

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Elétrica

UFCG

Dissertação de Mestrado

Caracterização Matemática do Ruído Acústico em Ambiente Fabril

Aluno: Daniel Perez Martins

Orientador: Marcelo Sampaio de Alencar

SUPRA OMNES LUX LUCES

Campina Grande – PB

Dezembro – 2013

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Elétrica

Caracterização Matemática do Ruído Acústico em Ambiente Fabril

Daniel Perez Martins

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Marcelo Sampaio de Alencar
Orientador

Campina Grande – PB, Dezembro de 2013 PB

©Daniel Perez Martins – daniel.martins@ee.ufcg.edu.br

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M379c Martins, Daniel Perez.
Caracterização matemática do ruído acústico em ambiente fabril / Daniel Perez Martins. – Campina Grande, 2013.
83 f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

"Orientação: Prof. Marcelo Sampaio de Alencar".
Referências.

1. Ruído Sonoro. 2. Característica Espectral. 3. Processo Estocástico.
I. Alencar, Marcelo Sampaio de. II. Título.

CDU 628.517.2(043)

"CARACTERIZAÇÃO MATEMÁTICA DO RUÍDO ACÚSTICO EM AMBIENTE FABRIL"



DANIEL PEREZ MARTINS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/12/2013


MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG
Orientador(a)


WASLON TERLLIZZIE ARAUJO LOPES, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc.
Examinador(a)


PAULO RIBEIRO LINS JÚNIOR, D.Sc., IFPB
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

À MINHA MÃE VIRGÍNIA DE
FÁTIMA PEREZ MARTINS.

Agradecimentos

Ao Prof. Marcelo Sampaio Alencar, pela orientação e a oportunidade de desenvolver um projeto de pesquisa aliado à indústria calçadista local, e, pelos desafios impostos durante esses dois anos de convívio.

Aos colegas de laboratório, pelo ambiente descontraído e propício para a produção de conhecimento científico, e pelos aconselhamentos durante os momentos mais nebulosos.

À CAPES, pelo suporte financeiro concedido durante primeiro ano de mestrado, que me possibilitou vir a Campina Grande estudar.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, pela estrutura oferecida à pesquisa.

Ao Engenheiro Hélio Moreira, pelo apoio no desenvolvimento na pesquisa de campo que serviu de base a esta dissertação e por acreditar que esta pesquisa traria um importante impacto na realidade da indústria em que o ruído sonoro foi avaliado;

À Larissa Cavalcante e Silva, minha namorada, que por muitas vezes não pode me ter ao seu lado, e ainda assim me incentivou, proporcionou um suporte emocional para que este trabalho pudesse ser realizado e sempre acreditou no meu potencial.

À minha mãe, pela educação proporcionada, carinho ofertado e ensinamentos que me permitiram buscar, por meio de meus esforços, uma carreira profissional e acadêmica exitosa.

À todos que de alguma forma contribuíram com o meu progresso como aluno e ser humano.

”A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

”A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos.”

Marcel Proust

Resumo

O ambiente industrial, proporciona muitos riscos ao trabalhador, sendo o ruído sonoro um deles. A crônica exposição a ruídos audíveis pode causar danos fisiológicos na audição e no corpo dos trabalhadores. Nesta dissertação está apresentada uma metodologia para analisar os níveis de pressão sonora existentes e o comportamento dos ruídos audíveis em um ambiente industrial. Uma indústria calçadista da cidade de Campina Grande - PB foi o campo de pesquisa escolhido para testar a metodologia. Essa análise resulta na caracterização matemática do ruído sonoro. Três entes matemáticos são calculados com os dados obtidos em campo: a densidade espectral de potência, a função densidade de probabilidade, a autocorrelação do ruído sonoro aferido. Desses, apenas os dois primeiros são descritos de maneira aproximada por meio de modelos matemáticos. Para o caso da função densidade de probabilidade, essa caracterização matemática aborda por um outro ponto de vista o problema clássico, na área de comunicações, da determinação da função densidade de probabilidade da soma de sinais senoidais com um ruído gaussiano, utilizando para este fim, polinômios de Chebyshev de primeira ordem. A estimação da distribuição de potência das componentes em frequência aliada ao modelo matemático para descrever o comportamento aleatório desse ruído permite o desenvolvimento de técnicas ativas para o controle de ruído em ambientes fabris. Assim, é resultado desta dissertação a elaboração de um método científico que de forma simples atende as regulamentações vigentes no país, e, que agrega importantes informações acerca do objeto de aferição para uma solução generalista e acurada do problema abordado.

Palavras-chave: Ruído Sonoro, Característica Espectral, Processo Estocástico.

Abstract

The industrial environment provides many risks to workers and the audible noise is one of them . Chronic exposure to audible noise may cause hearing damage physiological and worker's body. On this dissertation is presented a methodology to analyze existing levels of sound pressure and the behavior of audible noise in an industrial environment . A shoe industry in the city of Campina Grande - PB was the chosen as field of research to test the methodology . This analysis results in the mathematical characterization of the audible noise. Three mathematical entities are calculated with the data obtained in the field : the power spectral density , probability density function , the autocorrelation of the measured acoustic noise . Of these , only the first two are described in an approximate manner by means of mathematical models . For the case of the probability density function , this mathematical characterization addresses from another point of view the classical problem in the area of ??communications , the determination of the probability density function of the sum of sinusoidal signals with a Gaussian noise , using for this purpose , Chebyshev polynomials of the first order . Estimation of power distribution components in the frequency coupled mathematical model to describe the behavior of this random noise allows the development of techniques for active noise control in industrial environments . Thus , results of this thesis the development of a scientific method that simply meets the applicable regulations in the country , and it adds important information about the object of measurement for a general and accurate solution of the problem addressed .

Key-words: Acoustical Noise, Worker's Health, Spectral Characteristic

Lista de Figuras

2.1	Curvas de audibilidade.	7
2.2	Limiar diferencial de audição - Variação do nível de pressão sonora. . .	8
2.3	Limiar diferencial de audição - Variação da frequência.	9
2.4	Descrição visual da formação do ruído audível.	9
2.5	Esquema representativo do processamento do ruído pelo corpo humano.	10
2.6	Ventilador Centrífugo.	11
2.7	Ventilador Axial.	12
2.8	Imagem de um corte lateral do ouvido humano.	13
2.9	Resposta em frequência da aurícula.	14
2.10	Resposta em frequência do canal auditivo.	14
2.11	Resposta em frequência do ouvido médio.	14
2.12	Representação das regiões de excitação da membrana basilar com suas respectivas frequências.	15
2.13	Gráfico mostrando as curvas de critérios de ruído.	18
2.14	Representação da transmissão sonora nos diversos meios de propagação.	24
3.1	Comparação entre quatro quantidades de pontos para FFT testados com o janelamento plano.	29
3.2	Comparação entre 4 tipos de janelamento testados com 8192 pontos para a FFT.	29
3.3	Representação da execução do projeto.	31
3.4	Metodologia aplicada pela legislação brasileira.	33
3.5	Metodologia proposta para entender a natureza do ruído.	34
3.6	Ventilador no qual foi realizada a 1ª medição.	35
3.7	Ventilador no qual foi realizada a 2ª medição.	36
3.8	Ventilador no qual foi realizada a 3ª medição.	36
3.9	Ventilador no qual foi realizada a 4ª medição.	37
3.10	Peneira na qual foi realizada a 6ª medição.	37
3.11	Equipamento utilizado para inserir a forquilha no calçado. Local onde foi realizada a 7ª medição.	38
4.1	Gráficos das densidades espectrais de potência dos sons coletado no 1º e 3º pontos.	41

4.2	Gráficos das densidades espectrais de potência dos sons coletado no 2º e 4º pontos.	41
4.3	Gráficos das densidades espectrais de potência dos sons coletado no 5º e 6º pontos.	42
4.4	Densidade espectral de potência em função da frequência do som coletado no 7º ponto.	43
4.5	Densidade espectral de potência em função da frequência do som coletado no 1º ponto com a fábrica desligada.	44
4.6	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.	48
4.7	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.	48
4.8	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.	49
4.9	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.	49
4.10	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.	50
4.11	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.	50
4.12	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.	51
4.13	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.	51
4.14	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).	52
4.15	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).	52
4.16	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).	53
4.17	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).	53
4.18	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).	54
4.19	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).	54
4.20	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).	55

4.21	Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).	55
4.22	Autocorrelação da amostra do 1º ponto de ruído predominante.	56
4.23	Autocorrelação da amostra do 2º ponto de ruído predominante.	57
4.24	Autocorrelação da amostra do 3º ponto de ruído predominante.	57
4.25	Autocorrelação da amostra do 4º ponto de ruído predominante.	58
4.26	Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 1º ponto de ruído predominante.	60
4.27	Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 2º ponto de ruído predominante.	60
4.28	Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 3º ponto de ruído predominante.	61
4.29	Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 4º ponto de ruído predominante.	61
4.30	Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 1º ponto de ruído predominante.	62
4.31	Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 2º ponto de ruído predominante.	62
4.32	Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 3º ponto de ruído predominante.	63
4.33	Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado no 4º ponto de ruído predominante.	63
4.34	Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito menores que A . . .	65
4.35	Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito maiores que A . . .	65
4.36	Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito menores que A . . .	67
4.37	Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito maiores que A . . .	68
4.38	Gráfico de comparação entre o modelo proposto e a fdp empírica. . . .	68
A.1	Curva da ponderação A	74
B.1	Diagrama de blocos do medidor de nível sonoro utilizado nesta dissertação.	76

Lista de Tabelas

2.1	Importantes níveis acústicos medidos.	6
2.2	Classificação NC.	19
2.3	Limites de tolerância à exposição de ruído.	21
2.4	Práticas para controlar ruído.	25
4.1	Dados das análises das medições realizadas nos diversos pontos do ambiente industrial.	43
4.2	Medição do nível sonoro no primeiro ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1]	45
4.3	Medição do nível sonoro no segundo ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1].	45
4.4	Medição do nível sonoro no terceiro ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1].	45
4.5	Medição do nível sonoro no quarto ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1].	45
4.6	Medição do nível sonoro no primeiro ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.	46
4.7	Medição do nível sonoro no segundo ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.	46
4.8	Medição do nível sonoro no terceiro ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.	46
4.9	Medição do nível sonoro no quarto ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.	47
4.10	Tabela comparando as metodologias utilizadas.	47
4.11	Dados das análises realizadas nos quatro pontos de ruído predominante do ambiente industrial, espectro de frequências ponderado.	49
4.12	Dados das análises realizadas nos pontos de ruído predominante do ambiente industrial, espectro de frequência sem ponderação.	56
A.1	Ajuste do nível de potência aferido utilizando a ponderação A.	73

Sumário

1	Introdução	1
2	Aspectos Teóricos Sobre Ruído Acústico	4
2.1	Som e Ruído	5
2.1.1	Efeitos Subjetivos Provocados por Estímulos Sonoros	6
2.1.2	Ruído Industrial	10
2.2	Fisiologia da Audição	12
2.3	Normas Técnicas	16
2.4	Ruído de Baixa Frequência	22
2.5	Controle do Ruído	23
2.6	Conclusões	26
3	Uma Nova Abordagem para Medição de Níveis de Potência de Ruído	27
3.1	Metodologia Proposta	27
3.1.1	Primeira Visita	31
3.1.2	Segunda Visita	32
3.2	Pontos Escolhidos	34
3.3	Conclusão	39
4	Medição do Ruído e Análise dos Resultados Obtidos	40
4.1	Análises e Resultados da Primeira Visita	40
4.2	Segunda Fase das Medições de Ruído	44
4.2.1	Medição do Nível Sonoro Utilizando o Decibelímetro	44
4.2.2	Medição do Nível Sonoro Utilizando o Critério de NIOSH	46
4.3	Avaliação da Densidade Espectral de Potência	47
4.3.1	Espectro de Frequências Observado com Ponderação A	47
4.3.2	Espectro de Frequências Observado sem Ponderação	52
4.4	Análise da Autocorrelação do Ruído	56
4.5	Comparação entre os Resultados da DEP e os da Autocorrelação do Ruído	59
4.5.1	Filtragem do ruído	59
4.6	Modelagem Matemática	64
4.6.1	Caracterização da Densidade Espectral de Potência	64

4.6.2	Caracterização da Função Densidade de Probabilidade	65
4.7	Conclusões	68
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	70
5.1	Trabalhos Futuros	71
5.2	Publicações	72
A	Filtro de Ponderação A	73
B	Medidor de Nível Sonoro	75
	Referências Bibliográficas	83

Capítulo 1

Introdução

A segurança e a qualidade de vida no trabalho são temas de grande importância para a sociedade [2]. Os diversos ambientes de trabalho, em especial o industrial, proporcionam muitos riscos ao trabalhador, que podem ser classificados em três tipos: químicos (vapores, poeira, névoa), físicos (ruídos, vibrações, pressão anormal, temperaturas extremas) e biológicos (fungos, bactérias, vírus) [3]. A exposição prolongada a qualquer um desses riscos, isolados ou em conjunto, pode ocasionar graves doenças ocupacionais, impossibilitando o trabalhador de exercer a sua atividade laboral.

O ruído sonoro é um problema comum às indústrias (alguns setores sofrem mais que outros com esse problema). Ele pode ser descrito como um movimento vibratório, periódico ou não, que não é inteligível ao ser humano. Os motores, ventiladores, transformadores e compressores geram poluição sonora que pode causar efeitos nocivos na saúde do trabalhador [4, 5]. O ruído gerado por esses equipamentos, comuns às indústrias, se caracteriza por possuir níveis elevados de potência para as baixas frequências (20 Hz a 250 Hz). Essa classe de ruído é conhecida como ruído de baixa frequência e é objeto de estudo dessa dissertação.

A exposição diária a níveis elevados de pressão sonora causa, na maioria dos indivíduos, problemas auditivos. Um dos primeiros sintomas é a perda temporária da capacidade auditiva após uma jornada de trabalho. Podem também ser constatados nessa fase, zumbidos e persistência sonora [6]. Horas de repouso auditivo em um ambiente com nenhum ou baixo nível de pressão sonora garantem o restabelecimento da audição. Caso o trabalhador não atue de forma a minimizar sua exposição a ruídos, ele pode sofrer uma perda permanente no seu limiar auditivo (PTS – *Permanent Threshold Shift*). A Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR) afeta inicialmente uma ou mais frequências da faixa de 3 kHz a 6 kHz [7]. Dessa forma, quando constatado em um ambiente industrial níveis sonoros acima do permitido pela legislação brasileira, projetos de absorção acústica são desenvolvidos para mitigar o problema. Trata-se de uma solução simplificada e que não aborda devidamente a complexidade do problema.

Um ruído de baixa frequência afeta toda a superfície do corpo humano [8], podendo causar outros efeitos na saúde de um indivíduo (além dos citados no parágrafo anterior), tais como: estresse, distúrbio de sono, cefaleias, dificuldade de concentração, irritabilidade, fadiga, tontura ou vertigem, ansiedade, doenças cardíacas, disfunções neuro vasculares, disfunção do sistema vestibular [9, 10]. Essa relação subjetiva motiva pesquisadores a mensurá-la [11–13]. Contudo, cada pessoa é mais ou menos susceptível que outra a certo tipo de ruído. A perturbação causada por um tipo de som é um dos fatores que pesam nessa relação [13]. Portanto, o controle do ruído sonoro não deve ser direcionado ao cuidado com a audição apenas, mas deve englobar os demais sistemas do corpo humano.

A Agência de Proteção à Saúde inglesa (*Health and Protection Agency*) recomenda cuidados para a longa exposição a ruídos a fim de prevenir aumentos nos níveis de hormônios, a exemplo do cortisol (hormônio ligado ao estresse) e a diminuição da capacidade de raciocinar [14]. A legislação brasileira atua, de maneira geral, na compensação dos efeitos nocivos da exposição aos riscos mencionados [2]. Para o ruído sonoro, a regulamentação existente atua no nível mínimo de nocividade, ou seja, garante o maior nível de exposição permitido que minimiza os efeitos do ruído [15]. Por exemplo, pela NR 15, um trabalhador que esteja exposto a um ruído de 90 dB só pode permanecer nesse ambiente por no máximo quatro horas [16]. Após esse período, o risco de adquirir uma doença ocupacional se eleva.

Uma outra fonte de ruído de baixa frequência são os aerogeradores. Há relatos de problemas de saúde (efeitos semelhantes aos encontrados em trabalhadores expostos a altos níveis de ruído) ocasionados pela exposição ao ruído dos aerogeradores [8]. Países que fazem uso dessa tecnologia, a exemplo dos Estados Unidos da América, Canadá, Dinamarca, Suécia e Taiwan estão constatando os efeitos nocivos do ruído de baixa frequência e já dispõem de legislação própria para garantir um nível saudável de exposição às pessoas que vivem no entorno das turbinas eólicas [17]. Entre esses países, o Canadá, na província de Alberta, é o único que controla as emissões deste tipo de ruído nas suas indústrias de energia [18]. Diferentemente desses países, o Brasil não possui nenhuma legislação sobre o tema.

Esta dissertação apresenta uma nova abordagem para o problema da presença de ruído sonoro no ambiente industrial e é fruto de um projeto de parceria entre a indústria local e um renomado centro de pesquisa na Paraíba (o Instituto de Estudos Avançados em Comunicações – Iecom). O Iecom vem desde 2003 formando pesquisadores e colaborando para o desenvolvimento da ciência através de sua parceria com a Universidade Federal de Campina Grande [19]. Dentre suas principais atividades está o desenvolvimento e difusão de conhecimento técnico científico e a realização de estudos na sua área de atuação [19]. O estudo inicial para identificação e caracterização do ruído existente na indústria pesquisada é detalhado nesta dissertação. É um dos

objetivos desse trabalho apresentar as bases científicas, as análises e os resultados obtidos com esse estudo.

O objetivo principal é entender a natureza dos ruídos produzidos pelos diversos equipamentos existentes nesse local e caracterizá-los matematicamente. Dada a diversidade de fontes geradoras de ruído, tratá-las separadamente não é uma abordagem prática [20]. Contudo, o conhecimento da natureza espectral do ruído gerado permite propor projetos de melhoria acústica personalizados e acurados. Também permite identificar quais dos equipamentos presentes neste ambiente que produzem um ruído predominante aos dos demais. Conhecer qual é o comportamento do sinal de áudio; se existem frequências específicas ou se são faixas de frequência que predominam no sinal; se as fontes produzem harmônicos e se eles são predominantes; se o ruído é banda larga, conforme esperado [21], ou se é uma composição de diversos sinais e de que forma isso ocorre; permitem estabelecer modelos matemáticos que auxiliem em um futuro próximo a mitigação do ruído sonoro.

A metodologia desenvolvida e aplicada para este projeto de parceria visa de maneira simples atender a complexidade da aferição de um ruído existente em um ambiente fabril. Os processos de baixo custo aplicados e sua fácil implementação tem esse perfil. Portanto, em uma visão ampla, esta dissertação trata-se de prover bases científicas e tecnológicas para aferição e análise do ruído sonoro industrial a fim de caracterizá-lo. Essa abordagem ao problema do ruído não é contemplada pela legislação brasileira e acaba por ser uma atualização às normas vigentes. Isso porque a caracterização espectral aliada às medições quantitativas previstas em norma possibilitam uma ampla análise do problema do ruído em qualquer ambiente.

Esta dissertação está apresentada em cinco capítulos. O primeiro, apresenta a proposta e contextualiza a importância de se observar este problema por um outro ângulo. O segundo apresenta as bases e teorias em que esta dissertação se alicerça. Nele estão apresentados: os conceitos básicos de acústica, o problema do ruído de baixa frequência, a legislação vigente no Brasil e de que forma se propõe interpretar o objeto de estudo com as devidas modificações legais. No Capítulo 3, estão descritos os procedimentos experimentais e a metodologia utilizada para a coleta dos dados necessários ao projeto. No Capítulo 4, estão apresentados os resultados obtidos com o procedimento empregado, os gráficos oriundos da análise espectral e o equacionamento analítico da função densidade de probabilidade (FDP) do ruído e da densidade espectral de potência (DEP). No Capítulo 5 estão dispostas as conclusões e os trabalhos futuros a serem desenvolvidos. Por fim são apresentados dois apêndices a respeito da ponderação A e do medidor de nível sonoro.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos Sobre Ruído Acústico

A acústica é uma área de estudos que remonta a antiguidade clássica. O primeiro filósofo grego a buscar entender como gerar sons musicais foi o filósofo grego Pitágoras (500 A.C.). A ele é creditado o seguinte experimento: vibrar cordas com tamanhos proporcionais entre si. Pela observação das ondas formadas ele descobriu que entre duas cordas a razão dos seus tamanhos era igual ao inverso da razão da quantidade de ondas produzidas nelas em um dado período de tempo. Por exemplo, se uma corda tiver o dobro do tamanho de uma outra, ao serem vibradas a primeira produz duas vezes menos ondas que a segunda para o mesmo período de tempo [15]. Se entre duas ondas a razão entre suas frequências for 2:1 a essa diferença denomina-se oitava [22].

Em 1636, o padre francês Marin Mersenne, publicou sua análise, intitulada *Harmonie Universelle*, sobre vibração de cordas. Ele utilizou uma corda de tal tamanho que o possibilitou relacionar uma determinada frequência com a sensação audível produzida pela vibração desta corda (a frequência em questão era 84 Hz) [15, 23]. Dois anos mais tarde, Galileu Galilei relacionou quantitativamente a frequência vibracional de cordas com o seus comprimentos, tensões aplicadas e densidades a partir da observação do movimento de pêndulos. Havendo uma razão proporcional entre as frequências de oscilação dos pêndulos, tais como 2:1 (oitava), 3:2 (quinta), 5:4 (terça maior), o movimento torna-se agradável de ser visto. Para instrumentos de corda, ele afirma que somente se as cordas vibrarem proporcionalmente entre si o som produzidos por elas é agradável (de forma análoga ao seu experimento com pêndulos), caso contrário é discordante ou ruidoso. Na mesma época, Joseph Sauveur ¹ realizava experimentos com tubos de órgão. Ele tocou dois desses tubos ao mesmo tempo (os

¹Quem primeiro denominou a ciência do som como acústica e que apesar de possuir deficiência auditiva desenvolveu diversos experimentos nesta área [24]

tubos diferiam na produção de sensações audíveis em um semitom²) e deduziu que a razão das vibrações realizadas por ambos canos no mesmo tempo gerava alta ou baixa sensação auditiva [23, 26].

Outros cientistas se envolveram com problemas na área de acústica. Robert Boyle, em 1660, realizou um experimento com um relógio dentro de um tubo sem ar. Em sua observação Boyle conclui que o ar está diretamente envolvido na transmissão sonora (apesar de haver outros meios). Sir Isaac Newton, por meio de analogias com a vibração de um pêndulo e com ondas na superfície d'água, desenvolveu um modelo matemático para a velocidade do som [24]. Sua equação predizia esse valor com 16% de erro, pois assumia que o som era transmitido isotermicamente. Somente em 1816 que o pressuposto estabelecido por Newton foi substituído pelo resultado das observações do matemático francês, Pierre Simon Laplace. Para Laplace, a transmissão do som era adiabática por causa da alta frequência da onda sonora e, a partir dessa assunção, ele possibilitou calcular a velocidade do som com grande precisão [15, 23, 26]. Em 1877 foi publicado um documento em dois volumes intitulado a Teoria do Som, por John William Strutt Rayleigh. Este permitiu a publicação de 128 artigos na área de acústica entre os anos de 1870 e 1919 [15].

2.1 Som e Ruído

O som é um fenômeno físico que caracterizado pela variação periódica de pequenos valores de pressão (compressão e expansão de ar) em torno da pressão atmosférica [27]. É considerado também como o resultado de vibrações de partículas do ar propagadas por diversas estruturas vibrantes, visto que ele pode ser transmitido através de sólidos, líquidos e gases.

O som é descrito matematicamente pela variação temporal da pressão sonora, $p(t)$, cuja unidade de medida é o pascal (Pa). Entre o limite audível (10^{-5} Pa) e o limite da dor (10^2 Pa) se encontram os valores de pressão sonora que interessam à psicoacústica (ramo da psicologia que estuda o comportamento e os processos mentais dos indivíduos e de grupos devido percepções auditivas obtidas a partir da estimulação sonora [28, 29]). Os níveis de pressão sonora são obtidos por [30]

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p(t)}{p_0} \right) = 10 \log \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 \text{ dB}, \quad (2.1)$$

em que L_p é o nível de pressão sonora, p_0 é o valor padronizado da pressão sonora ($p_0 = 20\mu$ Pa). Uma outra medida é importante para esta área de estudos, a intensidade sonora. Esta unidade é igual a quantidade de potência transmitida em uma unidade

²Um semitom, na escala igualmente temperada de 12 tons por oitava, é igual a $\sqrt[12]{2}$ de uma frequência [25].

de área. De forma similar a pressão sonora, a intensidade também é medida em níveis. Portanto, o nível de intensidade sonora é calculado por

$$L_I = 10 \log(I/I_0) \text{ dB}, \quad (2.2)$$

em que L_I é o nível de intensidade sonora, I_0 é o valor padrão e é igual a $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Na Tabela estão dispostas algumas métricas utilizadas na acústica.

Tabela 2.1 – Importantes níveis acústicos medidos [15].

Nível Medido	Expressão	Valor de Referência
Pressão Sonora	$L_p = 20 \log\left(\frac{p(t)}{p_0}\right) \text{ dB}$	$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$
Intensidade Sonora	$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ dB}$	$I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$
Potência	$L_W = 10 \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \text{ dB}$	$W_0 = 1 \text{ pW}$
Frequência	$L_{freq} = 10 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \text{ dB}$	$f_0 = 1 \text{ Hz}$

Em Psicoacústica conhecer as características temporais e espectrais dos sinais sonoros que estimulam a audição é importante. Para ruídos é comum calcular e representar a densidade da intensidade sonora, em vez da intensidade sonora, considerando a largura de banda de 1 Hz. Relações entre nível de pressão sonora e nível de densidade de intensidade sonora podem ser obtidos para as funções dos sinais sonoros. Para o caso do ruído branco, tem-se

$$L_p = [l + 10 \log(\Delta f / \text{Hz})] \text{ dB}, \quad (2.3)$$

em que L_p é o nível de pressão sonora, l é o nível de densidade de intensidade sonora, Δf é a banda de frequência do som medido em hertz.

2.1.1 Efeitos Subjetivos Provocados por Estímulos Sonoros

O conhecimento da função temporal da pressão sonora também é importante. Por meio dela é possível obter outros parâmetro físicos úteis para a mensuração dos efeitos subjetivos provocados pelos estímulos sonoros. As grandezas físicas (nível de pressão sonora, duração, frequência, intensidade sonora) se correlacionam com as grandezas subjetivas, ou sensações, como a audibilidade e o *pitch*, uma vez que são provocadas pelo estímulo físico [30–32]. Essa relação só é possível se as grandezas físicas estiverem dentro da faixa audível do ouvido humano (20 Hz até 20 kHz). Fora dessa região não ocorrem sensações auditivas, independentemente da magnitude do estímulo [33].

A audibilidade é o equivalente subjetivo da intensidade sonora. A unidade de audibilidade é o fone. Essa é definida como o nível de pressão sonora de um tom de 1 kHz considerando que produza igual audibilidade [24, 32, 34]. A Figura 2.1 apresenta as curvas de audibilidade para tons puros³. A curva de 60 fones, por exemplo, apresenta para a faixa de frequência audível tons puros com audibilidade igual a um tom de 1 kHz com $L_p = 60 \text{ dB}$. A escala utilizada pela ponderação A baseia-se na curva invertida de 40 fones [32, 34].

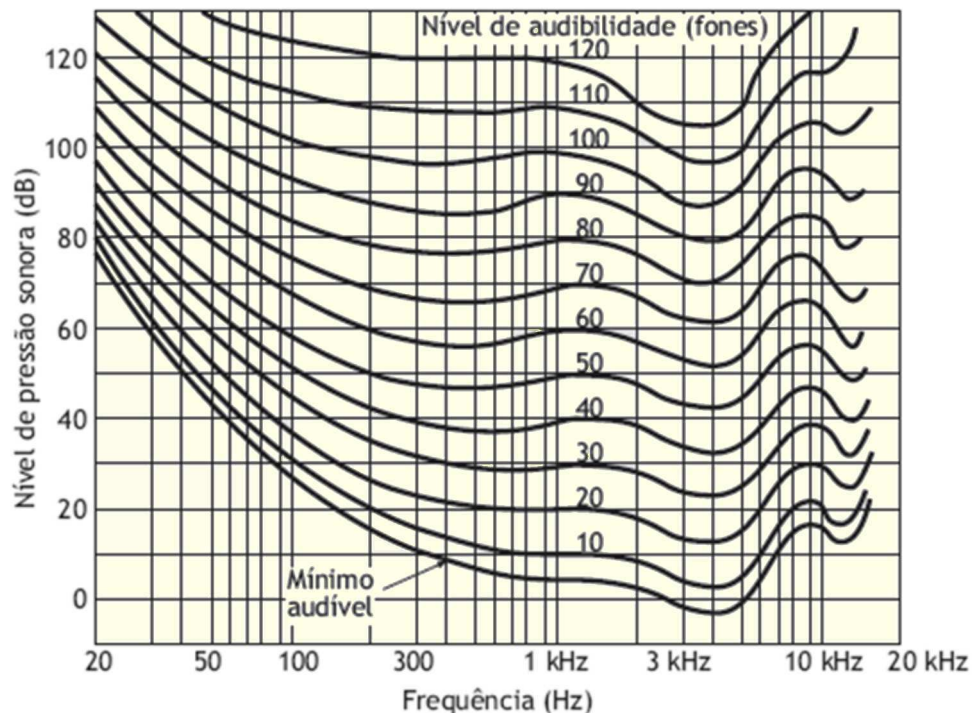


Figura 2.1 – Curvas de audibilidade. Retirado de [34].

