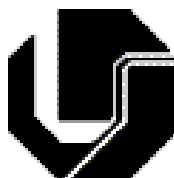


RICARDO HUMBERTO DE OLIVEIRA FILHO

**UMA METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO VIRTUAL
DA DOSE DE EXPOSIÇÃO AO RUÍDO NO AMBIENTE
DE TRABALHO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2011

RICARDO HUMBERTO DE OLIVEIRA FILHO

**UMA METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO VIRTUAL DA DOSE DE
EXPOSIÇÃO AO RUÍDO NO AMBIENTE DE TRABALHO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte

UBERLÂNDIA - MG

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

- O48m Oliveira Filho, Ricardo Humberto de, 1980-
 Uma metodologia para a avaliação virtual da dose de exposição ao
 ruído no ambiente de trabalho [manuscrito] / Ricardo Humberto de
 Oliveira Filho.- 2011.
 188 f. : il.
- Orientador: Marcus Antônio Viana Duarte.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
 Inclui bibliografia.
1. Ruído industrial - Teses. 2. Controle de ruído - Teses. 3. Higiene
 industrial - Teses. I. Duarte, Marcus Antônio Viana. II. Universidade
 Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
 Mecânica. III. Título.

CDU: 531.773.37

Aos meus pais, Ricardo e Marilene,
à minha irmã, Karine
e à minha namorada Débora.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela disposição e força de vontade concedidas.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e ao Programa de Pós-Graduação pela oportunidade de participar deste curso e pela estrutura fornecida para realização deste trabalho.

Aos órgãos CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

Ao meu amigo e orientador, Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte, pelas contribuições valiosas ao longo dos anos de ensino, e ainda pelo interesse e apoio a esta linha de pesquisa.

Aos meus pais, Ricardo e Marilene, pela presença constante em minha vida e por acreditarem em minha capacidade e me incentivarem a correr atrás de meus sonhos.

À minha irmã, Karine, pelo incentivo e por ser fonte de inspiração para seguir na vida acadêmica.

À minha namorada Débora, por sempre me motivar a acreditar em meu potencial, por ser mais do que minha companheira e pelo afeto nas horas mais difíceis.

Aos meus familiares pelo apoio e incentivo.

Aos amigos do Laboratório de Acústica e Vibrações Pedro, Paulo, Marlipe, Vinicius, Júlia, Henrique, Ana Paula, Marcela, Eider e Ricardo e às amigas que já saíram do laboratório Tatiana e Maria Alzira pelo apoio no desenvolvimento dos trabalhos e principalmente pela amizade.

Ao Prof. Elias Bitencourt Teodoro, PhD., pela amizade, contribuições na linha de pesquisa e apoio no desenvolvimento de trabalhos.

Aos amigos, alunos, professores e técnicos da FEMEC, que me ajudaram nesta jornada.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

OLIVEIRA FILHO, R. H. **Uma Metodologia para a Avaliação Virtual da Dose de Exposição ao Ruído no Ambiente de Trabalho**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2011.

