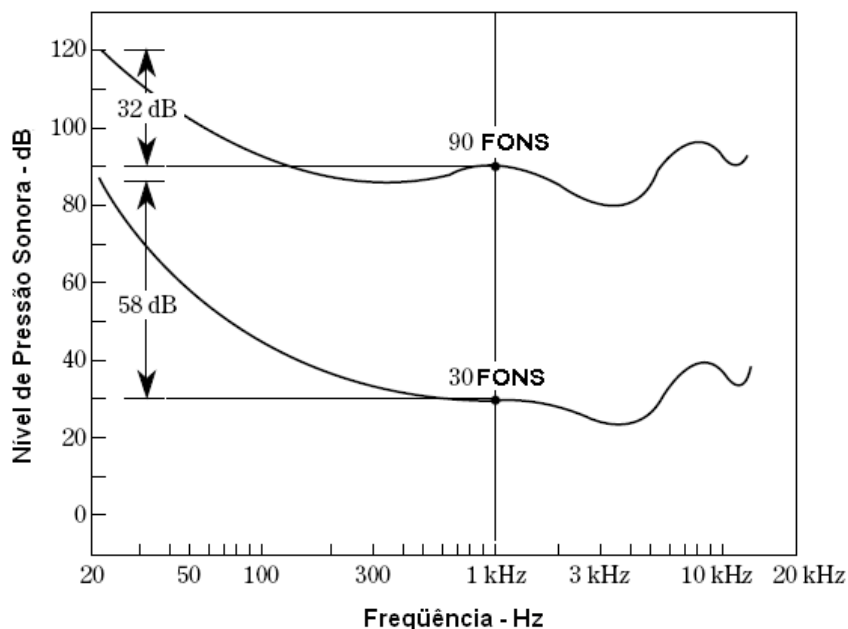


Figura 12 – Relação entre fon e nível de pressão sonora.
Fonte: Adaptado de BERANEK (1993).

2.3.1.1 Sensibilidade do Ouvido

A partir dos resultados encontrados por Fletcher e Munson e de estudos posteriores estabeleceu-se que a maior sensibilidade do ouvido humano situa-se entre 2 kHz e 3 kHz (NEPOMUCENO, 1994).

O espectro de frequência da voz humana situa-se entre 100Hz e 10 kHz e a maior parte da energia da voz encontra-se entre 300 Hz e 3 kHz (NEPOMUCENO, 1968).

2.4 MICROFONES

Os microfones são transdutores que convertem a energia sonora em energia elétrica. A Tabela 1 apresenta alguns transdutores usados em microfones e seus princípios de operação (BALLOU, 1988; COSTA, 2002).

Tabela 1 – Transdutores e seus princípios de operação.

<i>Transdutor</i>	<i>Princípio de Operação</i>
Carbono	Piezo-resistência
Cerâmica ou cristal	Piezo-eletricidade
Ímã móvel	Eletromagnetismo
Bobina móvel	Eletrodinâmica
Condensador e eletreto	Eletrostática

Os microfones dinâmicos e condensadores são os mais utilizados em sistemas de medição.

2.4.1 Microfone Dinâmico (Eletromagnético)

O microfone dinâmico funciona como um pequeno gerador elétrico e seus principais elementos são: membrana, bobina móvel (*voice coil*) e ímã (WALLER *et al*, 2004). A Figura 13 mostra como esses elementos são dispostos.

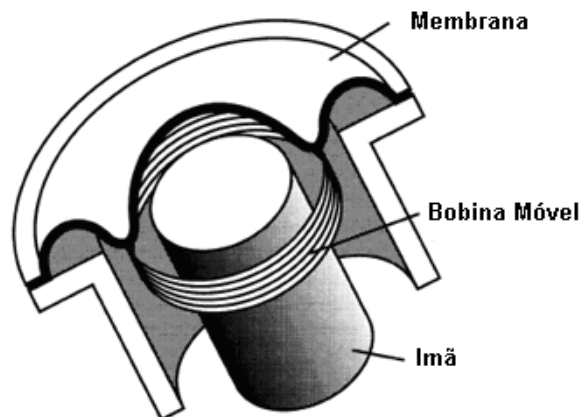


Figura 13 – Partes constituintes do microfone tipo dinâmico.
Fonte: VEAR (2004).

A energia sonora incide sobre a membrana e a faz oscilar proporcionalmente à frequência e amplitude do sinal sonoro incidente. A bobina é fixada na membrana para que as duas oscilem juntas e como a bobina está ao redor do campo magnético do ímã, essa oscilação gera um sinal elétrico proporcional à oscilação de entrada (WALLER et. al., 2004).

Esse tipo de microfone é bastante resistente a choques mecânicos e imune a fatores ambientais como diferenças de temperatura e umidade. A membrana é constituída de material elástico e resistente, de forma a suportar altas intensidades sonoras sem deformar-se e capaz de eliminar os ruídos provenientes do manuseio (COSTA, 2002; FERNANDES, 2002).

2.4.2 Microfone Condensador (Eletrostático)

É composto de uma membrana e uma placa condutora fixa que são separadas por uma pequena camada de ar, formando um capacitor variável (WALLER et al, 2004). A Figura 14 mostra a disposição desses elementos.

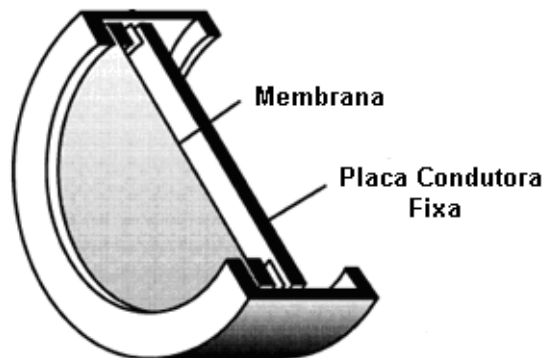


Figura 14 – Partes constituintes do microfone tipo condensador.
Fonte: VEAR (2004).

O espaço entre a membrana e a placa condutora vibra proporcionalmente à oscilação gerada pela onda sonora sobre a membrana. Isso faz com que a diferença de potencial entre as placas seja exatamente a representação elétrica do movimento do diafragma e, conseqüentemente, uma representação elétrica do sinal sonoro. Essa variação de tensão é bem pequena e por isso esse tipo de microfone necessita de pré-amplificador em sua saída (DAVIS e JONES, 1990; COSTA, 2002).

A membrana pode ser feita de material metálico muito fino ou de plástico coberto por um material condutor, sendo mais frágil que as membranas de microfones dinâmicos (COSTA, 2002).

A massa dos microfones condensadores é menor que a dos microfones dinâmicos devido à ausência do imã. Com menor massa, e conseqüentemente menor inércia, os microfones condensadores são mais sensíveis e respondem melhor a sinais sonoros transientes. A largura da faixa de resposta em frequência também é melhor (COSTA, 2002; FERNANDES, 2002).

Esse tipo de microfone é mais utilizado em instrumentação devido às duas qualidades acima citadas: maior sensibilidade e melhor resposta a transientes. Já os microfones dinâmicos são mais utilizados para aplicações em campo, como shows, já que têm maior resistência a choques mecânicos e não sofrem influências de condições ambientais (COSTA, 2002; FERNANDES, 2002).

Existem dois tipos de elementos condensadores: condensador balanceado e não balanceado. O sistema condensador balanceado precisa ser polarizado com uma tensão contínua externa chamada de *Phantom Power*. O sistema condensador não balanceado ou eletreto-condensador tem polarização permanente em suas placas devido ao bombardeio de elétrons que recebe durante o processo de fabricação e por isso não necessita de polarização externa. (COSTA, 2002 apud Valle, 1997).

A definição de sistema balanceado e não balanceado é derivada do tipo de cabo a que o microfone é conectado. No sistema balanceado a conexão do microfone é feita usando três sinais: positivo (*hot*), negativo (*cold*) e terra (*ground*). Os três pinos, por definição, são enumerados como 1 (terra), 2 (positivo) e 3 (negativo). Os cabos que transmitem esse sinal são formados por dois fios mais malha de terra (AKG Inc, 2005; COSTA, 2002).

Nos microfones de eletreto o sinal gerado é transmitido através de um único fio e o pino de terra é ligado à malha do cabo.

A Figura 15 apresenta os dois modelos de conectores para microfones condensadores.

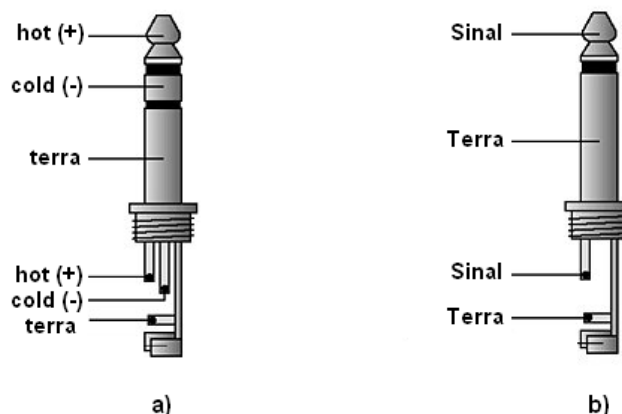


Figura 15 – Conectores. a) Balanceado; b) Não balanceado.
Fonte: AKG Inc (2005).

Microfones de eletreto são mais utilizados em equipamentos onde não é necessário o uso de cabos, como celulares e filmadoras. Equipamentos que necessitam de cabos para conexão utilizam microfones condensadores com *phantom power*, já que o sinal nesse caso é gerado de forma diferencial e o ruído gerado no cabo pode ser reduzido (COSTA, 2002).

2.4.3 Impedância de Saída

A impedância de um microfone é normalmente calculada na frequência de 1kHz e pode receber o nome de impedância de fonte. Em microfones dinâmicos seu valor está em torno de 150 ohms e nos condensadores em torno de 600 ohms (COSTA, 2002; SIGISMOND, 2004).

Se a impedância na entrada do pré-amplificador for muito baixa, o microfone dissipará mais potência e poderá distorcer o sinal de entrada. Impedâncias muito altas melhoram a performance do circuito, mas pode-se perder a captação das frequências mais altas, causar oscilações nos circuitos internos do microfone e aumentar a captação de ruídos gerados nos cabos (COSTA, 2002). Muitos fabricantes informam nas folhas de dados de seus microfones o valor de duas impedâncias: a impedância de saída do microfone e a impedância ideal do circuito que o microfone será conectado.

Os microfones considerados com impedâncias maiores que $10k\Omega$ são classificados de alta impedância e os microfones com impedância entre 50 e 600Ω são classificados como de baixa impedância (SIGISMOND, 2004).

2.4.4 Phantom Power

Phantom Power é a tensão contínua utilizada na polarização dos microfones do tipo condensador não eletreto e seu valor pode variar de 9 a 48V (WALLER *et al*, 2004).

Essa tensão é fornecida ao microfone através dos mesmos conectores onde estarão os sinais de áudio, isto é, nos pinos 2 (positivo) e 3 (negativo). A Figura 16 apresenta como é conectada a alimentação *phantom power* (COSTA, 2002).

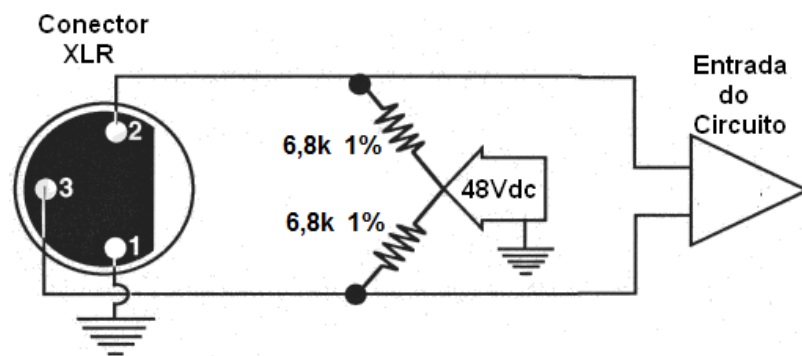


Figura 16 – Phantom Power.
Fonte: VEAR (2004).

Os resistores devem ser precisos para que não haja diferença de potencial entre os pinos positivo e negativo. Com dois resistores iguais, a tensão sobre os pinos será a mesma e caso seja conectado um microfone do tipo dinâmico não haverá corrente circulando por ele e seu funcionamento não será afetado. Essa foi uma das razões que essa alimentação recebeu o nome de *phantom power*, pois é “invisível” para microfones do tipo dinâmico e visível para os tipo condensadores. Caso os dois resistores tenham valores diferentes, microfones do tipo dinâmico são danificados quando conectados a este circuito (LOUD Technologies Inc, 2002; WALLER, 2004).

A norma IEC 26815 é quem regula o uso do *phantom power* e especifica o valor dos resistores que devem ser usados para os valores possíveis de tensão (DAVIS e JONES, 1990). A Tabela 2 apresenta os valores da norma.

Tabela 2 – Valores de resistência e tensão para alimentação *phantom power*.

Tensão (V)	Resistência (Ω)
12	680
24	1k2
48	6k81

Fonte: AKG Inc apud IEC 26815 (2002)

Microfones que operam com *phantom power* de 48V apresentam melhor performance devido à maior excursão do sinal (DAVIS, 1990).

2.4.5 Sensitividade

A sensibilidade ao som ambiente é a representação da taxa do sinal sonoro de um ambiente qualquer que o microfone é capaz de transformar em energia elétrica (LYONS *et al*, 2005; WALLER *et al*, 2004). Ela é expressa em milivolts por pascal (mV/Pa).

Nas especificações dos fabricantes, muitas vezes encontramos como sensibilidade um valor expresso em dBV ou dB_{SPL}. Esse valor representa a sensibilidade do microfone expressa em decibels, ou seja:

$$dBV = 20 \log(\text{sensitividade}) \quad (7)$$

$$dBV = 20 \log(mV/Pa) \quad (8)$$

Os valores de sensibilidade variam normalmente entre 0,7 e 3,0 mV/Pa para microfones dinâmicos e entre 7,0 e 11,0 mV/Pa para microfones condensadores (FERNANDES, 2002).

2.4.6 Direcionalidade

A direcionalidade do microfone é sua sensibilidade para diferentes ângulos de recepção do sinal sonoro (FERNANDES, 2002). Os microfones podem ser divididos em unidirecionais, bidirecionais e onidirecionais.

As folhas de dados mostram a direcionalidade do microfone através de um gráfico polar, como pode ser visto no item b da Figura 17. No gráfico é mostrada a curva do microfone considerando que o mesmo está na posição vertical com o ângulo de 0°

representando sua parte frontal e o ângulo de 180° sua parte traseira. Cada círculo representa um valor de atenuação.

2.4.6.1 Cardióide

O microfone tipo cardióide é o modelo mais comum de microfones unidirecionais, ou seja, microfones que respondem a estímulos de apenas uma direção. Esse microfone apresenta a máxima sensibilidade para sons vindos da sua frente. Sons provenientes de suas laterais são um pouco atenuados e os sons vindos da parte traseira são completamente atenuados (VEAR, 2004).

A Figura 17 mostra a curva típica de direcionalidade do microfone cardióide.

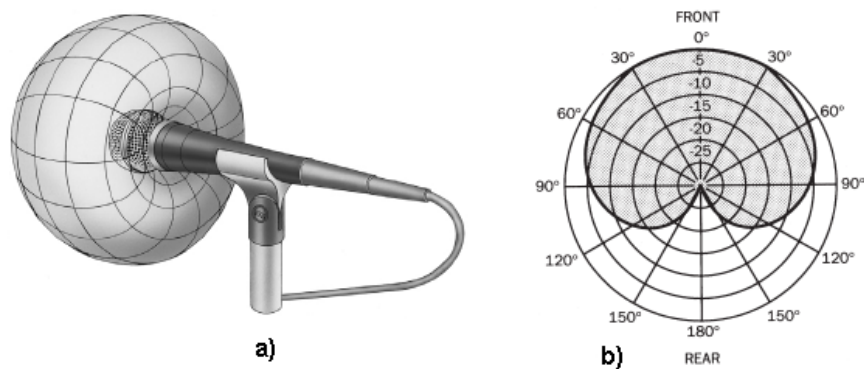


Figura 17 – Microfone cardióide. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.
Fonte: VEAR (2004).

2.4.6.2 Hipercardióide

Esse tipo de microfone apresenta maior atenuação que o cardióide para sons laterais, mas em contrapartida apresenta pequena sensibilidade para sons provenientes da parte traseira (LYONS, 2005). A Figura 18 apresenta a visão espacial e o gráfico polar do microfone hipercardióide.

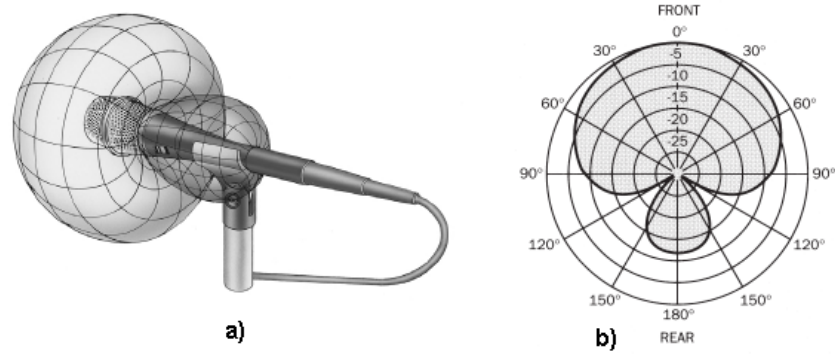


Figura 18 – Microfone hipercardióide. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.
Fonte: VEAR (2004).

2.4.6.3 Bidirecional

O microfone bidirecional possui sensibilidade simétrica em duas direções, como mostrado na Figura 19.

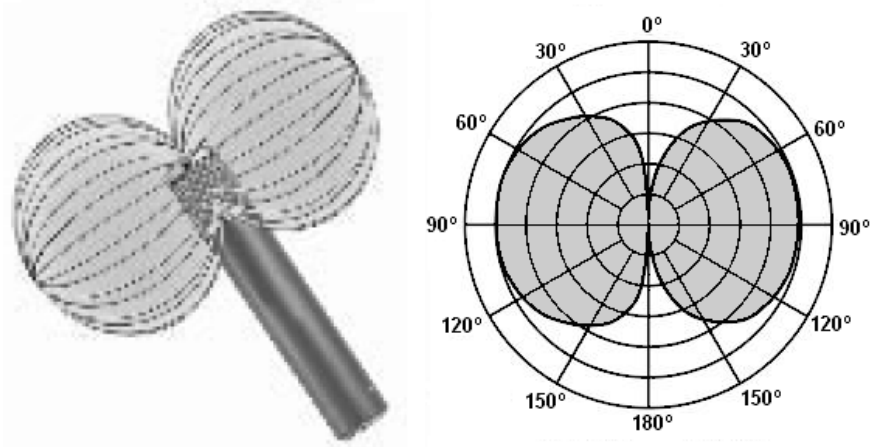


Figura 19 – Microfone bidirecional. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.
Fonte: LYONS (2005).

2.4.6.4 Onidirecional

O microfone onidirecional apresenta a mesma sensibilidade para qualquer ângulo de incidência do sinal sonoro (LYONS, 2005). A Figura 20 mostra a curva típica de um microfone onidirecional.

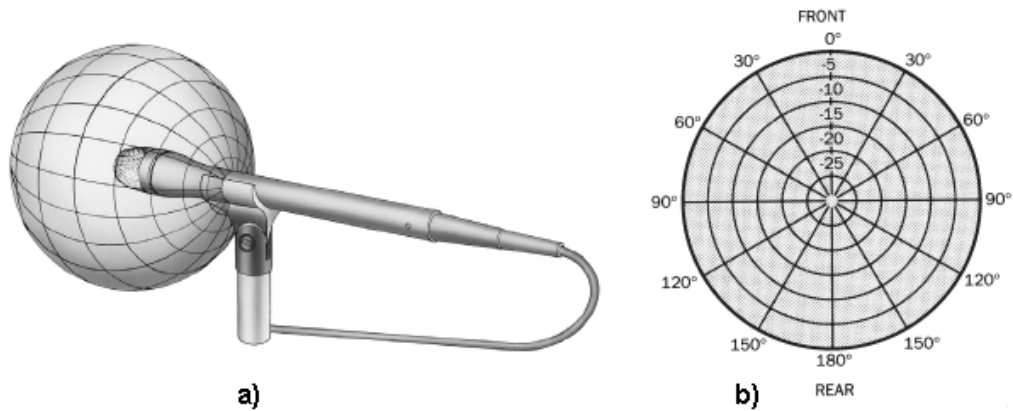


Figura 20 – Microfone onidirecional. a) Visão espacial; b) Gráfico polar.
Fonte: VEAR (2004).

2.4.7 Resposta em Frequência

A resposta em frequência de um microfone é o gráfico que mostra sua sensibilidade para a faixa de frequência audível. Existem dois padrões para a resposta em frequência: linear (*flat*) e o não linear (*shaped*).

A Figura 21 apresenta a resposta em frequência de dois microfones.

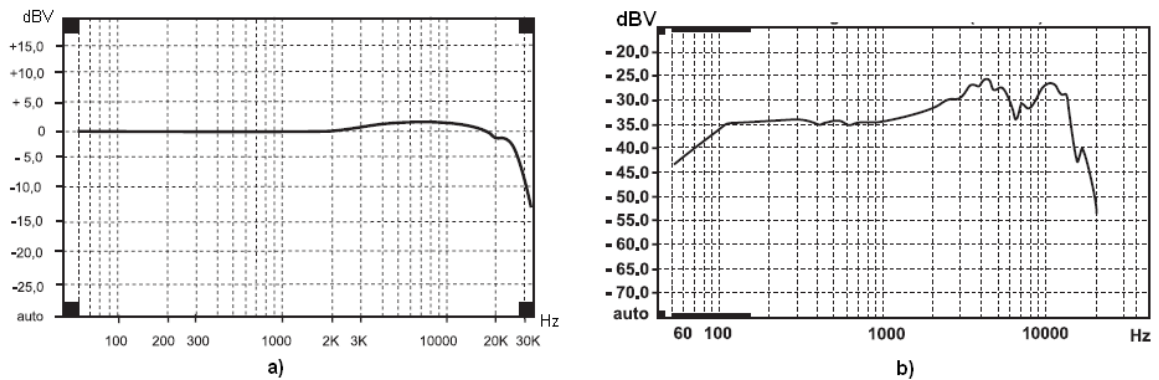


Figura 21 – Resposta em frequência. a) Microfone modelo ECM8000 (linear); b) Microfone modelo XM8500 (não linear).

Fonte: BEHRINGER GmbH, 2000).

2.4.7.1 Efeito Proximidade

O efeito proximidade é a alteração da resposta do microfone para as baixas frequências quando a distância entre a fonte sonora e o microfone é pequena. Esse efeito

ocorre em microfones direcionais e sua consequência é o aumento da captação das baixas frequências (FERNANDES, 2002).

A Figura 22 mostra a resposta em frequência de um microfone quando a fonte sonora é posicionada em duas distâncias diferentes.

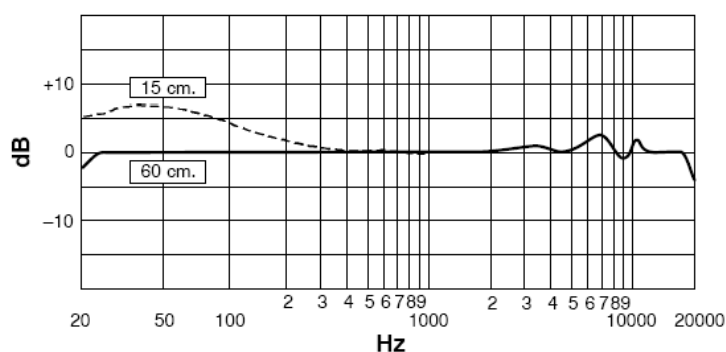


Figura 22 – Efeito proximidade.
Fonte: SHURE Inc (2003).