O pitch é a percepção humana da frequência de um som [24, 32, 35]. Para um som complexo⁴, o *pitch* corresponde a sua frequência fundamental [35]. A resposta a diferentes sons da aurícula (ver Seção 2.2) pode provocar *pitches* iguais. Isso ocorre independentemente da recepção pelo ouvido da frequência fundamental de um som [24, 35]. As variações dos níveis de pressão sonora ou de frequências pode resultar em alteração da sensação auditiva provocada por um som. Um exemplo dessa relação está apresentado nas Figuras 2.2 e 2.3. A variação dos níveis de sensação somente ocorre quando as grandezas físicas ultrapassam um determinado limiar (conhecido por limiar diferencial). Para produzir uma sensação auditiva basta que a pressão sonora

³Um tom puro, na escala igualmente temperada de 12 tons por oitava, é igual a $\sqrt[12]{2}$ de uma frequência [25].

⁴Sons complexos podem ser melhor representados em bandas de frequências. Estas podem ser apresentadas em oitavas ou frações de oitavas. As frequências centrais padronizadas para a oitava são 31.5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz e 16 kHz [22].

seja alterada em aproximadamente 1 dB⁵. Para níveis sonoros elevados, uma variação de 0,3 – 0,5 dB é suficiente para criar uma sensação sonora diferente [34]. No caso de variações de frequências, uma diferença de 2 – 3 Hz é suficiente para gerar uma sensação auditiva diferente para frequências abaixo de 500 Hz. Acima de 500 Hz, uma variação de 0,5% na frequência do som produz uma sensação auditiva.

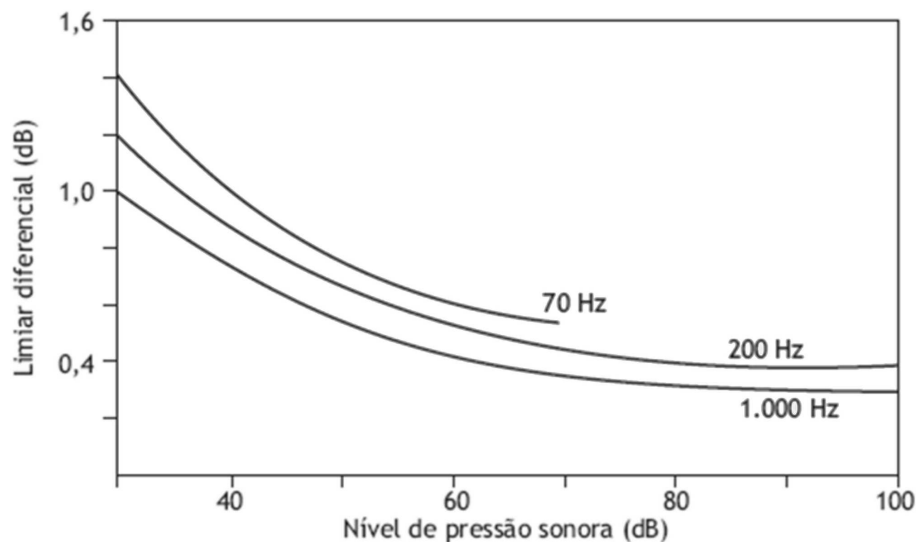


Figura 2.2 – Limiar diferencial de audição - Variação do nível de pressão sonora. Retirado de [34].

De um ponto de vista subjetivo, o som, diferentemente do ruído⁶, produz uma sensação agradável no sistema auditivo de uma pessoa. Em um *show*, por exemplo, dependendo da sensibilidade dessa pessoa, o som ali produzido e transmitido pode ser considerado som ou ruído [34]. Apesar de ser indesejável, esta característica não significa que esse ruído deva ser desprezado. Ou seja, essa classificação sonora depende da aplicação. Muitos equipamentos podem transmitir informações úteis por meio de ruídos específicos. Por exemplo, em um automóvel, barulho do motor, das rodas, da suspensão de um automóvel fornecem informações sobre o seu funcionamento. Um outro exemplo é o som emitido pelas hélices de um helicóptero. Para quem está a bordo desde veículo o giro das hélices é um ruído. Entretanto, para quem necessita de um resgate ou de um suporte aéreo em uma ação tática, as hélices produzem um som alentador [34]. O ruído acústico também pode ser descrito como um som gerado a partir de vibrações não periódicas do ar (sinal de natureza aleatória) ou como a combinação de diversos sons inteligíveis (conforme apresentado na Figura 2.4), com características iguais ou diferentes, cujo resultado não é inteligível ao ouvido humano [4].

⁵Isto se torna verdade para sons de baixo nível sonoro, por volta de 30 – 40 dB e para médias e altas frequências.

⁶Um som indesejável, em determinada situação ou ambiente é considerado ruído.

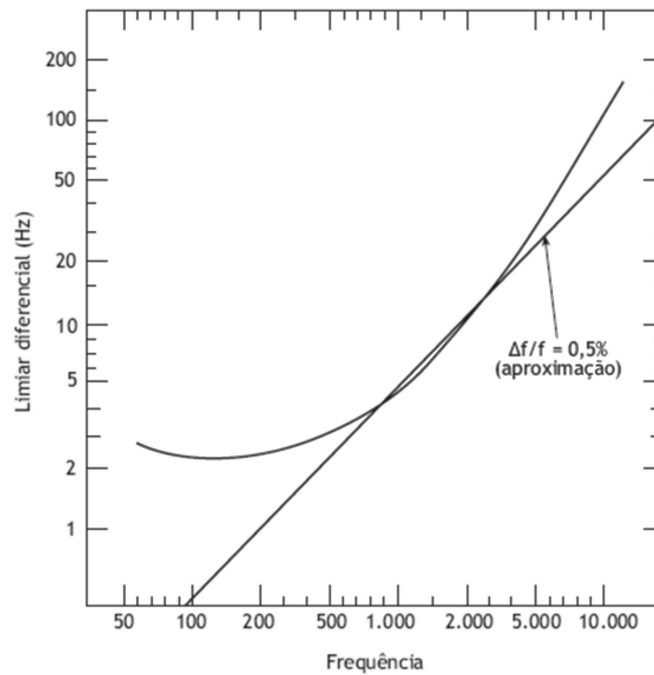


Figura 2.3 – Limiar diferencial de audição - Variação da frequência. Retirado de [34].

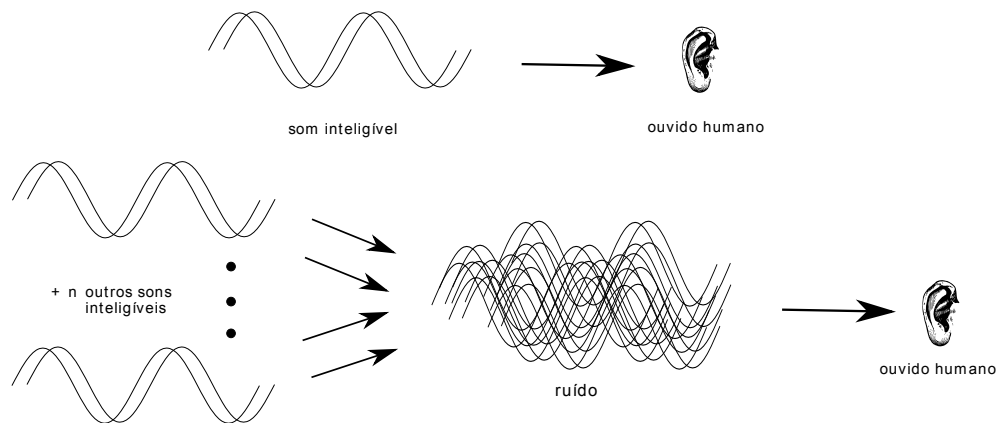


Figura 2.4 – Descrição visual da formação do ruído audível.

A Figura 2.5 mostra como o organismo de uma pessoa reage à exposição ao ruído. A exposição a sons e ruídos depende do ambiente físico e social ao qual a pessoa está inserida, ou mesmo pelo estilo de vida que ela tem. Caso a exposição seja excessiva, o ruído passa a produzir efeitos adversos na saúde. Se as características genéticas e as adquiridas aumentarem a sensibilidade sonora, os efeitos são amplificados. Podem ser observadas atividades perturbadoras, aborrecimentos e efeitos somáticos e psicossomáticos. A avaliação de risco à saúde humana causado, por um agente exógeno qualquer, deve considerar o nível de exposição da pessoa a esse agente [27, 36].

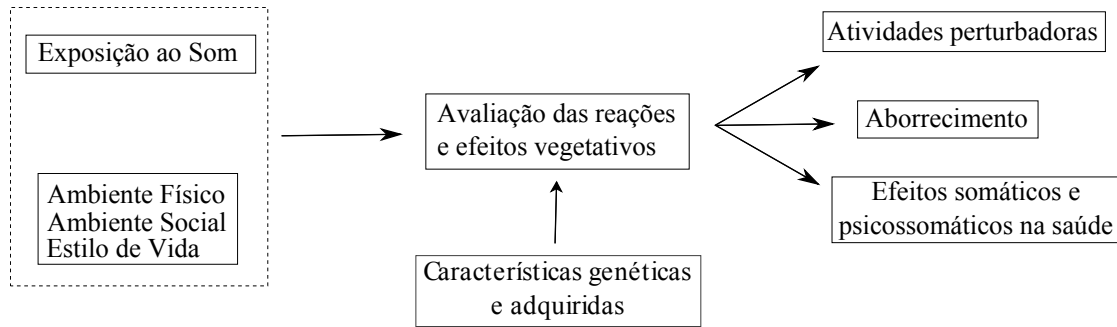


Figura 2.5 – Esquema representativo do processamento do ruído pelo corpo humano. Adaptada de [27].

2.1.2 Ruído Industrial

O ambiente industrial submete aos trabalhadores uma exposição a elevados níveis de ruído, por longo tempo. Nesse local existe uma diversidade de máquinas e equipamentos que geram ruído.

O metal, assim como outros materiais, possui um valor de resistência para compensar as forças deformantes. A esse valor dá-se o nome de módulo de elasticidade. O processo de deformação e retorno, do material deformado, ao estado original é a origem de som, qualquer que seja o meio. A frequência do som produzido depende da intensidade de deformação e do valor do módulo de elasticidade [15]. O ruído que cada máquina gera está relacionado com as propriedades elásticas dos metais e com a sua operação. Equipamentos que exijam impactos entre peças metálicas para funcionar são eficazes na geração de ruído. As oscilações provocadas dessa forma abrangem uma larga faixa de frequências. Motores a combustão interna e elétricos funcionam com movimentação de peças metálicas (biela – combustão interna; giro do rotor – motor elétrico) causando uma vibração contínua por toda suas estruturas, funcionando como grandes alto-falantes [34].

Sistemas de ventilação são importantes para indústrias, seja para resfriar componentes de máquinas, seja para refrigerar ambientes. São constituídos comumente por hélices, um motor elétrico, sistema de acionamento e dispositivos para controle de fluxo [37]. Durante seu funcionamento podem gerar ruído. Quanto maior for o fluxo de ar e menor for a pressão estática do ar, maior será o nível de ruído. Cada tipo de ventilador possui uma assinatura de ruído diferente do outro [15]. Ventiladores geram um tom na frequência de passagem das hélices (f_{PH}), dado por [22]

$$f_{PH} = \frac{N_H \cdot \omega_H}{60}, \quad (2.4)$$

em que N_H é o número de hélices do ventilador e ω_H são as rotações por minuto dessas hélices. Esse tom pode ser amplificado em caso de problemas com o ventilador, podendo ser desde distorções no fluxo de ar na entrada do ventilador até operação

inadequada deste fluxo [22]. As operações de um ventilador são regidas por relações entre fluxo de ar, velocidade, pressão estática e potência. Para alterar alguma dessas características a fim de diminuir o ruído produzido, por exemplo, as seguintes relações devem ser obedecidas [37]

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad \frac{PE_1}{PE_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3, \quad (2.5)$$

em que F_1 é o fluxo de ar inicial, F_2 é o fluxo de ar final, ω_1 é o velocidade do ventilador (RPM) inicial, ω_2 é o velocidade do ventilador (rpm) final, PE_1 é a pressão estática inicial, PE_2 é a pressão estática final, P_1 é a potência inicial e P_2 é a potência final [37]. Os ventiladores são classificados pela natureza do fluxo de ar e pela geometria das pás:

- **Ventiladores centrífugos:** utilizam um impulsor rotatório para aumentar a velocidade de um fluxo de ar. São mais indicados para aplicações mais severas, uma vez que produzem altas pressões. Podem possuir pás planas, curvadas para frente, curvadas para trás, tipo aerofólio e radiais [15, 22, 37].



Figura 2.6 – Ventilador Centrífugo. Retirado de [38].

- **Ventiladores axiais:** São comuns na indústria, pois possuem baixo custo de implantação, são compactos e leves. Movimentam o fluxo de ar ao longo do eixo do ventilador. Esse tipo de ventilador pressuriza o ar por meio de um empuxo aerodinâmico oriundo do movimento de rotação das pás. Podem ser do tipo propulsor, tubo-axial e cata-vento axial [15, 22]. São mais ruidosos do que o outro tipo [37].



Figura 2.7 – Ventilador Axial. Retirado de [39].

2.2 Fisiologia da Audição

O sistema auditivo humano é composto por ouvido externo, médio e interno (ver Figura 2.2). A primeira parte a ter contato com o som que chega à cabeça é o ouvido externo. A aurícula, faz parte do ouvido externo e é a estrutura que capta o som. Sua função é direcionar o som e prover um ganho sonoro para o tímpano [32, 34]. A função de transferência da aurícula apresenta maiores ganhos na faixa de 1,5 – 5 kHz [35]. O outro componente do ouvido externo é o canal auditivo. Ele conduz o som da aurícula até o tímpano e promove ganhos entre 12 dB e 15 dB na faixa de 3 – 5 kHz [32, 34]. Dadas suas características, ocorrem ressonâncias em seu interior. Essa ressonância depende do comprimento do canal e da frequência da onda. A primeira ressonância é igual a velocidade do som dividido pela quarta parte do comprimento de onda equivalente do tubo, ou seja [40]

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4L}, \quad (2.6)$$

em que $L = \frac{\lambda}{4}$

As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam as respostas em frequência médias da aurícula e do canal auditivo. Ambas possuem alto ganho na faixa entre 3 – 5 kHz, compensando a resposta em frequência do ouvido humano que possui baixos níveis para essa faixa. A Figura 2.11 apresenta a resposta em frequência do ouvido médio.

O ouvido médio é composto pelo tímpano e por três ossículos. O som que chega ao tímpano (membrana que separa o ouvido externo do médio), causa vibrações que são transmitidas para a cóclea por três ossículos: martelo, bigorna e estribo [32, 35]. A principal função do ouvido médio é garantir a maior transferência de energia sonora possível para a cóclea. Para executar tal tarefa, os três ossículos, conjuntamente com o tímpano, agem casando a impedância do fluido existente na cóclea com a do ar

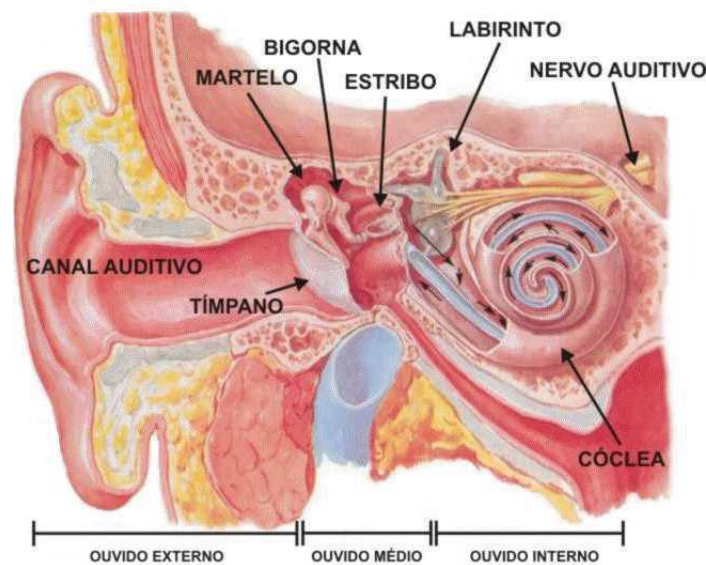


Figura 2.8 – Imagem de um corte lateral do ouvido humano. Retirado de [41].

(existe uma grande diferença entre eles) e ajustam a força que atua sobre a cóclea para prover uma excitação suficiente para movimentar o fluido da cóclea [32, 34, 35]. Existem também no ouvido médio dois músculos (tensor do tímpano e do estapédio). Eles protegem o sistema auditivo quando ao tímpano é excitado com um som intenso, se contraindo, reduzindo a potência sonora em até 15 dB dessa forma. Esse mecanismo é chamado de reflexo estapediano, e além de exercer a função de proteção, atua: no controle automático de ganho para sons intensos e de baixa frequência, na redução da percepção de sons autogerados ⁷ e promove uma atenuação seletiva das baixas frequências melhorando o entendimento de sons complexos [35]. Considerando níveis de pressão sonoros abaixo de 90 dB, tanto o ouvido externo quanto o médio se comportam como sistemas lineares. Contudo, se os níveis forem maiores do que esse limiar, passam a se comportar como não lineares, produzindo distorção intermodulação e harmônicos [35].

O ouvido interno é composto pelo labirinto e pela cóclea. O primeiro se relaciona com o equilíbrio, uma vez que contém sensores sensíveis à gravidade e a acelerações lineares da cabeça [34]. A cóclea é o órgão que converte os sinais sonoros em elétricos (é simultaneamente um detector de envoltória e um transdutor eletromecânico) e possui a forma de um tubo espiralado que contém dois fluidos responsáveis pela propagação do som e pelo transporte de tecidos [32, 35]. Dentro do duto coclear existe uma membrana capaz de transformar as formas de onda sonoras em espectro sonoro [32, 34, 35]. Essa membrana é chamada de basilar e cada região (desde a base até o ápice da cóclea) é excitada por frequências diferentes conforme ilustrado na Figura 2.12.

⁷Sons gerados pela própria voz e pela movimentação do corpo

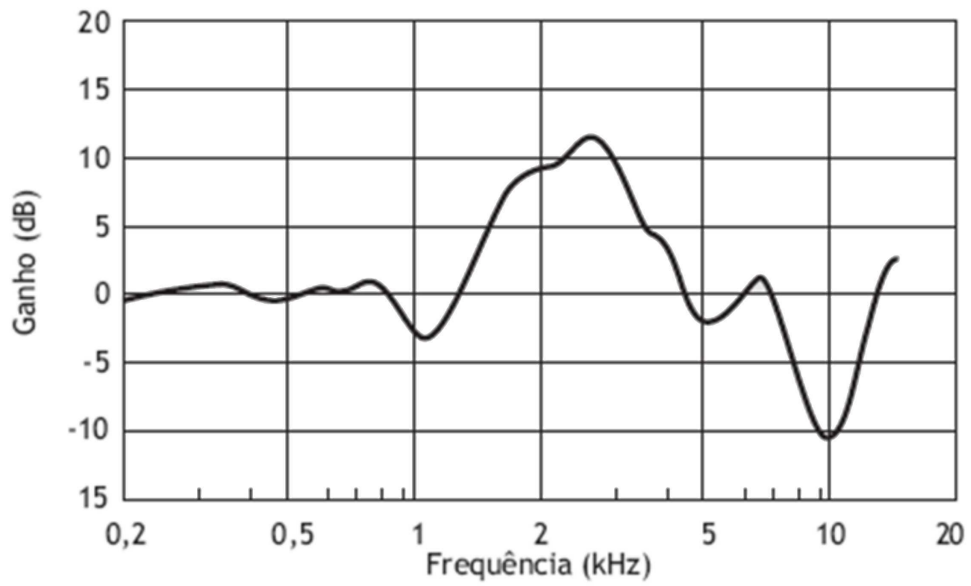


Figura 2.9 – Resposta em frequência da aurícula. Retirado de [34].

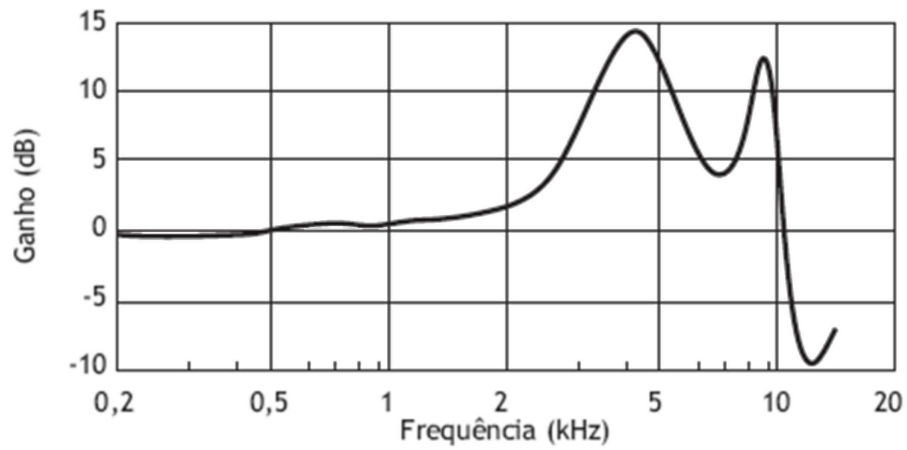


Figura 2.10 – Resposta em frequência do canal auditivo. Retirado de [34].

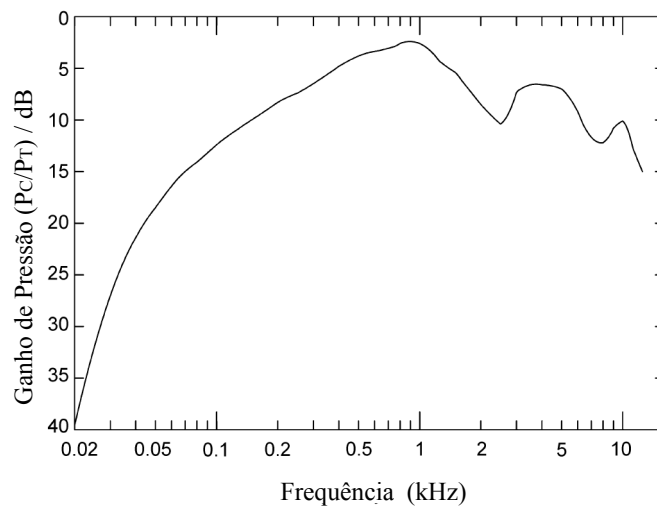


Figura 2.11 – Resposta em frequência do ouvido médio. Retirado de [35].

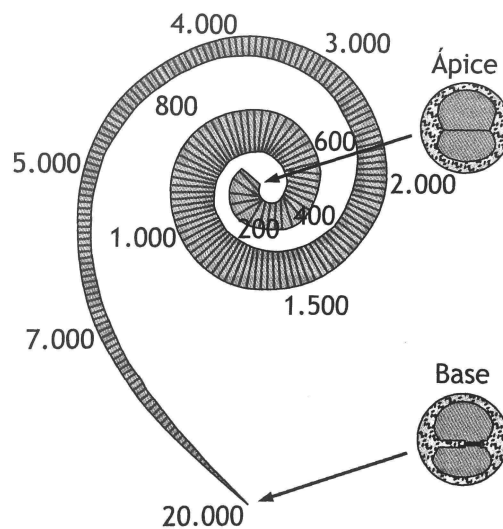


Figura 2.12 – Representação das regiões de excitação da membrana basilar com suas respectivas frequências. Retirado de [34].

A excitação da membrana basilar inicia na sua base, onde a onda sonora se propaga até encontrar a região capaz de responder a essa excitação (a resposta se dá na forma de movimentos vibratórios). Esse mecanismo foi descoberto pelo cientista húngaro Georg von Békésy (1899-1972), durante os seus 15 anos de dedicação a estudos nessa área. Pela Figura 2.12, pode ser observado que as altas frequências excitam a base da membrana basilar enquanto que as baixas frequências o ápice. Portanto, como sons de alta frequência não excitam o ápice da membrana diferentemente dos de baixa frequência que podem excitar a base, ruídos reduzem a longo prazo a capacidade auditiva para altas frequências devido a fadiga da membrana.

Assentado na membrana basilar encontra-se a estrutura responsável por realizar a transdução eletromecânica dos sinais sonoros, órgão de Corti que é composto por células ciliares e de suporte. As últimas se encarregam de manter a estrutura do órgão de Corti. As células ciliares se dividem em dois tipos: externas e internas. As células ciliares externas (CCE) atuam como um mecanismo ativo para sintonizar a frequência de recepção da membrana basilar [35]. As células ciliares internas (CCI) agem como transdutores eletromecânicos. O movimento ciliar tanto das CCE quanto das CCI abre e fecha canais iônicos (íons de K^+) que despolarizam e hiperpolarizam os cílios gerando movimento opostos. O cérebro pode se comunicar com as CCE para melhorar a amplificação seletiva em frequência de sons de interesse e reduzir esta amplificação para ruídos [35].

2.3 Normas Técnicas

A regulamentação das atividades laborais é antiga. Com o passar dos anos os trabalhadores vêm melhorando suas condições de trabalho à medida que a legislação nessa área evolui. Como marco do compromisso com os direitos trabalhistas e justiça social, em 1919 foi fundada a Organização Internacional do Trabalho (OIT). As normas internacionais relacionadas ao trabalho são formuladas e aplicadas por essa organização [42]. A OIT possuiu um papel fundamental na elaboração da legislação trabalhista durante o século XX [42]. No ano de 1977 ocorreu a 63ª reunião da Conferência Internacional do Trabalho em que foi adotada a Convenção sobre o Meio Ambiente de Trabalho (Contaminação do Ar, Ruído e Vibrações). Essa Convenção passou a vigor internacionalmente em 11 de julho de 1979 e no Brasil em 14 de janeiro de 1983, quase quatro anos depois. Em seus artigos, estão estabelecidas obrigações, a serem obedecidas pelos membros signatários, a respeito da contaminação do ar, ruído e vibrações [42]. Para essa Convenção os seguintes conceitos são aplicados:

- a) o termo “contaminação do ar” designa o ar contaminado por substâncias que podem provocar risco à integridade e à saúde do trabalhador;
- b) o termo “ruído” designa qualquer som que pode provocar uma perda da capacidade auditiva ou que seja um risco à integridade e à saúde do trabalhador;
- c) o termo “vibrações” designa movimentos oscilatórios realizados por estruturas sólidas que são transmitidos ao ser humano que podem provocar risco à sua integridade e saúde.

Pelo disposto no artigo 4 da Convenção de 1977, os países devem adotar práticas que visem a prevenção e a limitação dos riscos (devidos a contaminação do ar, ruído e vibrações) aos quais os trabalhadores estão expostos [42]. Os Artigos 8 e 9 obrigam o estabelecimento de critérios para mensurar os riscos e limites à exposição a esses agentes, e a eliminação do risco por meio de técnicas a serem aplicadas tanto em novas instalações quanto nas existentes [42].

A partir desse marco na legislação, normas foram estabelecidas, no âmbito internacional e nacional, para regulamentar a avaliação quantitativa de tal risco à saúde. Foram estabelecidas sanções legais para a garantia da melhoria da qualidade nas condições de trabalho. Dessa forma, é garantida a diminuição dos índices de doenças relacionadas à perda auditiva, à hipertensão, dentre outras, devido a exposição ao ruído industrial excessivo [43].

A exposição excessiva ao ruído⁸ pode ter efeitos danosos à saúde do trabalhador. Um grupo da Agência de Proteção à Saúde inglesa descreve em seu

⁸O conceito de ruído utilizado neste trabalho é o mesmo definido pela Convenção N. 148 da OIT.

relatório intitulado *Environmental Noise and Health in the UK* que os níveis de hormônios aumentam, a exemplo do cortisol (hormônio ligado ao estresse) e afetam o desempenho cognitivo devido longos períodos de exposição a ruídos [14]. A Organização Mundial de Saúde e outras entidades nacionais e internacionais, a respeito do ruído, recomendam limites de tolerância à sua exposição para salvaguardar a saúde dos trabalhadores [44].

O Brasil, como membro signatário da OIT, possui regulamentações para minimizar ou eliminar o ruído. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por exemplo, na Resolução nº 002 de 1990 estabelece o programa SILÊNCIO. Este programa busca incentivar a fabricação e a utilização (por indústrias, veículos em geral, construção civil, utilidades domésticas, dentre outros) de máquinas e equipamentos que produzam uma menor intensidade de ruído [45].

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da Norma Brasileira (NBR) 10151:2000 e da NBR 10152:1987, apresenta uma metodologia para aferição dos níveis de ruído em áreas habitadas visando garantir o conforto acústico em ambientes diversos. As medições dos níveis de ruído devem ser realizadas sem que haja interferência audível de fenômenos naturais (chuva forte, por exemplo), e nas condições normais de utilização do ambiente [46]. A escolha tanto do tempo de cada amostra, quanto da quantidade delas, é feita de tal maneira que permita a caracterização do ruído. Outro aspecto a ser observado é a distância mínima entre o equipamento de leitura e qualquer superfície (1 metro) [46]. Para a NBR 10151:2000, bem como para esta dissertação, as seguintes definições são consideradas [46]:

- Nível de pressão sonora equivalente em decibéis ponderados em “A” (dB(A))⁹ – Nível obtido a partir do valor médio quadrático médio da pressão sonora (com ponderação A) para todo o intervalo de medição;
- Ruído com componente tonal – Ruído que contém tons puros como o som de apitos ou zumbidos.

A sensibilidade do ouvido humano não é linear. Há uma maior sensibilidade para as baixas frequências do que para as altas. Assim, foram desenvolvidas as ponderações A, B, C e D para enfatizar faixas de frequências específicas ¹⁰[47]. Atualmente, a IEC 61672:2003 (atualização da IEC 60804:1985) utiliza as ponderações A e C para mensurar níveis sonoros [48]. Em cumprimento às legislações da IEC apresentadas, a NBR 10151:2000 sugere a utilização da ponderação A para a medição dos níveis de pressão sonora.

⁹Ver Apêndice A

¹⁰A ponderação A destaca as altas frequências; a B destaca as médias; a C destaca as baixas e a D, os ruídos de alto volume em aeronaves.

A ponderação A é a mais similar à resposta do ouvido humano ao estímulo sonoro. Uma pessoa ao ser exposta a altos níveis sonoros perde principalmente a capacidade de detectar a faixa de 1 kHz a 4 kHz, a ponderação A é empregada para medir poluição sonora [49]. As medidas realizadas com esse fator de escala são denominadas por dB(A).

A NBR 10152:1987 apresenta o conceito de Critérios de Ruído (*Noise Criteria* – NC), que permite observar os limites de tolerância auditiva para as diferentes frequências que o ouvido humano é capaz de detectar. Por meio destas curvas é possível identificar quais frequências precisam ter sua potência ajustada para a região de tolerância [46]. Esse critério permite realizar o balanço espectral do som medido. A classificação leva em consideração níveis de interferência de voz tidos como aceitáveis para diversos ambientes de trabalho. São 12 curvas que permitem a configuração de níveis de oitavas de frequências para que haja uma conversação sem incômodos.

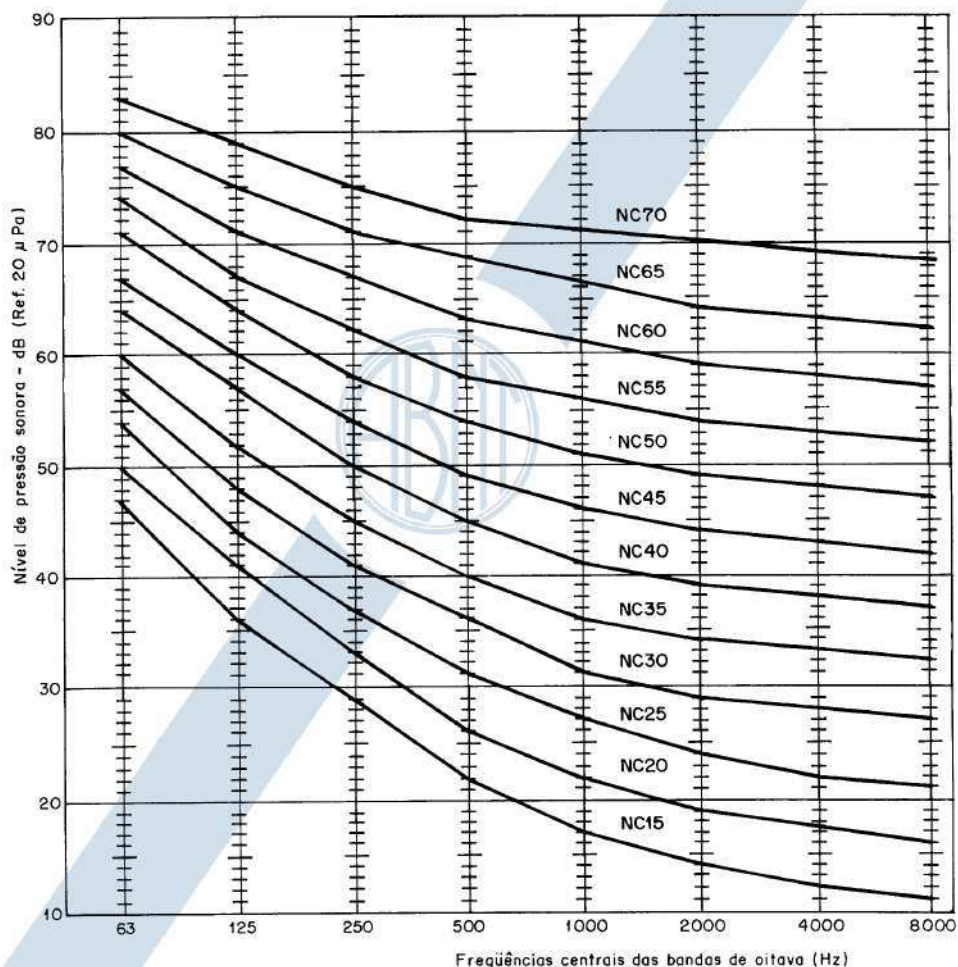


Figura 2.13 – Gráfico mostrando as curvas de critérios de ruído. Obtidas de [50].

Como pode ser observado na Figura 2.13, no eixo das abcissas estão apresentados os valores de frequência separados em oitavas e o eixo das ordenadas apresenta os valores dos níveis de pressão sonora apresentados em decibel. A

discriminação das medições dos sons em oitavas de frequências permite compreender o impacto do ruído na audição.

A Tabela 2.2 apresenta os níveis NC adequados para os diversos ambientes de trabalho. Para obter o valor NC em uma medição, basta gerar os gráficos em oitavas de frequência e verificar qual das curvas NC tangencia o maior valor de potência medido. Existem diversas classificações para critérios de ruído: Critério de Ruído NC, Critérios de Ruído Balanceado (NCB – *Balanced Noise Criteria*) e Critérios do Ambiente (RC – *Room Criteria*) [51]. Entretanto, essa métrica não avalia o impacto da poluição sonora na fala e na audição, tornando-se necessária uma classificação específica para tal fim.

Tabela 2.2 – Classificação NC. Tabela adaptada de [50] e [52].

Locais	dB(A)	NC
Hospitais		
Apartamentos, Enfermarias, Berçários, Centros cirúrgicos	35-45	30-40
Laboratórios, Áreas para uso do público	40-50	35-45
Serviços	45-55	40-50
Escolas		
Bibliotecas, Salas de música, Salas de desenho	35-45	30-40
Salas de aula, Laboratórios	40-50	35-45
Circulação	45-55	40-50
Hotéis		
Apartamentos	35-45	30-40
Restaurantes, Sala de estar	40-50	35-45
Portaria, Recepção, Circulação	45-55	40-50
Residências		
Dormitórios	35-45	30-40
Salas de estar	40-50	35-45
Auditórios		
Salas de concerto, Teatros	30-40	25-30
Salas de conferências, Cinemas, Salas de múltiplo uso	35-45	30-35
Restaurantes	40-50	35-45
Escritórios		
Salas de reunião	30-40	25-35
Salas de gerência, Salas de projetos de administração	35-45	30-40
Salas de computadores	45-65	40-60
Salas de mecanografia	50-60	45-55
Igrejas e Templos	40-50	35-45
Locais para esporte		
Pavilhões fechados para espetáculos e atividades esportivas	45-60	40-55
Indústria	50-60	45-55

Em 8 de junho de 1978, foram aprovadas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) as Normas Regulamentadoras (NR). As normas são de observância obrigatória por parte de todas as empresas privadas e públicas e pelos órgãos públicos da administração direta e indireta, bem como pelos órgãos dos poderes legislativo e

judiciário, que possuam empregados regidos pela CLT, conforme disposto no item 1.1 da NR 1 [53]. Entre as 35 Normas Regulamentadoras, a NR 7, a NR 9, a NR 15 e a NR 17 tratam sobre ruído industrial em alguns de seus itens.

A NR 7 afirma que a exposição sistemática a níveis elevados de sons provoca a perda auditiva nos trabalhadores, ocorrendo de forma gradual e progressiva. Essa perda afeta inicialmente uma ou mais frequências da faixa de 3 kHz a 6 kHz. A fim de aferir sua capacidade auditiva, devem ser realizados, pelo trabalhador, exames audiológicos periódicos. Para possuir uma audição normal, o audiograma resultante deve apresentar limiares auditivos menores ou iguais a 25 dB(NA) em todas as frequências examinadas [7].

Os agentes nocivos ao trabalhador citados na NR 9 (físicos¹¹, químicos e biológicos) são considerados riscos ambientais. Essa norma regulamenta o desenvolvimento e aplicação de um Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA)¹². Objetiva-se com esse programa a preservação da saúde e da integridade do empregado. No item 9.3.5.1 da norma são listadas quatro situações em que os riscos ambientais devem ser minimizados ou eliminados [3]:

- a) quando há risco potencial à saúde;
- b) quando há risco evidente à saúde;
- c) quando, na avaliação qualitativa do PPRA, forem detectados valores de exposição maiores que o previsto na NR 15 ou em outra legislação adotada em negociação coletiva de trabalho, desde que sejam mais rigorosas;
- d) quando há constatação da relação direta entre a saúde do trabalhador e o ambiente ao qual está exposto.

As ações devem proteger todos os trabalhadores devendo focar na redução ou eliminar o uso ou a formação de agentes prejudiciais à saúde. Caso não seja possível, devem prevenir sua liberação ou disseminação no ambiente. Para garantir a efetividade destas medidas, os trabalhadores devem ser treinados quanto aos procedimentos a serem adotados [3].

A NR 15 regula as atividades e a realização de operações em ambientes insalubres. Nos itens 15.2 e 15.4 regulamenta a indenização e cessação, respectivamente, ao trabalhador por expô-lo a um ambiente insalubre. O item 15.2 trata de assegurar um valor adicional ao salário àqueles que atuem em ambientes insalubres. O item 15.4 trata da cessação do pagamento do adicional salarial previsto no item 15.2 quando há a eliminação ou neutralização da insalubridade [16]. Isto ocorre quando o agente causador é conservado dentro dos limites de tolerância impostos por essa norma. O

¹¹O ruído é um risco físico

¹²Nas ações do PPRA deve haver a participação tanto do empregador quanto do empregado.

Anexo 1 dessa norma trata da poluição sonora e dos limites de tolerância impostos a este tipo de insalubridade. Para ruídos de característica contínua, os limites de exposição estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Limites de tolerância à exposição de ruído. Adaptado de [16].

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

Considerando um ambiente em que um trabalhador esteja exposto a mais de um tipo de ruído (com níveis diferentes), o tempo máximo de exposição é calculado pela soma ponderada entre os tempos que o trabalhador esteja exposto para cada nível de ruído e os tempos máximos permissíveis para estes níveis. No Anexo 8 da norma está previsto como insalubridade a exposição a vibrações [16]. O correto controle do ruído permite a diminuição da insalubridade devido a redução da potência sonora captada pelo ouvido e da vibração que o corpo do trabalhador sofre.

De acordo com a NR 17, em ambientes nos quais haja solicitação intelectual e atenção constantes, os níveis de ruído devam estar de acordo com o estabelecido na NBR 10152:1987. No caso de não haver equivalência entre as atividades desempenhadas no ambiente aferido com as constantes na NR 17, o nível de ruído contínuo ou intermitente aceitável, para efeito de conforto, deverá ser de até 65 dB(A) e 60 dB(C) para ruídos de impacto [54].

2.4 Ruído de Baixa Frequência

As normas aplicadas pelo governo brasileiro, por meio do MTE, ao problema do ruído, não aborda a característica espectral do ruído. O problema é tratado sob o ponto de vista quantitativo [5]. As normas revisadas não contemplam uma análise mais ampla do ruído. Dessa forma, a existência de uma maior concentração da potência sonora em uma determinada frequência ou faixa de frequências (que pode afetar especificamente as pessoas que estejam submetidos a esse tipo de ruído) não é observada.

Uma ruído em que ocorra uma concentração do nível de potência sonora ocorra na faixa entre 10 Hz e 200 Hz esse é tido como de baixa frequência (LFN – *Low Frequency Noise*) [8]. A Organização Mundial de Saúde determina que em ambientes com este tipo de ruído devem ser observados com atenção uma vez que pessoas podem ser perturbadas com níveis de pressão sonora abaixo de 30 dB(A) [44]. Outro aspecto ser observado é a não adequação da ponderação A para filtrar LFN [8, 44]. Por se tratar de um filtro psfométrico¹³ a atenuação das componentes de baixa frequência realizada por essa ponderação mascara a nocividade do ruído [44].

A criação de fazendas de vento motivou os governos dos Estados Unidos, Canadá, Dinamarca, Suécia, entre outros, a criar leis para diminuir o efeito do ruído de baixa frequência nas localidades próximas às turbinas eólicas [17]. A agência de saúde do Canadá estabelece que a potência sonora em 16 Hz, 31,5 Hz e 63 Hz não pode ultrapassar 70 dB(A) [17]. Nos Estados Unidos, em Oregon, para as frequências abaixo de 31,5 Hz não devem exceder 65 dB(A) à noite [17]. A Agência Dinamarquesa de Proteção Ambiental limita entre 5 e 15 dB(A) (a depender da frequência observada) abaixo do valor padrão do espectro dos limites da ponderação A [17]. A Suécia estabelece para ambientes internos o limite variando de 56 dB até 32 dB para a faixa de 31,5 Hz até 200 Hz [17].

Se um ruído de baixa frequência for gerado, ao produzir elevados níveis de pressão sonora ele pode afetar a superfície do corpo humano [8]. Para mensurar a resposta vibratória do corpo humano, um grupo de pesquisadores realizou testes dentro de uma pequena câmara. Mantendo-se um nível constante de ruído (107 dB) entre 3 Hz e 100 Hz, foi possível constatar que o efeito de ressonância do peito humano é capaz de modular a voz de uma pessoa para um tom mais baixo [8]. Experimentos similares também foram realizados [11, 12]. Nesses foi observada a relação diretamente proporcional (linear) entre vibração mecânica e frequência sonora.

Outros pesquisadores buscam compreender a relação subjetiva entre o ruído com componentes de baixa frequência (com alta potência) e a sensibilidade ao ruído [5]. Entretanto, essa mensuração é difícil de ser realizada. Alguns fatores demonstram

¹³As baixas frequências são atenuadas e as altas são amplificadas para emular a recepção auditiva do ouvido humano.

ser preponderantes: idade, gênero e introversão não influenciam a sensibilidade ao ruído, diferentemente da capacidade de se aborrecer com um estímulo sonoro [13]. Além do aborrecimento, podem ocorrer também [9, 10]: estresse, distúrbio de sono, cefaleias, dificuldade de concentração, irritabilidade, fadiga, tontura ou vertigem, zumbido, ansiedade, doenças cardíacas (por exemplo, arritmia cardíaca), dores agudas no coração, disfunções neuro vasculares, disfunção do sistema vestibular.

2.5 Controle do Ruído

Controlar ruído é um problema multidisciplinar. Devem ser observados desde aspectos econômicos até os psicológicos e culturais [34]. É necessário portanto, uma abordagem multidisciplinar para o problema. A implantação de uma solução deve atender:

- **Disponibilidade financeira** – para determinadas soluções o custo pode se tornar tão proibitivo que inviabilize a sua realização. Deve-se portanto, equilibrar o custo da solução proposta com a disponibilidade financeira de quem deseja resolver esse problema (seja pessoa física ou jurídica);
- **Normas e legislações aplicáveis** – normas nacionais e internacionais podem estar ligadas a solução desenvolvida. A não observância de normas pode gerar para quem deseja resolver esse problema severas implicações legais. O atendimento completo ao estabelecido nas legislações aplicáveis é uma ação necessária para o controle do ruído;
- **Questões operacionais** – máquinas, equipamentos e ambientes funcionam de maneira particular. Enclausurar um motor sem permitir uma ventilação adequada, irá danificá-lo. Revestir uma parede com um material isolante acústico inadequado ou construir paredes em locais indevidos pode criar e dificultar situações emergenciais (problema ocorrido em Santa Maria - RS [55]);
- **Aspectos médicos** – deve ser realizada a observação se os trabalhadores sofrem mal-estares com sintomas ligados à longa exposição a ruídos. Mesmo estando em conformidade com os aspectos anteriores, caso ainda hajam casos de doenças ligadas a acústica do ambiente, uma nova solução necessita ser elaborada;
- **Aspectos psicológicos** – cada indivíduo possui uma sensibilidade maior ou menor ao ruído [11] e [12]. Portanto, a medida ideal é alocar os menos suscetíveis ao ruído em ambientes mais ruidosos e os mais suscetíveis nos menos ruidosos.

Em um problema de controle de ruído estão envolvidos (ver Figura 2.14): fonte sonora, meio de transmissão e receptor [34]. Em um ambiente urbano, o tráfego

de automóveis e pedestres são fontes sonoras, assim como em um domicílio são os eletrodomésticos e na indústria são os equipamentos e processos industriais. Por necessitar de um meio físico para ser transmitido, a propagação sonora envolve o ar, paredes, tubulações, revestimentos (sejam de equipamentos, paredes ou solo) e líquidos. A última parte, e a mais importante, é o receptor. Pode ser um (indivíduo) ou mais seres humanos (comunidade) que estejam sendo incomodados com o nível sonoro existente na localidade. A busca pela solução desse problema conduz a estudos nas três partes desse processo.

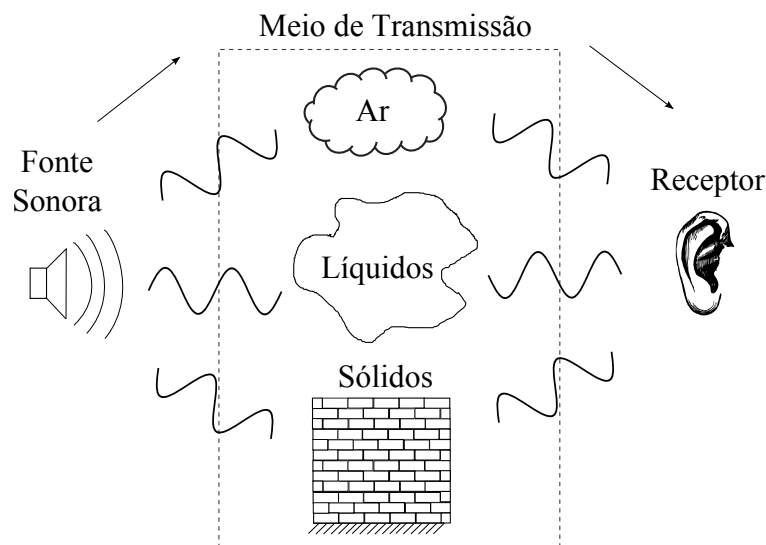


Figura 2.14 – Representação da transmissão sonora nos diversos meios de propagação.

Atuar no controle sonoro de uma fonte geradora de ruído requer alterar a sua estrutura física. Para o caso de uma indústria, modificar componentes de um equipamento propicia grandes alterações na geração do ruído [15]. A existência de ruído na fonte pode significar defeitos em máquinas ou necessidade de manutenção [15]. Portanto, o controle do ruído na fonte é o método mais eficaz [34], uma vez que ao minimizá-lo ou eliminá-lo ainda nesse ponto do enlace o problema não é disseminado. Para tanto, é necessário realizar esse controle durante o processo de fabricação da fonte sonora, por ser uma opção de baixo custo se comparada ao mesmo tipo de solução aplicada após a implantação do maquinário fabril [21]. Entretanto, normalmente os estudos para mitigação de poluição sonora ocorrem após todos os equipamentos estarem instalados, dificultando essa abordagem.

A abordagem comum é atuar na transmissão do som, atenuando os efeitos de reverberação e reflexão sonora bastando modificar o caminho pelo qual o ruído é propagado [34]. Para esse tipo de controle, dois cenários principais necessitam ser considerados: ambiente externo e interno. Para fontes sonoras que se situam em áreas externas, isolá-las dos receptores é uma solução prática e simples de ser executada [15]. Para ambientes internos a colocação de barreiras entre a fonte e o receptor

atenua o ruído existente no local. Entretanto, caso a potência sonora se concentre em caminhos oblíquos ao receptor, soluções como a instalação de absorvedores nas paredes, abafadores em exaustores são mais adequadas.

A atuação com o receptor ocorre na forma do cuidado com a exposição excessiva ao ruído. Por não ser tão eficaz quanto controlar o ruído na fonte e na transmissão, essa deve ser a última ação para proteger a saúde de uma pessoa. Em locais com altos níveis sonoros, os dispositivos de proteção individual utilizados apenas limitam a exposição ao ruído - indústrias e aeroportos são exemplos de locais [15]. Ao escolher esta proposta para solucionar o problema com ruído, todas as pessoas devem passar por treinamento para serem educados a usar corretamente esses aparatos. Na Tabela 2.4 estão consolidadas alguns procedimentos para controle de ruído na fonte, na transmissão e no receptor.

Tabela 2.4 – Práticas para controlar ruído. Adaptado de [21].

Fonte	<ul style="list-style-type: none"> Escolher máquinas silenciosas Reduzir a amplitudes das forças Aplicar forças mais devagar Utilizar materiais macios para proteger superfícies de impacto Balancear partes móveis Melhorar a lubrificação Melhorar o alinhamento dos rolamentos Mudar a frequência natural dos elementos de máquinas Melhorar o amortecimento dos elementos de máquinas Isolar os painéis das máquinas das forças aplicadas Reduzir as superfícies radiantes Escalonar o tempo de funcionamento das máquinas
Trajectoria	<ul style="list-style-type: none"> Instalar isoladores de vibração Usar barreiras Instalar invólucros Usar materiais absorvedores Instalar abafadores reativos ou dissipadores Utilizar sistemas que param a vibração em dutos Descascar impedância de materiais Utilizar linhas de dutos Utilizar dutos flexíveis Usar materiais amortecedores
Receptor	<ul style="list-style-type: none"> Prover tampões ou protetores auriculares para os funcionários Construir invólucros pessoais Rotacionar o pessoal para reduzir o tempo de exposição Posicionar as pessoas longe das fontes de ruído

Em seu livro [15], Randall Barron afirma: “O conhecimento da distribuição da frequência do ruído produzido por equipamentos industriais é importante para decidir

qual procedimento para controle desse ruído será mais efetivo”¹⁴. Portanto, conhecer o comportamento das componentes de frequências do ruído é um importante passo para estabelecer uma estratégia de controle sonoro. Atuar diretamente sobre o valor de potência sonora do ruído sem conhecer quais componentes possuem maior contribuição para o valor medido, pode não resultar na solução do problema. Cada estratégia de combate ao ruído pode atuar melhor se conhecida a natureza da poluição sonora. Uma barreira pode ser melhor dimensionada, um material absorvedor pode ser específico às frequências predominantes, os protetores auriculares podem compensar determinadas componentes e ressaltar outras dentre as ações que podem ser tomadas ao conhecer o comportamento do ruído.

2.6 Conclusões

O ruído é um grave problema que afeta grandes espaços urbanos, indústrias, aeroportos. A longa exposição é nociva e pode provocar danos irreversíveis se não forem tomados os devidos cuidados ao aparecerem os primeiros sinais de dano a saúde. Além disso, a partir dessa observação deve-se construir soluções técnicas que visem a minimização da potência sonora a qual trabalhadores são expostos.

Tratar o problema do ruído é uma atividade complexa que engloba diversas áreas do conhecimento humano conforme foi apresentado neste Capítulo. Portanto, analisar somente uma parte do problema, a exemplo do realizado pela legislação brasileira que trata somente da aferição dos níveis de potência sonora, não atende a essa complexidade. O entendimento do problema deve se pautar na fisiologia do corpo humano, na legislação vigente e em soluções técnicas que possam identificar e caracterizar o ruído para posterior mitigação. Essa última parte compreende o estudo realizado em uma indústria local e será apresentados nos Capítulos seguintes.

¹⁴Tradução livre

Capítulo 3

Uma Nova Abordagem para Medição de Níveis de Potência de Ruído

Esta dissertação foi motivada pela necessidade de uma grande indústria calçadista em identificar a origem do ruído presente em suas duas fábricas, para poder quantificá-lo adequadamente e, se possível, mitigá-lo. A indústria se localiza no Distrito Industrial de Campina Grande-PB em um ponto estratégico da cidade (próxima do Aeroporto Presidente João Suassuna e das BR-104 e BR-230). Possui duas fábricas, uma agrega todos os processos de produção dos calçados enquanto a outra se concentra na finalização (fase anterior ao acabamento) dos produtos.

3.1 Metodologia Proposta

Foram realizadas duas visitas técnicas às fábricas. Na primeira, foi realizada uma reunião com o engenheiro responsável pela segurança do trabalho das duas unidades fabris para levantamento das necessidades da empresa. Foram detalhados os locais (durante uma visita às instalações das fábricas) em que se deveria realizar as medições. Também foram especificados quais, dentre os pontos selecionados, eram os de maior interesse, aqueles que o engenheiro acreditava serem as principais fontes de ruído. Após a reunião, amostras do ruído foram coletadas nos pontos especificados. A análise dos ruídos nesses pontos permitiu determinar quais equipamentos produzem altos níveis de ruído, sendo portanto os mais prejudiciais àquele ambiente¹.

Na segunda visita, foram realizadas novas coletas de dados em outros pontos. Para essa nova medição foram considerados os equipamentos com ruído predominante. Nessa oportunidade, também foram aferidos os valores instantâneos e médios do ruído

¹Buscando um melhor entendimento, os ruídos produzidos por esses equipamentos serão considerados nesta dissertação como ruídos predominantes

existente nas fábricas. A seleção dos pontos determinados como predominantes, dentre todos os aferidos, possibilita uma observação mais coerente dos dados coletados. Nas Subseções 3.1.1 e 3.1.2 estão apresentados os procedimentos executados para coletar e analisar as amostras de áudio, na primeira e segunda visita respectivamente.

Em busca de compreender estatisticamente o ruído, foram calculadas, e posteriormente analisadas, as densidades espectrais de potência (DEP) e autocorrelação para os conjuntos das amostras referentes a cada ponto de coleta. A DEP permite observar a composição das frequências de um sinal aleatório, ou seja, como a potência desse sinal se distribui nas suas componentes em frequência [56]. Permite observar se há ou não padrões repetitivos e correlações [57].

Para análise desenvolvida nesta dissertação, a DEP é estimada pelo método de Welch². O uso de um método não-paramétrico se deve ao interesse em caracterizar o ruído sonoro a partir de amostras coletadas no local. O método de Welch é utilizado por softwares comerciais para análise de ruído e aplica a transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) para estimar a DEP a partir das amostras de um sinal [58, 59]. Além dessas suas características, a fácil implementação em Matlab (software utilizado para processar os áudios gravados) motivou o seu uso nesta dissertação.

O estimador de Welch foi configurado com 8192 pontos de FFT, um janelamento Hamming e sobreposição de 50%. A escolha da quantidade de pontos para a FFT bem como do janelamento deve-se a preservação de uma resolução espectral³ que permita a compreensão da natureza das amostras coletadas e auxiliasse na determinação dos pontos predominantes. Foram testadas outras configurações, entretanto esta se apresenta como a melhor. O primeiro teste visou escolher a quantidade de pontos para a FFT. Na Figura 3.1 uma amostra do ruído da fábrica para quatro quantidades distintas de pontos para a FFT. Observa-se que quanto maior for a quantidade de pontos para a FFT, mais picos em frequência aparecem. Entretanto, o valor de 8192 pontos se mostra como satisfatório, uma vez que já consegue representar o ruído a ser analisado com uma quantidade menor de operações.

A Figura 3.2 apresenta a comparação entre quatro tipos de janelamento. É possível observar que para o janelamento Hamming, os picos são melhor apresentados. Dada a escolha desse tipo de janelamento, a sobreposição ótima é de 50% [60].