2.5 MEDIDOR DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (SONOMETRO)

O sonômetro, mais conhecido no Brasil como decibelímetro, é utilizado para medir o nível de pressão sonora (NPS) instantâneo e mostrar a resposta simulando o comportamento do ouvido humano (KLUESENER, 2001).

“O resultado apresentado em seu mostrador deve ser a média quadrática (RMS) das variações da pressão do som dentro do tempo especificado pela constante de tempo” (FERNANDES, 2002).

A Tabela 3 apresenta os tipos de sonômetro de acordo com a classificação das normas IEC 651 e ANSI S1.4.

Tabela 3 – Tipos de Sonômetro.

ANSI S1.4	IEC 651	Aplicação
0	0	Padrão de referência em laboratórios
1	1	Uso em laboratórios ou em campo com condições controladas
2	2	Uso geral em campo
-	3	Inspeções de varredura. Usado para constatar se os níveis de ruído estão substancialmente acima dos limites de tolerância. Seu resultado não pode ser usado em folhas de medições.

Fonte: IEC 615 e ANSI S1.4.

Os sonômetros devem apresentar no mínimo opções para curva de ponderação: A e C; e duas constantes de tempo: lenta e rápida (FERNANDES, 2002).

2.5.1 Ponderação em Frequência

Para simular o comportamento do ouvido humano foram criadas três curvas de ponderação chamadas de A, B e C, conforme mostra a Figura 23. Elas foram criadas baseadas nas curvas de audibilidade do ouvido.

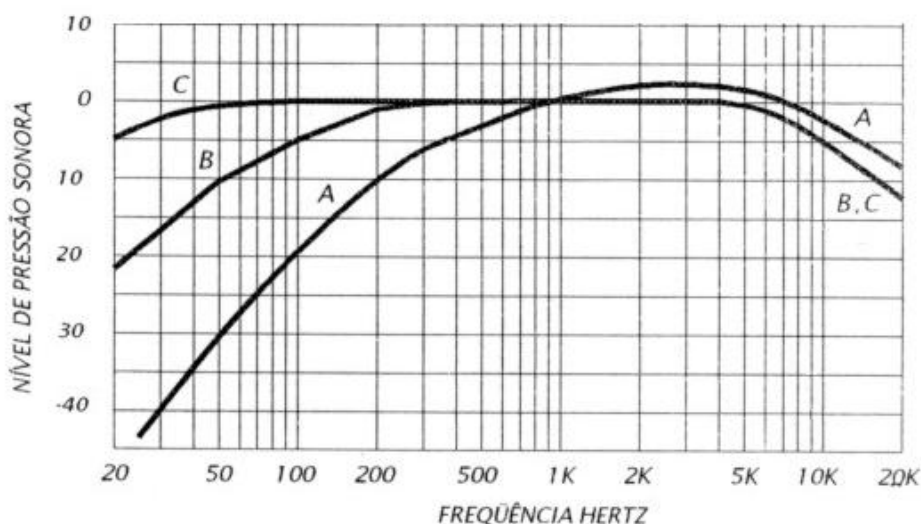


Figura 23 – Curvas de Ponderação.
Fonte: NEPOMUCENO (1994).

A curva A foi criada para medir sons de intensidade menor que 55 fons, a curva B para sons com intensidade entre 55 e 85 fons e a curva C para sons acima de 85 fons. Todas as curvas usam como referência o nível de pressão sonora em 1k Hz (NEPOMUCENO, 1994). A curva B não representa de forma correta a resposta do ouvido humano e por isso não é mais utilizada (PURVES *et al*, 2004).

A norma IEC651 divide as frequências audíveis em 10 oitavas entre 31,25Hz e 16kHz. Os pontos das curvas de ponderação correspondentes a essas 10 oitavas são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ponderação para as oitavas audíveis.

Frequência (Hz)	Curva A (dB)	Curva B (dB)	Curva C (dB)
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
63	-26,2	-9,3	-0,8
125	-16,1	-4,2	-0,2
250	-8,9	-1,3	0,0
500	-3,2	-0,3	0,0
1000	0,0	0,0	0,0
2000	+1,2	-0,1	-0,2
4000	+1,0	-0,7	-0,8
8000	-1,1	-2,9	-4,4
16000	-6,6	-8,4	-8,5

Fonte: (IEC 651).

Para identificar a curva de ponderação utilizada no cálculo do nível de pressão sonora é acrescentada a letra correspondente depois de dB. Por exemplo, se a curva utilizada para o cálculo for a curva A o resultado deve ser representado em dBA ou dB(A).

2.5.2 Filtros de oitava

Segundo a norma ANSI S1.11 os filtros de banda de oitava são filtros passa faixa com frequências centrais de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Frequências centrais para os filtros de banda de oitava.

Frequência Central – f_m (Hz)	Tipo Restrito	Tipo Estendido
31,5		✓
63		✓
125	✓	✓
250	✓	✓
500	✓	✓
1000	✓	✓
2000	✓	✓
4000	✓	✓
8000		✓

Fonte: ANSI S1.11.

A norma permite que sejam incluídos filtros com outras frequências centrais.

Os filtros de banda de oitava são divididos em classes: Classe I, II e III. Essa classificação diz respeito à curva de resposta de cada filtro. Filtros classe I são os que apresentam frequência de corte mais distantes da frequência central de cada filtro, enquanto filtros classe III apresentam frequências de corte mais próximas da frequência central (ANSI S1.11).

A Figura 24 apresenta a curva de resposta exigida para um filtro de banda de oitava classe II.

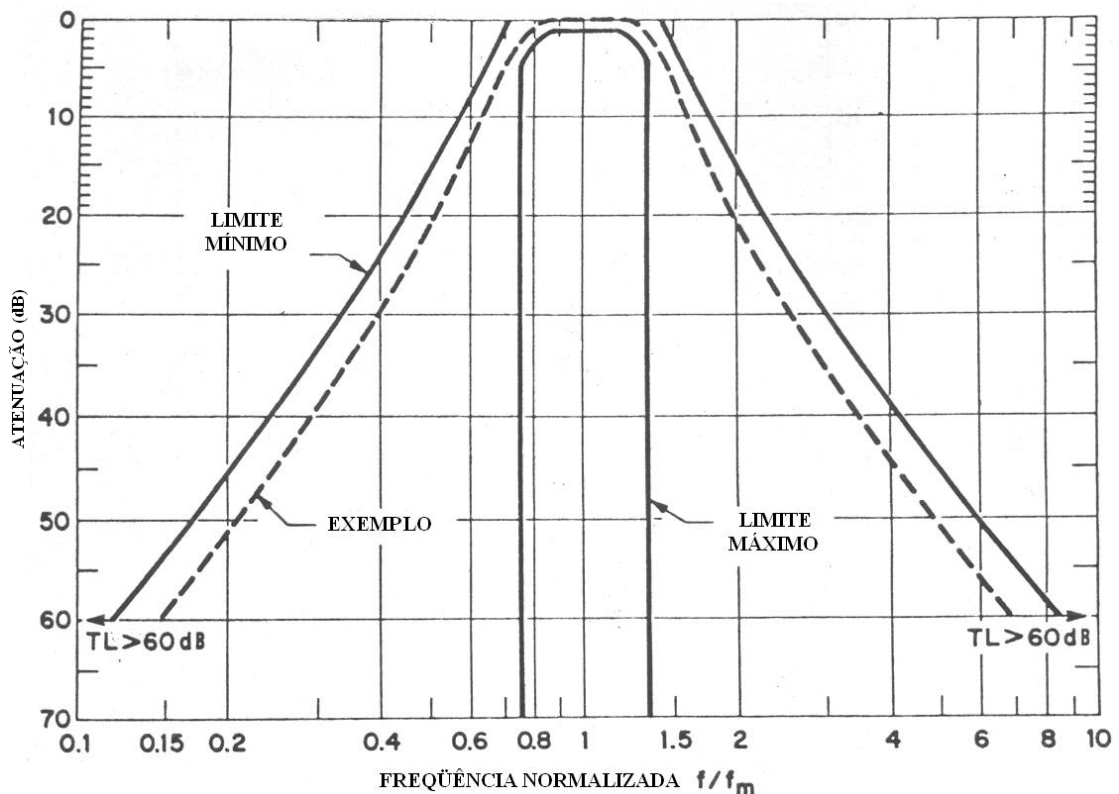


Figura 24 – Resposta em frequência para filtros de banda de oitava classe II.
Fonte: ANSI S1.11.

2.5.3 Constantes de Tempo

A constante de tempo define o tempo total em que o sonômetro irá adquirir o sinal. Na Tabela 6 são apresentadas as constantes de tempo existentes de acordo com a norma IEC 651.

Tabela 6 – Constantes de Tempo.

Constante de Tempo	Lenta (<i>slow</i>)	Rápida (<i>fast</i>)	Impulsiva (<i>impulse</i>)
Tempo (ms)	1000	125	35

Fonte: IEC651.

Existe ainda a possibilidade de usar qualquer das constantes acima e registrar o valor de pico.

2.5.4 Medições

2.5.4.1 Ruído Contínuo

De acordo com a norma regulamentadora NR15, o nível de ruído contínuo ou intermitente deve ser medido usando o circuito de compensação A e a resposta lenta.

2.5.4.2 Ruído Flutuante

Existem várias formas de medir o ruído flutuante. A mais simples é aplicar uma distribuição estatística às leituras dos níveis de pressão sonora medidos em intervalos de tempo ao longo do dia. As amostras são medidas da mesma forma dos ruídos contínuos: resposta lenta e curva de ponderação A (CCDR, 2008).

Outro método é usar o nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}). Esse método consiste em encontrar o nível de ruído contínuo que possui a mesma energia acústica do sinal flutuante original (NBR 13369). O nível sonoro contínuo equivalente é dado por:

$$L_{eq} = 10 \log \int_0^T \frac{P(t)}{P_0} dt \quad (9)$$

Onde: P = Pressão da onda sonora;

P_0 = Pressão sonora de referência;

T = Período de medição;

t = tempo.

O tempo de medição é usado conforme a necessidade: 30 segundos, 30 minutos, 1 hora, 8 horas, etc (FERNANDES, 2002).

2.5.4.3 Ruído Impulsivo

Conforme a norma regulamentadora NR15, os níveis de impacto deverão ser avaliados usando o sonômetro no circuito de compensação C e resposta impulsiva. Nos intervalos entre os picos, o ruído existente deverá ser avaliado como ruído contínuo. Em caso de não dispor de aparelho com resposta ao impulso, a norma possibilita usar a resposta rápida e a curva de ponderação C.

2.6 DOSÍMETRO

O medidor de dose, chamado de dosímetro, é um aparelho que o trabalhador deve transportar durante toda a jornada de trabalho com o microfone instalado no abafador de ouvido. O cálculo da dose de ruído é uma variação do cálculo do nível sonoro contínuo equivalente. Enquanto o L_{eq} expressa o ruído em dBA, o dosímetro apresenta a medida como uma porcentagem da exposição diária permitida (NR 15).

A exposição diária permitida é definida pela norma regulamentadora 15, que tem força de lei no Brasil. A Tabela 7 apresenta os valores para os limites de exposição diária para o ruído.

Tabela 7 – Limites de exposição diária ao ruído.

Nível de Ruído dB(A)	Máxima exposição diária permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: NR 15.

A dose é calculada pela seguinte equação:

$$D = \frac{C}{T} \cdot 100 \quad (10)$$

Onde: D = dose (%);

C = tempo total que o trabalhador fica exposto a um nível de ruído específico;

T = máxima exposição diária permissível a este nível.

Se o cálculo da dose resultar 100%, indica que o nível de ruído do ambiente está no limite permitido.

Para ruídos flutuantes a equação passa a ser:

$$D = 100 \left(\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \right) \quad (11)$$

Onde: D = dose (%);

C_n = tempo total que o trabalhador fica exposto a um nível de ruído específico;

T_n = máxima exposição diária permissível a este nível;

n = número de períodos.

Para o cálculo de ruídos flutuantes, o período total é dividido em n períodos e durante cada período é calculado o L_{eq} . Esses valores são então comparados com os da Tabela 7 para serem colocados na equação 8.

2.7 APARELHOS COMERCIAIS

A maior parte dos sonômetros comercializados não tem a função de apresentar a distribuição do sinal nas diversas frequências e só apresentam o nível de pressão sonora total. As curvas de ponderação A e C são realizadas através de filtros analógicos.

Os dosímetros encontrados com maior frequência no mercado apresentam apenas valores da dose de ruído, não sendo capazes de fornecer o valor do nível de pressão sonora. Utilizam filtro analógico para curva de ponderação A.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 DEFINIÇÃO DO CIRCUITO

O projeto consiste em desenvolver um aparelho capaz de calcular a intensidade total do sinal sonoro, a intensidade para as dez oitavas de frequência audíveis e a dose de ruído. Ele deve ser um sonômetro do tipo 2, apresentar curvas de resposta lenta, rápida e impulsiva e ponderação em frequência A e C.

A primeira parte do projeto foi definir os componentes usados no produto. A escolha foi baseada no diagrama em blocos apresentado na Figura 25. No decorrer deste capítulo serão apresentados os principais componentes mostrados no diagrama.

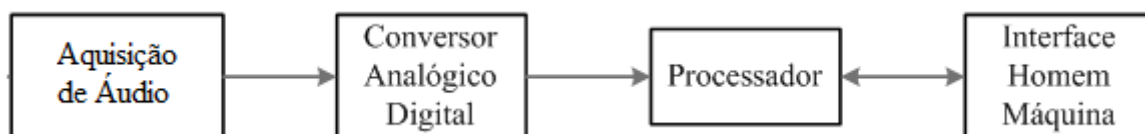


Figura 25 – Diagrama em blocos do medidor de intensidade sonora.

3.1.1 Aquisição de áudio

O circuito de aquisição de áudio deve ser capaz de responder a estímulos sonoros de forma rápida sem distorcer o sinal. Para isso foi escolhido como transdutor o microfone do tipo condensador modelo ECM8000 da Behringer. Ele foi escolhido entre vários modelos de microfones condensadores por ser onidirecional e apresentar resposta em frequência linear, conforme pode ser visto na Figura 27. A imagem do microfone é mostrada na Figura 26.



Figura 26 - Microfone ECM8000.
Fonte: AKG Inc (2007).

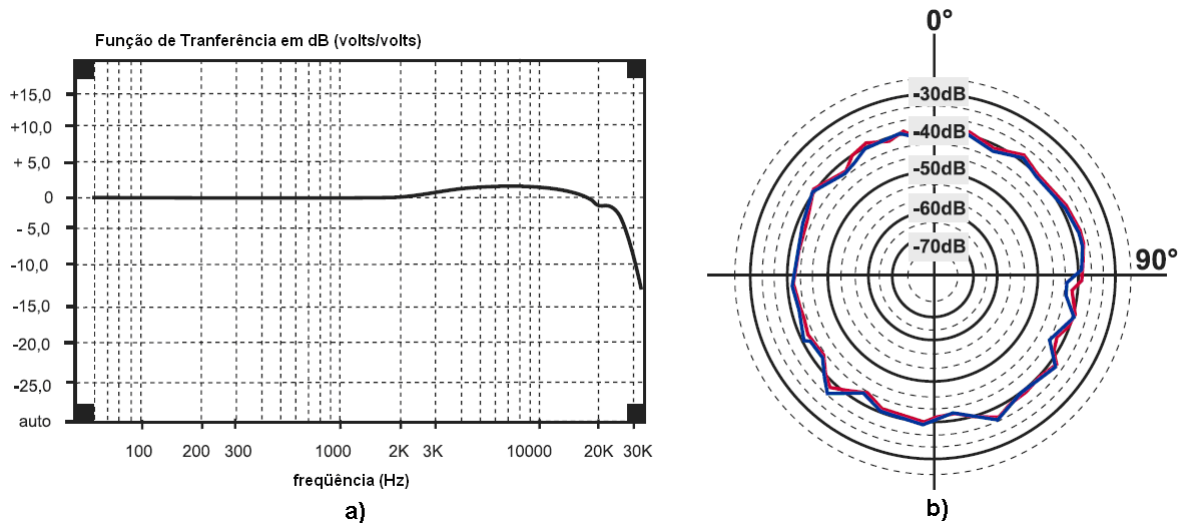


Figura 27 – Dados do microfone ECM8000. a) Resposta em Freqüência; b) Resposta Espacial.
Fonte: BEHRINGER GmbH (2000).

Para usar o microfone do tipo condensador foi necessário usar um pré-amplificador para o sinal de saída do microfone e uma tensão *Phantom Power* de 24V.

Para amplificação do sinal de saída do microfone, foi utilizado o amplificador de ganho programável (PGA) modelo PGA2500 da *Texas Instrument*. Ele possui entrada e saída diferenciais e ganho programável através de comunicação serial. O ganho é programado em decibels e pode ser unitário ou variar de 10 a 65 dB em passos de 1 dB. Sua impedância diferencial de entrada é de 9600 Ω , ideal para ser usado junto ao microfone escolhido que possui impedância diferencial de 600 Ω .

A Figura 28 apresenta a curva de resposta do PGA2500 em relação ao ganho programado.

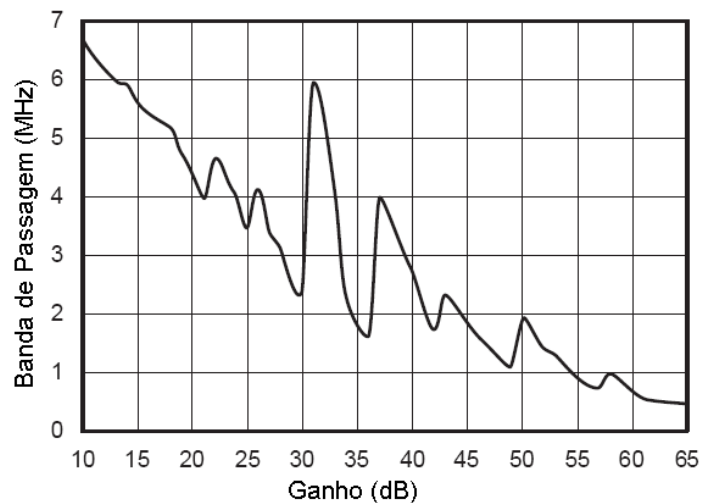


Figura 28 – Ganho banda do PGA2500.
Fonte: TEXAS INSTRUMENT (2003)

Com esta configuração, o circuito de aquisição de sinais precisava de alimentação $\pm 5V$ para o PGA2500 e $+24V$ de *Phantom Power* para o microfone. Devido à tensão de $24V$, foi colocado um circuito de proteção entre o microfone e o PGA.

A Figura 29 apresenta o diagrama em blocos do circuito de aquisição de sinais.

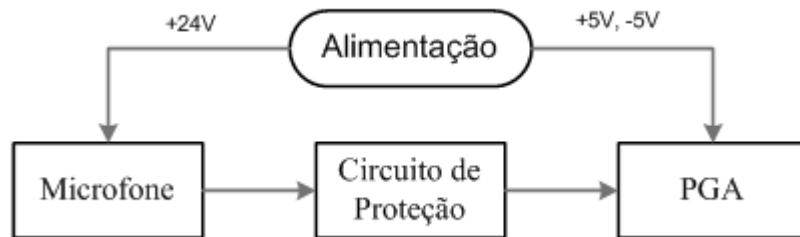


Figura 29 – Diagrama em blocos do circuito de aquisição de sinal.

3.1.2 Conversão do Sinal

O nível de pressão sonora da região audível sem desconforto acústico está entre $20\mu Pa$ e $20 Pa$, ou seja, o último valor da escala é 1.000.000 (um milhão) de vezes maior que o primeiro.

Com o ajuste do ganho do amplificador é possível medir toda a faixa de áudio, mas quanto maior a resolução do conversor analógico digital (ADC), maior será a faixa de áudio que ele será capaz de medir sem que o ganho do amplificador precise ser modificado.

Para abranger a maior faixa possível foi usado o conversor ADS1271 da Texas *Instrument*. Ele é um conversor sigma delta de 24 bits e possui entrada diferencial com tensão de modo comum de $+2,5V$.

A tensão de modo comum também deve ser usada no PGA para que sua saída seja compatível com a entrada do ADC.

O microfone capta sinais com frequência acima da audível. Para que esses sinais não causem erro no processamento foi colocado entre o PGA e o ADC um filtro *anti-aliasing* com frequência de corte em $24 kHz$. A frequência de amostragem do sinal foi de $48 kHz$.

A Figura 30 apresenta o diagrama em blocos do circuito de conversão dos sinais.



Figura 30 – Diagrama em blocos do circuito de conversão dos sinais.

3.1.3 Interface Homem Máquina (IHM)

A interface homem máquina consiste em quatro botões direcionais e um display de cristal líquido (LCD) gráfico de 128x64 pixels modelo PE12854-004 da Powertip. Para o programa de testes foram usados três botões para configuração do sonômetro e um botão com o fim de detectar possíveis erros de programação. Esta detecção é feita parando o programa em alguns locais pré-definidos até que o botão seja pressionado. Este botão pode ser configurado posteriormente com outra função. A Figura 31 apresenta a disposição da IHM na placa e um exemplo de como poderia ficar a aparência final do produto.

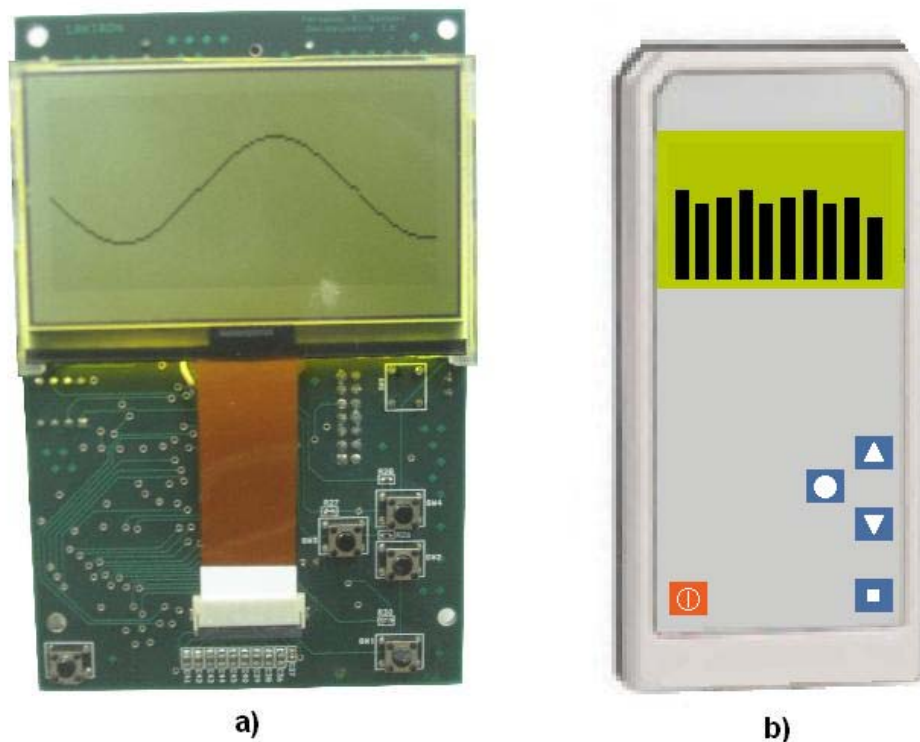


Figura 31 – Interface IHM. a) Placa de circuito impressa; b) Exemplo de bastidor.

Os três botões em uso servem para mover o cursor para cima, para baixo ou selecionar a opção desejada. Na Figura 32 são mostradas três telas da interface IHM.

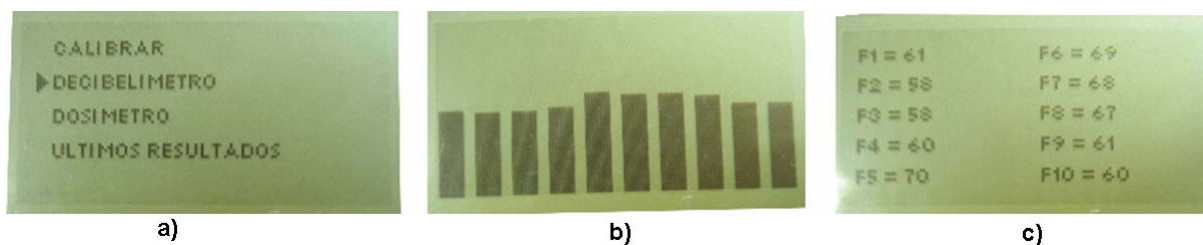


Figura 32 – Exemplos de tela da interface IHM. a) Tela inicial; b) Resultado gráfico do sonômetro com análise de frequências; c) Resultado descritivo do sonômetro com análise de frequências.

A tela inicial do equipamento é utilizada para que o usuário calibre o equipamento, meça o nível de pressão sonora, a dose de ruído ou reveja os últimos resultados medidos. O resultado dos níveis de pressão sonora distribuídos na frequência pode ser visualizado de forma gráfica ou descritiva.

3.1.4 CONTROLE E PROCESSAMENTO DO SINAL

Como já visto, o sinal é amostrado pelo ADC a uma taxa de 48.000 amostras por segundo. O sonômetro deve ser capaz de processar essas amostras em tempo real, sem perder qualquer parte do sinal. Para isso foi utilizado um processador digital de sinais (DSP) modelo TMS320VC5402A da Texas *Instrument*.

Esse processador opera com 16 bits e possui 64k bytes de memória interna, dividida da seguinte forma:

- ROM (*Read Only Memory*) com 32k bytes de capacidade (16k x 16);
- RAM (*Random Access Memory*) com 32k bytes de capacidade (16k x 16).

A ROM é programada pelo fabricante e não será usada. O programa será gravado em uma memória externa e é carregado no DSP cada vez que o mesmo for ligado (*bootloader*). Para que o espaço de memória não seja insuficiente foi incluída ao circuito uma memória paralela com 64k bytes de capacidade.

A Figura 33 apresenta o diagrama em blocos com o esquema de ligação do DSP com os outros componentes.

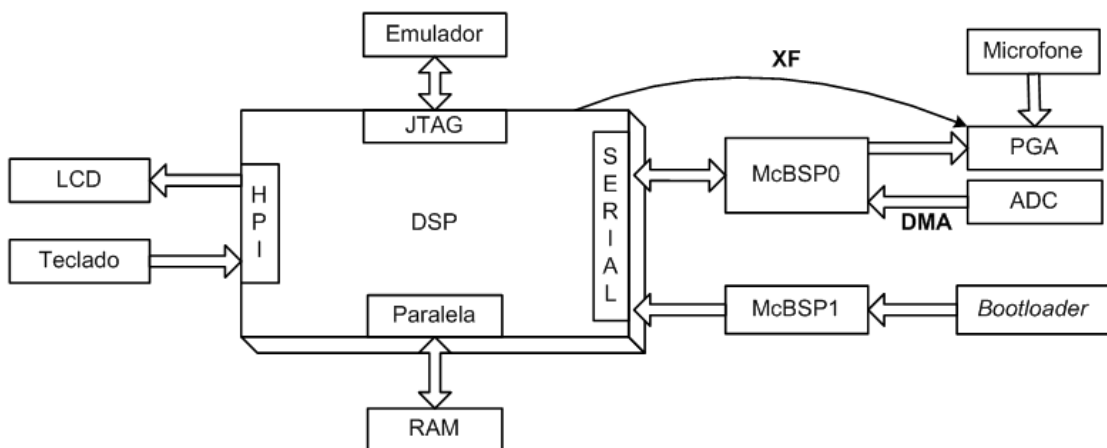


Figura 33 – Esquema de conexões do DSP.

Os dados capturados pelo ADC são gravados no DSP através de acesso direto à memória (DMA). Devido às configurações de transmissão e recepção da serial foi necessário usar o pino XF (propósito geral) do DSP para enviar o sinal de sincronismo para o PGA.

A comunicação para carga do *firmware* é realizada através da porta de comunicação serial 1 (McBSP1) e a comunicação com o ADC e o PGA é feita através da porta serial 0 (McBSP0).

A comunicação com a memória RAM externa é realizada através da interface paralela de 16 bits do DSP.

O emulador é conectado ao DSP através da interface JTAG.

A interface HPI (*host port interface*) é uma interface paralela de 8 bits que foi configurada como propósito geral para que seus pinos fossem usados separadamente, podendo ser configurada parte dos pinos como entrada e parte como saída de dados.

3.1.5 Alimentação

Os níveis de tensão necessários para os componentes do circuito são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Níveis de tensão para os componentes da placa.

Componente	Microfone	PGA	ADC	LCD	DSP
Nível de Tensão (V)	+24	+2,5;+5;-5	+2,5;+3,3;+5	+5	+1,6;+3,3

A partir da tensão fornecida por três pilhas AA em série (4,5V) foram implementados circuitos para elevar ou abaixar as tensões até os níveis de trabalho de cada componente.

3.2 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

Com o circuito já definido passou-se para a etapa de desenvolvimento do *layout* da placa de circuito impresso. Foi usado o *software* ORCAD[®] para esse fim.

Durante o projeto foram elaboradas duas versões de *layout*. A primeira versão era para ser conectada ao *kit* de desenvolvimento do DSP e por isso só continha a parte de aquisição e conversão do sinal. Os testes com a primeira versão da placa mostraram que o circuito elaborado estava correto, porém existia muito ruído interferindo nos sinais.

Para diminuir os ruídos na nova versão da placa, esta foi dividida em três blocos:

- Bloco analógico de entrada: microfone, circuito de proteção, entradas do PGA e alimentação de +24V;
- Bloco analógico: saída do PGA, entrada do ADC e alimentação de +5V e -5V;
- Bloco digital: saída do ADC, pinos de configuração do PGA e todo o resto do circuito.

O bloco digital foi separado do analógico devido ao ruído do *clock* digital. Foram criados dois blocos analógicos porque o conversor DC/DC que eleva a tensão de +6V para +24V gera ruídos que podem atrapalhar a configuração do PGA. A ligação entre cada um dos três blocos de circuitos é feita somente via indutores, capacitores e/ou resistores de filtro.

A placa foi elaborada em quatro camadas, sendo uma camada para malha de terra, uma camada para trilhas de alimentação e duas camadas para as demais trilhas. A placa tem dimensão de 80x120mm e seu *layout* final é mostrado na Figura 34.

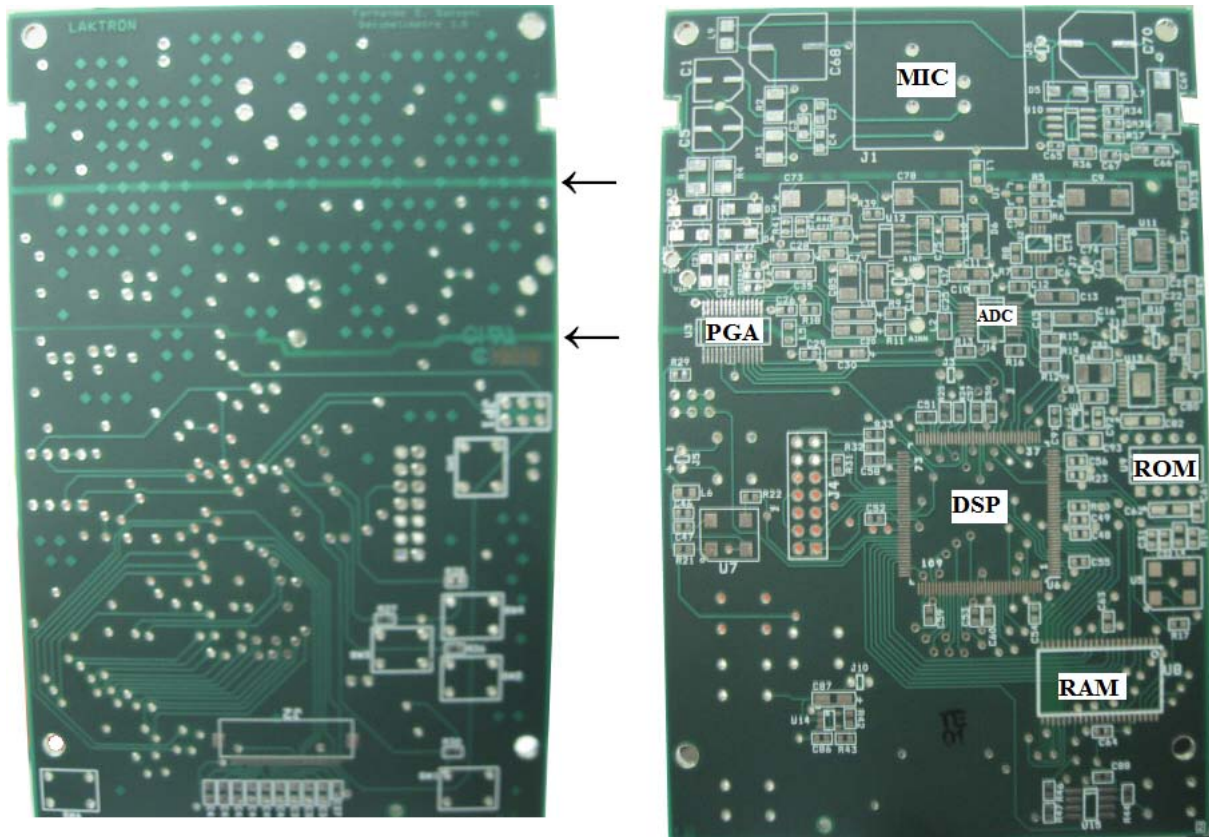


Figura 34 – Layout final da placa de circuito impresso. A seta superior indica o ponto de separação entre o bloco analógico de entrada e o bloco analógico; A seta inferior indica a separação entre o bloco analógico e o bloco digital.

3.3 TESTES

Foram realizadas cinco etapas de análises:

1ª – Comparação dos resultados do *firmware* com os requeridos pelas normas IEC651 e ANSI 1.11;

2ª – Teste do recebimento do sinal pelo DSP;

3ª – Teste comparativo entre o resultado teórico e prático da Transformada Rápida de Fourier (FFT);

4ª – Teste comparativo entre o sonômetro desenvolvido e um comercial;

5ª – Teste comparativo entre o resultado da dose medida no equipamento em relação à medida em um equipamento comercial.

Os testes 1, 2 e 3 foram realizados usando a curva de ponderação C, enquanto os testes 4 e 5 usaram a curvaram de ponderação A.

3.3.1 Comparação do Resultado Teórico com os Requeridos pelas Normas

A norma IEC651 apresenta valores máximos para erros de medição da intensidade total e na medição das intensidades de cada raia de frequência e a ANSI 1.11 especifica as frequências de corte para os filtros de oitava. Iniciaram-se os testes de comparação teóricos para descartar que o software desenvolvido contemplava o requerido pelas normas.

A própria FFT pode ser usada como filtro para o sinal e por isso o resultado da FFT foi usado para calcular a pressão sonora do sinal em cada banda de oitava. A primeira parte do *firmware* foi desenvolvida para testar o melhor número de amostras a serem adquiridas e se o uso de filtros digitais e a transformada rápida de Fourier iriam atender o requerido pelas normas. Foi usado o emulador de DSP do *code composer*[®] para o teste. Os sinais de entrada do *firmware* foram gerados através do Matlab[®].

Para o equipamento operar em tempo real, todas as amostras usadas no cálculo da FFT e a biblioteca de cálculo devem permanecer na memória interna do DSP. Para atender esses requisitos foi definido que a FFT teria 512 pontos.

Com 512 pontos e frequência de amostragem de 48kHz a FFT tem resolução de 93,75Hz. Porém a resolução mínima necessário para sinais audíveis é de 20Hz. Para solucionar esse problema o processamento foi dividido em dois blocos chamados de baixas frequências ($f < 375\text{Hz}$) e altas frequências ($f \geq 375\text{Hz}$). O cálculo das altas frequências é feito mantendo a resolução de 93,75Hz e o das baixas frequência é feito após o sinal passar por um filtro de decimação com fator 8, o que aumento a resolução para 11,72Hz.

O fluxograma do *software* de teste desenvolvido é mostrado na Figura 35. Nesse momento não foi aplicada a curva de ponderação.

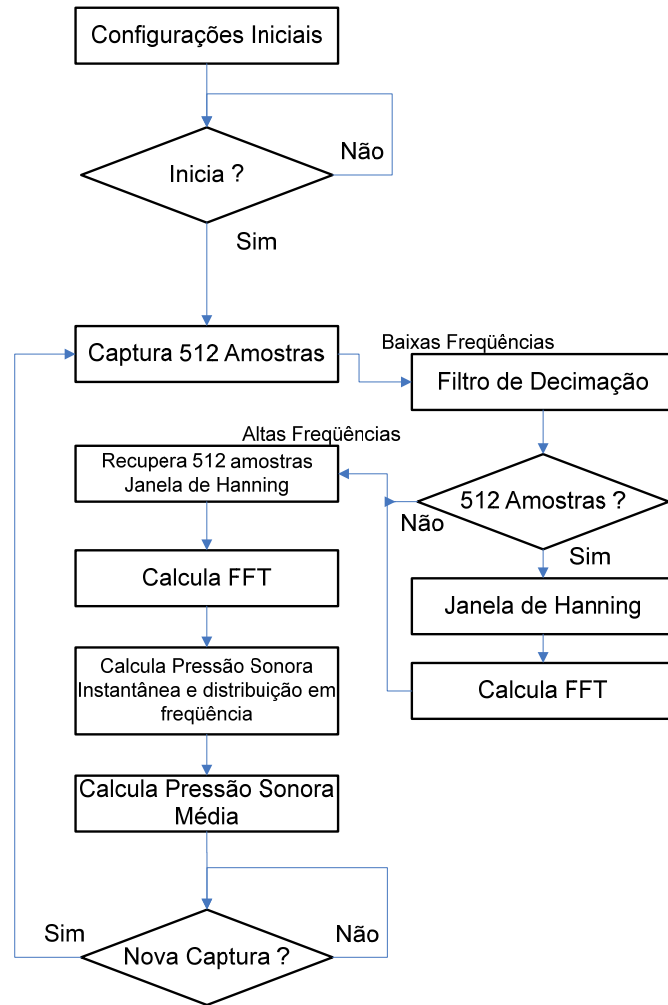


Figura 35 – Fluxograma do *software* usado na comparação com as normas.

3.3.1.1 Teste de acordo com a norma IEC 651

O mesmo software foi usado para medir sinais usando resposta rápida, lenta e impulsiva e verificar se os resultados não apresentavam diferença maior que 0,1dB para mesmos sinais e exatidão de ± 1 dB. Como entrada foram usadas ondas contínuas (senoidais e quadradas) criadas no Matlab[®].

O nível de pressão sonora que um sonômetro começa a medir é bem superior ao nível de referência. Por isso, considerando V_0 a tensão de referência, foram usadas ondas senoidais com amplitude mínima igual a $600.V_0$ para traçar as curvas de resposta dos filtros. Para verificar se existia diferença de resposta quando a amplitude variava foi analisada a resposta dos filtros para diferentes amplitudes.

As ondas quadradas foram criadas usando harmônicas de no máximo 24kHz, para simular o efeito do filtro *anti-aliasing* existente no protótipo.

3.3.1.2 Teste de Acordo com a Norma ANSI S1.11

Os filtros do *software* estão ajustados para frequências centrais iguais as de sonômetros de banda de oitava restrita, mais a frequência de 8 kHz. Para verificar se os filtros estavam de acordo com a curva de atenuação mostrada na Figura 24 foram usados sinais de entrada com mesma amplitude e frequências variando de 32 Hz a 12 kHz.

Para verificar a influência da amplitude do sinal no resultado da FFT, foram utilizados sinais senoidais de 32, 100, 250, 350, 1000, 2500 e 8000 Hz com 3 níveis de amplitude diferente. Esse teste é feito para verificar se a informação que será mostrada ao usuário está em conformidade com o solicitado pela ANSI S1.11.

3.3.2 Teste de Recebimento do Sinal e interface Homem Máquina

Para verificar se o sistema de aquisição era capaz de capturar os sinais sonoros dentro da faixa audível e se a interface homem máquina estavam corretas foram retiradas as rotinas de cálculo da FFT e inseridas as rotinas de configuração inicial da comunicação serial (McBSP0), de configuração do acesso direto a memória (DMA), de inicialização e uso do LCD e configuração de ganho do PGA.

Usou-se um alto-falante ligado a um gerador de sinais para reproduzir sons dentro da faixa audível. A frequência e a amplitude do sinal foram alteradas e a resposta no display era observada. O mesmo teste foi repetido três vezes para diferentes ganhos do PGA.

O fluxo de dados para esse programa é mostrado na Figura 36.

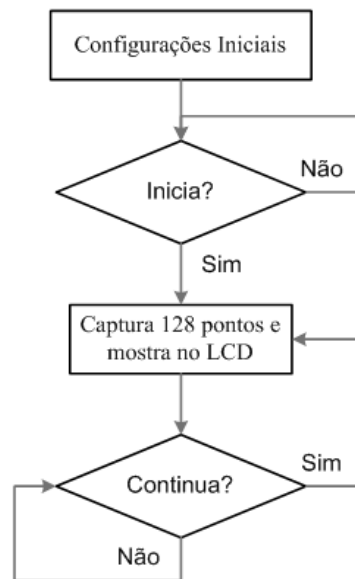


Figura 36 – Fluxograma do programa de teste de recepção.

3.3.3 Teste entre FFT Teórica e Prática

Terminados os testes teóricos de software e os testes iniciais de hardware, foram incluídas novamente as funções de cálculo de nível de pressão sonora colocando a opção de escolha de curva de ponderação e a inclusão do programa de cálculo da dose.

A versão final do *firmware* foi desenvolvida para processamento do sinal em tempo real, realizando o processamento e a armazenagem dos dados simultaneamente. Para isso foi alocado um *buffer* com capacidade para armazenar 1024 amostras vindas pela DMA. A cada 512 amostras recebidas, era gerada uma interrupção para que os cálculos desses dados fossem efetuados enquanto o sistema continuava a receber os próximos 512 dados.

Para verificar se o programa completo apresentava resultados próximos ou distantes dos teóricos foi emulado novamente o programa da Figura 35 usando sinais de entrada com os valores de 190, 500, 1000, 3000, 9000 e 16000 Hz.

Usou-se novamente a interface de gerador de sinais com o alto falante para gerar sinais senoidais com frequência de 1 kHz. O ganho do PGA e a amplitude do sinal do gerador foi alterada até que o resultado apresentado no *display* do protótipo fosse o mesmo calculado para a frequência de 1 kHz usando o software emulado. Depois da calibração, a amplitude foi mantida constante e foram gerados sinais com as outras frequências de teste.

O fluxograma do *firmware* desenvolvido e os arquivos que fazem parte dele são mostrados na Figura 37.

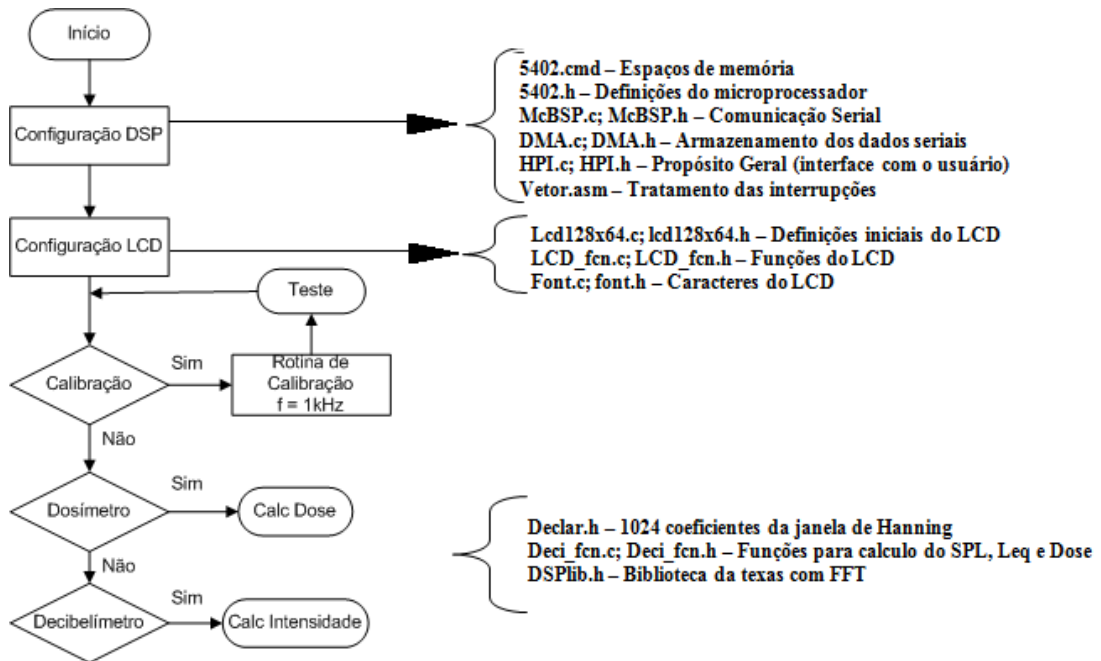


Figura 37 – Fluxograma para o cálculo da FFT.

O fluxograma da função de cálculo do nível de pressão sonora é apresentado na Figura 38.

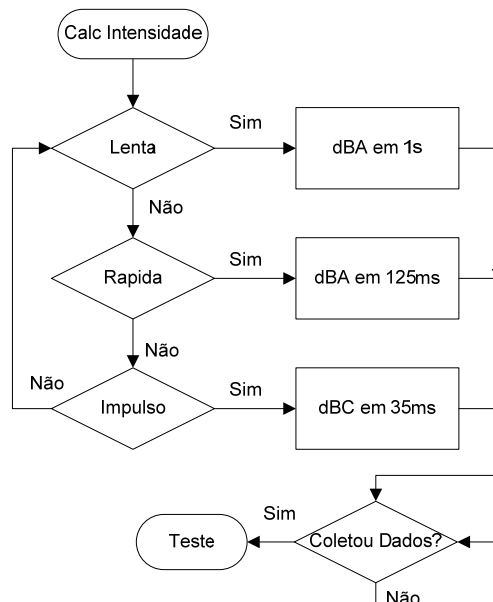


Figura 38 – Fluxograma para cálculo do nível de pressão sonora.

3.3.4 Curva de Resposta do Auto Falante com o Gerador de Sinais

Para que as variações nos resultados obtidos não fossem confundidos com a variação na resposta do circuito de geração de sinal, utilizou-se um sonômetro comercial para medir o nível de pressão sonora na saída do alto falante para sinais de mesma amplitude e frequências diferentes. A curva de resposta obtida é apresentada na Figura 39.