A autocorrelação é uma ferramenta estatística que auxilia na descrição de um processo aleatório. Trata-se de uma forma de medir a similaridade do ruído em qualquer instante de tempo [57, 58, 61–63]. A autocorrelação das amostras foi calculada

²Este método é melhor descrito no Apêndice C

³Pequenas variações nas amplitudes de frequências muito próximas podem ser observadas

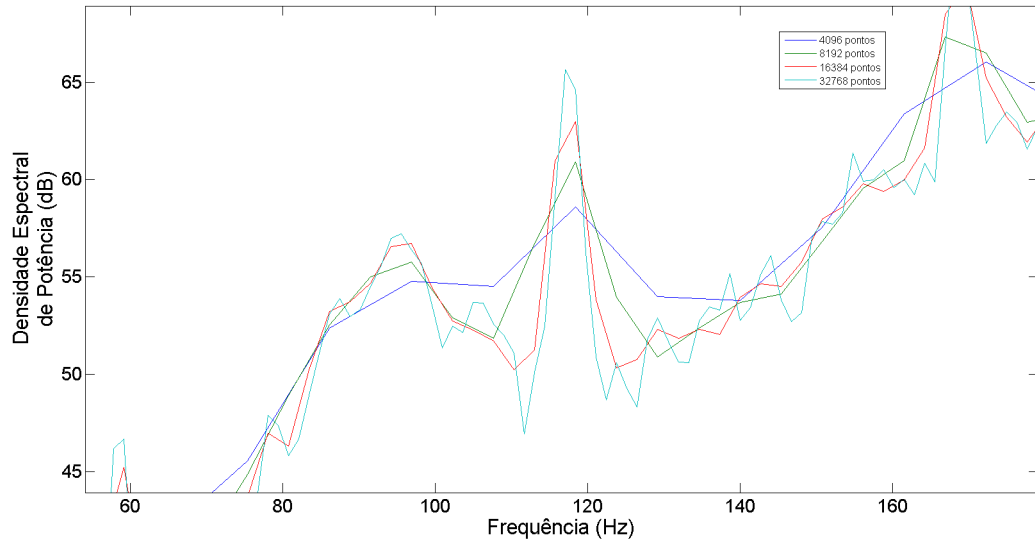


Figura 3.1 – Comparação entre quatro quantidades de pontos para FFT testados com o janelamento plano.

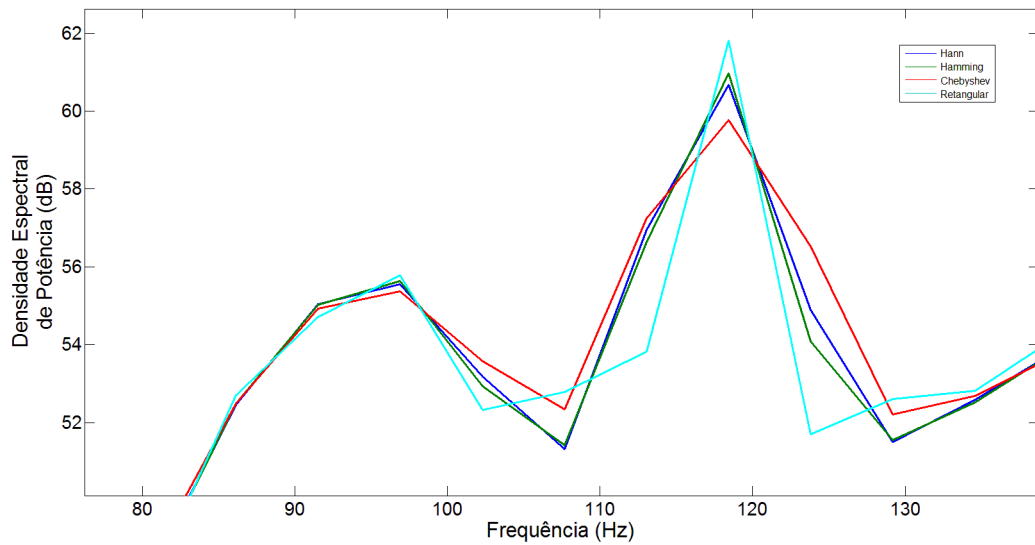


Figura 3.2 – Comparação entre 4 tipos de janelamento testados com 8192 pontos para a FFT.

diretamente do áudio coletado utilizando a equação [57, 58, 64]

$$R_X(m) = E[X_{n+m}X_n] \quad (3.1)$$

em que X_n é um processo aleatório estacionário, $-\infty < n < \infty$, e $E[\cdot]$ é o operador valor esperado ⁴. A Fórmula 3.1 é uma medida de similaridade do ruído para qualquer instante de tempo e possui as seguintes propriedades [57, 64]:

$$R_X(-m) = R_X(m) \quad (3.2)$$

$$R_X(m) \leq R_X(0) \quad (3.3)$$

$$R_X(0) = E[X^2(t)] \geq 0, \quad (3.4)$$

em que $R_X(0)$ é potência do sinal X_n . Em seu livro, Alberto Leon-Garcia define que um processo aleatório é dito estacionário “se a distribuição conjunta de qualquer conjunto de amostras não depender do posicionamento da origem do tempo” [61], portanto,

$$F_{X(t_1), \dots, X(t_k)}(X(t_1), \dots, X(t_k)) = F_{X(t_1+\tau), \dots, X(t_k+\tau)}(X(t_1 + \tau), \dots, X(t_k + \tau)), \quad (3.5)$$

para todos os deslocamentos temporais, todo k e todas as escolhas de tempos amostrais t_1, \dots, t_k . A Equação 3.5 implica que a média e a variância de um processo aleatório estacionário é independente do tempo e constante e que a autocorrelação e autocovariância depende somente da diferença de tempo entre duas amostras (e não do tempo particular de cada amostra), assim [61, 64]

$$m_X(t) = E[X(t)] = m \quad \text{para todo } t_1, t_2$$

$$VAR[X(t)] = E[(X(t) - m)^2] = \sigma^2 \quad \text{para todo } t$$

$$R_X(t_1, t_2) = R_X(t_2 - t_1) \quad \text{para todo } t_1, t_2$$

$$C_X(t_1, t_2) = C_X(t_2 - t_1) \quad \text{para todo } t_1, t_2$$

Um processo aleatório tido como estacionário pode também ser ergódico. Isso é possível para processos aleatórios em que suas médias temporais converge para a média amostral⁵ [61, 62, 64]. O ruído aferido nas fábricas é um processo aleatório estacionário e ergódico (independente do tempo de medição ele possui o mesmo comportamento). Portanto, a autocorrelação do ruído coletado nos pontos selecionados é aproximada pela média temporal [65]. Então, a Equação 3.1 se torna

⁴Esta operação é possível, pois o ruído analisado é um processo estacionário *lato sensu* [57]

⁵Para ser ergódico, um processo aleatório necessita ser estacionário.

$$\hat{R}_{XX}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} X_{n+k} X_n, \quad \text{para } 0 \leq k \leq N-1 \quad (3.6)$$

e

$$\hat{R}_{XX}(k) = \hat{R}_{XX}(-k), \quad \text{para } -(N-1) \leq k \leq -1, \quad (3.7)$$

em que N é o comprimento do bloco das amostras do ruído medido [65]. A função `xcorr` do MATLAB, utilizada no processamento dos ruídos, aplica a Equação 3.6 para calcular a autocorrelação de um sinal [66].

As densidades espectrais de potência (DEP) e autocorrelação⁶ possibilitaram observar o comportamento do ruído. Como resultado destas análises, são sugeridas duas equações como modelos para a densidade espectral de potência e para a função densidade de probabilidade. A Figura 3.3 é uma apresentação macro dos processos desenvolvidos, e seus respectivos locais de desenvolvimento.

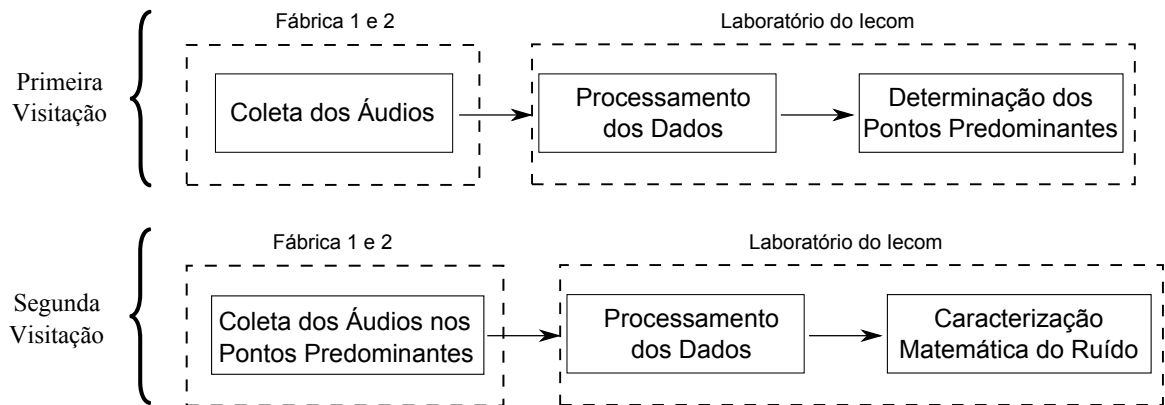


Figura 3.3 – Representação da execução do projeto.

3.1.1 Primeira Visita

A primeira visitação às instalações das fábricas permitiu conhecer o campo de estudo. Durante esta visita, o engenheiro de segurança do trabalho ia solicitando, a medida em que caminhávamos pelas instalações, a medição de determinados pontos⁷. Esses pontos foram marcados nas plantas baixas fornecidas para auxiliar na coleta dos dados. Foram determinados 32 pontos e em cada um deles foram coletadas 10 amostras de 15 segundos cada (gravações do ruído). A escolha da quantidade de amostras e suas respectivas durações levou em consideração alguns aspectos: agilidade na coleta dos dados, minimizar a quantidade de dados a serem processados posteriormente e minimizar o tamanho dos arquivos de áudio gerado a cada coleta. O tempo gasto com as coletas dos áudios deveria ser a menor possível para evitar transtornos à rotina

⁶A análise e os resultados estão presentes no Capítulo 4

⁷Cumprindo desta forma com o determinado na regulamentação brasileira [46]

das atividades industriais e que garantisse a caracterização do ruído em questão [46]. Apesar do cuidado em determinar essa estratégia, foram gastas duas horas para realizar todas as gravações necessárias e foram gerados trezentos e vinte arquivos de áudio com tamanho total de 75 Mb. Desses total de pontos escolhidos, apenas sete foram selecionados para posterior análise, por serem aqueles que o engenheiro enfatizou a necessidade de medição.

Para executar tanto a gravação dos áudios quanto o processamento dos sinais coletados, foi utilizado um *notebook* Dell XPS 15 com 8 Gbytes de memória *RAM*, processador Intel Core i5 de segunda geração, placa de áudio Waves MaxxAudio3. Dada a falta de capital de giro necessária para tal aparelhamento no tempo disponível para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizado um equipamento comum (*notebook*) para coletar o áudios nos pontos solicitados. Essa restrição motivou estruturar uma metodologia capaz de atender a demanda da indústria com boa acurácia e baixo custo.

Para o processamento dos sinais foi utilizado a versão R2010a do MATLAB®. As medições foram realizadas a uma distância mínima de 50 cm e máxima de 2 m da fonte de ruído (de acordo com as especificações da NBR 10151 [46]). Foram considerados para estudo posterior as amostras colhidas nos ventiladores de resfriamento das fábricas, nas peneiras e nas máquinas de inserção de forquilha por serem os maiores geradores de ruído neste ambiente industrial.

A DEP foi estimada utilizando o estimador de Welch com 8192 pontos, janelamento Hamming e 50% de sobreposição. A partir deste cálculo se buscou conhecer o espectro de frequências do ruído. Os gráficos gerados após esse processamento estão apresentados para a faixa de baixa frequência (BF) (0 Hz – 500 Hz) e média frequência (MF) (500 Hz – 1200 Hz) para possibilitar analisar os efeitos auditivos e não auditivos causados pelo ruído [5].

3.1.2 Segunda Visita

A partir dos resultados obtidos com a coleta de dados na primeira visita às fábricas, foram selecionados quatro pontos com ruído predominante para ser realizada uma nova coleta de amostras. Em cada ponto o ruído foi gravado utilizando o mesmo *notebook* da primeira coleta, além de medir o nível de pressão sonora utilizando um medidor de nível sonoro (MNS)⁸. A aferição do ruído consiste na abordagem sugerida pela norma ABNT NBR 10151:2000 [16, 46]. O nível de potência do ruído é medido ajustando o MNS para resposta rápida e ponderação A [46].

Foram coletadas 5 amostras com 10 segundos de duração para cada ponto, tanto para gravação das amostras de áudio, quanto para aferição dos níveis de potência sonora. Durante os 10 segundos (tempo destinado para a medição), o MNS coleta

⁸Este instrumento de medição também é popularmente conhecido por decibelímetro [34]. Ver Apêndice B

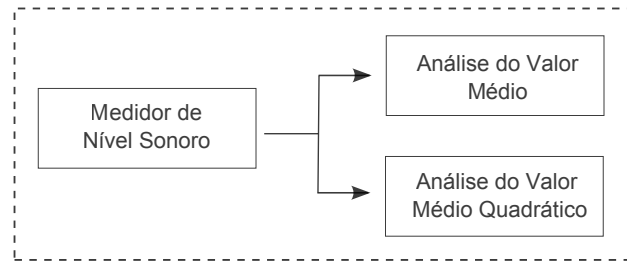


Figura 3.4 – Metodologia aplicada pela legislação brasileira.

diversos valores de potências, seleciona e armazena o máximo e o mínimo para aquele intervalo. O valor instantâneo considerado era o último nível de potência apresentado no visor do equipamento ao término do tempo de aferição. Com o MNS foram aferidos os valores instantâneos, máximos e mínimos do nível de pressão sonora do ruído. O nível de pressão sonora equivalente foi calculado pela fórmula [46]:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}, \quad (3.8)$$

em que L_i é o nível de pressão sonora instantâneo, em dB(A) e n é o número de medições realizadas.

A gravação dos áudios conjuntamente com a aferição dos níveis de pressão sonora, segundo o método padrão, fazem parte da primeira fase da metodologia proposta nesta dissertação, conforme pode ser observado na Figura 3.5. Esta é uma adaptação da apresentada por Bendat e Piersol [67]. A partir das gravações, foram analisadas as DEP's e autocorrelações das amostras. Os valores médios e valor quadrático médio utilizados no procedimento adotado pelo Ministério do Trabalho e Emprego, também obtidos por meio desta metodologia. Os níveis de pressão sonora obtidos a partir das gravações e do MNS são comparados para fornecer informações quantitativas a respeito do ruído coletado nas fábricas.

A segunda fase compreende o cálculo e análise dos valores médios e quadráticos médio dos níveis de pressão sonora, da densidade espectral de potência e da autocorrelação. Para o cálculo e análise dos valores médio é utilizado o critério de dosagem de ruído estabelecido pelo NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*)[68] possibilitou obter valores de pressão sonora para cada segundo da amostra (considerando o período de 10 segundos por amostra). Com os 10 valores obtidos é calculado o valor médio. O valor quadrático médio é calculado da mesma forma que a metodologia da NBR 10151:2000. A partir desses valores médios das cinco amostras, calculou-se o nível de pressão equivalente. A densidade espectral de potência foi calculada da mesma forma que as análises realizadas na primeira visita. A autocorrelação é calculada diretamente das amostras de acordo com a Equação 3.1.

A fase final da metodologia inclui realizar duas comparações. Uma entre

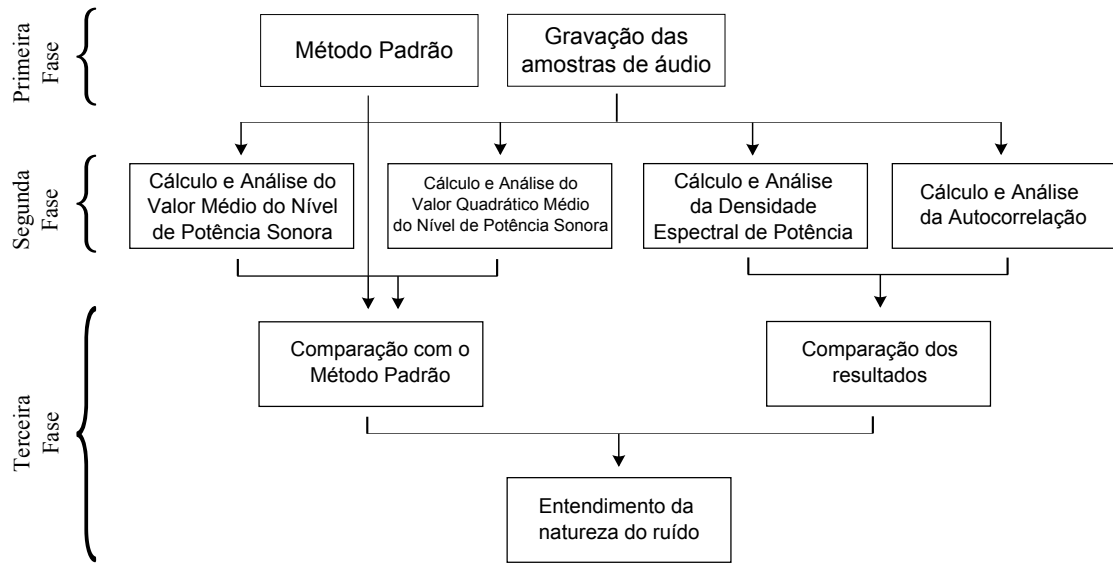


Figura 3.5 – Metodologia proposta para entender a natureza do ruído.

os resultados da análise da DEP e da autocorrelação. A outra entre os valores médio e quadrático médio obtidos por meio do processamento de amostras de áudio e dos obtidos utilizando o medidor de nível sonoro. Os resultados dessa comparação permitem entender a natureza do ruído existente no ambiente fabril.

3.2 Pontos Escolhidos

Os ventiladores existentes nas fábricas são utilizados para o resfriamento da borracha dos calçados (são do tipo axial). Eles geram um elevado nível de potência de ruído, continuamente, e contribuem para tornar o ambiente de trabalho ruidoso. Este método de resfriamento é aplicado, pois garante a qualidade requerida para o solado dos calçados, entretanto gera um ruído com altos valores de potência em determinadas frequências. As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 permitem observar os equipamentos.

Outros equipamentos tiveram seus ruídos medidos no primeiro dia de visita. A peneira apresentada na Figura 3.10 é um deles. Ela separa a borracha triturada pelo processo de reaproveitamento de matéria-prima. São utilizados dois tipos de peneira: aberta e fechada. Por serem construídas de forma diferente, podem produzir ruídos distintos.



Figura 3.6 – Ventilador no qual foi realizada a 1ª medição.

O processo de inserção da forquilha no solado do calçado é parte do processo de acabamento da linha de produção da empresa. A máquina utilizada para fixar a forquilha utiliza ar comprimido. Para realizar a inserção, um jato de ar comprimido é liberado gerando um ruído característico. A Figura 3.11 ilustra esse procedimento.

A gravação das amostras ideal deve ocorrer o mais próximo possível da fonte geradora de ruído para atender os requerimentos das normas brasileiras [46]. Para os ventiladores, as amostras foram tomadas a uma distância de 2 m dos ventiladores devido à existência de uma pilha de solados dispostos à frente (exceto a 2ª medição que pode ser realizada na parte de trás desses ventiladores). Entretanto, as amostras coletadas das peneiras e do processo de inserção da forquilha puderam ser tomadas mais próximas às fontes de ruído (o aferidor estava distante das máquinas em torno de 50 cm).



Figura 3.7 – Ventilador no qual foi realizada a 2ª medição.

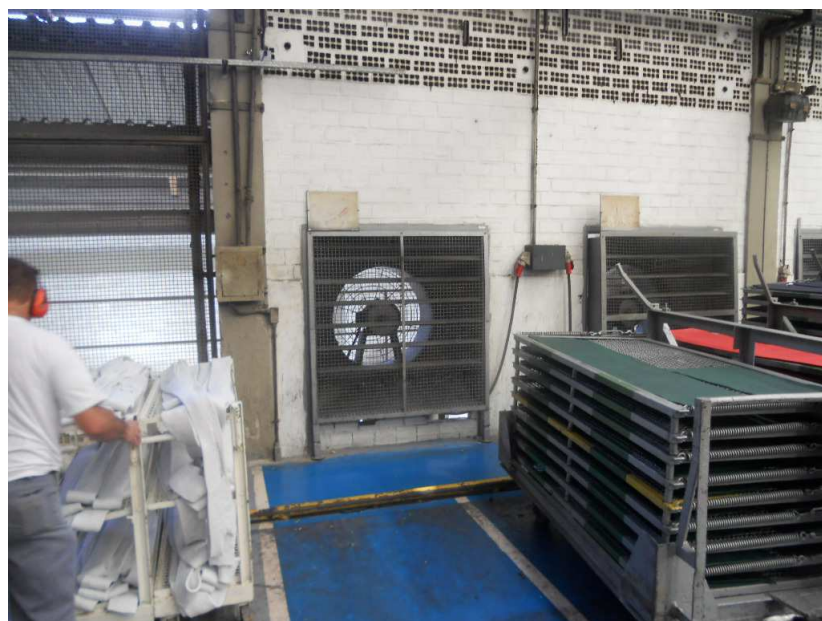


Figura 3.8 – Ventilador no qual foi realizada a 3ª medição.



Figura 3.9 – Ventilador no qual foi realizada a 4ª medição.



Figura 3.10 – Peneira na qual foi realizada a 6ª medição.



Figura 3.11 – Equipamento utilizado para inserir a forquilha no calçado. Local onde foi realizada a 7ª medição.

3.3 Conclusão

A metodologia proposta se apresenta é mais complexa que aquela recomendada pelo Ministério do Trabalho e Emprego para vistoriar as empresas. A observação da densidade espectral de potência fornece uma vantagem para aquele que utilizar esta abordagem. Com uma mesma técnica de aferição pode-se obter os valores que o MTE obriga a manter dentro dos níveis regulamentados pela NR 15 e conhecer o espectro de frequências do ruído existente no ambiente de trabalho ao qual pertence. O atendimento de níveis aceitáveis para os dois conjuntos garante um ambiente com menor poluição sonora, ou seja, mais saudável para os trabalhadores.

As análises resultantes dessa metodologia permitem entender a natureza de qualquer ruído medido. Pode ser aplicada para analisar o ruído em grandes eventos, em ambientes industriais (escopo desta dissertação), em salas de aula, bem como quaisquer outros ambientes em que haja a necessidade de um controle dos níveis de potência sonora. Outro importante resultado dessa metodologia é a identificação da fonte geradora de ruído cuja potência sonora predomina sobre as demais. Por fim, permitiu o desenvolvimento de dois modelos matemáticos para caracterizar o comportamento do ruído aferido, servindo portanto, de base para tomada de decisão a respeito de soluções técnicas para sua futura mitigação.

Capítulo 4

Medição do Ruído e Análise dos Resultados Obtidos

Os ruídos coletados nos diversos pontos escolhidos durante as duas visitas realizadas às instalações da indústria pesquisada foram analisados de acordo com as normas brasileiras vigentes e sob o ponto de vista do espectro de frequências. Esse amplo conjunto de análises é apresentado neste Capítulo.

4.1 Análises e Resultados da Primeira Visita

Na primeira visita às instalações das fábricas, foram realizadas coletas de amostras de áudio dos pontos determinados pelo engenheiro, funcionário da indústria. Os primeiros equipamentos medidos foram os conjuntos de ventiladores (primeiro ao quarto ponto). Em seguida foram coletadas amostras das peneiras (fechada e aberta, quinto e sexto pontos, respectivamente), por fim, foram coletadas amostras do ruído produzido pelo ar comprimido utilizado na inserção da forquilha (sétimo ponto). As Figuras 4.1, 4.2 apresentam as densidades espectrais de potência das amostras captados no primeiro, segundo, terceiro e quarto pontos. Observa-se em todos os gráficos que há uma concentração de potência nas baixas frequências (de 20 Hz até 500 Hz). Os ruídos coletados no primeiro e terceiro ponto, bem como segundo e quarto, apresentam uma distribuição espectral semelhante. No primeiro e terceiro ponto os conjuntos são formados por mais ventiladores e encontram-se mais próximos de outros equipamentos e paredes do que no segundo e quarto.

O resultado obtido no ponto 2 difere dos demais por apresentar valores de potência acima de 60 dB para a faixa de 1 kHz a 3 kHz. Para este ponto, o nível de potência entre 3 kHz e 6 kHz situa-se entre 40 dB e 60 dB. Essa peculiaridade existe devido à sua localização. Há uma grade para proteger o trabalhador da parte traseira dos ventiladores nessa área como pode ser visto na Figura 3.7. Além disso,

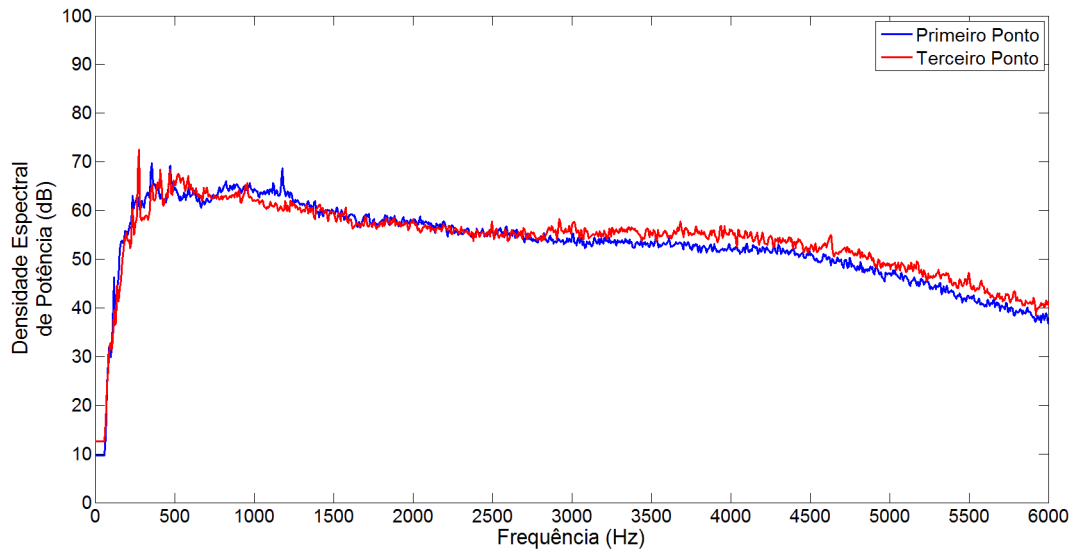


Figura 4.1 – Gráficos das densidades espectrais de potência dos sons coletado no 1º e 3º pontos.

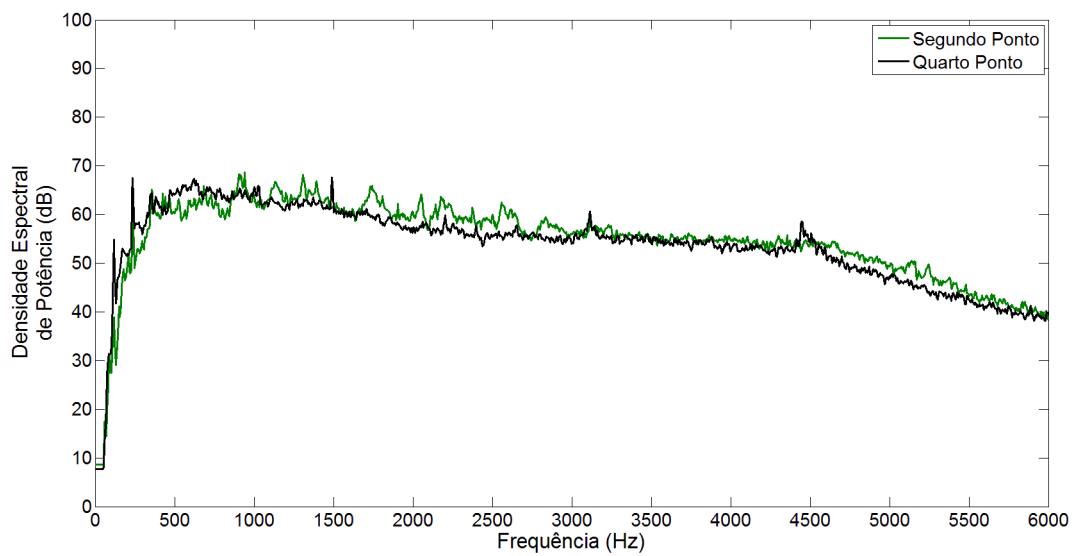


Figura 4.2 – Gráficos das densidades espectrais de potência dos sons coletado no 2º e 4º pontos.

eles se situam próximo de outros maquinários que contribui para a densidade espectral apresentada.

A Figura 4.3 apresenta as densidades espectrais de potência dos áudios captados na peneira fechada e na peneira aberta.

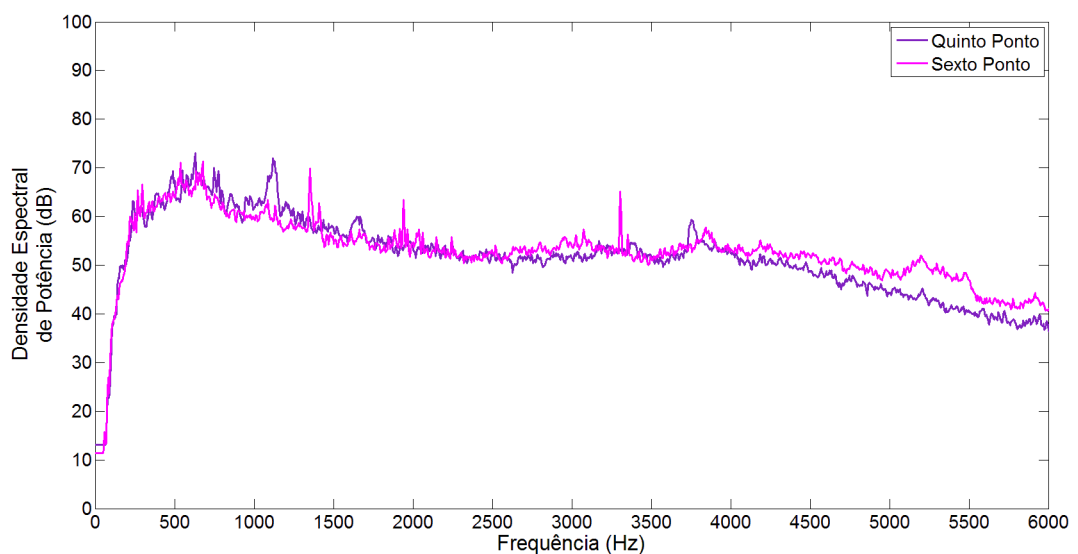


Figura 4.3 – Gráficos das densidades espectrais de potência dos sons coletado no 5º e 6º pontos.

Existem diferenças entre os gráficos das duas peneiras. A peneira fechada produz altos níveis de potência para uma faixa de frequências menor que a aberta. Isto se deve às suas características construtivas. Por ser aberta, o som se dispersa melhor no ambiente e não apresenta picos de potência do ruído. Por sua vez, na peneira fechada, dada a sua altura, constituição e disposição na fábrica, ocorre a produção de picos de potência sonora em determinadas faixas de frequência.

O ar comprimido utilizado no processo de inserção da forquilha causa um pico em 349,9 Hz com intensidade de 68,38 dB como pode ser observado na Figura 4.4. O nível de potência para a faixa de frequência analisada se mantém praticamente constante em 60 dB, o que causa grande desconforto auditivo, uma vez que a membrana basilar é estimulada em toda sua extensão.

Na Tabela 4.1 estão dispostos os dados referentes a cada um dos pontos de medição considerados. Estão listados os valores de frequência e potência dos picos significativos para cada ponto medido. Por pico significativo entende-se picos de sinal que atinjam valor próximo, igual ou maior que 70 dB. Estão apresentados também a

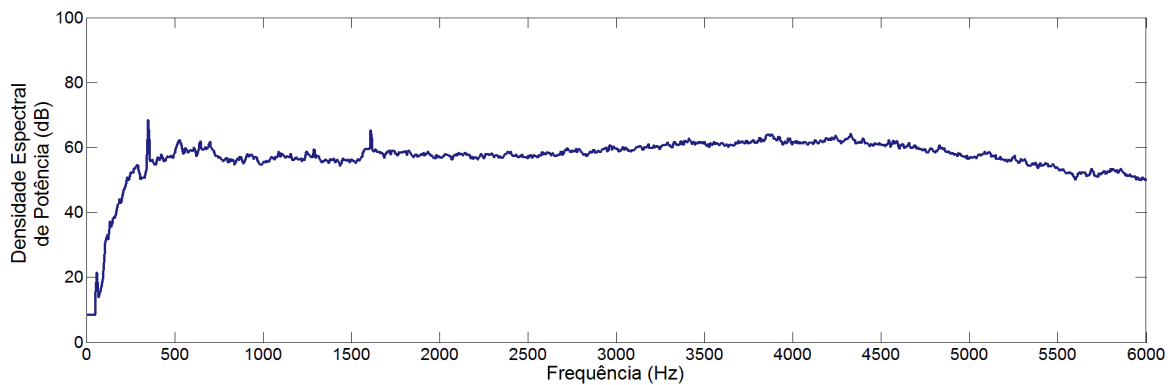


Figura 4.4 – Densidade espectral de potência em função da frequência do som coletado no 7º ponto.

faixa de frequência em que a potência se mantém acima de 60 dB (limiar escolhido).

Pode ser observado que os valores de pico ocorreram para os pontos aferidos na faixa de 163 Hz até 1.600 Hz. Segundo [6], o trabalhador demora mais para perder a capacidade de detecção quando submetido a ruídos com essa característica. Entretanto, uma longa exposição a ruído com níveis de potência alto pode prejudicar a audição, independentemente da faixa, segundo o mesmo autor. Portanto, faz-se necessária a atenuação desses níveis de potência para essas faixas de frequência.

Os valores de pressão sonora equivalente apresentados na Tabela 4.1 são valores médios obtidos a partir dos dados coletados. Referem-se à pressão sonora exercida no ouvido do trabalhador e não a um pico em uma frequência específica. Apesar dos níveis de potência não serem tão elevados para as altas frequências, é interessante mantê-los em níveis mais baixos para melhorar a salubridade do ambiente industrial.

Tabela 4.1 – Dados das análises das medições realizadas nos diversos pontos do ambiente industrial.

Pontos de Medição	Faixas de Frequência (Hz)	Pico		Leq (dB(A))
		Frequência (Hz)	Potência (dB)	
1º	63,3 - 1,5 k	1.179	70,25	95,9
2º	349,9 - 2,6 k	942	68,6	96,8
3º	231,5 - 1,6 k	274,5	72,88	95,8
4º	236,9 - 1,7 k	236,9	67,31	96,2
5º	247,6 - 1,6 k	629,8	72,94	96,3
6º	231,5 - 3,3 k	678,3	71,48	95,2
7º	344,5 - 4,5 k	349,9	68,38	96,8

Com os resultados obtidos, ainda é necessário descobrir qual desses equipamentos possui maior contribuição para os ruídos medidos. As medições não foram realizadas isolando cada equipamento a ser medido. Dessa forma, as sete densidades espectrais de potências são o resultado da combinação de diversos ruídos oriundos da fábrica. Não seria prático avaliar todos os equipamentos, desligando-os um a um. Portanto, por sugestão da própria empresa, em um momento de

parada da fábrica, um conjunto de ventiladores foi ligado e seu ruído medido. Para ela, os ventiladores seriam as principais fontes de ruído. Caso o resultado dessa medição não confirmasse o parecer da empresa, outras medições seriam realizadas¹. O processamento dessa nova amostra está apresentado na Figura 4.5.

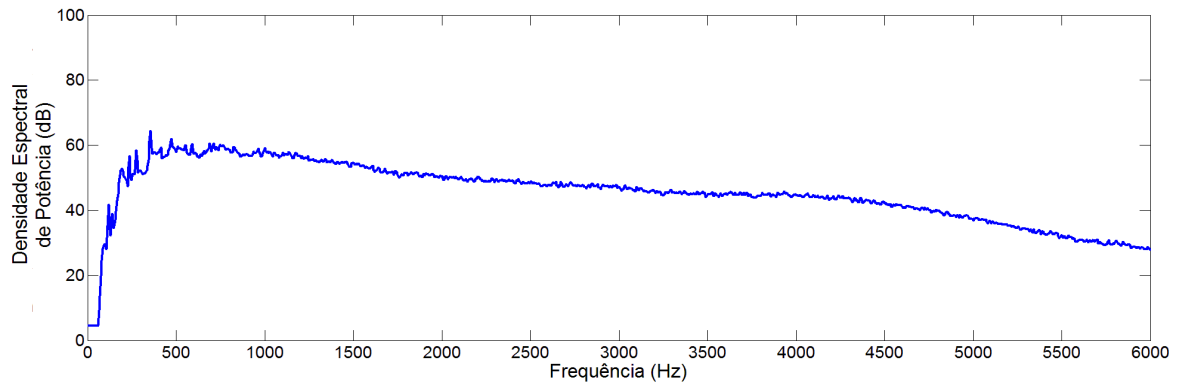


Figura 4.5 – Densidade espectral de potência em função da frequência do som coletado no 1º ponto com a fábrica desligada.

A densidade espectral de potência desse conjunto de ventiladores apresenta um formato similar as dos equipamentos em funcionamento. Portanto, a diminuição da potência do ruído gerada por essas máquinas permite a redução da poluição sonora do ambiente.

4.2 Segunda Fase das Medições de Ruído

Com o conhecimento da fonte do ruído predominante nas fábricas observadas, o próximo passo é aplicar a metodologia proposta. Dessa forma, de acordo com a Figura 3.5, a primeira fase é a coleta dos níveis de potência sonora utilizando o medidor de nível sonoro e a gravação de novas amostras de ruído.

4.2.1 Medição do Nível Sonoro Utilizando o Decibelímetro

Os dados coletados com o medidor de nível sonoro estão apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Observa-se que a potência do ruído ultrapassa o limite máximo imposto pela ABNT 10151:2000 (70 dB(A)) [46]. Configura-se portanto o cenário apresentado na NR 6 [69]. Os trabalhadores necessitam usar equipamentos de proteção individual, no caso específico os protetores auriculares.

Outro ponto a ser observado nas tabelas são os valores de desvio padrão. Para todos os casos os valores de máximo e mínimo medidos possuem um pequeno desvio padrão. Essa variação era esperada, uma vez que se trata de uma medição de um processo aleatório.

¹Não foram necessárias novas medições devido ao gráfico apresentado na Figura 4.5

Tabela 4.2 – Medição do nível sonoro no primeiro ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1]

Primeiro ponto				
Coleta	Nível de Potência			
	Mínimo (dB(A))	Máximo (dB(A))	Instantâneo (dB(A))	Leq (dB(A))
1 ^a	93,6	96,3	94,5	94,71
2 ^a	93,6	95,9	94,8	
3 ^a	93,6	97	94,5	
4 ^a	93,9	96,1	95,1	
5 ^a	93,6	95,9	94,6	
Média	93,7	96,2	94,7	
Desvio Padrão	0,1	0,5	0,3	

Tabela 4.3 – Medição do nível sonoro no segundo ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1].

Segundo ponto				
Ponto de Coleta	Nível de Potência			
	Mínimo (dB(A))	Máximo (dB(A))	Instantâneo (dB(A))	Leq (dB(A))
1 ^a	92,6	95,1	93,6	94,08
2 ^a	92,8	95,4	93,9	
3 ^a	92,5	95,6	93,8	
4 ^a	93,3	96,1	94,8	
5 ^a	93,2	95,4	94,2	
Média	92,9	95,5	94,1	
Desvio Padrão	0,4	0,4	0,5	

Tabela 4.4 – Medição do nível sonoro no terceiro ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1].

Terceiro ponto				
Ponto de Coleta	Nível de Potência			
	Mínimo (dB(A))	Máximo (dB(A))	Instantâneo (dB(A))	Leq (dB(A))
1 ^a	91,3	97,4	94,5	94,25
2 ^a	91,3	96,6	94,0	
3 ^a	92,0	97,2	93,3	
4 ^a	92,2	97,6	95,5	
5 ^a	91,2	98,2	93,6	
Média	91,6	97,4	94,2	
Desvio Padrão	0,5	0,6	0,9	

Tabela 4.5 – Medição do nível sonoro no quarto ponto utilizando o medidor de nível sonoro. Adaptada de [1].

Quarto ponto				
Ponto de Coleta	Nível de Potência			
	Mínimo (dB(A))	Máximo (dB(A))	Instantâneo (dB(A))	Leq (dB(A))
1 ^a	92,0	95,1	94,0	93,6
2 ^a	91,4	94,8	93,2	
3 ^a	92,1	94,5	93,9	
4 ^a	92,8	96,3	94,2	
5 ^a	91,4	94,2	92,5	
Média	91,9	95,0	93,6	
Desvio Padrão	0,6	0,8	0,7	

4.2.2 Medição do Nível Sonoro Utilizando o Critério de NIOSH

Os resultados do processamento dos níveis de pressão sonora das amostras de áudio estão apresentados nas Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Para todos os conjuntos de ventiladores os valores de potência medidos foram acima de 90 dB(A). Os níveis de potência equivalente, tanto para o método do Ministério Trabalho e Emprego, quanto utilizando o processamento das amostras de áudio (dosagem de ruído com o Critério NIOSH) se apresentam bem próximos, conforme pode ser observado na Tabela 4.10.

Tabela 4.6 – Medição do nível sonoro no primeiro ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.

Primeiro Ponto		
Coleta	Valor Médio (dB(A))	L_{eq} (dB(A))
1 ^a	94,5	94,5
2 ^a	94,4	
3 ^a	94,5	
4 ^a	94,5	
5 ^a	94,5	
Média	94,5	
Desvio Padrão	0,04	

Tabela 4.7 – Medição do nível sonoro no segundo ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.

Segundo Ponto		
Coleta	Valor Médio (dB(A))	L_{eq} (dB(A))
1 ^a	93,8	93,8
2 ^a	93,9	
3 ^a	93,9	
4 ^a	93,6	
5 ^a	93,7	
Média	93,8	
Desvio Padrão	0,13	

Tabela 4.8 – Medição do nível sonoro no terceiro ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.

Terceiro Ponto		
Coleta	Valor Médio (dB(A))	L_{eq} (dB(A))
1 ^a	94,1	94,2
2 ^a	94,1	
3 ^a	94,2	
4 ^a	94	
5 ^a	94,4	
Média	94,2	
Desvio Padrão	0,15	

Tabela 4.9 – Medição do nível sonoro no quarto ponto utilizando o critério de NIOSH para dosagem de ruído.

Quarto Ponto		
Coleta	Valor Médio (dB(A))	L_{eq} (dB(A))
1 ^a	93,2	93,2
2 ^a	93,2	
3 ^a	93,1	
4 ^a	93,4	
5 ^a	93,1	
Média	93,2	
Desvio Padrão	0,11	

Tabela 4.10 – Tabela comparando as metodologias utilizadas.

Pontos de Medição	Metodologias		
	Padrão - L_{eq} (dB(A))	Proposta - L_{eq} (dB(A))	Diferença
1 ^o	94,71	94,5	0,21
2 ^o	94,08	93,8	1,00
3 ^o	94,25	94,2	0,05
4 ^o	93,6	93,2	0,04

4.3 Avaliação da Densidade Espectral de Potência

A segunda parte da medição teve como objetivo verificar, além da existência de um ruído com alto valor de potência, se o ruído também poderia ser nocivo a outras partes do corpo do trabalhador além do ouvido. Assim, estão apresentados, na Subseção 4.3.1, os espectros de frequência das amostras coletadas utilizando a ponderação A com suas respectivas análises. Na Subseção 4.3.2, estão dispostos os gráficos das densidades espectrais de potência sem ponderação em frequência, caso no qual pode ser observada a possível influência em outras partes do corpo humano.

4.3.1 Espectro de Frequências Observado com Ponderação A

De posse dos áudios, para os pontos aferidos foram gerados gráficos da densidade espectral de potência (representando as duas faixas de observação). As Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os resultados desse processamento.

Pode ser observado nos gráficos em questão que todos apresentam um rápido aumento na potência de ruído entre 20 Hz e 100 Hz. A partir de 150 Hz, o nível se mantém praticamente constante, existem alguns picos, até a frequência de 500 Hz.

A fim de observar os níveis de potência para outra faixa de frequências, foram geradas as Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13. Neles é possível perceber que para a faixa de 0 – 1 kHz há uma concentração de altos níveis de potência e que de 1 kHz – 6 kHz há uma diminuição nestes níveis.

Na Tabela 4.11 estão reunidos os maiores valores de pico observados em cada

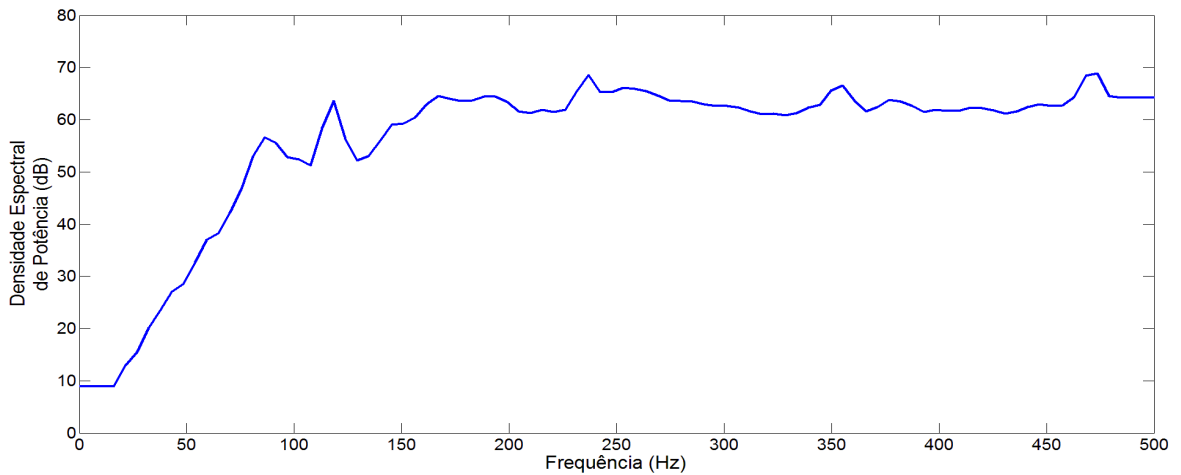


Figura 4.6 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.

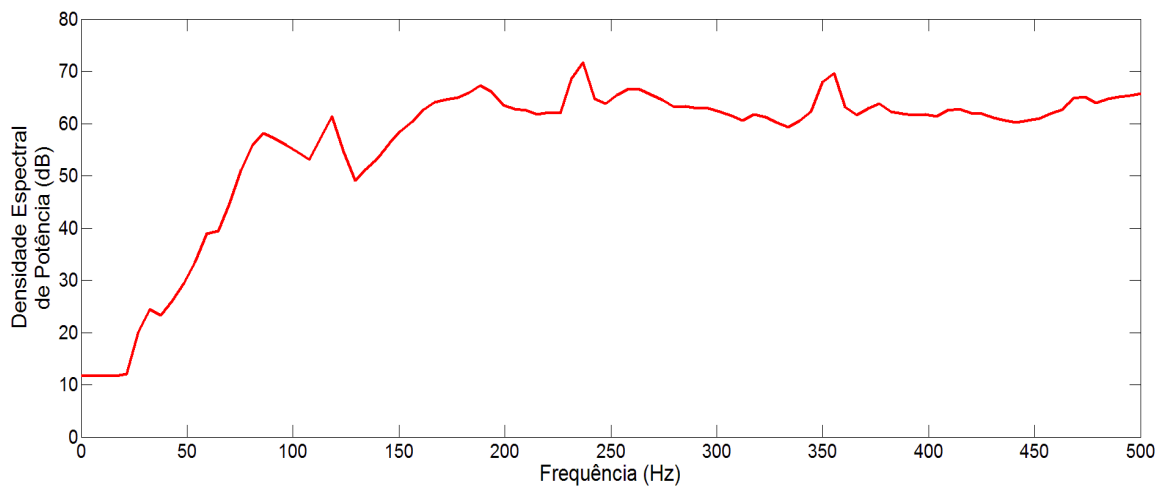


Figura 4.7 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.

um dos gráficos. Cada pico existente se concentra em uma faixa estreita de frequência. São, portanto, componentes senoidais misturados ao ruído produzido pelos ventiladores conforme [70] e [71].

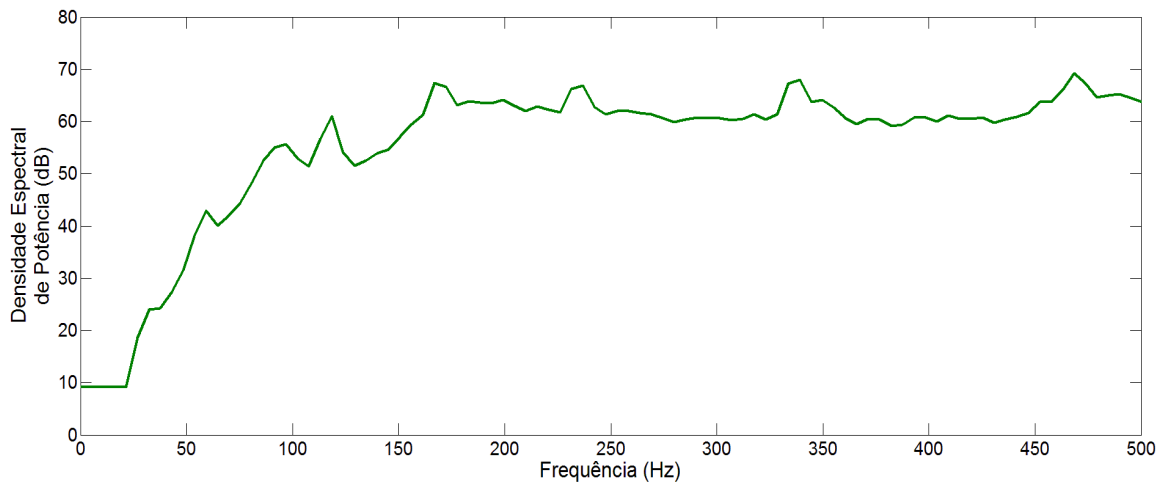


Figura 4.8 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.

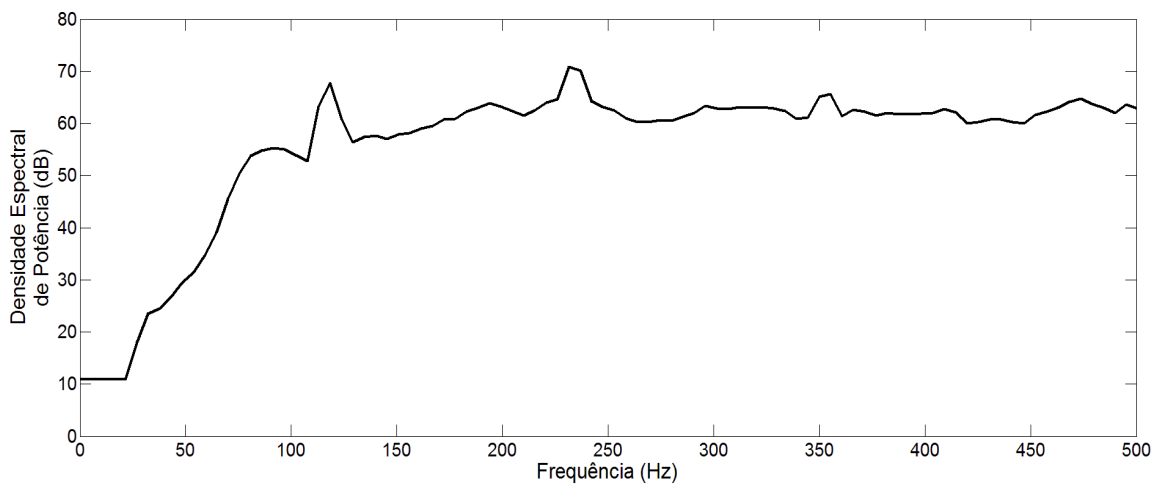


Figura 4.9 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz.

Tabela 4.11 – Dados das análises realizadas nos quatro pontos de ruído predominante do ambiente industrial, espectro de frequências ponderado.

Pontos de Medição	Faixas de Frequência (Hz)	Picos	
		Frequência (Hz)	Potência (dB)
1º	0 - 500	473,7	68,87
	500 - 6000	586,8	67,26
2º	0 - 500	236,9	71,72
	500 - 6000	942,1	66,67
3º	0 - 500	468,3	69,18
	500 - 6000	586,8	66,9
4º	0 - 500	231,5	70,88
	500 - 6000	915,2	66,76

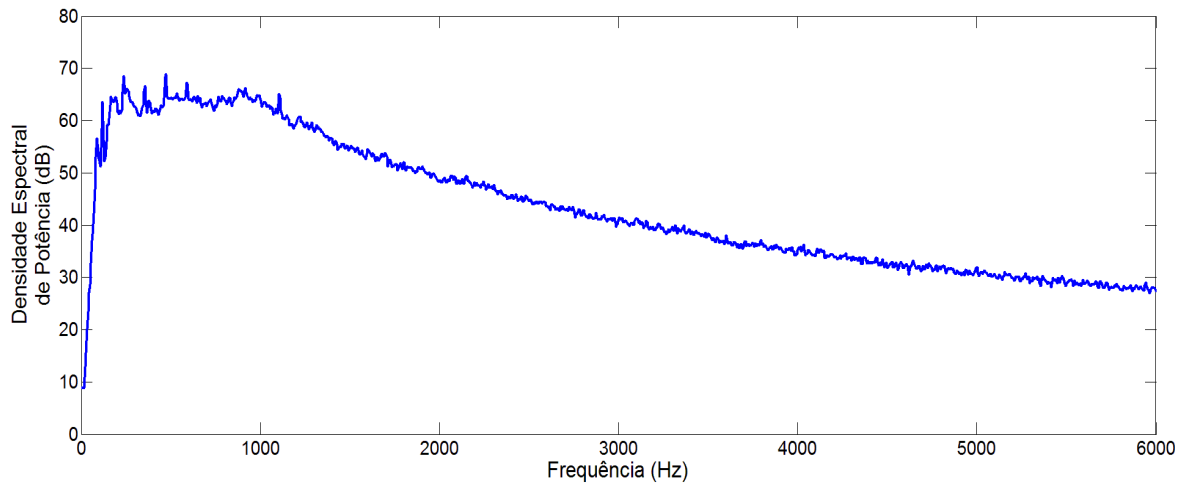


Figura 4.10 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.

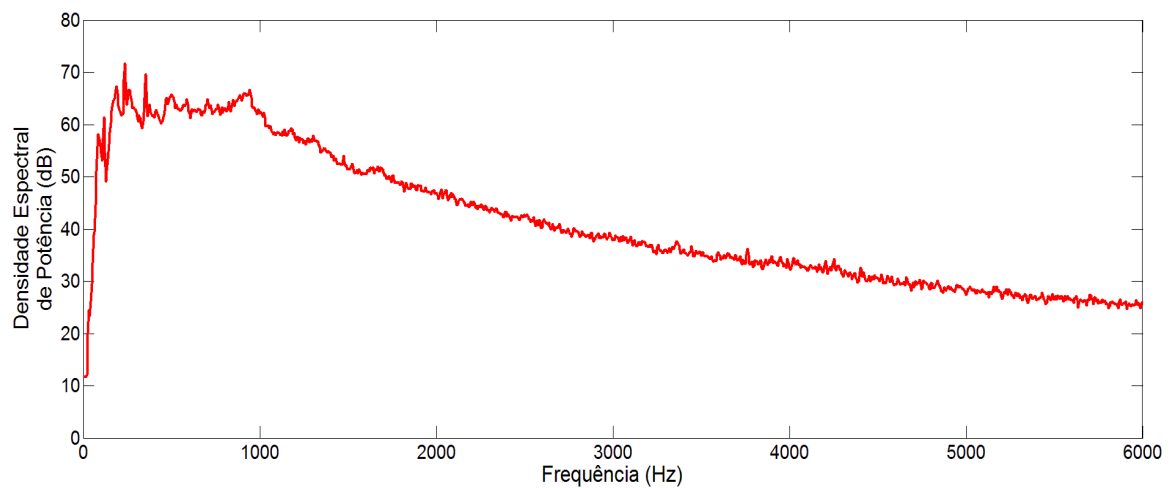


Figura 4.11 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.

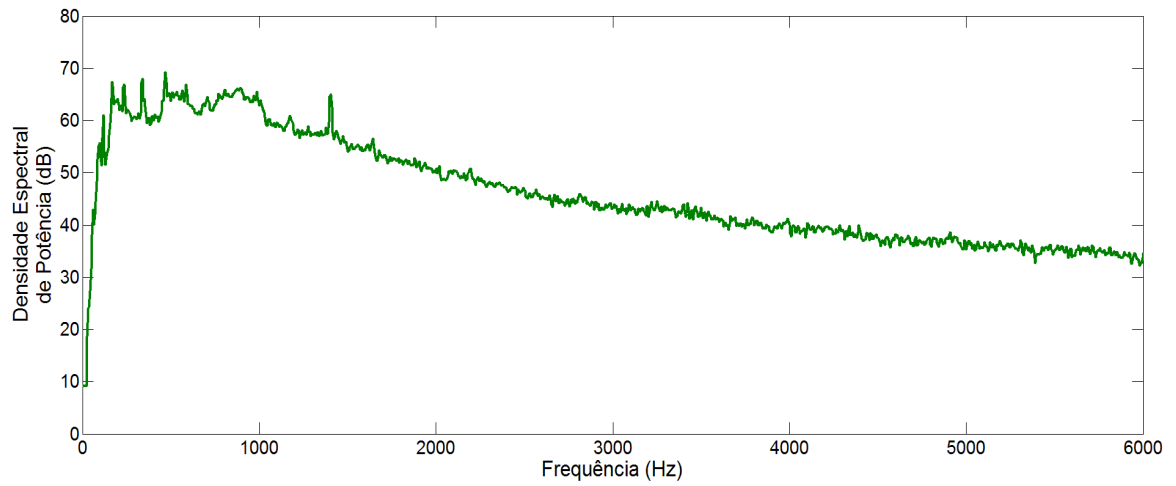


Figura 4.12 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.