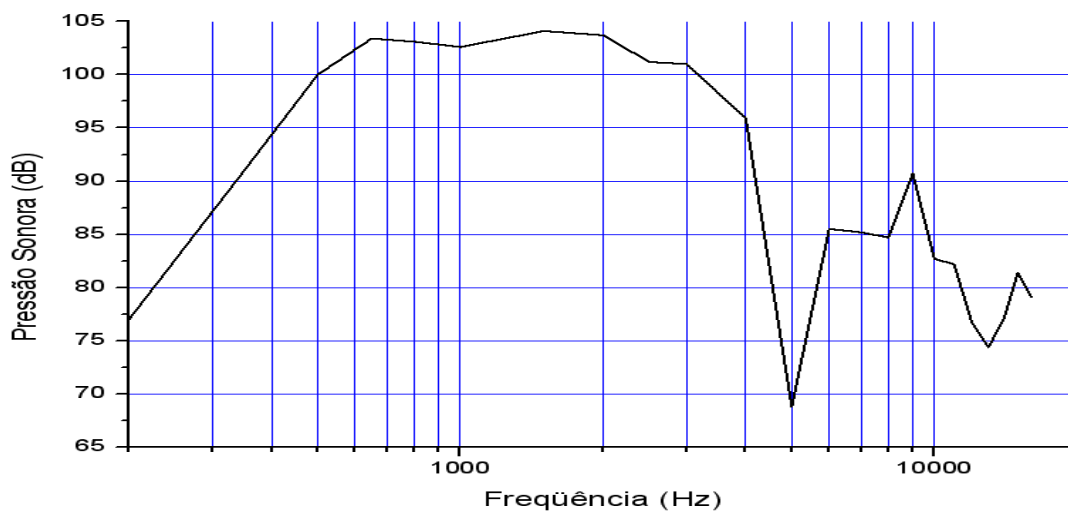


Figura 39 – Curvas de resposta do circuito com gerador de sinais e alto falante.

3.3.5 Comparação entre o Equipamento Projetado e um Comercial

Com o novo firmware, foram comparados os resultados do equipamento com um sonômetro e um dosímetro comercial. Os dois equipamentos utilizavam microfones direcionais.

Os testes de nível de pressão sonora foram realizados usando sinais sonoros de frequência fixa e com amplitudes variadas. O sonômetro foi programado para atualizar o valor medido a cada um segundo. Os testes para cálculo da dose de ruído foram feitos durante períodos de 5 e 10 minutos e considerando um período total de 8 horas. Nos testes com período de 10 minutos a frequência ou a intensidade do sinal sonoro era modificada a cada 30 segundos. Já nos testes de 5 minutos o sinal sonoro foi alterado de forma aleatória, para simular ruídos flutuantes e também de impacto.

Os resultados obtidos nos testes serão apresentados no capítulo seguinte para posterior análise dos resultados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 TESTE TEÓRICO DO SOFTWARE

4.1.1 Testes de acordo com a norma IEC 651

A tensão RMS relativa de uma onda senoidal com amplitude de pico igual a $600.V_0$ em relação a uma onda de tensão RMS igual a V_0 é:

$$V_{rel} = 20 \cdot \log \frac{600.V_0 / \sqrt{2}}{V_0} = 52,6dB$$

Onde: V_0 = Tensão de referência.

A Tabela 9 apresenta os valores das tensões relativas calculadas pelo *firmware* para ondas senoidais com amplitude de pico igual a $600.V_0$.

Tabela 9 – Tensão de ondas senoidais com amplitude de pico igual a $600.V_0$ em relação a onda com tensão RMS igual a V_0 .

Frequência (Hz)	Tensão relativa (dB)	Frequência (Hz)	Tensão relativa (dB)	Frequência (Hz)	Tensão relativa (dB)
16	56,3	220	56,2	2500	56,2
20	56,1	250	56,6	3500	56,1
24	56,0	300	57,4	4000	56,2
28	56,0	350	58,3	5000	56,2
32	56,0	450	56,0	5500	56,2
36	55,9	500	56,0	7500	56,0
40	56,0	600	56,2	8000	56,3
50	56,0	800	56,1	8080	56,2
60	55,9	900	56,2	9000	56,2
70	55,8	1000	56,0	10500	56,0
80	56,0	1090	56,1	13000	56,3
100	56,0	1200	56,1	15500	56,3
115	56,1	1350	56,2	16000	56,2
125	56,1	1500	55,7	16200	56,2
140	56,0	1800	56,1	18000	55,4
160	56,2	1900	56,1	20000	56,2
200	56,2	2000	56,3		

Alterando a amplitude de pico do sinal de entrada para $10000.V_0$ e $30000.V_0$, a tensão relativa passa a ser, respectivamente, de 77,0 e 86,5 dB. A Tabela 10 apresenta o resultado do *firmware* para ondas com essas amplitudes de pico.

Tabela 10 – Tensão relativa de ondas senoidais com diferentes amplitudes de pico.

Frequência (Hz)	Tensão relativa para amplitude de pico igual a $600 V_0$ (dB)	Tensão relativa para amplitude de pico igual a $10000 V_0$(dB)	Tensão relativa para amplitude de pico igual a $30000 V_0$(dB)
32	56,0	74,9	84,1
100	56,0	75,0	84,2
250	56,6	76,0	85,3
350	58,3	78,7	88,1
1000	56,0	74,9	84,1
2500	56,2	74,9	84,1
8000	56,3	74,9	84,1

A tensão relativa de ondas quadradas sem nível contínuo e com amplitude positiva e negativa de mesma magnitude ($600.V_0$) é dada por:

$$V_{rel} = 20. \log \frac{600.V_0}{V_0} = 55,6dB$$

E para ondas quadradas com nível contínuo de mesma magnitude do pico da onda quadrada, a tensão relativa é dada por:

$$V_{rel} = 20. \log \frac{1200.V_0 / \sqrt{2}}{V_0} = 58,6dB$$

A Tabela 11 apresenta as tensões relativas encontradas para ondas quadradas.

Tabela 11 – Tensão relativa de ondas quadradas com amplitude de pico igual a $600.V_0$.

Frequência	Tensão relativa sem nível DC (dB)	Tensão relativa com nível DC igual a $600.V_0$ (dB)	Tensão relativa com nível DC igual a $600.V_0$, sem a raia zero (dB)
32	61,0	63,9	62,1
100	61,5	64,3	62,0
350	61,6	65,0	62,9
1000	61,6	64,5	62,2
2500	60,2	63,4	61,4
8000	57,3	61,4	58,9

A Figura 40 apresenta a resposta em frequência da FFT do *firmware* para uma onda senoidal de amplitude igual a $600.V_0$ e frequência de 32Hz. No centro da figura é mostrada com maior detalhe a parte do espectro de frequência que fica ao redor da raia de 32Hz.

Os resultados mostrados desde a Figura 40 até a Figura 61 são usados para verificar se o uso da FFT com 512 amostra, a decimação e a mudança da constante de tempo causavam algum erro na distribuição do sinal em frequência.

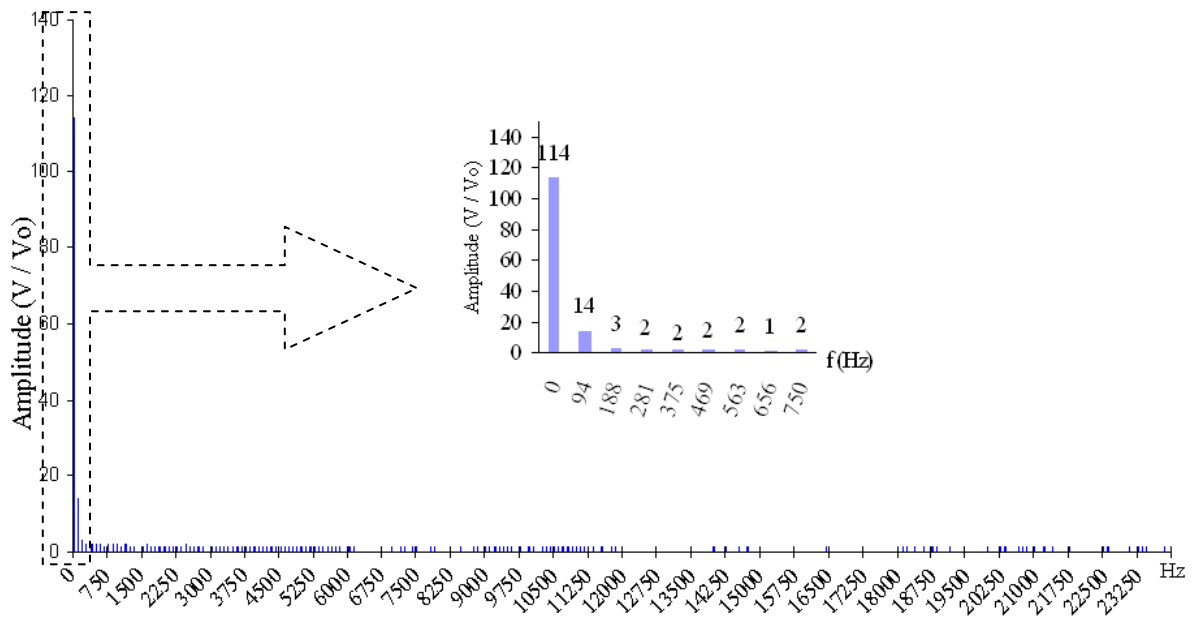


Figura 40 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 32 Hz.

A Figura 41 mostra as amplitudes das raiais de baixa frequência da onda de 32Hz.

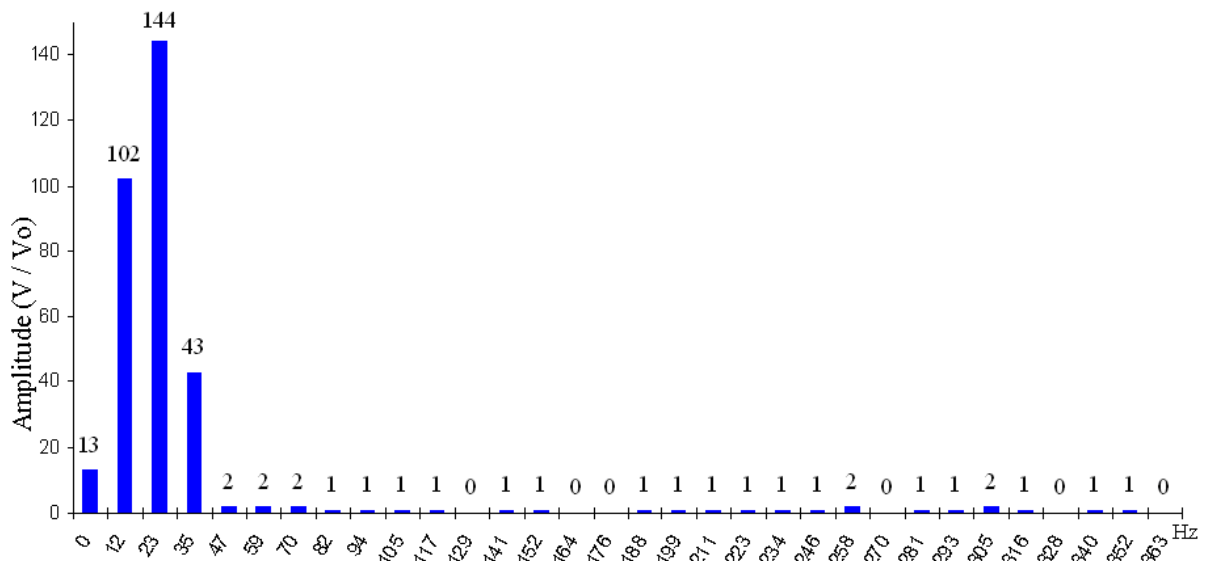


Figura 41 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 32 Hz (raiais de baixa frequência).

O espectro de frequência para a onda senoidal de 100 Hz é mostrado na Figura 42. No centro da figura é apresentado em detalhes as raia em torno da frequência de 100Hz.

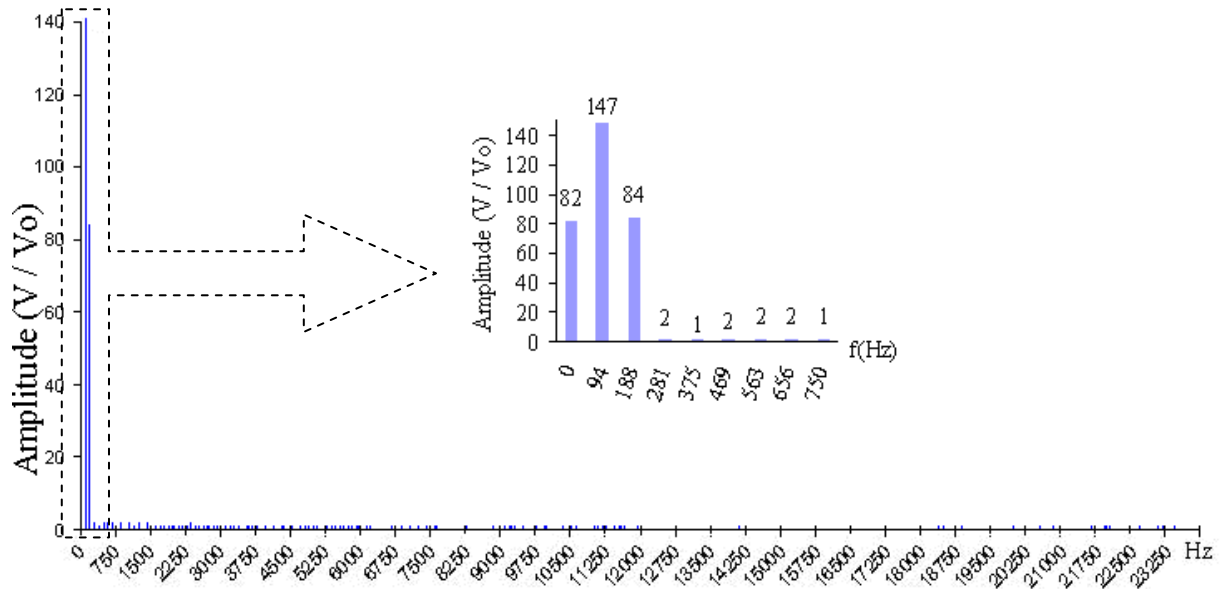


Figura 42 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 100 Hz.

O espectro de frequência das raia de baixa frequência é mostrado na Figura 43.

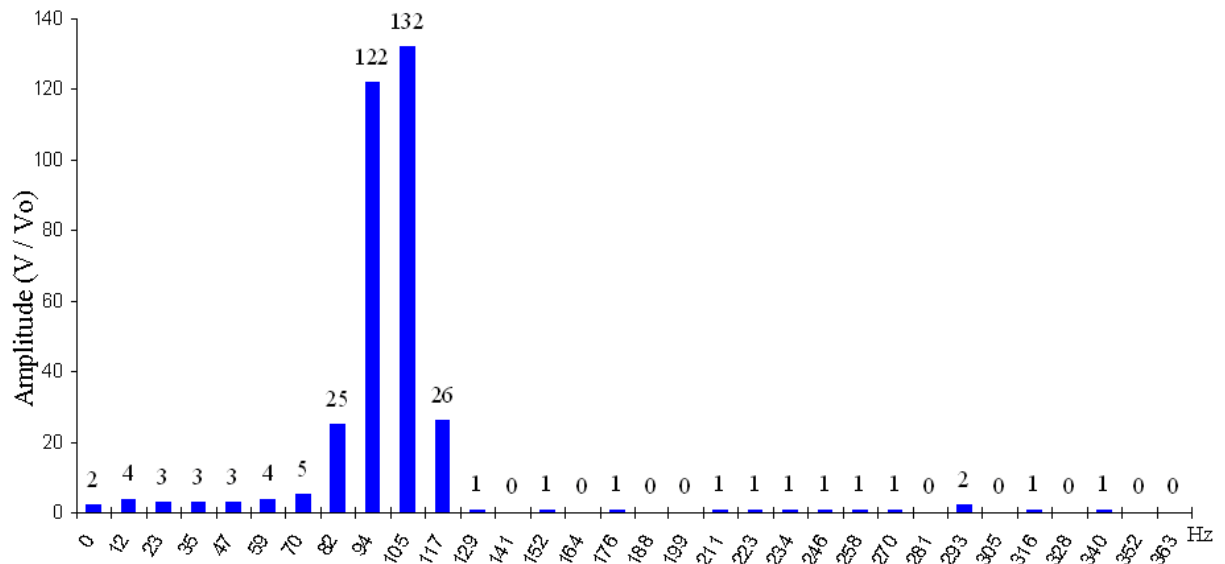


Figura 43 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 100 Hz (raia de baixa frequência).

A Figura 44 apresenta o espectro de frequência para a onda senoidal de 350Hz. No centro da figura é mostrado em detalhes as raias em torno da frequência de 350Hz.

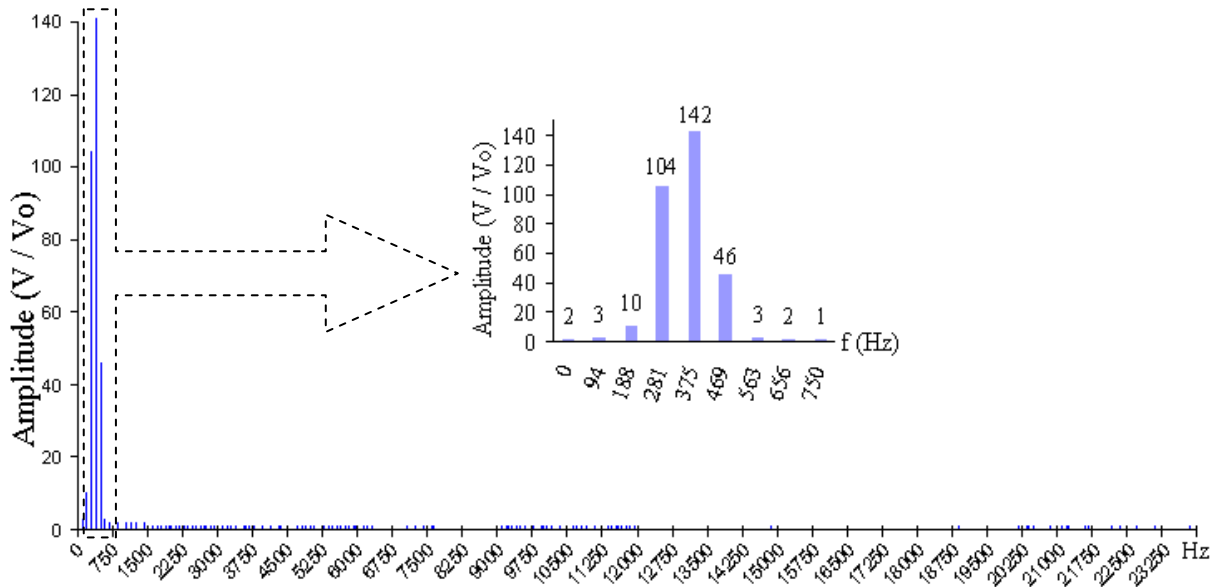


Figura 44 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 350 Hz.

O espectro de frequência para as raias de baixa frequência é apresentado na Figura 45.

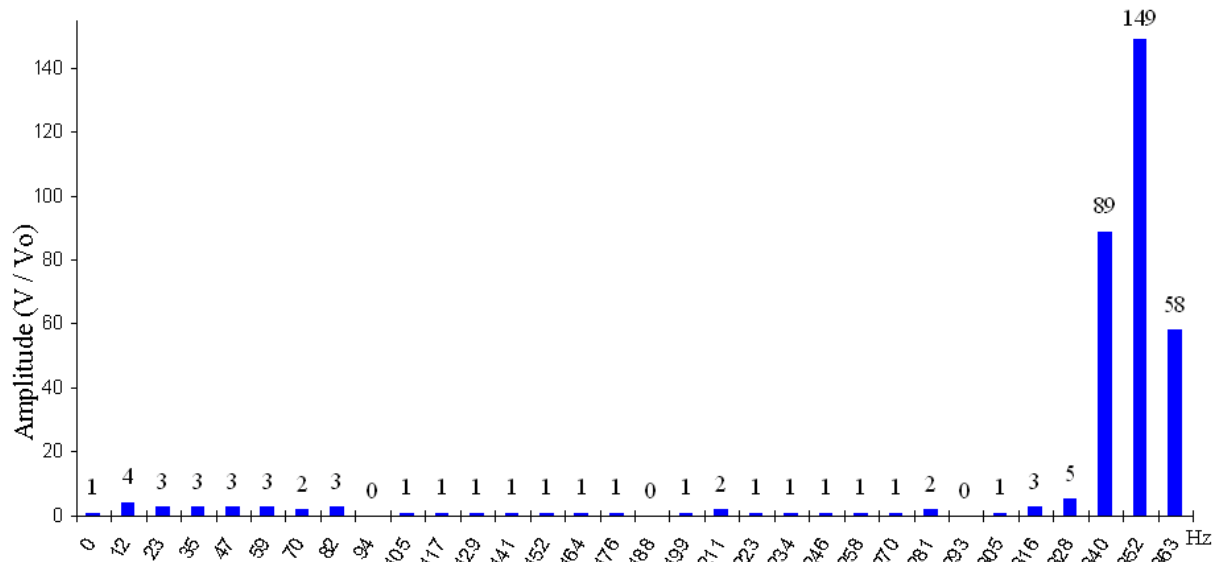


Figura 45 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 350 Hz (raias de baixa frequência).

Na Figura 46 é mostrado o espectro de frequência para a onda senoidal de 1kHz. No centro da figura é mostrado em detalhes as raíes em torno da frequência de 1kHz.

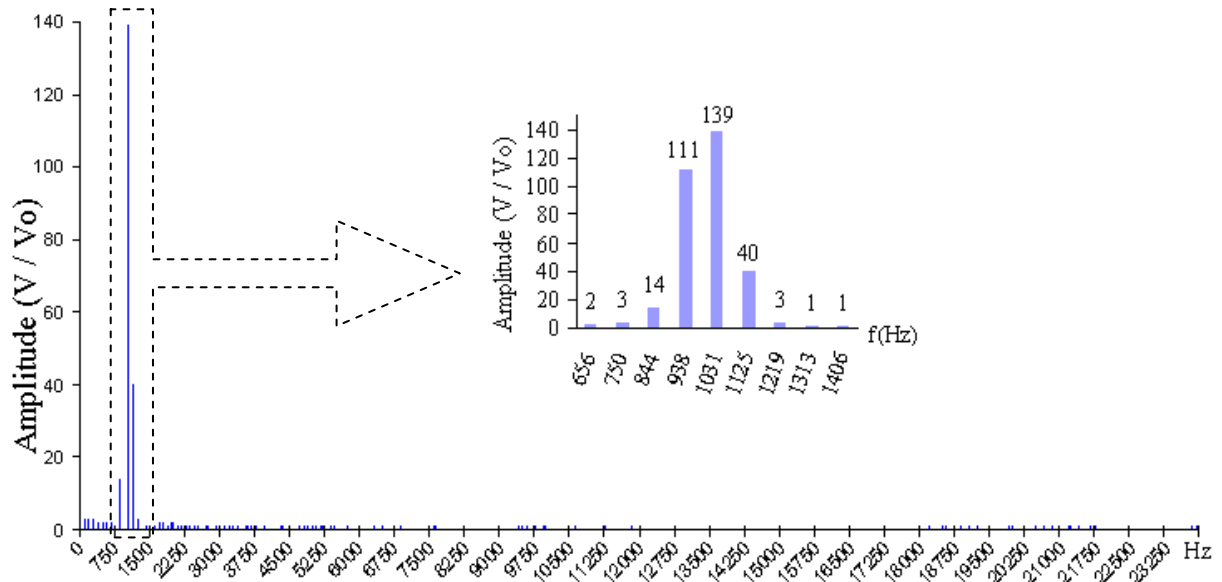


Figura 46 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 1000 Hz.

A Figura 47 apresenta o espectro de frequência para a onda senoidal de 1,5kHz. No centro da figura é mostrado em detalhes as raíes ao redor dessa frequência.