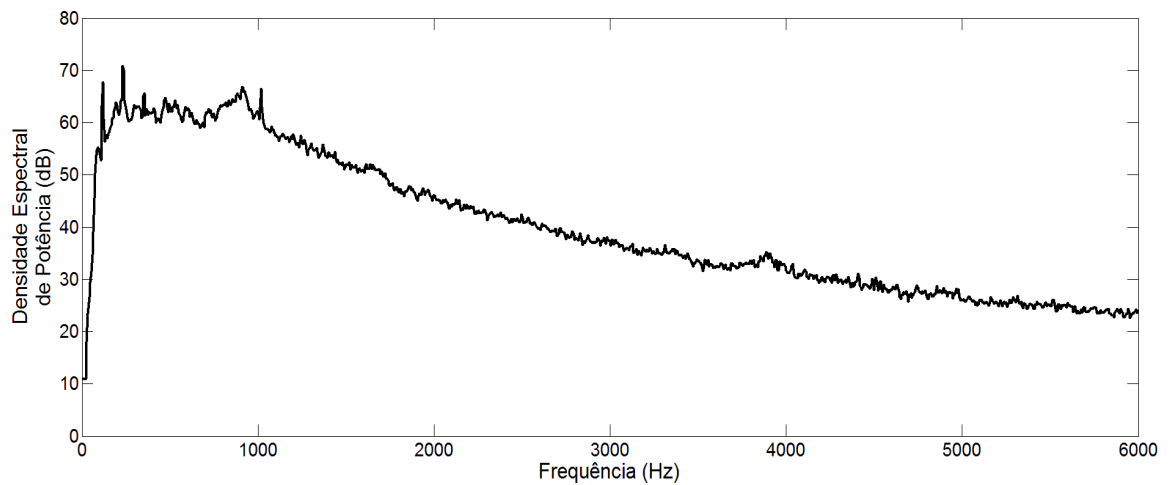


Figura 4.13 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz.

4.3.2 Espectro de Frequências Observado sem Ponderação

Segundo a Organização Mundial de Saúde, a ponderação A não deve ser utilizada para analisar efeitos não auditivos provocados por um som. Dessa forma, para observar se um ruído é ou não nocivo à saúde do trabalhador, a densidade espectral de potência não deve ser ponderada [44].

As Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam os resultados do cálculo da densidade espectral de potência para o ruído sem ponderação em frequência. Essa observação é de interesse por permitir visualizar a distribuição da potência no ruído sem que haja ênfase ou atenuação de frequências (ou faixa de frequências) específicas.

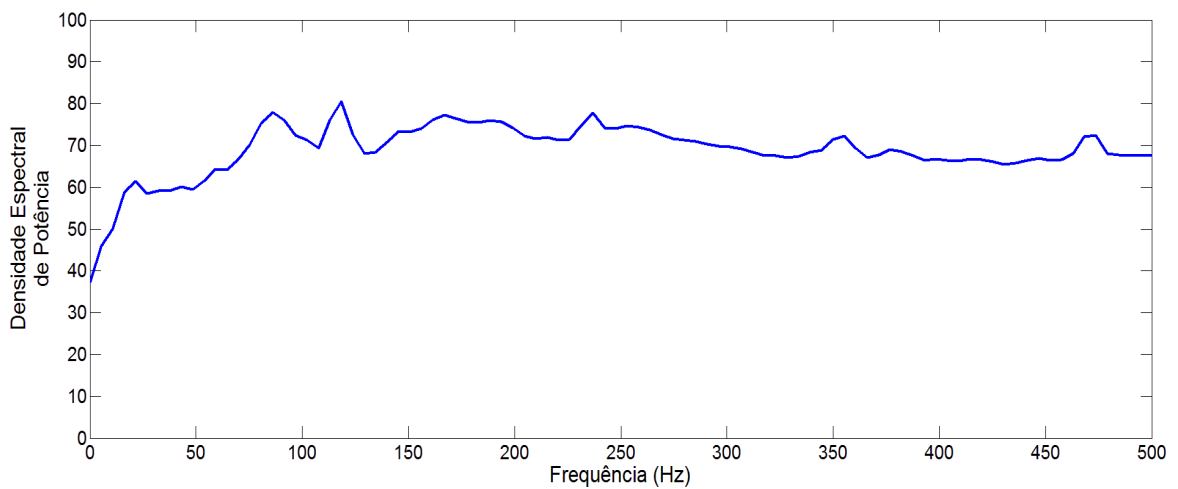


Figura 4.14 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).

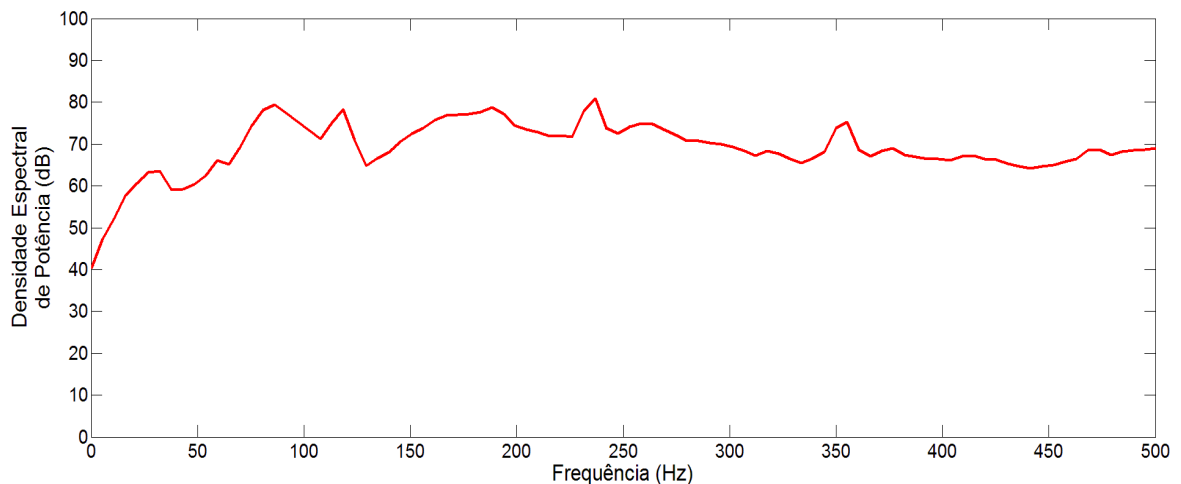


Figura 4.15 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).

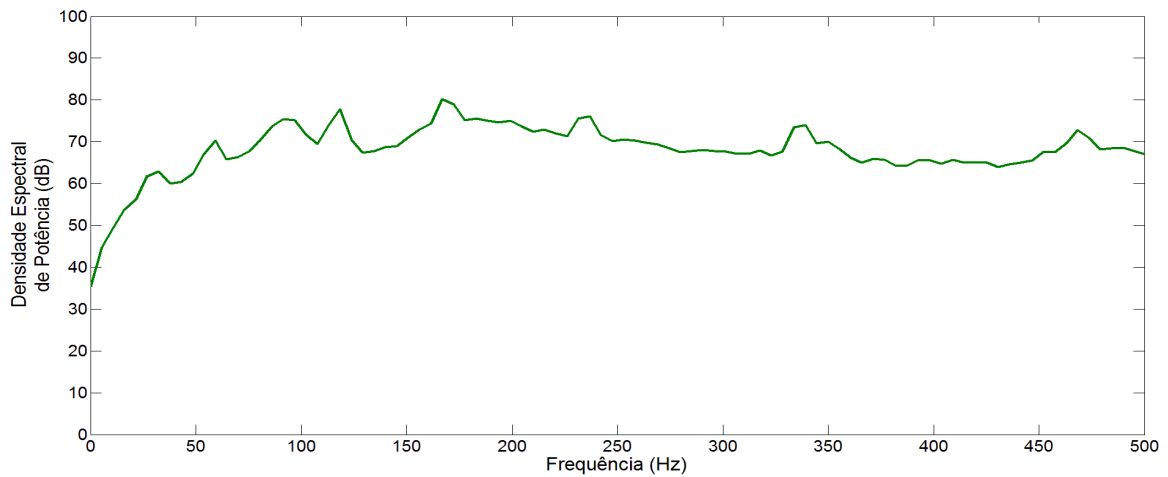


Figura 4.16 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).

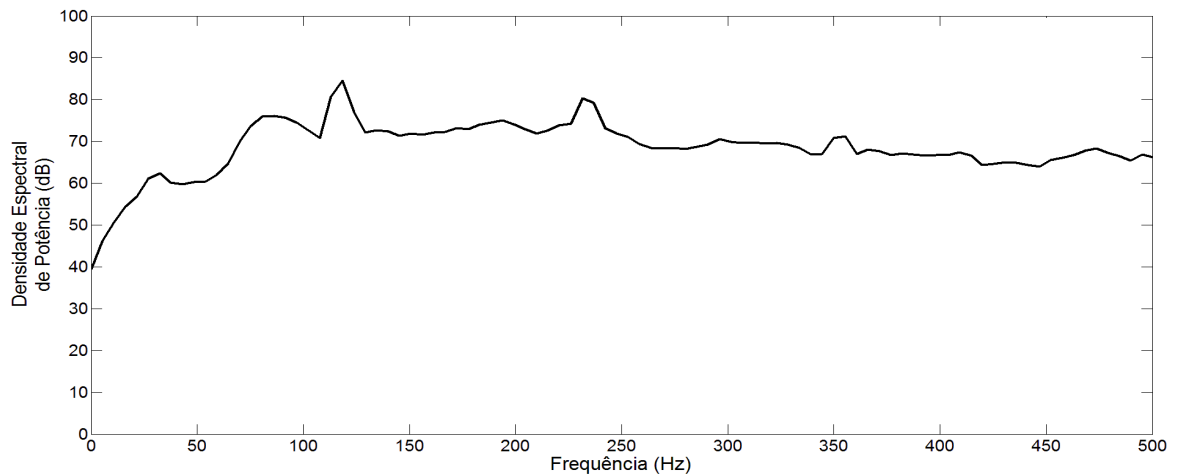


Figura 4.17 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 500 Hz (sem ponderação).

Observa-se nos gráficos altos valores de potência para baixas frequências. Os funcionários das fábricas sofrem com essas fortes vibrações. Elas podem causar irritação e aborrecimento em pessoas mais sensíveis ao ruído [12]. O pico de potência existente nos gráficos apresentados (4.14, 4.15, 4.16, 4.17), na faixa de 80 Hz a 150 Hz, gera vibrações no corpo desses funcionários. Segundo alguns pesquisadores, caso o peito de uma pessoa vibre devido um som na por volta de 80 Hz pode alterar suas vozes momentaneamente e conseqüentemente dificultar sua comunicação [8, 11, 12]. O ruído com altos valores de potência para a faixa apresentada nos quatro conjuntos de ventiladores das fábricas afeta o corpo dos trabalhadores provocando vibrações que são nocivas. Pode ser observado nos gráficos em questão que todos apresentam um rápido aumento na potência de ruído entre 20 Hz e 150 Hz. A partir de 150 Hz, o nível

se mantém praticamente constante, existem alguns picos, até a frequência de 500 Hz. Na Tabela 4.12 estão reunidos os maiores valores de pico observados em cada um dos gráficos.

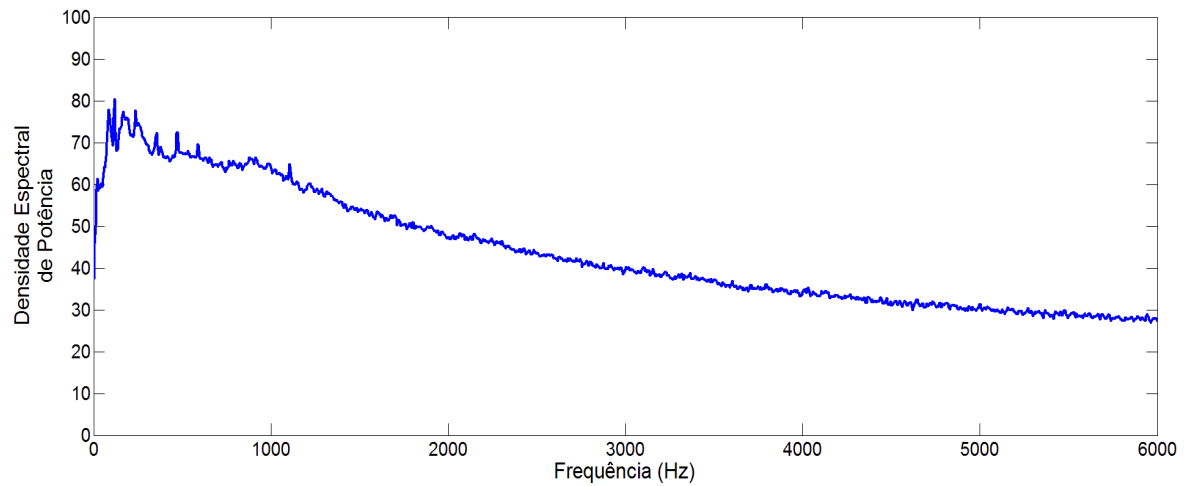


Figura 4.18 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 1º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).

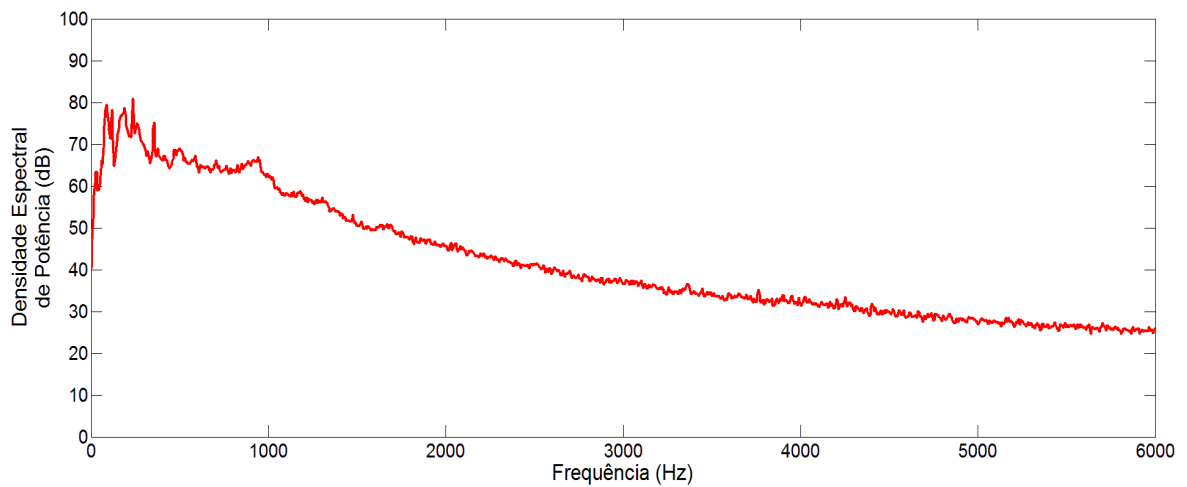


Figura 4.19 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 2º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).

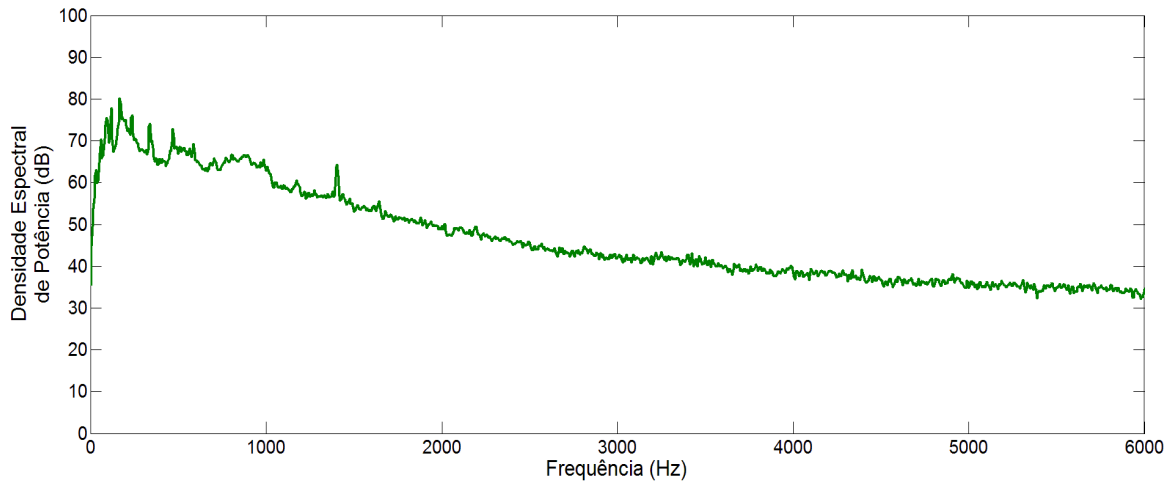


Figura 4.20 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 3º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).

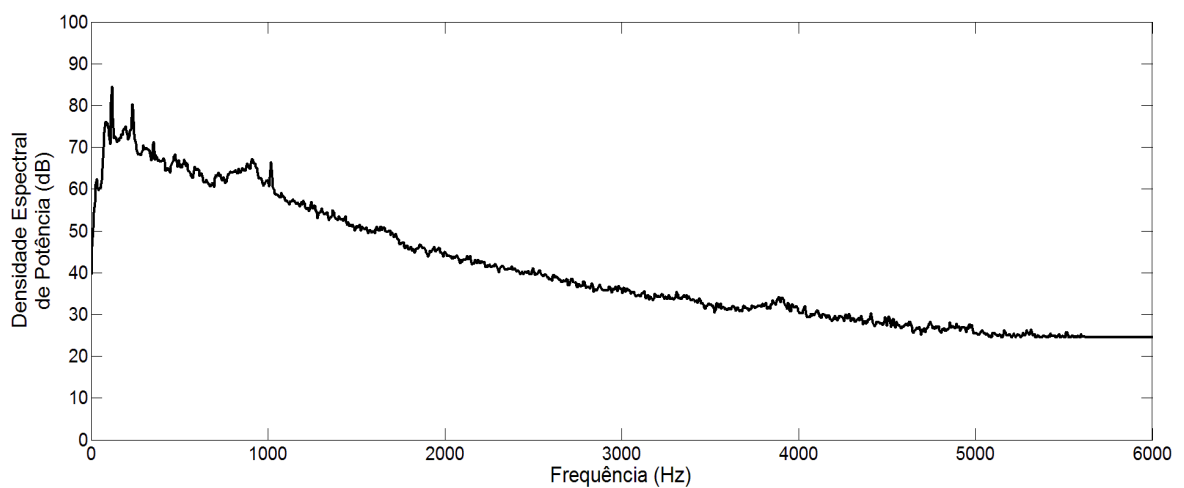


Figura 4.21 – Densidade espectral de potência do áudio coletado no 4º ponto de ruído predominante na faixa de 0 – 6 kHz (sem ponderação).

Tabela 4.12 – Dados das análises realizadas nos pontos de ruído predominante do ambiente industrial, espectro de frequência sem ponderação.

Pts. Medição	Faixa Freq. (Hz)	Maior Pico	
		Freq. (Hz)	Pot. (dB(A))
1º	0 - 500	118,4	80,43
	500 - 6000	592,2	69,4
2º	0 - 500	236,9	80,9
	500 - 6000	500,6	68,98
3º	0 - 500	166,9	80,15
	500 - 6000	586,8	69,19
4º	0 - 500	118,4	84,56
	500 - 6000	909,8	67,21

4.4 Análise da Autocorrelação do Ruído

O cálculo das autocorrelações para cada conjunto de ventiladores e o traçado dos respectivos gráficos, auxiliou no entendimento do comportamento desses ruídos. A autocorrelação pode mensurar se há, ou não, periodicidade em um sinal aleatório. Os gráficos obtidos foram comparados com os presentes em [67]. Semelhanças entre os gráficos de autocorrelação traçados e os apresentados na literatura auxiliam a compreensão da natureza do ruído.

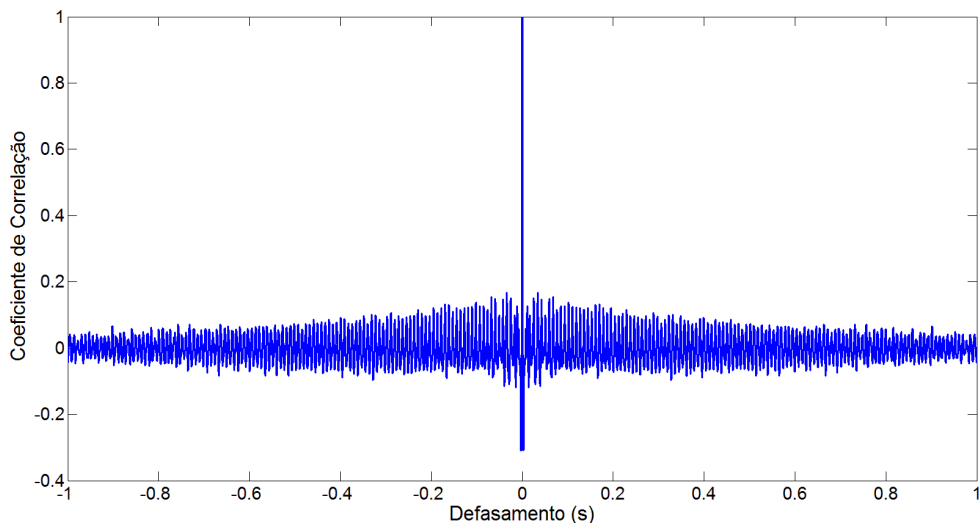


Figura 4.22 – Autocorrelação da amostra do 1º ponto de ruído predominante.

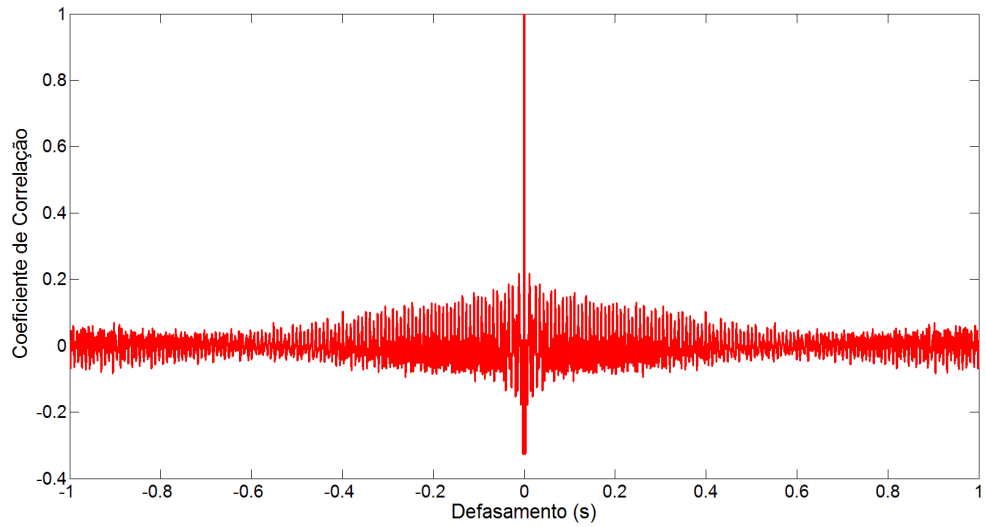


Figura 4.23 – Autocorrelação da amostra do 2º ponto de ruído predominante.

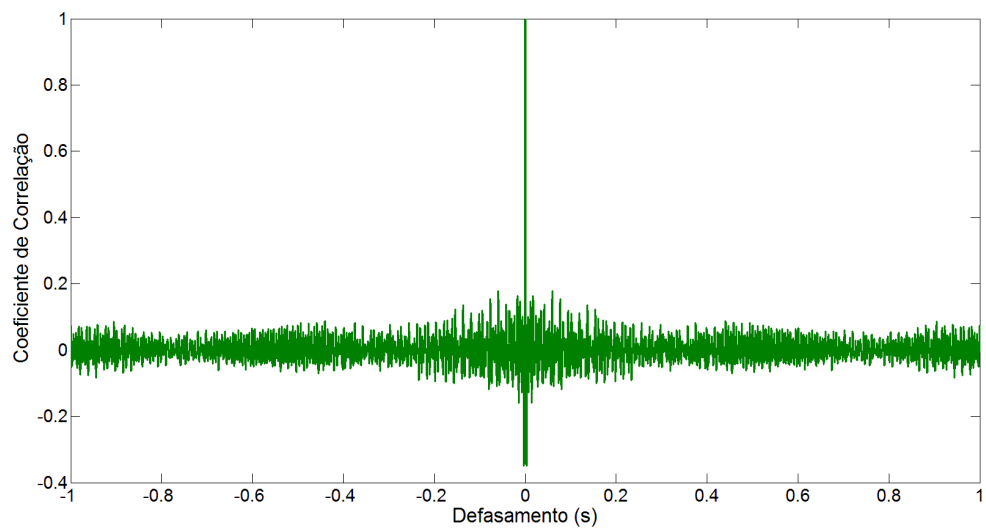


Figura 4.24 – Autocorrelação da amostra do 3º ponto de ruído predominante.

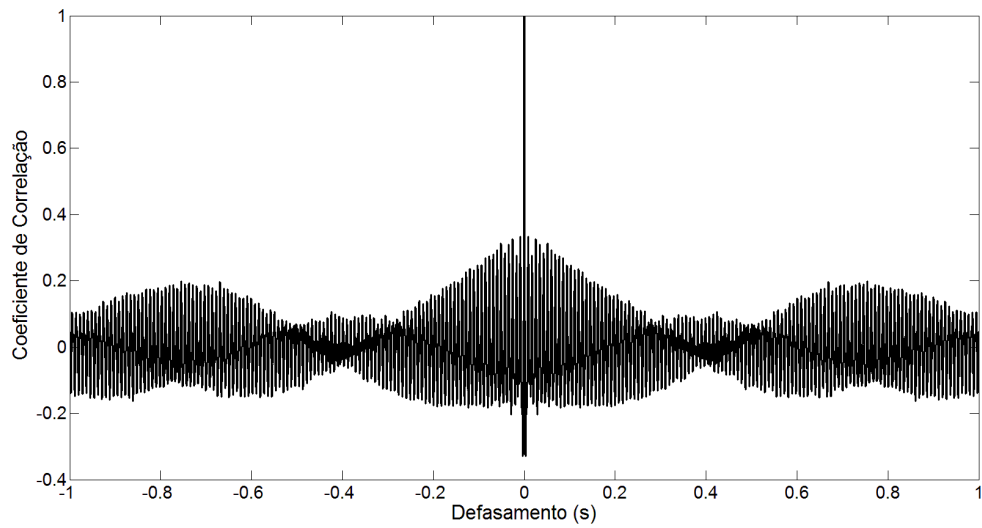


Figura 4.25 – Autocorrelação da amostra do 4º ponto de ruído predominante.

4.5 Comparação entre os Resultados da DEP e os da Autocorrelação do Ruído

O ruído gerado por ventiladores de refrigeração é composto de tons puros e de componentes de frequência banda larga, portanto, densidade espectral de potência e a autocorrelação de cada ponto aferido deve possuir esse comportamento [21]. Nas Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 suas partes centrais assemelham-se à autocorrelação de um ruído branco composto com outros sinais. As Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 também apresentam um comportamento de um ruído banda larga, uma vez que as componentes ocupam uma larga faixa de frequências.

Em busca de verificar se o comportamento do ruído aferido se assemelha ao apresentado na teoria, uma filtragem foi realizada. A partir desses resultados, a modelagem matemática da função densidade de probabilidade torna-se possível.

4.5.1 Filtragem do ruído

As Figuras 4.35, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 apresentam a comparação entre os gráficos da DEP e autocorrelação, respectivamente, para o ruído não filtrado e ruído filtrado. A filtragem foi implementada com um filtro digital com resposta ao impulso com duração infinita do tipo rejeita faixa estreito (*notch IIR filter*). Um filtro do tipo *notch* atenua as frequências em uma faixa estreita permitindo que a maior parte do sinal se mantenha inalterada [72]. Para o caso estudado, aplica-se uma combinação de filtros do tipo *notch* ajustados para n múltiplos de 118,45 Hz². O valor de n [73] é determinado por

$$n = \frac{f_s}{f_o},$$

sendo f_s a frequência de amostragem do ruído e f_o é a frequência principal que se deseja remover. Esta combinação de filtros possui fator de qualidade igual a 35 para garantir que o filtro seja o mais estreito possível.

Ao filtrar a frequência de 118,45 Hz (e seus múltiplos inteiros) em todas as amostras pode ser notado que os picos presentes foram atenuados. Algo similar ocorre para a autocorrelação. Desta forma, conclui-se que há senoides compondo o ruído aferido nas fábricas. Assim, esse ruído se assemelha ao gerado por um ventilador de refrigeração. Os demais picos podem caracterizar outros tons que compõe esse ruído gerado por um ventilador ou serem oriundos de outras fontes sonoras. A influência das senoides, bem como o comportamento banda larga despertou o interesse em buscar uma modelagem matemática para a densidade espectral de potência e da função densidade de probabilidade para descrevê-lo.

²Esta frequência corresponde ao primeiro pico observado indicativo da existência de sinal senoidal.

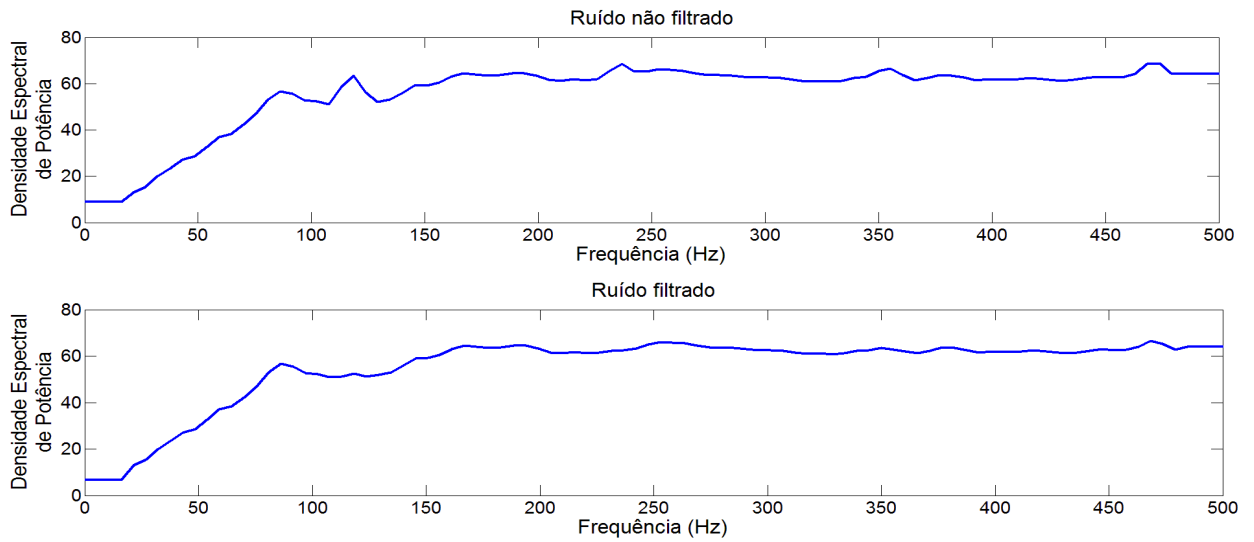


Figura 4.26 – Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 1º ponto de ruído predominante.

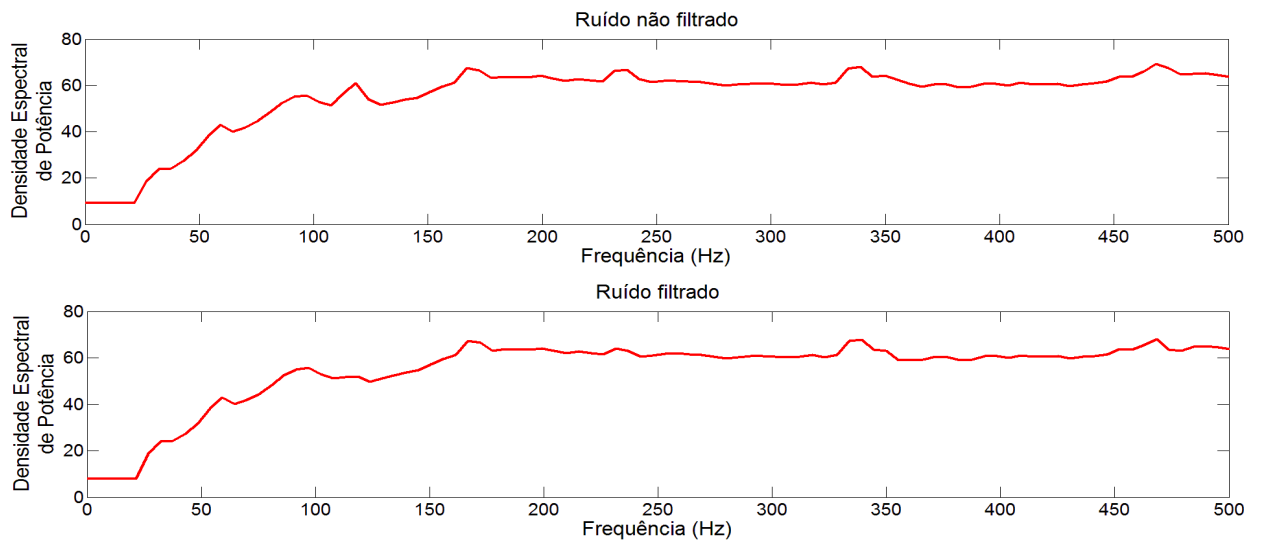


Figura 4.27 – Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 2º ponto de ruído predominante.

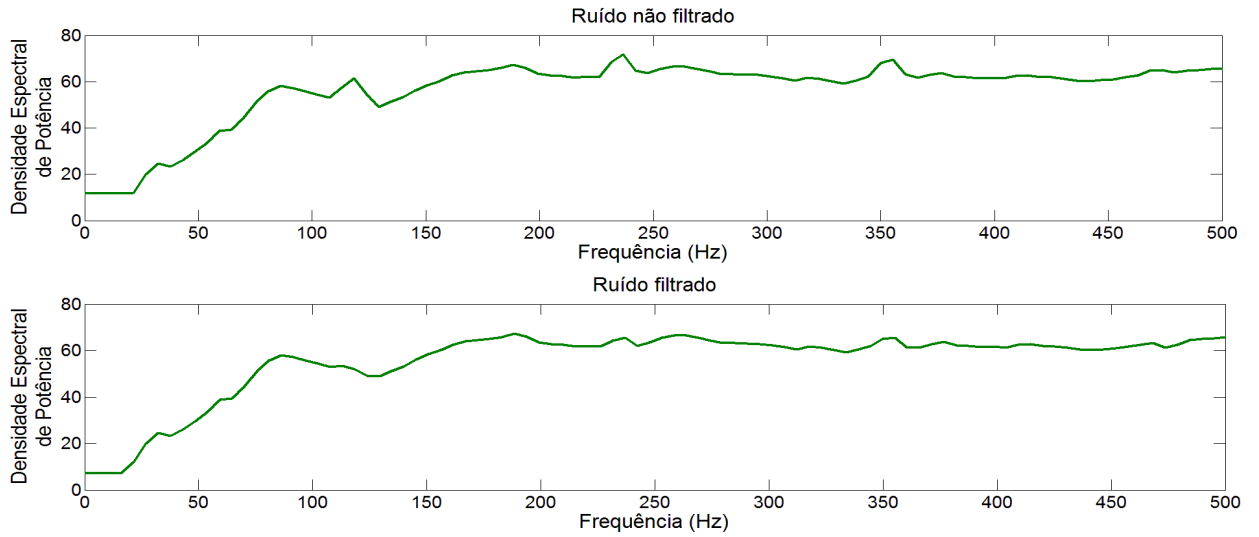


Figura 4.28 – Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 3º ponto de ruído predominante.

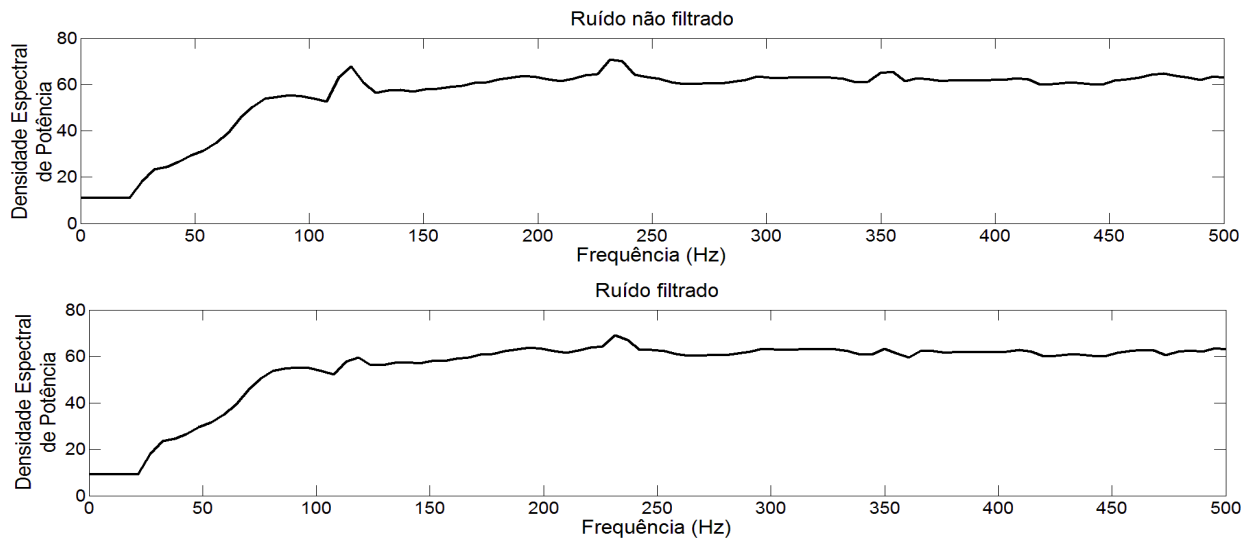


Figura 4.29 – Comparação entre a DEP com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 4º ponto de ruído predominante.

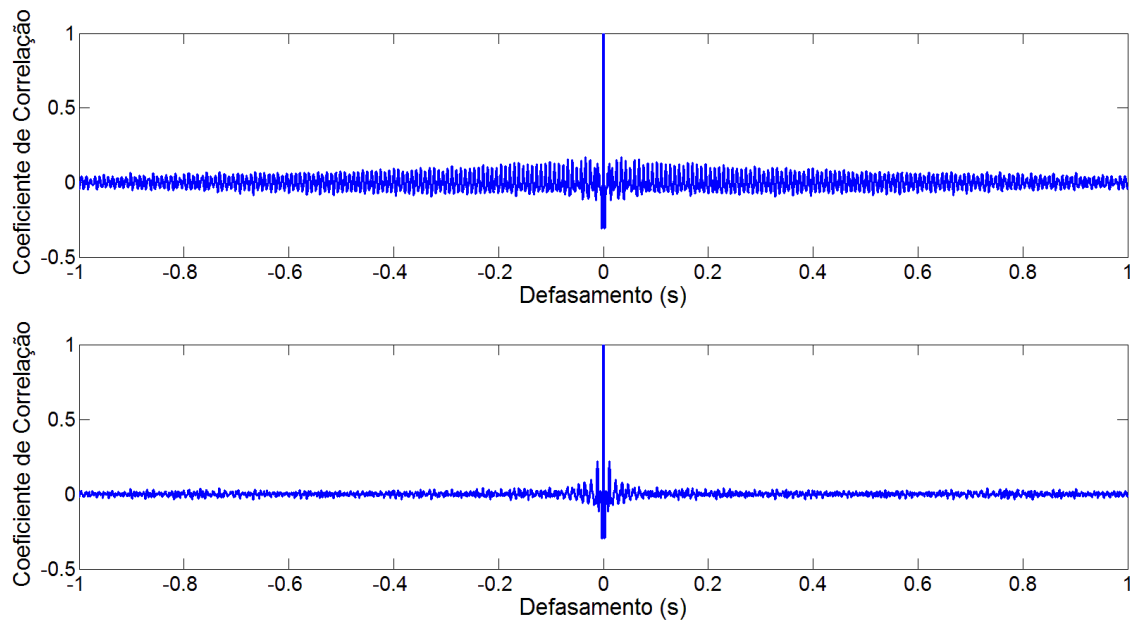


Figura 4.30 – Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 1º ponto de ruído predominante.

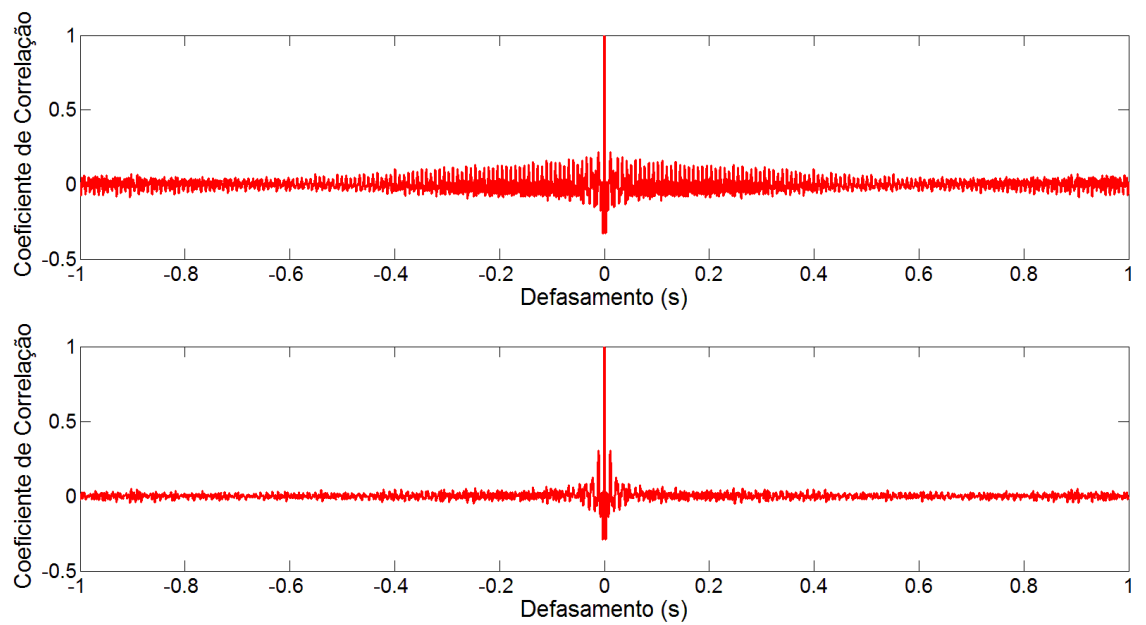


Figura 4.31 – Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 2º ponto de ruído predominante.

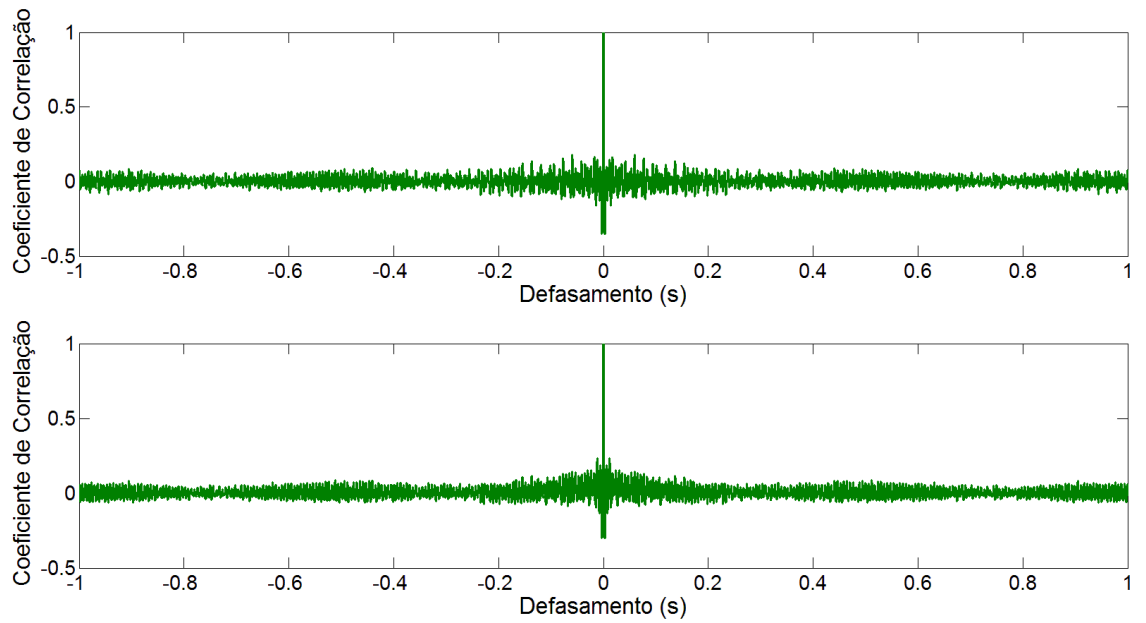


Figura 4.32 – Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado para o 3º ponto de ruído predominante.

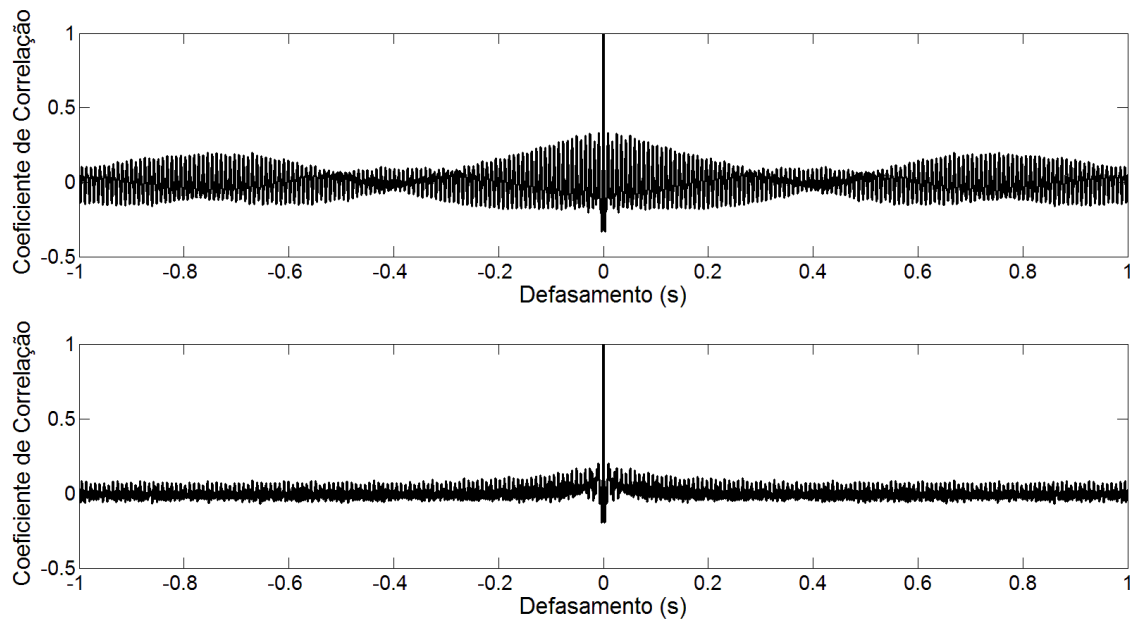


Figura 4.33 – Comparação entre a autocorrelação com filtro aplicado e sem filtro aplicado no 4º ponto de ruído predominante.

4.6 Modelagem Matemática

Nesta seção é proposta uma caracterização matemática para o ruído aferido na fábrica. Conforme apresentado na Seção 4.5, o ruído coletado é uma composição de tons puros com componentes de banda larga. Portanto,

$$Z = X + Y, \quad (4.1)$$

em que X e Y são independentes, X é um ruído banda larga, Y são tons puros e Z é o ruído composto. Pela análise da DEP e da autocorrelação, percebe-se a presença de senoides no ruído coletado. Portanto, a caracterização matemática deve abranger esse aspecto do ruído medido. Assim, o ruído X é um ruído gaussiano e Y é um ruído senoidal.

Calcular a função de densidade de probabilidade (fdp) da envoltória da mistura de ondas senoidais e um ruído gaussiano é um problema clássico. O primeiro a tratar dele foi Rice, em 1954. Ele expressou esta fdp como sendo uma integral envolvendo o produto de três funções de Bessel [74]. Essa integral era difícil de ser calculada. Anos mais tarde, o mesmo Rice publicou um estudo calculando a fdp de um número qualquer de ondas senoidais por meio da inversão numérica das suas funções características [75]. Em 1992, Helstrom propôs uma nova forma para calcular a fdp por meio de um método de aproximação numérica [74].

4.6.1 Caracterização da Densidade Espectral de Potência

A densidade espectral de potência para os pontos de ruído predominante apresenta as componentes de frequência com níveis significativos de potência por toda a faixa observada. A DEP pode ser caracterizada pelo produto de uma função polinomial com uma exponencial. O crescimento nos valores de potência para a faixa de 0 Hz até 100 Hz pode ser caracterizado por uma função polinomial. Para a faixa de 100 Hz a 6 kHz pode ser caracterizado por uma função exponencial, portanto

$$f(x) = \beta x^i \exp(-\alpha x^j) \quad (4.2)$$

A Figura 4.34 apresenta o gráfico do modelo da densidade espectral de potência considerando $\alpha = 4$, $\beta = 3$, $i = 3$ e $j = 0, 2$. Na Figura 4.35 está a sobreposição entre o modelo e a DEP do primeiro ponto predominante.

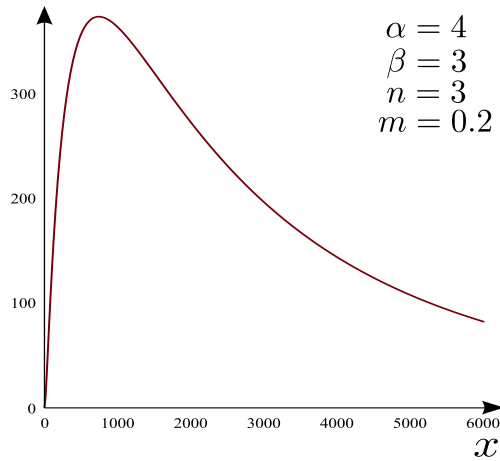


Figura 4.34 – Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito menores que A .

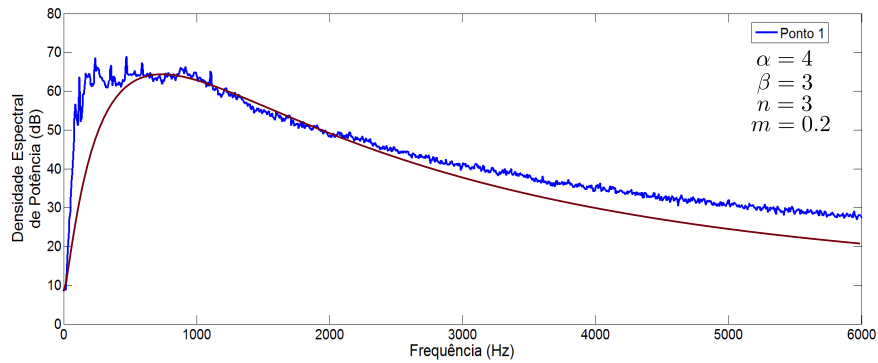


Figura 4.35 – Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito maiores que A .

4.6.2 Caracterização da Função Densidade de Probabilidade

Pelo problema proposto, o ruído coletado é uma soma de dois ruídos. Para o cálculo da função densidade de probabilidade do ruído, é realizada a operação de convolução entre X e Y . A convolução entre duas funções é obtida pela seguinte operação

$$p_Z(z) = p_X(x) * p_Y(y) \tag{4.3}$$

$$p_Z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p_x(t - z)p_y(t) dt, \tag{4.4}$$

em que $p_X(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$, $p_Y(t) = \frac{1}{\pi\sqrt{A^2-t^2}}$, com $|t| < A$.

Então,

$$\begin{aligned}
 p_Z(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} p_X(t-z)p_Y(t)dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(t-z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{\pi\sqrt{A^2-t^2}} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(t-z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{\pi\sqrt{A^2\frac{A^2-t^2}{A^2}}} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(t-z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{A\pi\sqrt{(1-\frac{t^2}{A^2})}} dt
 \end{aligned}$$

Como para um sinal de áudio, a média é nula, então

$$p_Z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(t-z)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{A\pi\sqrt{(1-\frac{t^2}{A^2})}} dt$$

Considerando $\frac{t}{A} = u$, e substituindo em 4.5, portanto

$$\begin{aligned}
 p_Z(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(uA-z)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{A\pi\sqrt{(1-u^2)}} Adu \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(uA-z)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{\pi\sqrt{(1-u^2)}} du
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

A integral da Equação 4.5 é de difícil solução analítica. Para solucionar $p_Z(z)$ é aplicada a Quadratura de Chebyshev-Gauss. Esse método numérico é utilizado para aproximar numericamente o cálculo de integrais. Existem outros tipos de quadratura, entretanto, o método de quadratura Chebyshev-Gauss foi escolhido pois a função peso utilizada é similar a função densidade de probabilidade de uma distribuição senoidal. A Equação 4.5 pode ser aproximada por uma soma ponderada da distribuição normal calculada para i valores. A quadratura Chebyshev-Gauss é dada por [76]

$$\int_{-1}^1 \frac{f(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx \approx \sum_{i=1}^n \omega_i f(x_i), \tag{4.6}$$

em que $x_i = \cos\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right)$ são os n -ésimos zeros do polinômio de Chebyshev de primeira ordem e $\omega_i = \frac{\pi}{n}$ é uma constante de ponderação. Este método só pode ser aplicado se tanto $p_x(t)$ quanto $p_y(t)$ forem integráveis entre -1 e 1, e, $p_x(t)$ puder ser aproximada por polinômios. Uma vez que as restrições são atendidas, a Equação 4.5

pode ser escrita como

$$p_Z(z) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(uA - z)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{\pi\sqrt{(1-u^2)}} du, \quad (4.7)$$

pela quadratura de Chebyshev-Gauss, tem-se

$$\begin{aligned} p_Z(z) &= \frac{\pi}{n\pi\sigma\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{-(u_i A - z)^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \frac{1}{n\sigma\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{-\left(A \cos\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) - z\right)^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Nas Figuras 4.36 e 4.37 estão dispostos os gráficos do conjunto de curvas geradas ao variar os valores de σ . Para os gráficos da Figura 4.36, o valor de $n = 100$, $-0.5 \leq z \leq 0.5$, $A = 0,2$, variando apenas o valor de σ . Para os gráficos da Figura 4.37, o valor de $n = 100$, $-2 \leq z \leq 2$, $A = 0,2$, variando apenas o valor de σ . Os valores foram escolhidos para melhor representar os resultados do modelo.

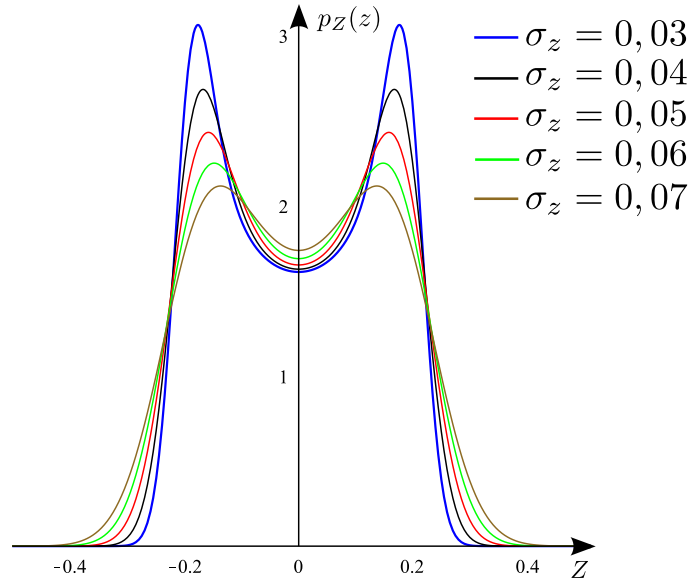


Figura 4.36 – Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito menores que A .

Observa-se na Figura 4.36 que com o aumento do valor de σ em relação a A , a curva se assemelha a da distribuição normal e com a diminuição de σ em relação a A (ver Figura 4.37), a curva se assemelha a da distribuição senoidal. Para validar o modelo proposto foi calculado o histograma do ruído. O histograma de uma sequência é a forma mais simples de obter informações iniciais sobre a fdp de uma distribuição desconhecida [77]. A sobreposição entre o histograma do ruído com o equacionamento proposto está apresentado na Figura 4.38. As formas dos dois gráficos são semelhantes.

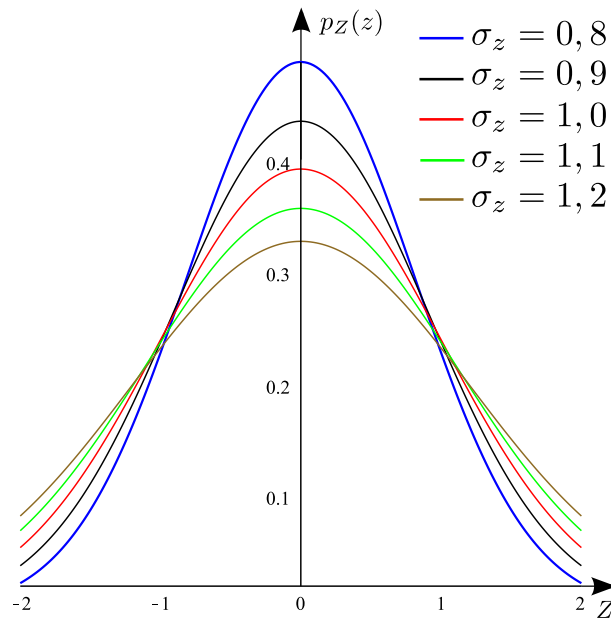


Figura 4.37 – Gráfico do modelo proposto com valores de σ muito maiores que A .