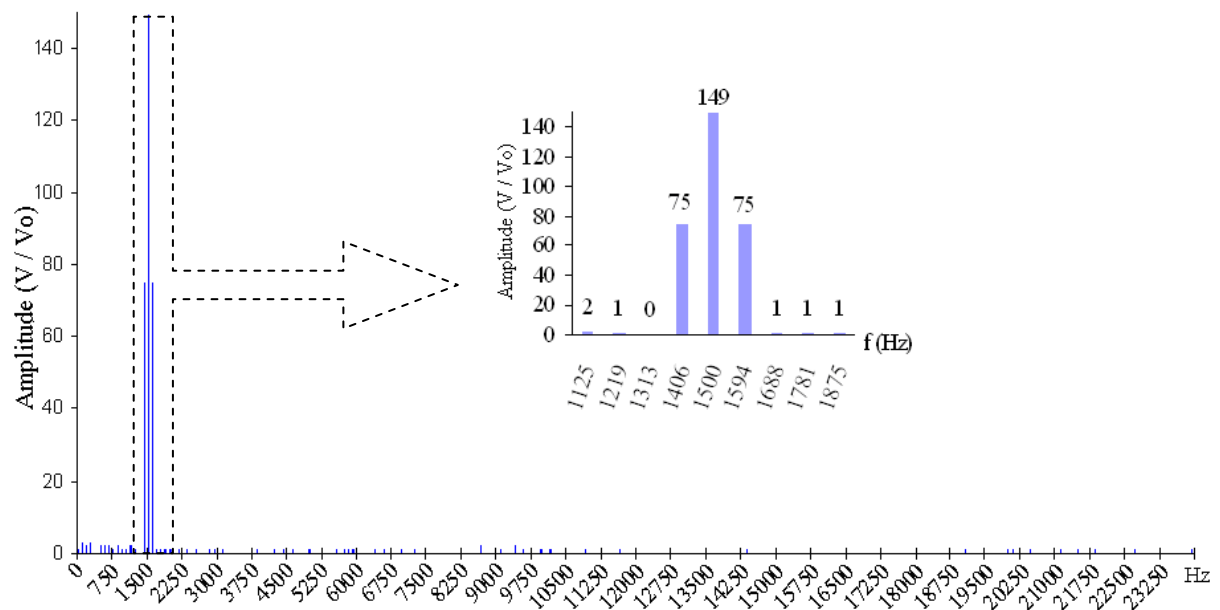


Figura 47 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 1500 Hz.

A Figura 48 apresenta o espectro de frequência da onda senoidal com e 8kHz. As raias ao redor dessa frequência são mostradas no detalhe.

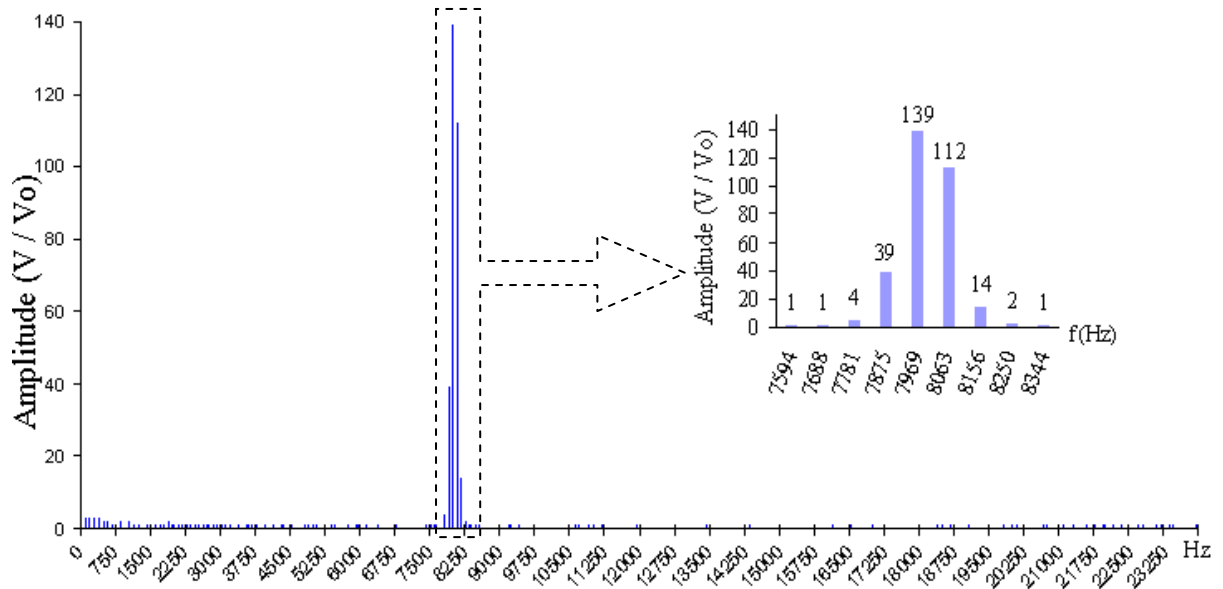


Figura 48 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 8000 Hz.

O espectro de frequência da onda senoidal de 16kHz é mostrado na Figura 49. No detalhe da figura são mostradas as raias ao redor da frequência de 16kHz.

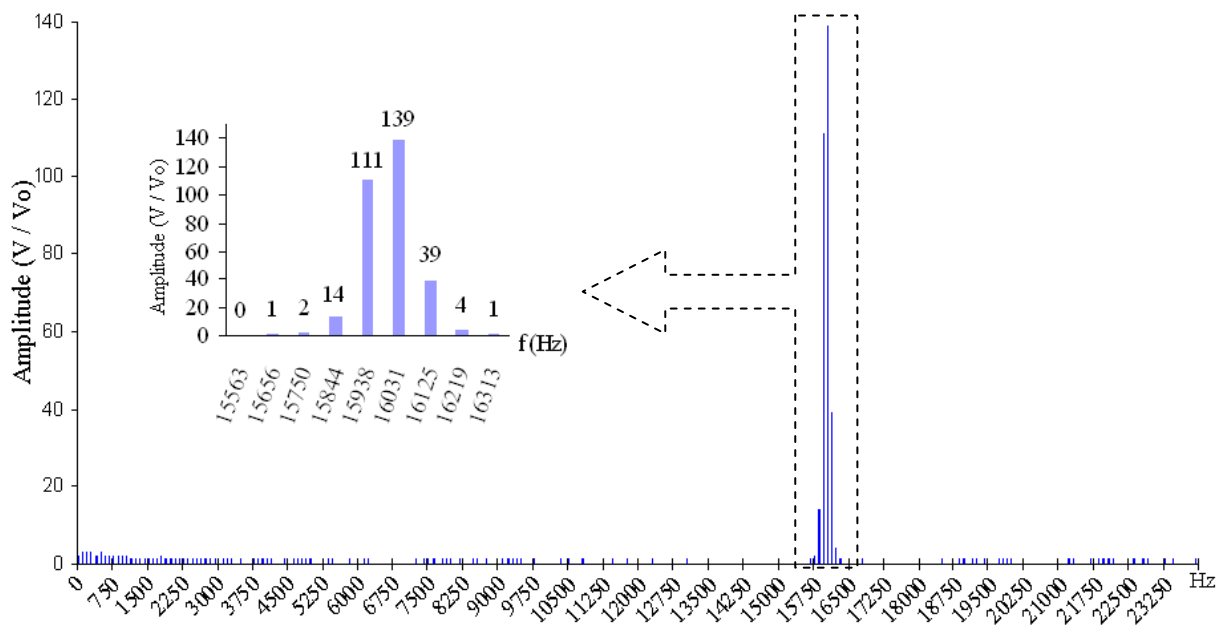


Figura 49 – Espectro de frequência para a onda senoidal de 16000 Hz.

A Figura 50 apresenta o espectro de frequência de uma onda quadrada com amplitude de pico igual a $\pm 600 V_0$ e a Figura 51 apresenta o espectro de frequência da mesma onda com nível contínuo de amplitude igual a $600 V_0$.

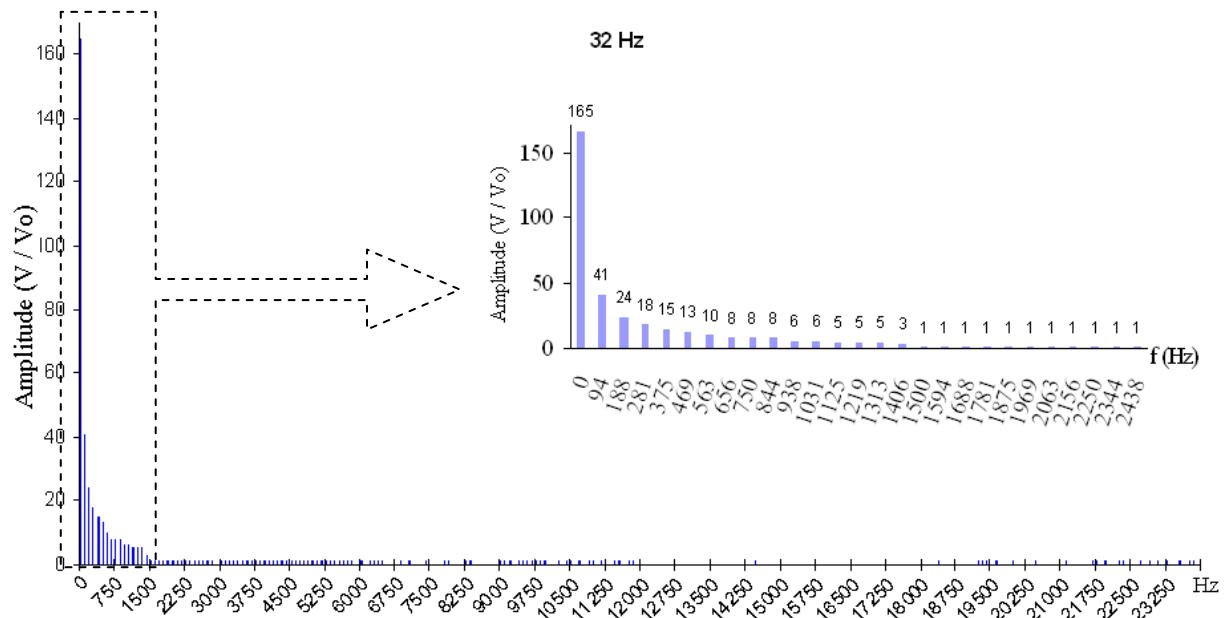


Figura 50 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz.

No centro das duas figuras aparece em detalhes as raias em torno da frequência de 32Hz.

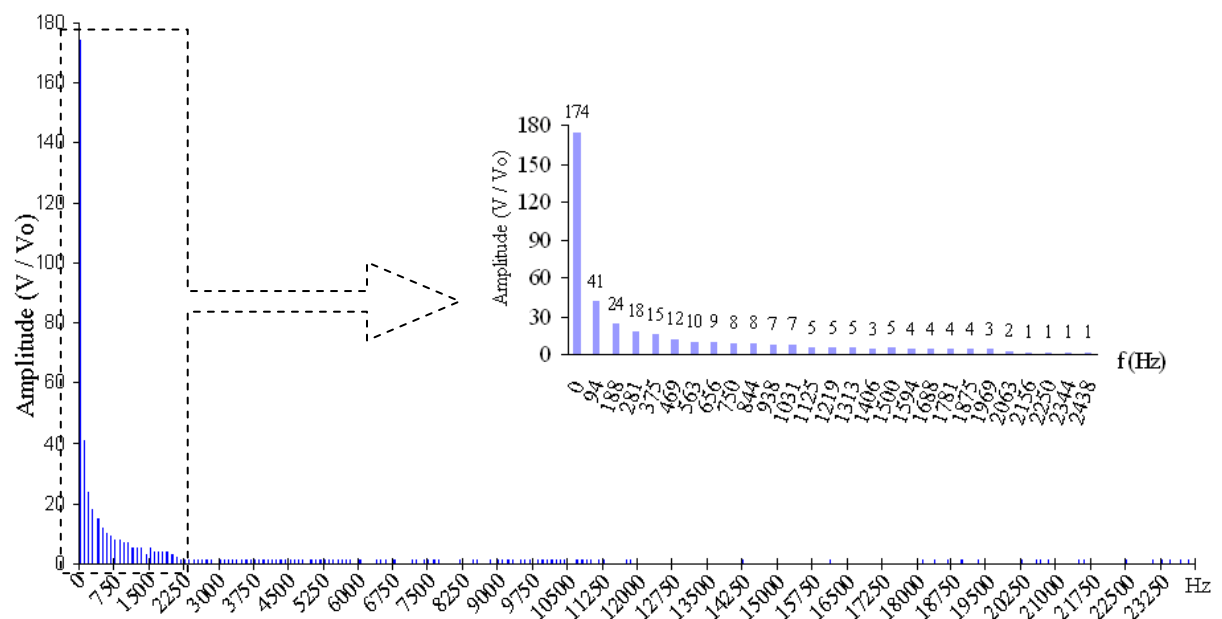


Figura 51 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz e nível contínuo de $600 V_0$.

Na Figura 52 é mostrado o espectro de frequência para as raiais de baixa frequência da onda quadrada sem nível contínuo.

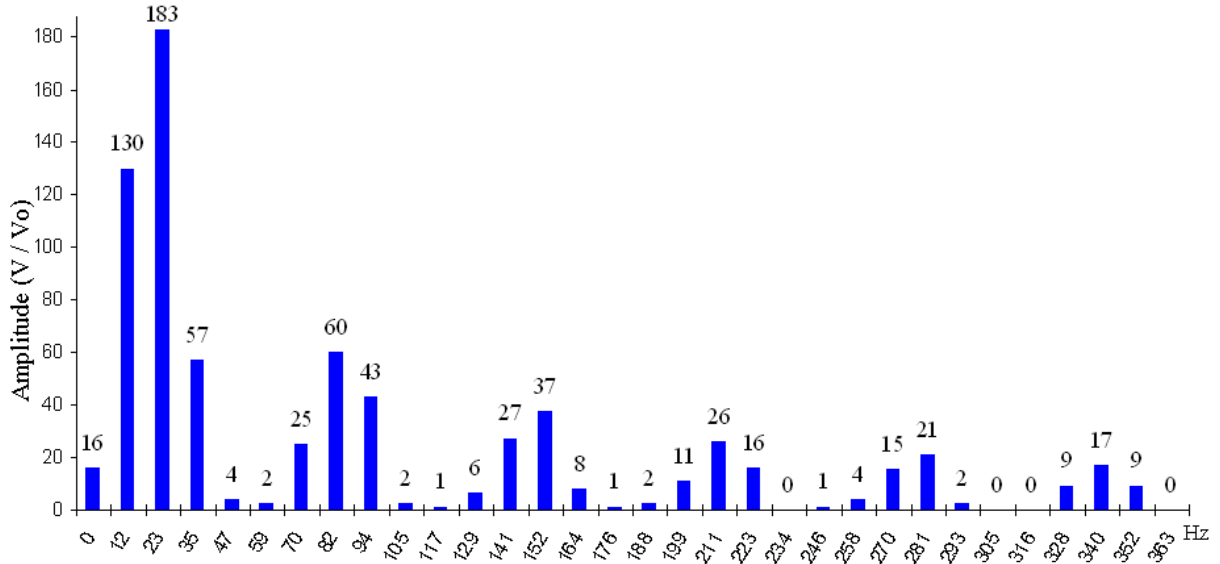


Figura 52 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz (raiais de baixa frequência).

O espectro de frequência para a onda quadrada com nível contínuo é mostrado na Figura 53.

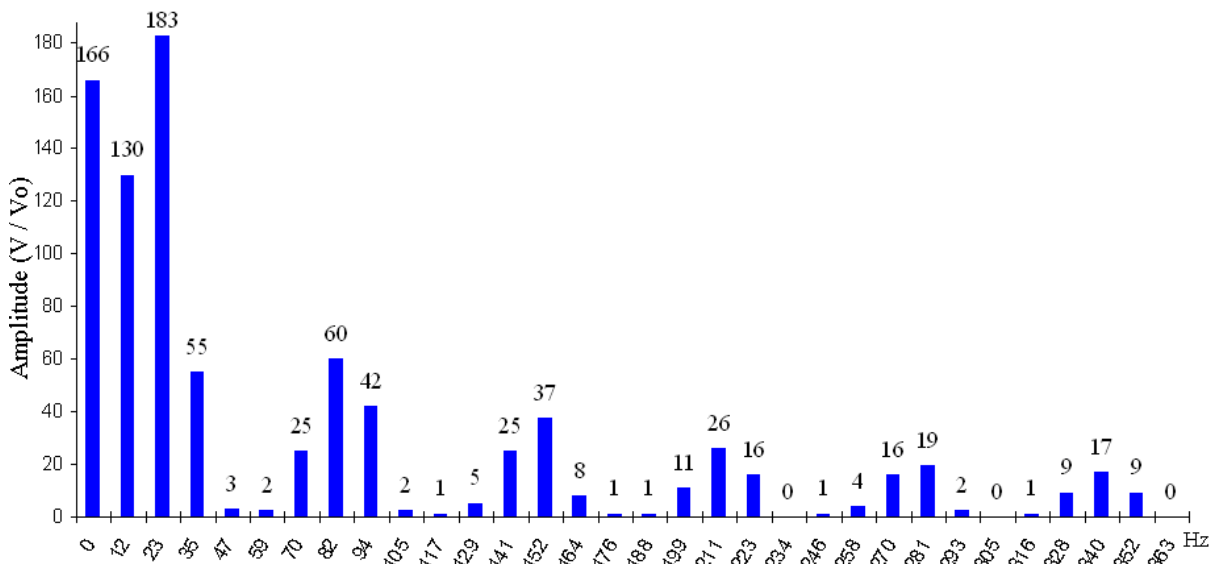


Figura 53 – Espectro de frequência para onda quadrada de 32 Hz com nível contínuo de $600V_0$ (raiais de baixa frequência).

A Figura 54 apresenta o espectro de frequência para a onda quadrada sem nível contínuo e a Figura 55 para a onda com nível contínuo.

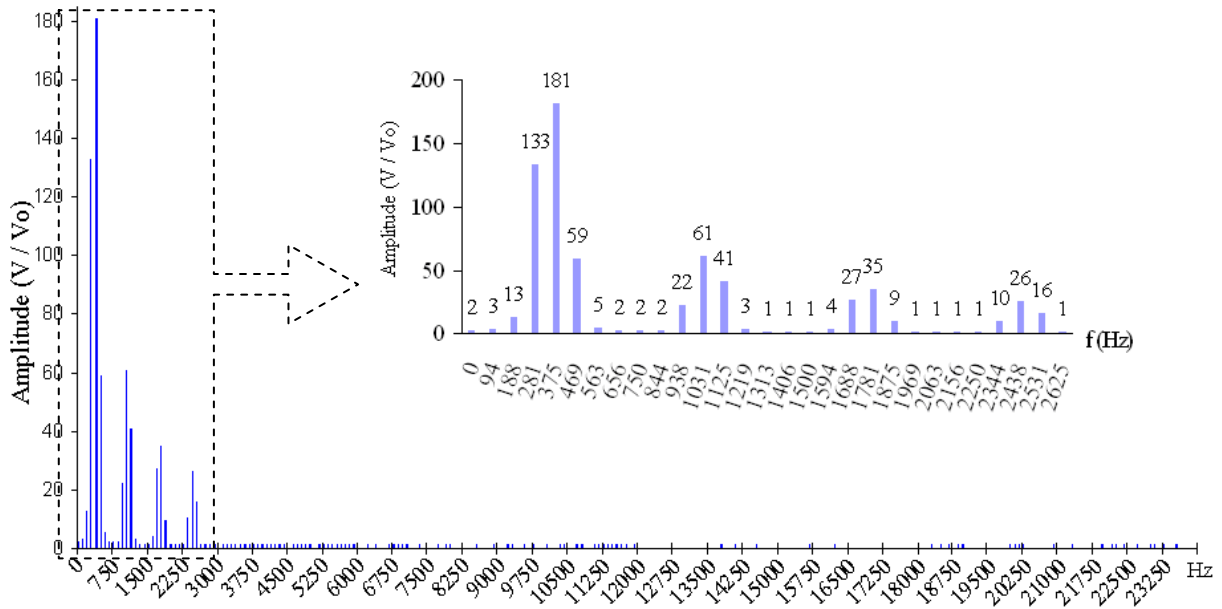


Figura 54 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz.

As duas figuras mostram em detalhe as raias ao redor da frequência fundamental e das harmônicas.

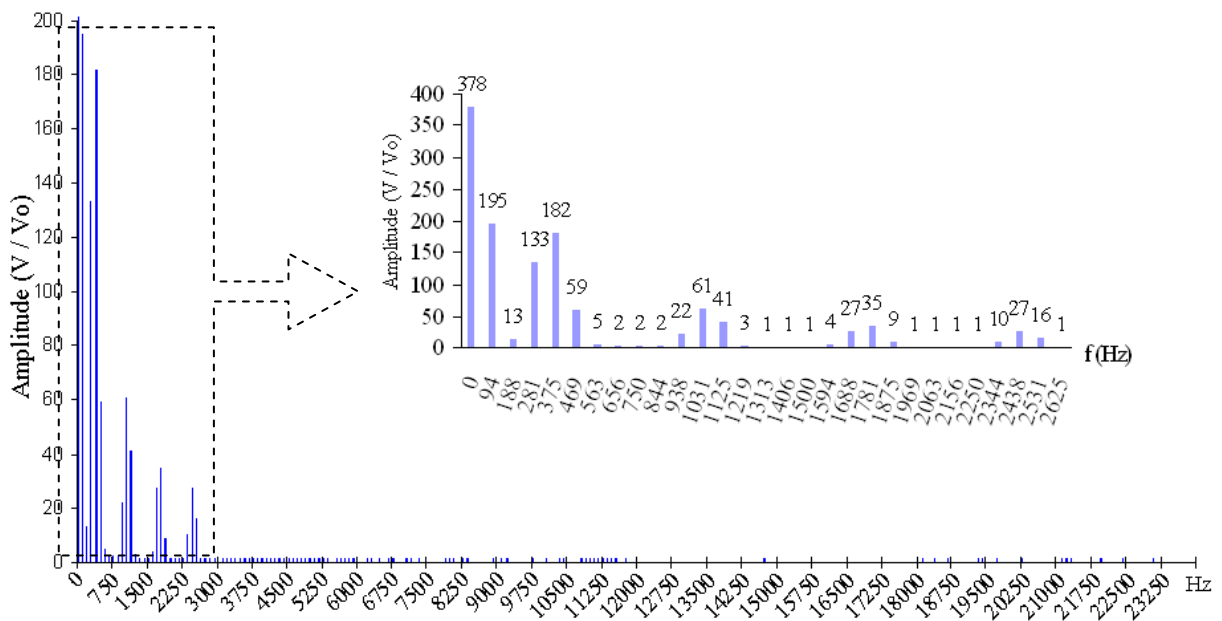


Figura 55 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz e nível contínuo de $600V_0$.

A Figura 56 mostra o espectro de frequência das raias de baixa frequência da onda quadrada com frequência de 350Hz.

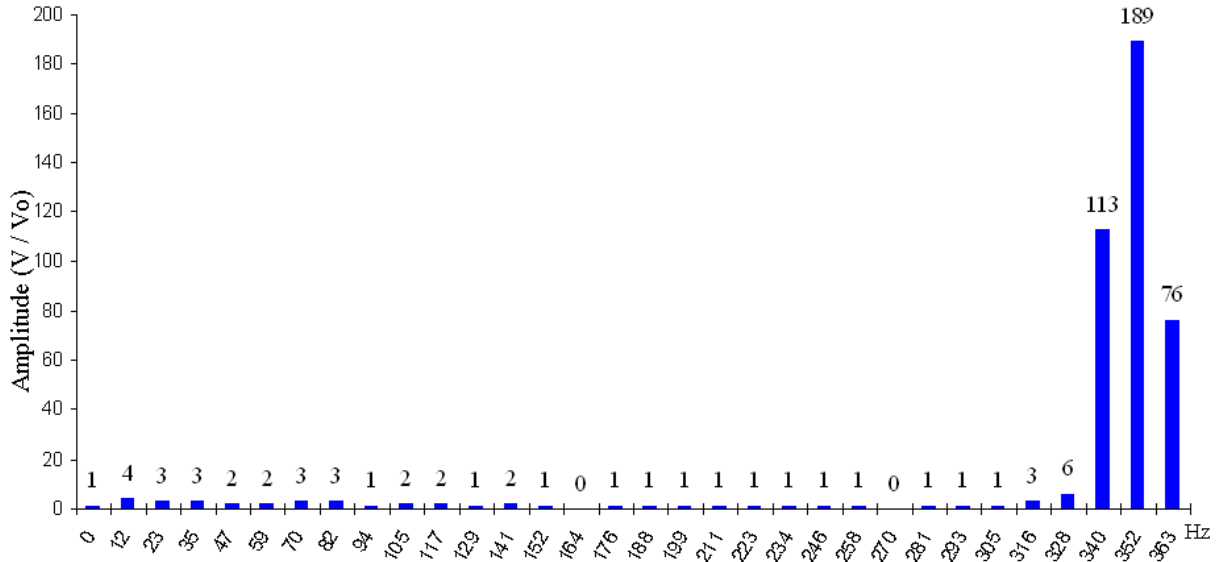


Figura 56 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz (raias de baixa frequência).

A Figura 57 apresenta o espectro de frequência das raias de baixa frequência da onda quadrada com nível contínuo e frequência de 350Hz.

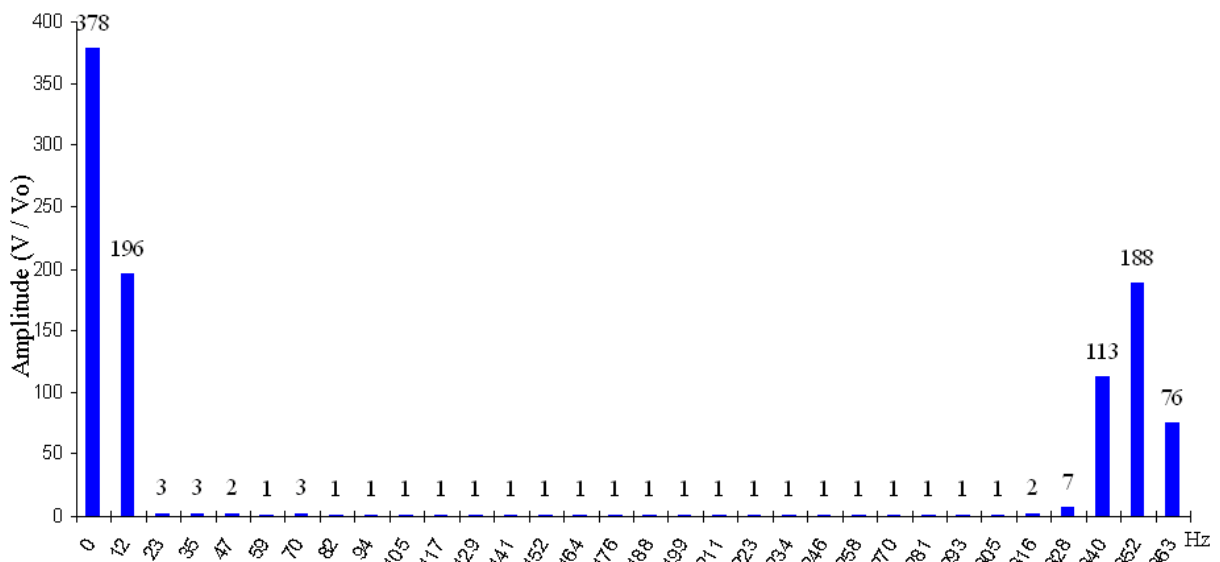


Figura 57 – Espectro de frequência para onda quadrada de 350 Hz com nível contínuo de $600V_0$ (raias de baixa frequência).

A Figura 58 apresenta o espectro de frequência da onda quadrada sem nível contínuo de 2,5kHz. O detalhe apresenta as raias em torno da frequência fundamental e das harmônicas até 22,5kHz.

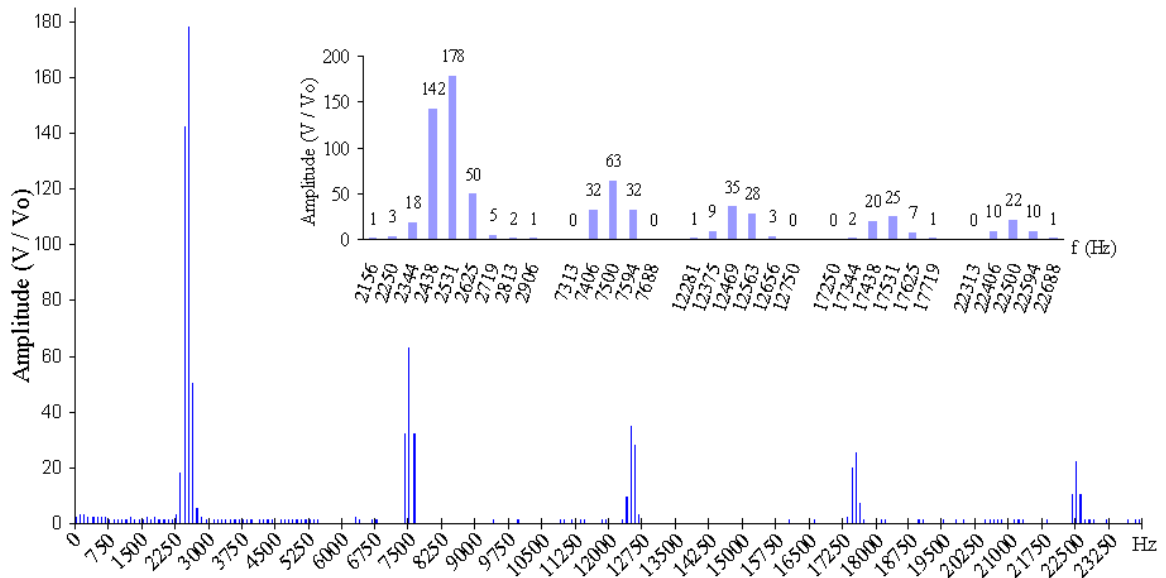


Figura 58 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz.

Na Figura 59 é apresentado o espectro de frequência da onda quadrada de 2,5kHz com nível contínuo. No detalhe dão mostradas as raias que representam o nível contínuo e as raias ao redor da frequência fundamental e das harmônicas.

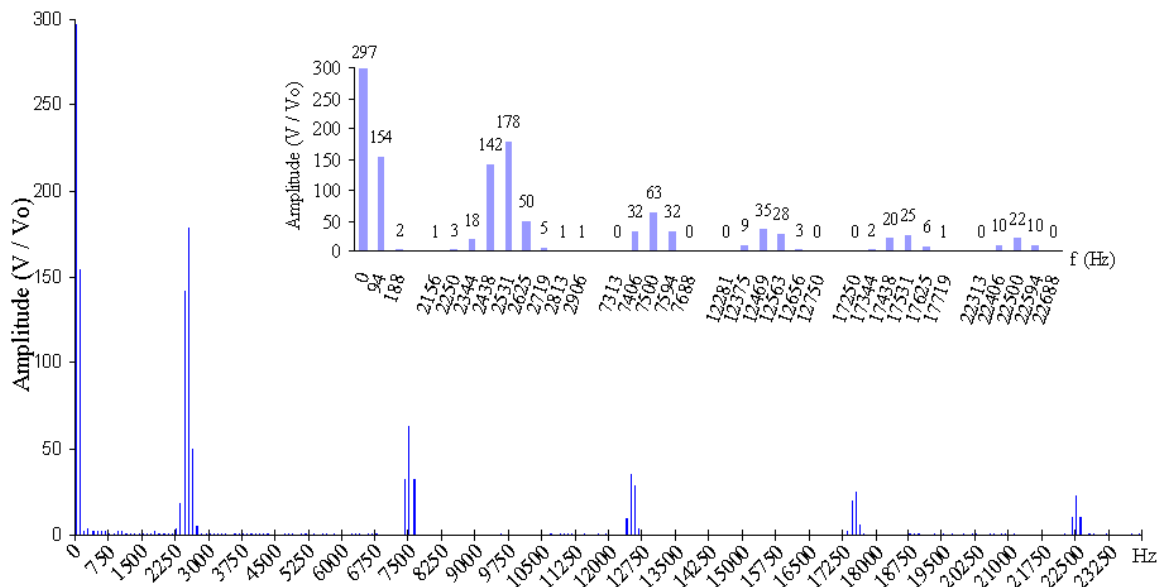


Figura 59 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz e nível contínuo de 600V₀.

A Figura 60 mostra o espectro de frequência da onda quadrada de 2,5kHz sem nível contínuo e a Figura 61 apresenta o espectro de frequência da onda com nível contínuo.

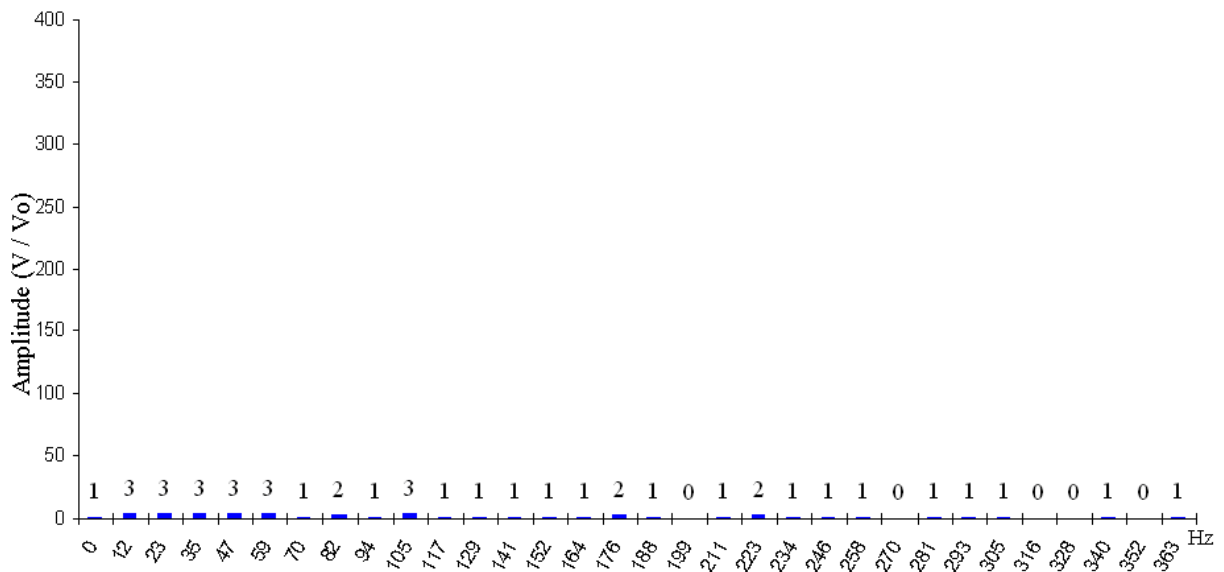


Figura 60 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz (raias de baixa frequência).

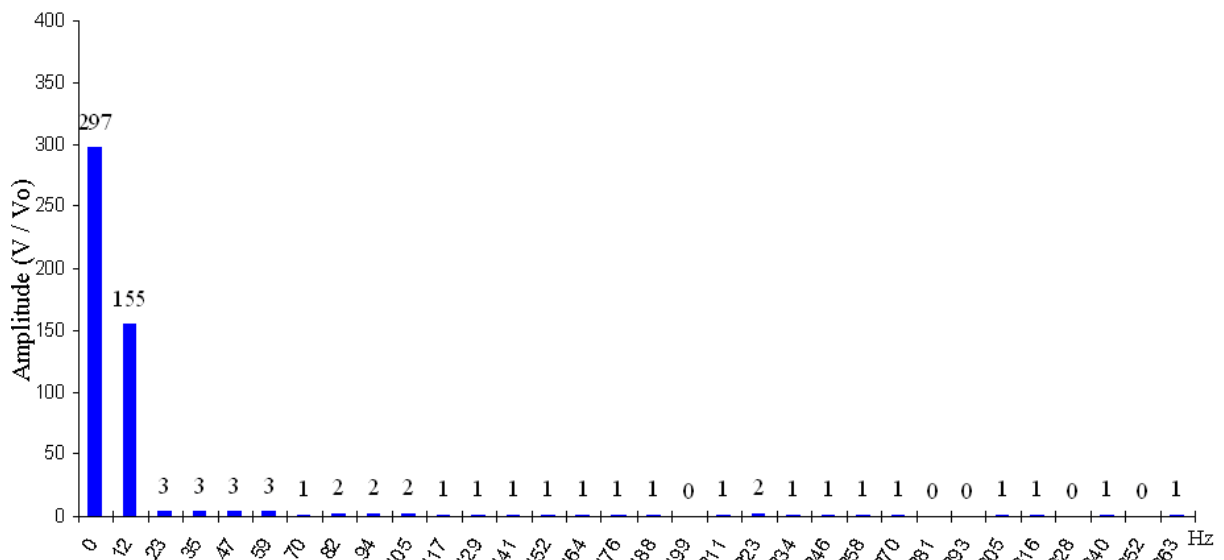


Figura 61 – Espectro de frequência para onda quadrada de 2500 Hz com nível contínuo de 600 V₀ (raias de baixa frequência).

Os valores das amplitudes foram iguais para as simulações com resposta lenta, rápida e impulsiva.

4.1.2 ANSI S1.11

Os resultados que apareciam aos usuários após executar o cálculo do nível de pressão sonora para as ondas de frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 Hz depois do

cálculo da FFT são mostradas, respectivamente na Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 12 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 32 Hz.

Pressão da onda senoidal	Pressão na oitava de 125Hz	Pressão na oitava de 250Hz	Pressão na oitava de 500Hz	Pressão na oitava de 1000Hz	Pressão na oitava de 2000Hz	Pressão na oitava de 4000Hz	Pressão na oitava de 8000Hz
56,0	22,9	28,7	18,9	23,4	28,7	32,7	36,7
74,9	24,6	28,4	30,7	24,7	28,4	32,2	36,2
84,1	30,6	29,7	39,8	27,9	28,5	32,6	36,7

Tabela 13 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 100 Hz.

Pressão da onda senoidal	Pressão na oitava de 125Hz	Pressão na oitava de 250Hz	Pressão na oitava de 500Hz	Pressão na oitava de 1000Hz	Pressão na oitava de 2000Hz	Pressão na oitava de 4000Hz	Pressão na oitava de 8000Hz
56,0	49,2	28,0	18,8	23,5	28,6	32,4	36,5
75,0	73,6	24,5	22,7	23,0	28,4	32,5	37,0
84,2	83,2	26,2	31,8	22,6	27,8	32,3	36,5

Tabela 14 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 250 Hz.

Pressão da onda senoidal	Pressão na oitava de 125Hz	Pressão na oitava de 250Hz	Pressão na oitava de 500Hz	Pressão na oitava de 1000Hz	Pressão na oitava de 2000Hz	Pressão na oitava de 4000Hz	Pressão na oitava de 8000Hz
56,6	24,8	50,3	33,7	23,7	28,6	32,4	36,5
76,0	28,6	74,4	57,6	26,1	28,8	32,9	36,6
85,3	32,4	84,0	67,2	32,4	28,3	32,8	36,4

Tabela 15 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 350 Hz.

Pressão da onda senoidal	Pressão na oitava de 125Hz	Pressão na oitava de 250Hz	Pressão na oitava de 500Hz	Pressão na oitava de 1000Hz	Pressão na oitava de 2000Hz	Pressão na oitava de 4000Hz	Pressão na oitava de 8000Hz
58,3	23,5	50,3	45,8	24,3	28,5	32,8	36,6
78,7	23,9	74,1	70,2	28,3	28,6	32,3	36,7
88,1	24,3	83,7	79,7	35,5	29,1	32,6	36,7

Tabela 16 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 1000 Hz.

Pressão da onda senoidal	Pressão na oitava de 125Hz	Pressão na oitava de 250Hz	Pressão na oitava de 500Hz	Pressão na oitava de 1000Hz	Pressão na oitava de 2000Hz	Pressão na oitava de 4000Hz	Pressão na oitava de 8000Hz
56,0	23,3	28,4	19,9	50,0	28,3	32,4	36,4

74,9	23,7	29,4	30,3	74,4	29,6	32,1	36,6
84,1	23,9	29,6	39,1	83,9	34,2	31,8	36,3

Tabela 17 – Distribuição da pressão sonora em dB para a onda senoidal de 2500 Hz.

Pressão da onda senoidal	Pressão na oitava de 125Hz	Pressão na oitava de 250Hz	Pressão na oitava de 500Hz	Pressão na oitava de 1000Hz	Pressão na oitava de 2000Hz	Pressão na oitava de 4000Hz	Pressão na oitava de 8000Hz
56,2	24,1	28,6	20,3	24,6	50,3	32,8	36,6
74,9	23,7	28,3	20,3	24,3	74,4	33,9	36,5
84,1	24,7	29,2	20,5	24,5	84,0	36,8	36,2

A atenuação dos filtros foi traçada variando a frequência dos sinais de entrada e mantendo a amplitude 1000 vezes maior que a pressão de referência. A curva de resposta dos filtros com frequência central de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 são apresentados, respectivamente, na Figura 62, Figura 63, Figura 64, Figura 65, Figura 66 e Figura 67.

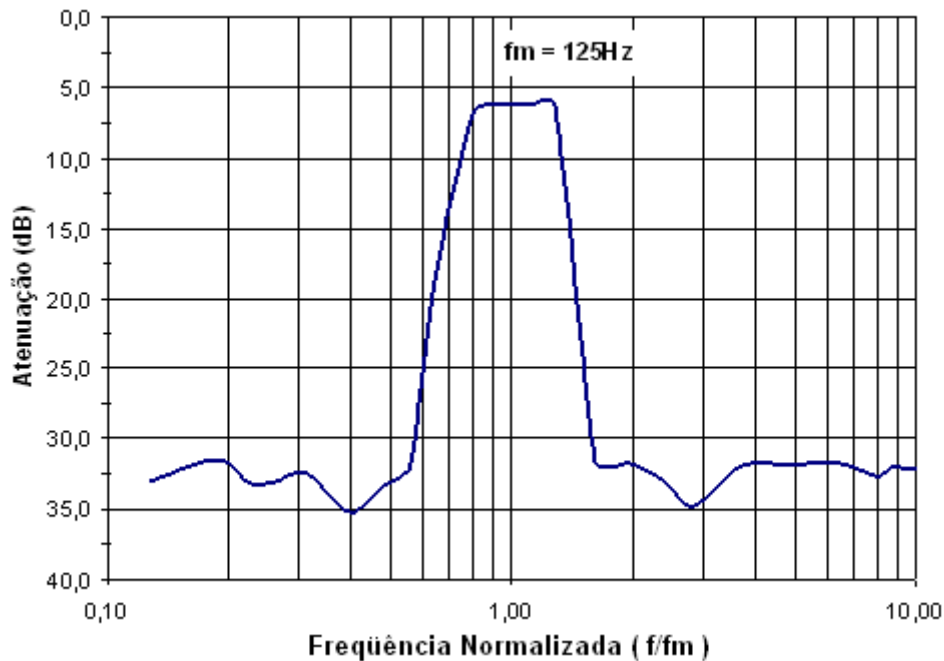


Figura 62 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 125 Hz.

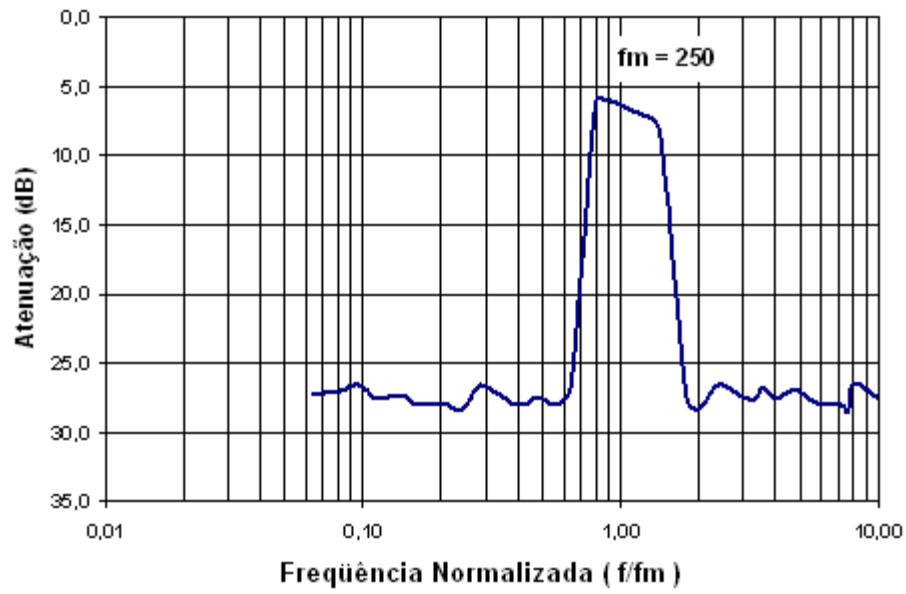


Figura 63 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 250 Hz.

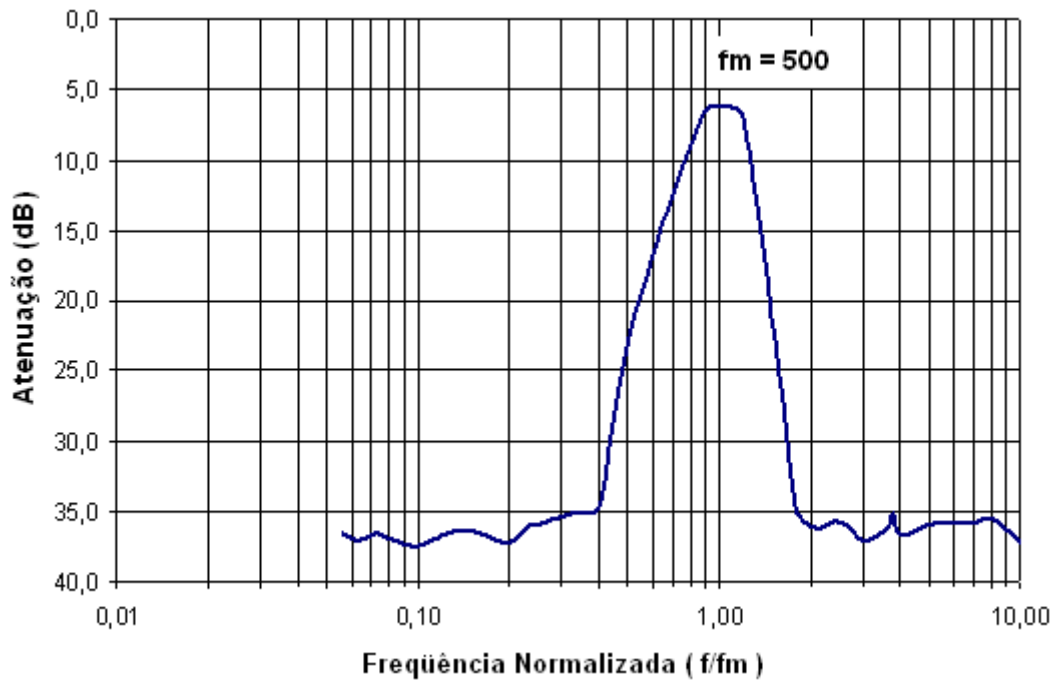


Figura 64 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 500 Hz.