A convolução da distribuição normal com mais distribuições senoidais resultaria em um resultado mais aproximado.

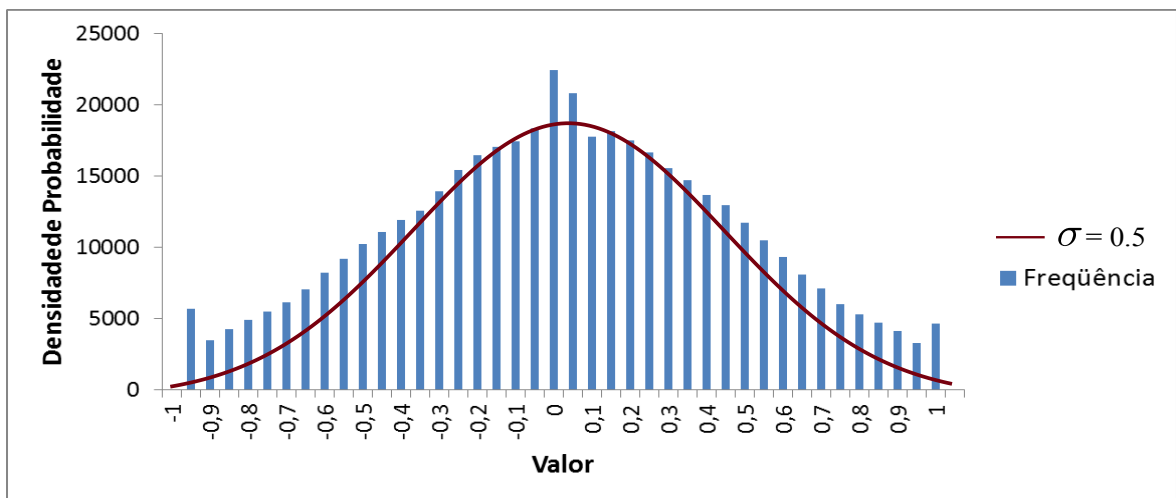


Figura 4.38 – Gráfico de comparação entre o modelo proposto e a fdp empírica.

4.7 Conclusões

A mensuração dos níveis de potência sonora permite identificar a necessidade do fornecimento de equipamentos de proteção individual. Caso as medições atestem valores abaixo dos limites estipulados em norma, o seu uso por parte dos trabalhadores não é necessário. Neste estudo pode-se observar a necessidade devido aos altos níveis de potência sonora existentes nas fábricas observadas.

O conhecimento da característica espectral do ruído possibilita uma melhor interpretação do problema. A utilização do cálculo da densidade espectral de potência para identificar a provável fonte geradora de ruído é um trunfo da metodologia proposta. A avaliação com o procedimento proposto é mais completa e possibilita propor soluções de mitigação específicas para o problema.

A filtragem do sinal permitiu observar que os conjuntos de ventiladores medidos gera harmônicos a partir de 118,45 Hz. Este valor provavelmente se refere a frequência de passagem da pá. Como se trata de um equipamento fabricado na própria empresa, não há como afirmar com certeza. A identificação da frequência de passagem das pás possibilita o projeto de protetores auriculares ativos, cuja característica de atenuação esteja sintonizada com esse valor. A filtragem permitiu, também, determinar se o comportamento do ruído se assemelha ao proposto em teoria. Atinge-se através da metodologia desenvolvida, portanto, a proposta desta dissertação.

O modelo matemático proposto para o ruído aferido se mostrou bem similar ao histograma do ruído. Um melhor ajuste em todos os parâmetros da Equação 4.5 permite obter um resultado mais aproximado possível daquele obtido com as medições. Novos estudos nessa linha de pesquisa necessitam ser desenvolvidos para aprimorar essa caracterização possibilitando, inclusive, a sua transposição para outras áreas de conhecimento ou para solucionar outros problemas.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

Esta dissertação apresentou uma nova metodologia para coleta e análise de ruído em ambiente fabril e a caracterização da densidade espectral de potência e da função densidade de probabilidade desse ruído. Os resultados apresentados delineiam um cenário novo e interessante. A prática comum de aferição de ruído em ambientes de trabalho é simples e não contempla as complexidades que o tema exige. A metodologia proposta atende a essa necessidade sem ser complexa, sendo possível construir um dispositivo que realize estas aferições e analise preliminarmente o ruído existente no ambiente laboral.

O conhecimento da fonte geradora do ruído a partir da sua análise espectral é um importante resultado desta dissertação. Atuar diretamente na fonte do ruído produz melhores resultados na mitigação do ruído do que atua no meio de transmissão ou no receptor. A mitigação do ruído é uma atividade complexa e o conhecimento da natureza deste ruído permite desenvolver ou aplicar técnicas específicas para tal finalidade. Soluções como ajustar a velocidade dos ventiladores para diminuir o ruído produzido ou a criação de filtros e barreiras específicas (a exemplo do realizado na Seção 4.5.1) somente são eficazes ao se conhecer a composição do ruído existente no local. A exposição crônica a altos valores de potência para baixas frequências, como é observado nas fábricas analisadas, pode provocar baixas médicas frequentes.

A análise das componentes de frequência permitiu construir um modelo matemático que se aproxima da função densidade de probabilidade e da densidade espectral de potência do ruído estudado. Além disso, permitiu observar a existência de senoides na composição do ruído, bem como a frequência em que ocorrem.

A parceria entre a empresa que serviu de campo de pesquisa e o Iecom possibilitou o desenvolvimento de uma metodologia eficaz e que apresenta com clareza e objetividade o quão nocivo é o ruído aferido. A interação entre indústria e academia pode gerar bons frutos para a sociedade, e esta dissertação é um deles. Uma futura aplicação deste mesmo procedimento em outros tipos de indústrias, em situações cotidianas (grandes eventos), bem como a medição de outros equipamentos industriais

se configuram interessantes vertentes para trabalhos posteriores. A legislação brasileira também pode ser beneficiada por esta dissertação. Conhecer a natureza dos ruídos produzidos pelos diversos setores da economia nacional possibilita melhorar os critérios de avaliação de ruído aos quais todas as empresas são obrigadas a seguir. Repensar a forma de medir ruído é um passo largo em busca da melhoria da saúde laboral.

São méritos desta dissertação:

1. Desenvolver uma metodologia de aferição de ruído que atenda a complexidade do problema;
2. Caracterização da fonte geradora do ruído aferido nas fábricas;
3. Caracterização matemática da função densidade de probabilidade e da densidade espectral de potência;
4. Conhecimento da natureza de um ruído produzido em uma indústria calçadista;
5. Parceria exitosa entre a indústria local e um conceituado centro de pesquisa;

5.1 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros pretende-se:

- Modelar o ruído pela convolução da distribuição normal com n distribuições senoidais;
- Otimizar os parâmetros do modelo matemático;
- Realizar testes estatísticos para ajustar as curvas dos modelos desenvolvidos;
- Construir um software que aplique a metodologia desenvolvida na solução de problemas relacionados a ruídos acústicos;
- Fazer medições em outros ambientes para comparar com o modelo matemático proposto;
- Correlacionar dados médicos com as características espectrais do ruído aferido para observar se alguma faixa de frequência pode causar algum mal específico a alguém cronicamente exposto ao ruído;
- Construir um dispositivo que com medições em tempo real possa estimar o quanto nocivo é um determinado ruído aferido.

5.2 Publicações

A análise realizada neste trabalho mostrou-se ser interessante e proporcionou um amplo horizonte de possibilidades para novos estudos, além de despertar o interesse na comunidade científica. Até o presente momento da escrita desta dissertação, foram submetidos 4 artigos para congresso e 1 para revista.

Artigos aprovados em congressos:

Daniel Perez Martins; Marcelo Sampaio de Alencar. Estudo Preliminar sobre Ruídos Sonoros em Ambiente Industrial. In *XVI Encontro de Modelagem Computacional, IV Encontro Ciência e Tecnologia de Materiais, III Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional*, Out. 2013.

Daniel Perez Martins; Marcelo Sampaio de Alencar. Análise de Ruído Sonoro em Ambiente Industrial: Uma Nova Abordagem. In *Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia*, Out. 2013.

Daniel Perez Martins; Marcelo Sampaio de Alencar. Modelagem Matemática de um Ruído Produzido por Ventiladores Industriais In *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*

Daniel Perez Martins; Marcelo Sampaio de Alencar. A New Approach to Noise Measurement and Analysis in an Industrial Facility. In *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Mai. 2014

Artigo enviado para publicação em revista:

Daniel Perez Martins; Marcelo Sampaio de Alencar. Análise e Caracterização Matemática do Ruído Gerado por Ventiladores Industriais. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*.

Apêndice A

Filtro de Ponderação A

Para aproximar as medições utilizando um medidor de nível de pressão sonora da sensibilidade do ouvido humano as frequências componentes do som medido são ponderadas [32]. Esse processo pode ser realizado tanto por um circuito eletrônico (no caso de um instrumento de medição) [32] quanto por um algoritmo (no caso do processamento digital de um som). Dos tipos de ponderação, a ponderação A é a utilizada por diversos países para regulamentar os níveis de pressão sonora aceitáveis aos quais um trabalhador pode ser submetido [15, 31]. Ela é o inverso da curva de audibilidade do ser humano, para níveis baixos de pressão sonora, para se ajustar à resposta em frequência do ouvido humano ao nível de pressão sonora igual a 40 dB para todas as frequências [15, 32]. A Figura A.1 apresenta a curva da ponderação A.

Tabela A.1 – Ajuste do nível de potência aferido utilizando a ponderação A. Tabela adaptada de [22, 31, 56].

Frequência (Hz)	Ajuste do nível de pressão sonora (dB)	Frequência (Hz)	Ajuste do nível de pressão sonora (dB)
10	-70,4	500	-3,2
12,5	-63,4	630	-1,9
16	-56,7	800	-0,8
20	-50,5	1000	0
25	-44,7	1250	0,6
31,5	-39,4	1600	1,0
40	-34,6	2000	1,2
50	-30,2	2500	1,3
63	-26,2	3150	1,2
80	-22,5	4000	1,0
100	-19,1	5000	0,5
125	-16,1	6300	0,1
160	-13,4	8000	-1,1
200	-10,9	10000	-2,5
250	-8,6	12500	-4,3
315	-6,6	16000	-6,6
400	-4,8	20000	-9,3

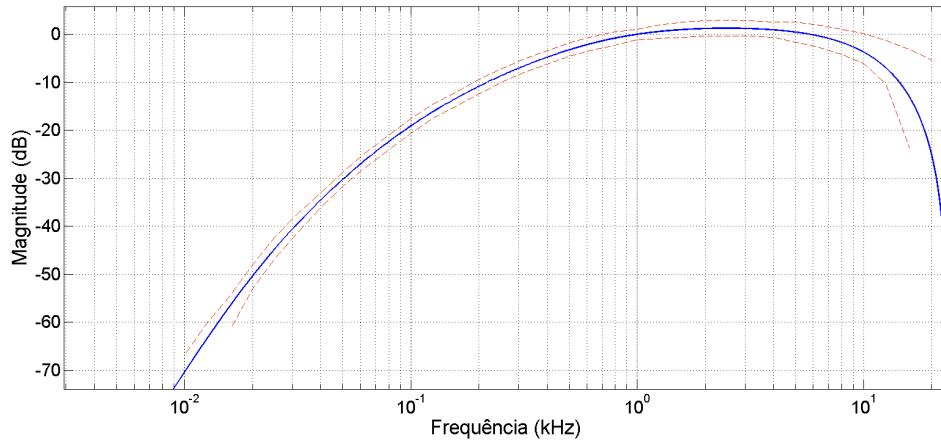


Figura A.1 – Curva da ponderação A.

A filtragem com a ponderação A é realizada pela operação de multiplicação entre o espectro de frequência do ruído e o filtro ajustado para a ponderação A. Portanto,

$$x_A(t) = x_L(t) * h_A(t) \quad (\text{A.1})$$

$$X_A(f) = X_L(f)H_A(f), \quad (\text{A.2})$$

em que $X_A(f)$ é o espectro ponderado A em frequência, $X_L(f)$ é o espectro linear de frequência e $H_A(f)$ é o filtro ajustado para a ponderação A [58].

O filtro $H_A(f)$ no domínio s é dado por [78]

$$H_A(s) = \frac{4\pi^2 f_4^2 z^4}{(z + 2\pi f_1)^2 (z + 2\pi f_4)^2 (z + 2\pi f_2)(z + 2\pi f_3)}, \quad (\text{A.3})$$

em que $H_A(s)$ é função de transferência do filtro no domínio z $f_1 = 20,6$ Hz, $f_2 = 107,7$ Hz, $f_3 = 737,9$ Hz, $f_4 = 12,2$ kHz.

O cálculo da densidade espectral de potência para o espectro ponderado é realizado de forma similar ao da filtragem do sinal de entrada. A DEP ponderada A é dada por [58]

$$S_{X,A}(f) = S_X(f)H_A(f)^2 \quad (\text{A.4})$$

Apêndice B

Medidor de Nível Sonoro

O medidor de nível sonoro é um instrumento de medição acústica. É composto essencialmente por um microfone, amplificador de sinal um filtro de ponderação em frequência e um display para apresentar as leituras realizadas e podem ser especificados em três tipos, de acordo com o padrão S1.4-1971 da ANSI [79, 80]:

1. Tipo 1 - Precisos
2. Tipo 2 - Uso Geral
3. Tipo 3 - Pesquisa

Atualmente, os tipos 1 e 2, principalmente o tipo 2, são utilizados para medição de nível sonoro de ruído [79, 80]. O medidor de nível sonoro utilizado nesta dissertação possui as seguintes características [81]:

- ± 2 dB de acurácia com resolução de 0.1 dB
- ponderação A,C
- saída analógica AC
- grava valores de max/min ao longo do tempo
- desligamento automático e funções Max Hold
- utiliza 0.5" (12.7mm) condensador de microfone
- montável em tripé
- faixa de medição de 40 dB a 130 dB
- tempo de resposta Rápido e Lento

A Figura apresenta o diagrama de blocos do medidor de nível sonoro utilizado nesta dissertação.

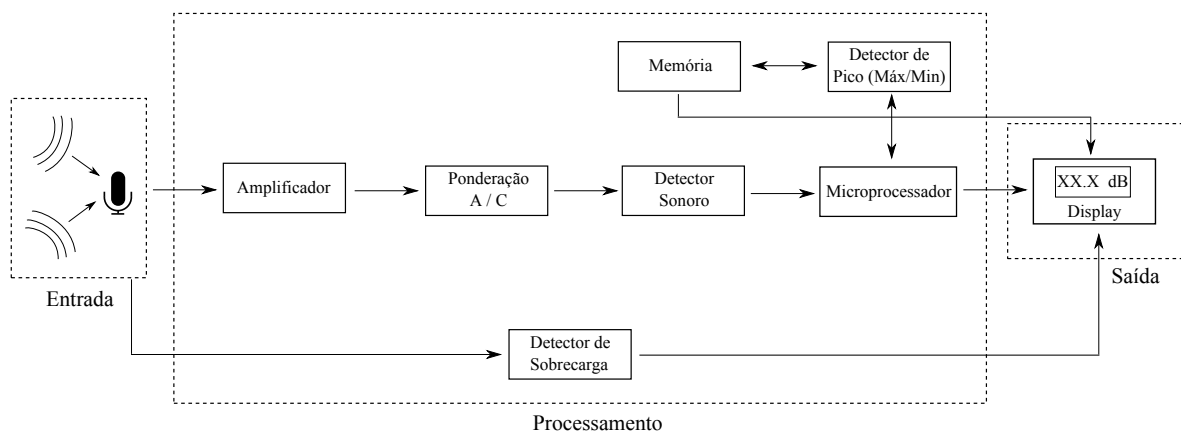


Figura B.1 – Diagrama de blocos do medidor de nível sonoro utilizado nesta dissertação.

Referências Bibliográficas

- [1] Daniel Martins and Marcelo S. Alencar. A new approach to noise measurement and analysis in an industrial facility. In *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2014)*, Montevideo, Uruguay, May 2014.
- [2] Isabella Vieira Botelho. Segurança no trabalho: Atuação preventiva e repressiva do direito. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2011.
- [3] Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora 9*, 2013. URL http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF1CA0393B27/nr_09_at.pdf. Acessado em: 15.01.2013.
- [4] Daniel Perez Martins; Marcelo Sampaio de Alencar. Estudo Preliminar sobre Ruídos Sonoros em Ambiente Industrial. In *XVI Encontro de Modelagem Computacional, IV Encontro Ciência e Tecnologia de Materiais, III Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional*, Out. 2013.
- [5] Daniel Perez Martins; Marcelo Sampaio de Alencar. Análise de Ruído Sonoro em Ambiente Industrial: Uma Nova Abordagem. In *Encontro Anual do IECOM em Comunicações, Redes e Criptografia*, Out. 2013.
- [6] Dóris Palma. Quando o ruído atinge a audição. *Monografia-Centro de Especialização em Fonoaudiologia Clínica-Audiologia, Porto Alegre*, 1999.
- [7] Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora 7*, 2013. URL http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C812D308E21660130E0819FC102ED/nr_07.pdf. Acessado em: 15.01.2013.
- [8] Geoff Leventhall, Peter Pelmear, and Stephen Benton. A review of published research on low frequency noise and its effects. 2003.
- [9] Low frequency noise, infrasound and wind turbines, 2013. URL <http://www.windvigilance.com/about-adverse-health-effects/low-frequency-noise-infrasound-and-wind-turbines>.

- [10] Helmut Seidel. Selected health risks caused by long-term, whole-body vibration. *American journal of industrial medicine*, 23(4):589–604, 1993.
- [11] Yukio Takahashi, Kazuo Kanada, Yoshiharu Yonekawa, and Noriaki Harada. A study on the relationship between subjective unpleasantness and body surface vibrations induced by high-level low-frequency pure tones. *Industrial Health*, 43(3):580–587, 2005.
- [12] Yukio Takahashi, Yoshiharu Yonekawa, Kazuo Kanada, and Noriaki Harada. Frequency-dependence in the relationship between subjective unpleasantness and body surface vibrations induced by low-frequency noise. In *18th International Congress on Acoustics (ICA 2004), Proceedings*, volume 3737, 2004.
- [13] Goran Belojevic, Branko Jakovljevic, et al. Factors influencing subjective noise sensitivity in an urban population. *Noise and Health*, 4(13):17, 2001.
- [14] Expert Group on the Effects of Environmental Noise on Health. Environmental Noise and Health in the UK. URL http://www.hpa.org.uk/webc/HPAwebFile/HPAweb_C/1246433634856. Acessado em : 10.05.2013.
- [15] Randall F Barron. *Industrial noise control and acoustics*. CRC Press, 2002.
- [16] Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora 15*, 2013. URL [http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812DF396CA012E0017BB3208E8/NR-15\%20\(atualizada_2011\).pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812DF396CA012E0017BB3208E8/NR-15\%20(atualizada_2011).pdf). Acessado em: 15.01.2013.
- [17] Brian Howe and N McCabe. *Low Frequency Noise and Infrasound Associated with Wind Turbine Generator Systems: A Literature Review*. Ontario Ministry of the Environment, 2010.
- [18] David C DeGagne and Stephanie D Lapka. Incorporating low frequency noise legislation for the energy industry in alberta, canada. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 27(2):105–120, 2008.
- [19] Instituto de Estudos Avançados em Comunicações. O Instituto. URL <http://iecom.org.br/index.php/o-iecom>. Acessado em: 23.12.2013.
- [20] Paul Jensen, Charles R Jokel, and Laymon N Miller. Industrial noise control manual. *Unknown*, 1, 1978.
- [21] Malcolm J Crocker. *Handbook of noise and vibration control*. Wiley. com, 2007.
- [22] David Bies and Colin Hansen. *Engineering noise control: theory and practice*. Taylor & Francis, 2009.

- [23] Thomas D. Rossing, editor. *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, 2007. ISBN 0387304460.
- [24] Daniel R. Raichel. *The Science and Applications of Acoustics (Aip Series in Modern Acoustics and Signal Processing.)*. Springer, 2000. ISBN 0387989072.
- [25] William A. Sethares. *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. Springer, 2005. ISBN 1852337974.
- [26] Robert Bruce Lindsay. The Story of Acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 39(4):629, 1966. doi: 10.1121/1.1909936.
- [27] Willy Passchier-Vermeer and Wim F Passchier. Noise exposure and public health. *Environmental health perspectives*, 108(Suppl 1):123, 2000.
- [28] Marcelo Fernandes Costa. A clínica da psicofísica. *Psicologia USP*, 22(1):15–44, 2011.
- [29] Psicoacústica. URL <http://www.eac.ufsm.br/pesquisa/qualidade-sonora>. Acessado em: 20.11.2013.
- [30] Michael Möser. *Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control*. Springer, 2009. ISBN 3540927220.
- [31] Joseph Sataloff; Robert Thayer Sataloff. *Hearing Loss, Fourth Edition*. CRC Press, 2005. ISBN 0824754352.
- [32] Maryanne Tate Maltby. *Principles of Hearing Aid Audiology*. Wiley, 2002. ISBN 1861562578.
- [33] Hugo Fastl and Eberhard Zwicker. *Psychoacoustics: facts and models*, volume 22. Springer, 2007.
- [34] Sylvio Reynaldo Bistafa. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. Edgard Blücher, 2008.
- [35] Brian C. J. Moore. *Cochlear Hearing Loss: Physiological, Psychological and Technical Issues (Wiley Series in Human Communication Science)*. Wiley-Interscience, 2007. ISBN 047051633X.
- [36] Ogenis Magno Brilhante and Luiz Querino de A Caldas. *Gestão e avaliação de risco em saúde ambiental*. Fiocruz Rio de Janeiro, 1999.
- [37] Electrical Energy Equipment: Fans and Blowers. URL http://www.energyefficiencyasia.org/docs/ee_modules/Chapter-Fans%20and%20Blowers.pdf. Acessado em: 15.11.2013.

- [38] Wikimedia Commons. Moto ventilateur.jpg, . URL http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moto_Ventilateur.jpg?uselang=pt-br. Acessado em: 13.01.2014.
- [39] Wikimedia Commons. Axialventilator.jpg, . URL <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Axialventilator.jpg?uselang=pt-br>. Acessado em: 13.01.2014.
- [40] *Física - Vol. 2*. LTC, 2003. ISBN 8521613687.
- [41] Fisiologia da Audição, 2013. URL <http://www.caalunicamp.com.br/site/wp-content/uploads/Resumos/Neurociencias/Felipe%20Franco%20XLVIII/Audicao.pdf>. Acessado em: 20.11.2013.
- [42] Arnaldo Sussekind. *Convenções da OIT*. LTr, 1998.
- [43] Paulo Roberto Moretzsohn de Mello Junior. O Ruído Industrial e Sua Regulamentação Nacional e Internacional. 1998.
- [44] World Health Organization et al. Guidelines for community noise. *Noise sources and their measurement*, 1999.
- [45] CONAMA Brasil. Resolução 002/90, de 08 de março de 1990. *Dispõe sobre o Programa Nacional de Educação e Controle da Poluição Sonora–SILÊNCIO*. URL <http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>. Acessado em: 15.01.2013.
- [46] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10151. Disponível em: <http://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/2012/01/Avalia\%C3%A7\%C3%A3o+do+Ru\%C3%ADdo+em+\%C3%81reas+Habitadas.pdf>, 2013. Acessado em: 15.01.2013.
- [47] Lindos Electronics. A-weighting in detail. Disponível em: <http://www.lindos.co.uk/cgi-bin/FlexiData.cgi?SOURCE=Articles&VIEW=full&id=2>, 2013. Acessado em: 12.01.2013.
- [48] Cirrus Environmental. Noise Measurements. Disponível em: <http://www.cirrus-environmental.com/noise-measurement-terms/>, 2013. Acessado em: 12.01.2013.
- [49] Richard L St Pierre Jr, RSP Acoustics, Daniel J Maguire, and Cooper Standard Automotive. The impact of A-weighting sound pressure level measurements during the evaluation of noise exposure. In *Conference NOISE-CON*, pages 12–14, 2004.
- [50] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Nbr 10152 níveis de ruído para conforto acústico. *Rio de Janeiro*, 1987.

- [51] Gregory C Tocci. Room noise criteria-the state of the art in the year 2000. *Noise News International*, 8(3):106–119, 2000.
- [52] Baltimore Air Coil. Fundamentals of Sound, 2013. URL <http://www.baltimoreaircoil.com/english/resource-library/file/461>. Acessado em: 12.01.2013.
- [53] Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora 1*, 2013. URL http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF0F7810232C/nr_01_at.pdf. Acessado em: 15.01.2013.
- [54] Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora 17*, 2013. URL http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEFBAD7064803/nr_17.pdf. Acessado em: 15.01.2013.
- [55] Revista VEJA. Poliuretano, um dos vilões do incêndio em Santa Maria, Janeiro 2013. URL <http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/poliuretano-um-dos-viloes-do-incendio-em-santa-maria>.
- [56] Leo L Vér, István L; Beranek. *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*. Wiley, 2005. ISBN 0471449423.
- [57] Saeed V Vaseghi. *Advanced digital signal processing and noise reduction*. Wiley, 2008.
- [58] Anders Brandt. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Wiley, 2011. ISBN 0470746440.
- [59] Peter D. Welch. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. 15(2):70–73, 1967. doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.
- [60] Gerhard Heinzl, A Rüdiger, Roland Schilling, and Teilinstitut Hannover. Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new flat-top windows. *Max Plank Institute*, 12:122, 2002.
- [61] Alberto Leon-Garcia. *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*. Addison, 1994. ISBN 020150037X.
- [62] Athanasios Papoulis. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. Mcgraw-Hill College, 1991. ISBN 0070484775.

- [63] Scott Miller and Donald Childers. *Probability and Random Processes: With Applications to Signal Processing and Communications*. Academic Press, 2004. ISBN 0121726517.
- [64] Hwei Hsu. *Schaum's Outline of Probability, Random Variables, and Random Processes*. McGraw-Hill, 1996. ISBN 0070306443.
- [65] Sophocles J. Orfanidis. *Optimum Signal Processing: An Introduction*. Macmillan Pub Co, 1988. ISBN 0070477949.
- [66] Mathworks. MATLAB Documentation - xcorr, . URL <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/xcorr.html?searchHighlight=xcorr#bqij2gl-1>. Acessado em: 14.10.2013.
- [67] Julius S Bendat and Allan G Piersol. *Random data analysis and measurement procedures*, volume 11. IOP Publishing, 2000.
- [68] Occupational Noise Exposure. Criteria for a Recommended Standard, 1998.
- [69] Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora 6*, 2013. URL [http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812DC56F8F012DCDAD35721F50/NR-06%20\(atualizada\)%202010.pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812DC56F8F012DCDAD35721F50/NR-06%20(atualizada)%202010.pdf). Acessado em: 15.01.2013.
- [70] T Verma, S Levine, and T Meng. Transient modeling synthesis: a flexible analysis/synthesis tool for transient signals. In *Proceedings of the ICMC*, 1997.
- [71] Davide Rocchesso. *Sound Processing*, 2003.
- [72] William East and Brian Lantz. Notch Filter Design. *California Institute of Technology, Technical Report LIGO-T0*, 2005.
- [73] Mathworks. MATLAB Documentation - iircomb, . URL <http://www.mathworks.com/help/dsp/ref/iircomb.html>. Acessado em 20.11.2013.
- [74] Carl W Helstrom. Distribution of the sum of two sine waves and Gaussian noise. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 38(1):186–191, 1992.
- [75] Stephen Oswald Rice. Probability Distributions for Noise Plus Several Sine Waves—The Problem of Computation. 22(6):851–853, 1974. doi: 10.1109/TCOM.1974.1092281.
- [76] Arthur H Stroud. *Numerical quadrature and solution of ordinary differential equations: a textbook for a beginning course in numerical analysis*, volume 10. Springer New York Heidelberg Berlin, 1974.

-
- [77] Neil A Gershenfeld. *The nature of mathematical modeling*. Cambridge university press, 1999.
- [78] Cross Spectrum Labs. Frequency Weighting Equations, Abril 1998. URL <http://www.cross-spectrum.com/audio/weighting.html>. Acessado em: 18.01.2014.
- [79] Nicholas P. Cheremisinoff. *Noise Control in Industry: A Practical Guide*. William Andrew, 1997. ISBN 0815513992.
- [80] Tim South. *Managing Noise and Vibration at Work*. Routledge, 2004. ISBN 0750663421.
- [81] EXTECH INSTRUMENTS. Digital Sound Level Meter. URL <http://www.extech.com/instruments/resources/datasheets/407730data.pdf>. Acessado em: 13.01.2013.