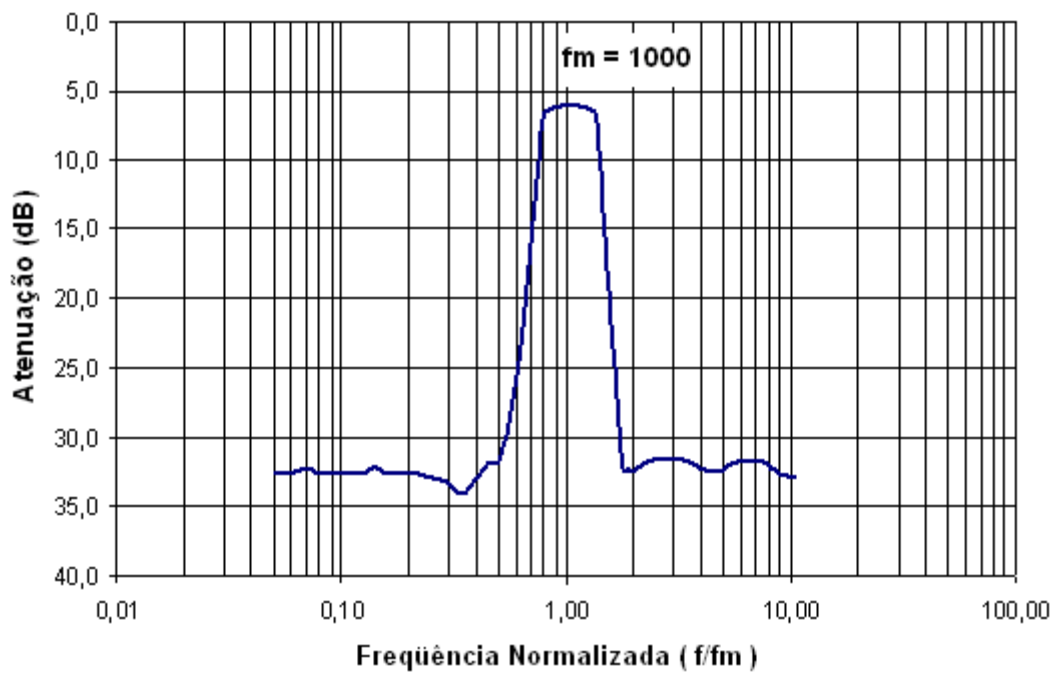


Figura 65 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 1000 Hz.

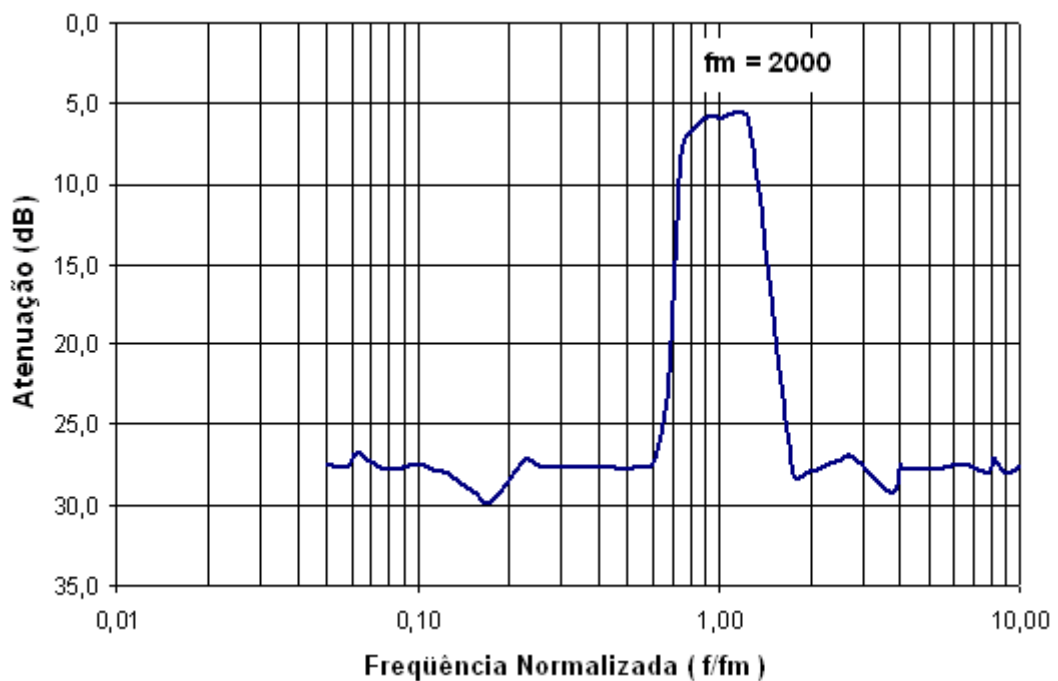


Figura 66 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 2000 Hz.

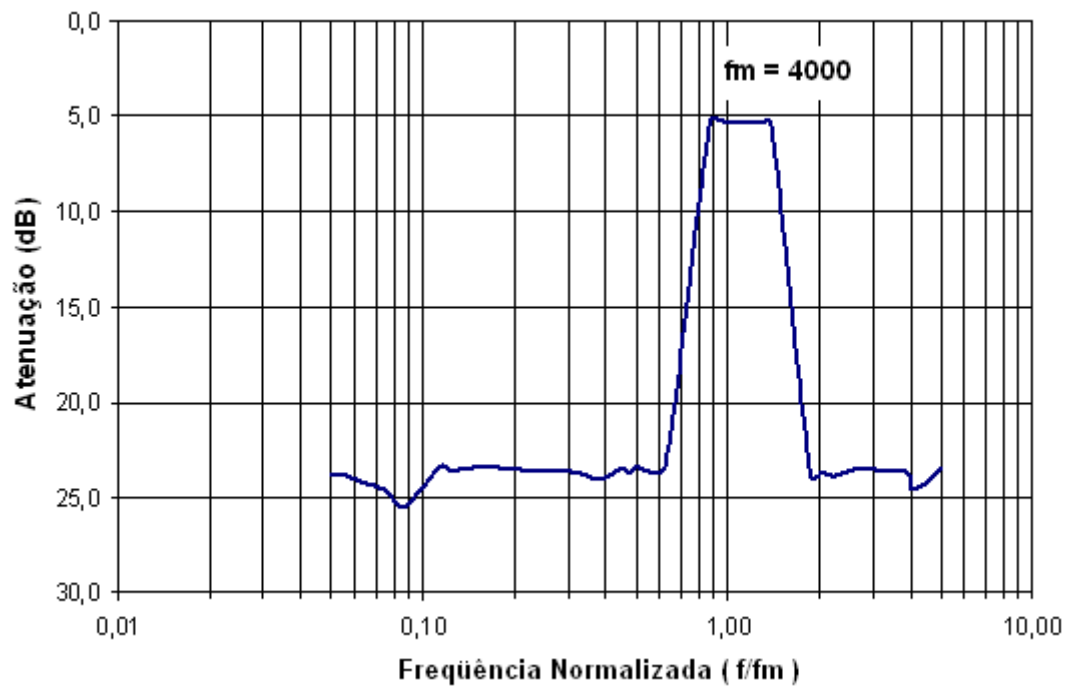


Figura 67 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 4000 Hz.

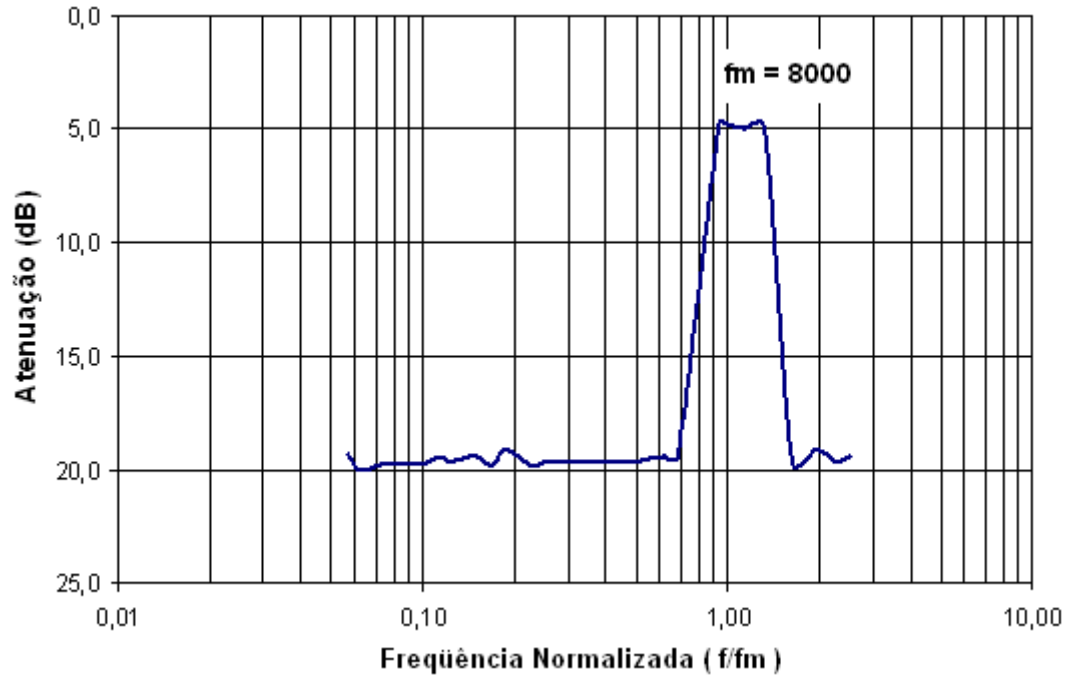


Figura 68 – Curva de resposta para o filtro com frequência central de 8000 Hz.

4.2 TESTES DE RECEBIMENTO DO SINAL

Na Figura 69 são apresentadas duas fotografias do *display* LCD. As fotos foram tiradas para ondas com frequência e amplitude diferentes.



Figura 69 – Ondas sonoras mostradas no *display* LCD. a) Onda com frequência de 3 kHz e pressão sonora de 80dB; b) Onda com frequência de 1,5 kHz e pressão sonora de 80dB.

Durante os testes pode-se notar que o sinal era atenuado à medida que a frequência usada para gerar a onda sonora se distanciava da faixa entre 1 kHz e 3 kHz. A maior amplitude foi encontrada com ondas ao redor de 2 kHz e as menores amplitudes para ondas sonoras abaixo de 500 Hz, acima de 12 kHz e nas frequências próximas a 5 kHz.

4.3 COMPARATIVO ENTRE FFT TEÓRICA E EXPERIMENTAL

As frequências usadas no teste foram nomeadas de f_1 a f_6 , como mostra a Tabela 18.

Tabela 18 – Valores das frequências usadas no teste.

Nome	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
Valor (Hz)	190	500	1000	3000	9000	16000

A Figura 70 apresenta o espectro de frequência encontrado pelo software ao usarmos ondas senoidais geradas no Matlab[®] com frequências iguais a f_2 , f_3 , f_4 , f_5 e f_6 .

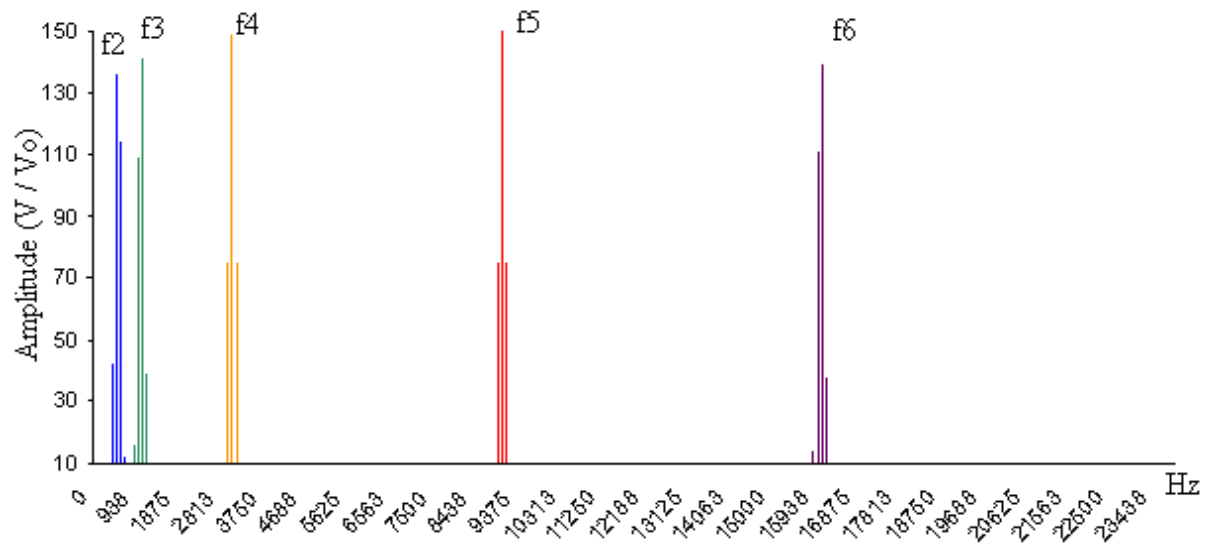


Figura 70 – Espectro de frequência teórico da FFT para as raias de alta frequência.

O resultado experimental encontrado é mostrado na Figura 71.

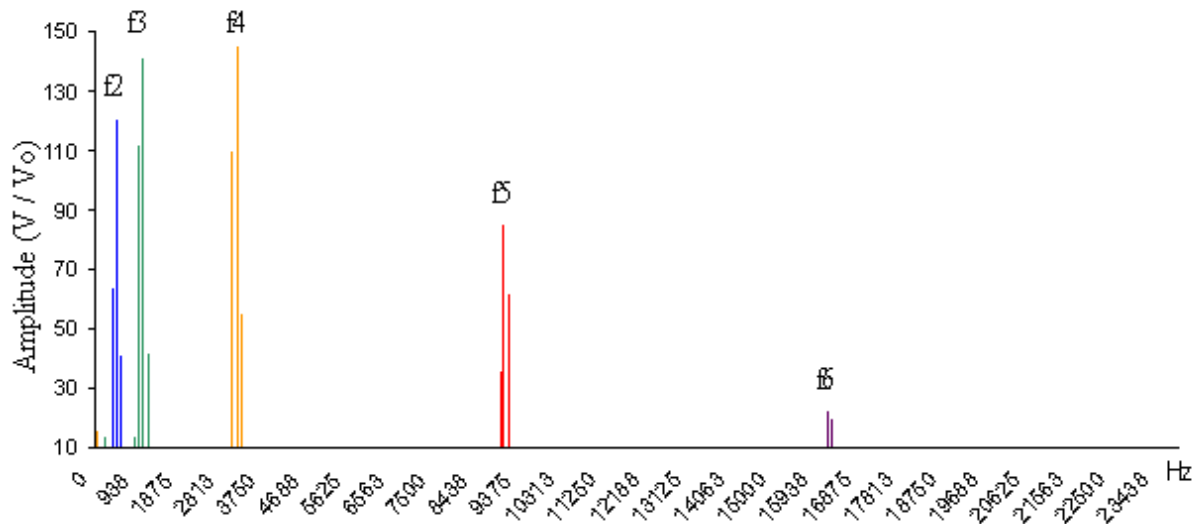


Figura 71 – Espectro de frequência experimental para as raias de alta frequência.

O espectro de frequência mostrando apenas os módulos de maior amplitude é apresentado na Figura 72.

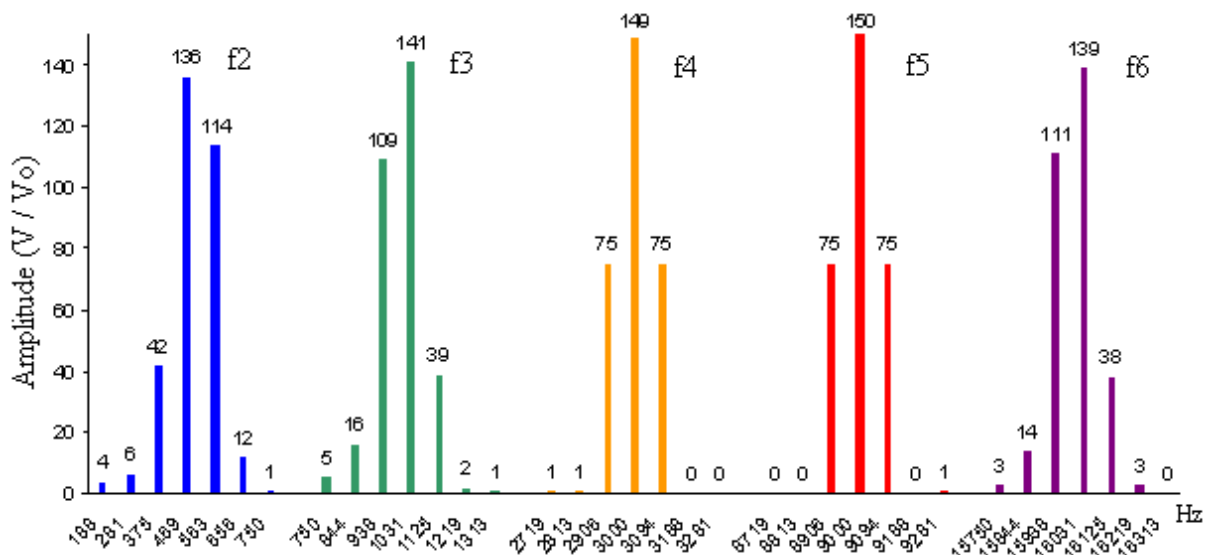


Figura 72 – Raias de maior amplitude (resultado teórico).
Fonte: GAZZONI *et al* (2008).

A Figura 73 apresenta as raias de maior amplitude encontrados no experimento.

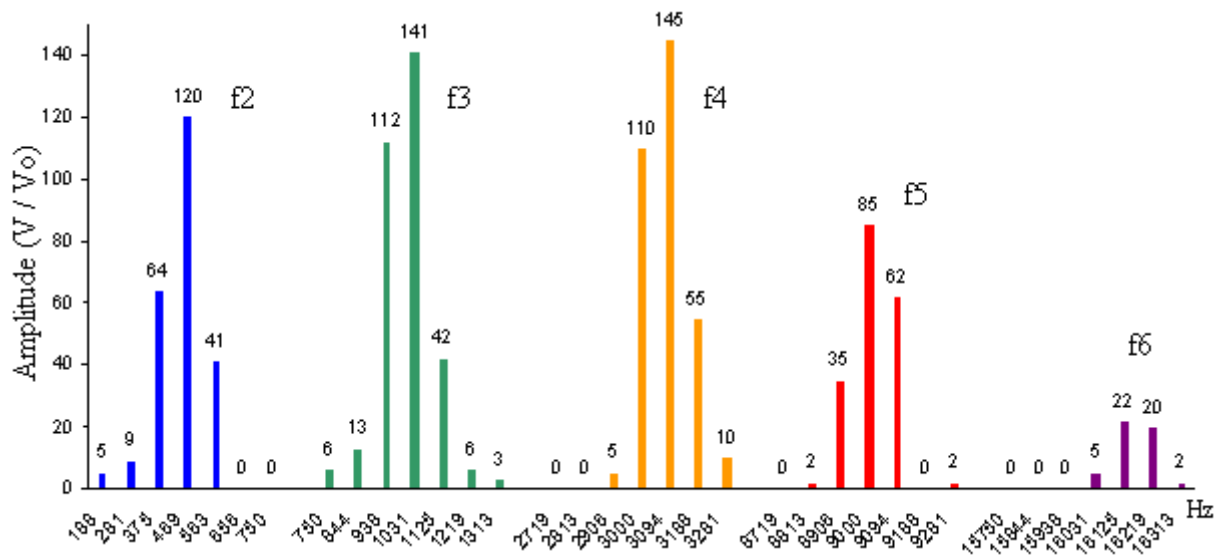


Figura 73 – Raias de maior amplitude (resultado experimental).
Fonte: GAZZONI *et al* (2008).

O resultado da FFT para a onda com frequência f_1 é apresentado na Figura 74. O resultado da FFT para essa frequência apresenta maior resolução e por isso foi colocado em um gráfico separado.

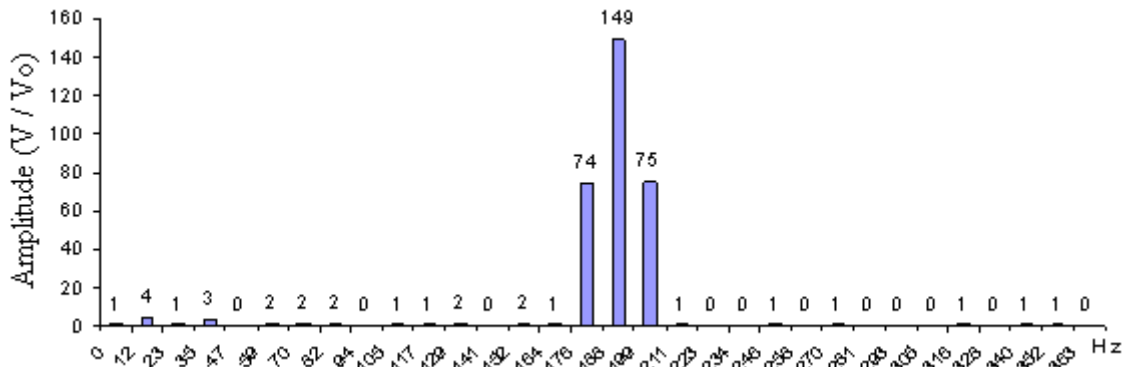


Figura 74 – Resultado teórico da FFT de baixa freqüência.

O resultado experimental para a onda com freqüência f_1 é mostrado na Figura 75.

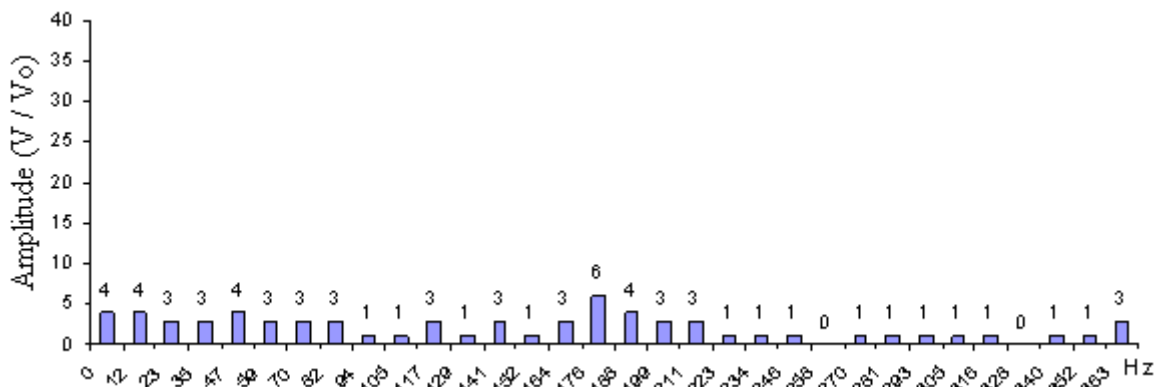


Figura 75 – Resultado experimental da FFT de baixa freqüência.

4.4 SONÔMETRO PROJETADO EM RELAÇÃO AO SONÔMETRO COMERCIAL

Os testes foram todos realizados usando a curva de ponderação A. Cada coleta de dados foi realizada durante um período de aproximadamente 1 minuto com sinal sonoro constante. O valor medido pelo protótipo oscilou enquanto o valor apresentado pelo sonômetro comercial permaneceu constante. A Tabela 19 apresenta os resultados dos valores mínimo, máximo e médio durante os testes e o valor apresentado pelo aparelho comercial.

A calibração foi realizada utilizando a freqüência de 1 kHz e nível de pressão sonora medido pelo aparelho comercial de 87,1 dBA.

Tabela 19 – Resultados medidos pelo sonômetro.

Frequência (Hz)	Mínimo (dBA)	Máximo (dBA)	Média (dBA)	Comercial (dBA)
400	81,0	86,0	83,7	85,1
400	87,6	90,4	89,5	89,8
400	92,9	93,8	93,3	92,4
400	92,9	94,2	93,6	93,3
800	74,1	78,0	76,9	79,0
800	78,0	78,3	78,2	82,7
800	86,1	86,6	86,3	86,7
800	89,3	90,0	89,6	90,7
1000	84,2	87,5	85,8	87,1
1000	86,9	87,2	87,1	88,8
1000	90,2	90,6	90,3	91,1
1000	93,6	96,6	95,2	94,6
1500	92,3	98,8	95,5	96,3
1500	98,1	100,5	99,5	97,8
2000	92,8	93,9	93,3	93,9
2000	94,5	95,3	95,0	94,8
3000	88,8	92,1	90,2	89,2
3000	92,1	93,8	93,0	92,5
4000	90,4	92,1	91,5	88,4
4000	95,3	96,1	95,7	91,0
6000	77,7	78,3	78,1	78,3
6000	76,1	77,0	76,3	77,2
8000	80,7	81,4	81,0	84,2
8000	80,7	81,1	80,9	84,5
10000	90,1	91,5	90,7	92,6
10000	89,2	91,9	90,4	91,9
12000	78,8	81,3	79,8	83,0
12000	81,0	82,4	82,0	83,8
16000	91,1	91,4	91,2	88,1
16000	94,0	94,3	94,1	89,4

Para melhor visualizar a variação dos dados medidos pelo protótipo, os resultados coletados para as ondas com frequência de 1 kHz e pressão sonora de 88,8dBA, frequência de 4 kHz e pressão sonora de 88,4 dBA e frequência de 10 kHz e potência de 91,9dBA são apresentados, respectivamente, na Figura 76, Figura 77 e Figura 78.

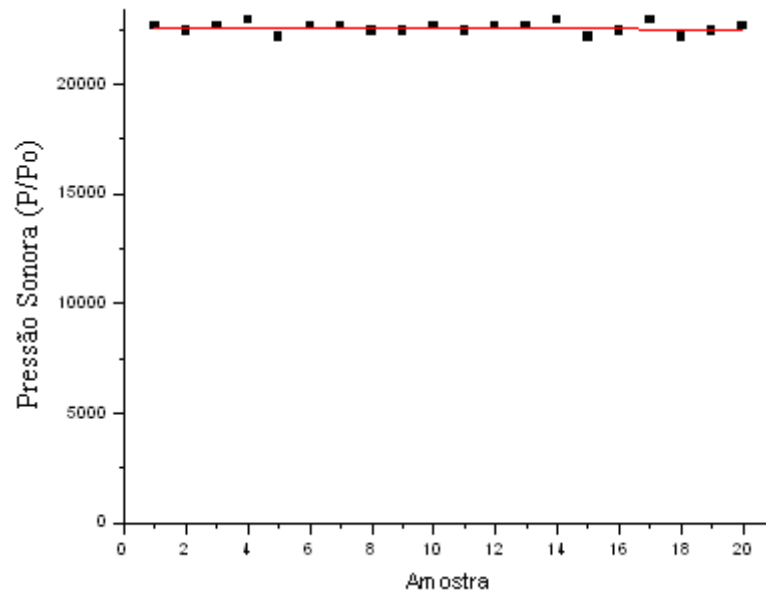


Figura 76 – Dados da onda com frequência de 1 kHz e potência de 88,8 dBA.

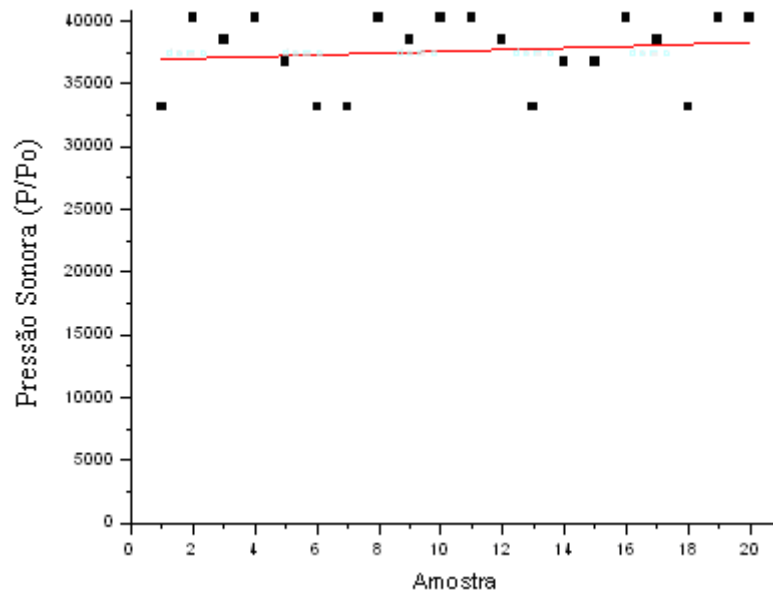


Figura 77 – Dados da onda com frequência de 4 kHz e potência de 88,4 dBA.

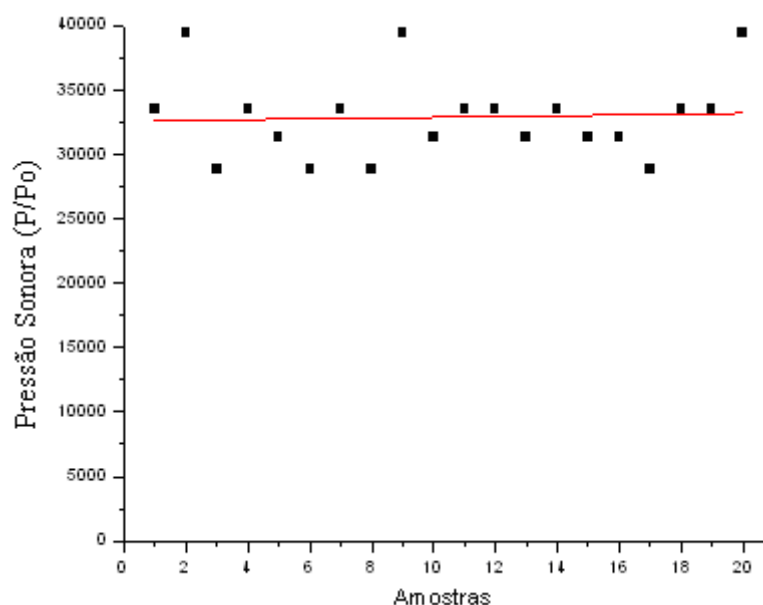


Figura 78 – Dados da a onda com frequência de 10 kHz e potência de 91,9 dBA.

4.5 DOSÍMETRO PROJETO EM RELAÇÃO AO DOSÍMETRO COMERCIAL

Os testes foram realizados com os equipamentos a mesma distância da fonte sonora. Os resultados nos testes durante o período de 5 minutos são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Doses obtidas nos testes de 5 minutos com o dosímetro comercial e o protótipo.

Comercial	Protótipo
0,8%	1,3%
1,7%	2,3%
1,3%	1,8%
0,6%	1,0%
1,1%	1,6%
0,7%	1,4%
0,3%	0,7%
0,2%	0,7%
0,9%	1,4%
0,5%	0,8%

Os valores encontrados para a dose durante o período de 10 minutos são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Doses obtidas nos testes de 10 minutos com o dosímetro comercial e o protótipo.

Comercial	Protótipo
3,0%	3,2%
2,8%	3,1%
1,9%	2,3%
1,7%	2,1%
2,2%	2,5%
2,4%	3,0%
1,6%	2,0%
1,5%	2,0%
1,4%	1,9%
2,7%	3,1%

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados encontrados na simulação para o espectro de frequência das ondas senoidais apresentados na Tabela 10, com exceção das ondas com frequência entre 250 e 350 Hz, apresentaram variação inferior a ± 1 dB em relação a frequência de 1000Hz, mesmo variando a amplitude do sinal de entrada. Isso mostra que o sistema, fora dessa faixa de erro, teria resolução maior que a requerida pela norma depois de calibrado.

O processamento do sinal foi dividido em duas partes: baixas e altas frequências. O erro está ocorrendo em frequências bem próximas a essa transição. A resolução das raias de alta frequência é de 93,75 Hz, o que significa que a raia de 375 Hz da alta frequência engloba frequências entre 281,25 e 468,75 Hz. A resolução das baixas frequências é de 11,72 Hz e a ultima raia usada é a de 363,3 Hz, que engloba frequências entre 351,56 e 375,00 Hz. Devido à diferença de resolução, sinais entre 281,25 e 375 Hz são duplicados durante o cálculo da pressão total.

Essa duplicação pode ser vista analisando os resultados do espectro de frequência. Com exceção da FFT da onda com frequência de 350 Hz, todos os espectros apresentaram apenas três raias de grande amplitude e maior significância para o cálculo da pressão sonora. Já a onda com frequência de 350 Hz apresenta cinco raias dentro da faixa de interesse. Duas raias de alta frequência: raias de 375 e 469 Hz (Figura 44); três raias de baixa frequência: raias de 340, 352 e 363 Hz (Figura 45).

A pressão sonora encontrada para as ondas quadradas (Tabela 11) estava de acordo com o esperado, já que apresentou erro menor que ± 1 dB para as frequências abaixo de 1000 Hz e o valor encontrado para as frequências de 2500 Hz e 8000 Hz foi abaixo dos demais, já que parte da onda seria atenuada no filtro *anti-aliasing*. O *firmware* foi capaz de detectar a inserção de um sinal contínuo junto à onda quadrada alternada e no espectro da FFT foi possível verificar que a maior parte da energia adicionada ao resultado estava na primeira raia, que detecta sinal com frequência igual a zero.

A resposta dos filtros dentro da banda de passagem, ou seja, para sinais com frequência entre $0,707f_m$ e $1,41f_m$ estavam de acordo com o requerido na norma ANSI S1.11, porém a atenuação do filtro para sinais fora dessa faixa foi menor que a esperada.

Observando os resultados apresentados desde a Tabela 12 até a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode-se observar que, aumentando a amplitude das ondas, a pressão sonora da banda de oitava que o sinal faz parte tem aumento bem maior que dos demais filtros. Isso já era esperado por ter usado a FFT como forma de aplicar os filtros.

O teste de recebimento do sinal e o de comparação da FFT teórica com a experimental apresentaram atenuação de acordo com a curva de resposta do sistema gerador de áudio (gerador de funções + alto falante) apresentadas na Figura 39. A raia de maior amplitude encontrada na FFT das ondas de 3.000 e 16.000 Hz estavam deslocadas uma raia a direita em relação ao resultado teórico esperado, o que não invalida o resultado já que o gerador de funções não tem ajuste fino para a seleção de frequência.

O resultado da FFT do sinal com frequência de 190 Hz mostrou que o circuito implementado atenua sinais de baixa frequência, já que a curva de resposta do circuito gerador de áudio mostrava que a amplitude do sinal de 190 Hz deveria ser a mesma do sinal de 16.000Hz.

Os resultados do protótipo referentes à pressão sonora (Tabela 19) apresentaram valores mínimos e máximos com diferença superior a ± 1 dB para alguns valores. O protótipo foi calibrado usando sinal com frequência de 1 kHz, porém, mesmo para sinais com essa frequência ocorreram erros superiores a ± 1 dB entre o valor médio das medidas e o valor mostrado no sonômetro comercial.

O microfone do sonômetro comercial era direcional, enquanto o protótipo usava um onidirecional. Devido a isso, o protótipo é mais susceptível a ruídos do ambiente de teste, o que pode ter originado as variações nas medidas, já que a variação foi maior nas medidas de sinais com mesma frequência e amplitudes menores.

O aumento ou redução da amplitude do sinal de entrada detectado pelo sonômetro comercial não foi proporcional ao aumento detectado pelo protótipo (Tabela 19). Um dos fatores que pode ter contribuído para isso é a configuração de ganho do pré-amplificador, já que ela é realizada com precisão de 1 dB e por isso não tem ajuste fino. Isso indica que o amplificador deve ser alterado para um modelo que tenha configuração de ganho com maior precisão.

A dose de ruído apresentou melhor resultado durante a medição por período de 10 minutos. Como nas medições com período de 10 minutos o sinal gerado era alterado apenas

durante intervalos de 30 segundos e nas medições de 5 minutos o sinal era aumentado de forma abrupta durante todo o experimento, as medidas foram influenciadas pelo uso do tempo de integração para resposta lenta. Esse erro é gerado devido à janela de Hanning não ser eficaz quando há variação brusca no meio das 512 amostras do sinal usados no cálculo da FFT.

A dose calculada pelo protótipo apresentou sempre valor superior em relação ao dosímetro comercial. A captação do ruído ambiente foi um dos fatores para essa diferença, além dos erros já citado referente à FFT.

O uso de bibliotecas criadas pelo fabricante do microprocessador melhora a velocidade de processamento do *firmware*, porém pode ser necessário usar ferramentas matemáticas que ainda não existem nas bibliotecas dos fabricantes, como a transformada de Karhunen-Loève, para tentar minimizar o erro devido ao processamento do sinal.

A resolução do sinal no domínio da frequência mostrou que o equipamento poderia ser usado como ferramenta para os estudos de patologias relacionadas à voz.

O equipamento tem a vantagem de integrar as funções de cálculo de pressão sonora total, pressão sonora ao longo das frequências e o cálculo da dose de ruído.

5.2 CONCLUSÕES

O desenvolvimento e depuração da placa de circuito impresso foram as etapas que mais demandaram tempo durante a construção do protótipo, já que a placa não poderia ser modificada depois de enviada para confecção e os erros decorrentes do processo de soldagem dos componentes foram muitos.

A divisão do circuito em blocos e o uso de filtros entre as alimentações analógica e digital reduziram os ruídos que existiam na primeira versão da placa.

O *firmware* testado apresentou boa resolução em frequência nos testes e respondeu de forma eficiente à variação de amplitude e frequência do sinal sonoro de entrada, porém durante os testes de bancada a medida de alguns sinais sonoros apresentou diferença elevada entre seus valores mínimo e máximo.

O pré-amplificador, por ser diferencial, foi o responsável em eliminar o ruído gerado pela fonte de alimentação de +24V no sinal sonoro captado pelo microfone. Em contrapartida, a resolução de ganho em dB pode acarretar erros durante a calibração e por isso é necessário usar outro amplificador diferencial com ajuste de ganho linear.

Usando a FFT como método de processamento, a análise da dose de ruído é prejudicada se houver a presença de ruídos impulsivos ou ruídos flutuantes com oscilação muito brusca de nível. Ruídos contínuos são os que apresentam melhor resposta.

O uso da constante de tempo rápida para medir a pressão sonora pode minimizar os erros de descontinuidade do sinal, já que com seu uso é possível diminuir o tempo da janela da FFT.

Os resultados do protótipo estão em acordo com a norma ANSI S1.11, mas em desacordo com a IEC 651, já que os resultados do filtro de banda de oitavas foram próximos ao esperado e os resultados de leitura da pressão sonora total apresentaram oscilações superiores a ± 1 dB.

Os resultados mostram que o protótipo mediu de forma satisfatória a distribuição do sinal na frequência, porém são necessárias modificações para medir de forma mais precisa o nível de pressão sonora e a dose de ruído.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Usar o protótipo para coleta de maior quantidade de dados usando microfones direcionais com curvas de resposta próximas às do equipamento de referência ou microfones onidirecionais em ambientes com ruído ambiente controlado.

Elaborar uma nova placa de circuito impressa com um pré-amplificador com ganho linear e uma porta de comunicação USB para enviar informação a um microcomputador.

Realizar testes usando outras ferramentas de processamento de sinais para verificar se existe outra ferramenta mais apropriada para o equipamento.

Desenvolver um *firmware* para uso em pesquisas na área de fonoaudiologia que seja capaz de caracterizar a voz humana e contribuir para a comparação da voz saudável com a voz de alguém que possui alguma patologia relacionada à fala.

BIBLIOGRAFIA

AKG INC. **Full line catalog**. Vienna, 2005. Disponível em: <http://www.akg.com/mediendatenbank2/psfile/datei/72/full_line_45c87aed9d2ec.pdf>. Acessado em: Fev. 2007.

ANSI S1.11 – 1966 (R1976): **specification for octave, half octave and third-octave band filter sets**. New York, 1976.

BALLOU, Glen. **Handbook for Sound Engineers: the New Audio Cyclopedia**. Indianapolis: Howard W. Sams and Co., 1988.

BEHRINGER GmbH. **Technical Specifications – XM8500; ECM8000**. 2000.

BERANEK, Leo L. **Acoustics**. Cambridge: Acoustical Society of America, 1993.

CCDR – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve. **Ruído**. 2008. Disponível em: <<http://www.ccdr-alg.pt/ccdr/index.php?module=ContentExpress&func=display&ceid=344>>. Acessado em: Jun. 2008.

CARMO, Livia I. C. **Efeitos do Ruído Ambiental no organismo Humano e suas Manifestações Auditivas**. Goiânia: CEFAC, 1999.

COSTA, Denio G. **Microfones: Características e Aplicações**. In: Seminário Brasileiro de Engenharia de Áudio, 2002. Belo Horizonte. Anais eletrônicos. Belo Horizonte: UFMG, 2002. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~semea/anais/index2.html>>. Acessado em: out. 2006.

COSTA, S.S.; CRUZ, O.L.M.; OLIVEIRA, J.A.A. **Otorrinolaringologia - Princípios e Prática**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

DAVIS, G.; JONES, R. **Sound Reinforcement Handbook**. Milwaukee: Hal Leonard Publishing Corporation, 1990.

EVEREST, F. Alton. **The Master Handbook of Acoustics**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

FERNANDES, João C. **Apostila de Acústica e Ruído**. Bauru: UNESP, 2002. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/acustica/apostila.htm>>. Acessado em: Dez. 2006.

FONSECA, H.; FERREIRA, A; SANTOS, V. **Constituição do Sistema Auditivo Humano**. Ciência Viva, Ministério da Ciência e Tecnologia de Portugal, 1994. Disponível em: <http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/constituicao_audicao.html>. Acesso em: 01 Maio 2008.

GAZZONI, Fernando Estevam ; MAIA, J. M. ; GAMBÁ, H. R. **Sistema para aquisição e processamento de sinais sonoros**. In: CBEB2008 - XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2008, Salvador. Anais do CBEB2008 - XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. Salvador : GT5 Brasil, 2008.

IEC 651 – **Sound Level Meter**. 1979

KLUESENER, Matthew F. **Sound level meter or dosimeter? Making the choice**. 2001. Disponível em: <<http://www.plantengineering.com/index.asp?layout=articlePrint&articleID=CA144655>>. Acesso em: Set.2007.

LENT, Roberto. **Cem Bilhões de Neurônios: Conceitos Fundamentais de Neurociência**. São Paulo: Atheneu, 2001.

LOUD Technologies Inc. **Balanced Lines, Phantom Powering, Grounding, and Other Arcane Mysteries**. 2002. Disponível em: <http://www.mackie.com/pdf/arcane_mysteries.pdf>. Acessado em: Fev. 2007.

LYONS, Chris; VEAR, Tim; PETERSEN, Michael. **Audio System Guide for Meeting Facilities**. Chicago: Shure Inc. 2005.

MÜLLER, S.; MASSARINI, P. **Medições da Resposta em Frequência de Sistemas de Sonorização**. In: Seminário Brasileiro de Engenharia de Áudio, 2002. Belo Horizonte. Anais eletrônicos... Belo Horizonte: UFMG, 2002. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~semea/anais/index2.html>>. Acessado em: out. 2006.

MOSCI A. S.; DINIZ J. L. C. P.. **Estudo da exposição ao ruído, impacto no policial militar do Batalhão de Trânsito**. Belo Horizonte: APM, 1997.

NBR 10151 – Acústica – Avaliação de ruídos em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. Jun. 2000.

NBR 13369 – Cálculo simplificado do nível de ruído equivalente. Out. 1995.

NEPOMUCENO, Lauro X. **Acústica Técnica**. São Paulo: Editora Técnico-Gráfica Industrial Ltda, 1968.

NEPOMUCENO, Luiza de A. **Elementos de Acústica, Física e Psicoacústica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1994.

NISHIDA, Silvia M. **Apostila de Fisiologia do Curso de Medicina**. Botucatu: UNESP. Disponível em: <http://www.ibb.unesp.br/departamentos/Fisiologia/material_didatico/Neurobiologia_medica/index.htm>. Acesso em: 01 Maio 2008.

NORMA REGULAMENTADORA NR-15, Lei nº 6515 Anexo 1 e 2. Portaria nº 3214, 1978.

OLIVEIRA, L.F. **Avaliação dos índices de ruídos em um serviço de alimentação: um estudo de caso**. Revista Universidade Rural: Série Ciências Humanas, RJ: EDUR, v.27, n.1-2, p. 1-43, jan-dez, 2005

PEREIRA, R. P., TOLEDO, R. N., AMARAL, J. G., GUILHERME, A. **Qualificação e quantificação da exposição sonora ambiental em uma unidade de terapia intensiva geral**. Revista Brasileira de Otorrinolaringologia. v.69, n.6, p.766-71, nov./dez, 2003

PURVES, D.; AUGUSTINE, G. J.; FITZPATRICK, D. *et al.* **Neuroscience**. 3rd ed. Sunderland: Sinauer Associates Inc, 2004.

RIOS, Ana L. **Efeito tardio do ruído na audição e na qualidade do sono em indivíduos expostos a níveis elevados**. Ribeirão Preto: USP, 2003.

SHURE INC. **User Guide KSM32**. 2003.

SIGISMOND, Gino. **Audio Systems Guide for Music Educators**. Chicago: Shure Inc, 2004.

SMITH, Julius O. **Spectral Audio Signal Processing**. Stanford: Stanford University, 2007. Disponível em: <<http://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/>>. Acessado em: jun. 2008.

SOUZA, Cleonilson Protasio. **Apostila de Instrumentação Eletrônica – Sistema Internacional de Medidas**. São Luis: CEFET-MA, 2007. Disponível em: <<http://www.dee.cefet-ma.br/~protasio/Apostila.html>>. Acessado em: Maio 2008.

TEXAS INSTRUMENT. **SBOS289A – Digitally Controlled Microphone Preamplifier**. Nov. 2003.

VEAR, Tim. **Audio System Guide for Houses**. Chicago: Shure Inc, 2004.

WALLER, R.; BOUDREAU, J.; VEAR, T. **Microphone Techniques for Live Sound Reinforcement**. Chicago: Shure Inc, 2004.

YAMADA, R. A. F. **Pesquisa sobre a insalubridade relacionada aos ruídos no interior dos ônibus do transporte público de Curitiba**. Ponta Grossa: UEPG, 2005.

YNOGUTI, C. A.; JOAQUIM, M. B. **Síntese de Sons Musicais Baseada na Transformada de Karhunen-Loève**. In: Seminário Brasileiro de Engenharia de Áudio, 2002. Belo Horizonte. Anais eletrônicos... Belo Horizonte: UFMG, 2002. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~semea/anais/index2.html>>. Acessado em: out. 2006.