Resumo

A permanência de pessoas em ambientes com níveis de ruído elevados pode causar comprometimentos orgânicos diversos, como hipertensão arterial, estresse, aumento da tensão muscular, incapacidade de concentração além de distúrbios auditivos temporários e permanentes. A perda auditiva induzida pelo ruído ocupacional (PAIRO) é a única patologia causada pelo ruído reconhecida pela legislação brasileira. Para avaliação da insalubridade por ruído em locais de trabalho, a Consolidação das Leis do Trabalho no Brasil, na Portaria 3.214, NR-15, estabelece os limites de exposição ao ruído para trabalhadores brasileiros, visando protegê-los de danos auditivos. Esta Portaria, através da NR-7, estabelece a obrigatoriedade dos exames audiométricos admissionais, periódicos e demissionais, além de estabelecer limites de exposição e diferenciar ruídos contínuos e impulsivos. A Norma de Higiene Ocupacional NHO 01 de 2001 da FUNDACENTRO estabelece critérios e procedimentos para a avaliação da exposição ocupacional ao ruído, que implique risco potencial de surdez ocupacional. Ainda introduz o conceito de nível de exposição como um dos critérios para a quantificação e caracterização da exposição ocupacional (dose) ao ruído contínuo ou intermitente, além de considerar a possibilidade de utilização de medidores integradores e de leituras instantâneas. Apesar de propiciar uma avaliação segura e posterior melhoria nas condições de trabalho dos colaboradores, fica evidente que é necessária a exposição para que seja realizado o procedimento. Visando evitar tal exposição, foi levantada a hipótese de se criar um sistema de predição da dose de exposição antes mesmo da execução da tarefa. Para tanto, foi proposto neste trabalho o desenvolvimento de uma metodologia que utiliza um prévio mapeamento e identificação das fontes de ruído no ambiente de trabalho além da rotina de trabalho do funcionário, para prever a dose de exposição ao ruído ocupacional de um dado grupo homogêneo. Utilizaram-se dois algoritmos para prever a probabilidade de o funcionário estar em qualquer local da planta, o primeiro levando em consideração a distância do funcionário ao ponto avaliado e a segunda através de uma rede neural probabilística. Foi possível, através das metodologias criadas, prever uma faixa de avaliação, utilizando o valor médio e a variância resultantes da repetibilidade das simulações, para predição da dose de exposição ao ruído ocupacional.

Palavras chave: Higiene Ocupacional, Acústica, Dosimetria, PAIRO.

OLIVEIRA FILHO, R. H. **A Methodology for Virtual Evaluating Noise Dose Exposure in the Workplace.** Doctor's Thesis, Federal University of Uberlandia, Uberlandia - MG, 2011.

Abstract

The permanence of people in environments with high noise levels can cause various organic commitments, such as hypertension, stress, increased muscle tension, impaired concentration, and temporary or permanent hearing disorders. The occupational noise induced hearing loss (ONIHL) is the only disease caused by noise recognized by Brazilian law. To evaluate the noise unsoundness in the workplace, the Labor Laws Consolidation in Brazil, in Ordinance 3214, NR-15, establishes the limits of noise exposure for workers in Brazil, aiming to protect them from hearing damage. This Ordinance by NR-7, establishes the obligation of entrance, periodic and resignation audiometric exams and to establish exposure limits and differentiate impulsive and continuous noise. The Standard Occupational Hygiene NHO 01, 2001 from FUNDACENTRO establishes criteria and procedures for the evaluation of occupational noise exposure, which involves potential risk of occupational deafness. Also introduces the concept of exposure level as a criterion to quantification and characterization of occupational exposure to continuous or intermittent noise, and consider the use of integrators and instantaneous readings. Although it provides a secure evaluation and improve on the working condition of employees, it is evident that the exposure is required to be performed the procedure. Seeking to avoid such exposure, it has been hypothesized to create a system to predict the dose of exposure even before the task execution. It was thus proposed in this work to develop a methodology that utilizes a prior mapping and identification of sources of noise in the workplace beyond the routine work of the employee, to predict the dose of exposure to occupational noise of a given homogeneous group. They were used two algorithms to predict the likelihood that the employee be anywhere in the plant, the first taking into consideration the distance of the official point evaluated and the second by a probabilistic neural network. It was possible using the methodologies created to provide a full assessment, using the mean and the variance resulting from the repeatability of simulations to predict the dose of exposure to occupational noise.

Key words: Occupational Hygiene, Acoustics, Dosimetry, ONIHL.

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A_{div}	Atenuação devido à divergência geométrica [dB]
A_{atm}	Atenuação devido à absorção atmosférica [dB]
A_{bar}	Atenuação devido a barreiras [dB]
A_{misc}	Atenuação devido a outros efeitos [dB]
$AT_t(f)$	Atenuação devido à transmissão da barreira [dB]
$AT_d(f)$	Atenuação devido à difração da barreira [dB]
AT_{LE}	Perda por difração no lado esquerdo da barreira [dB]
AT_{LD}	Perda por difração no lado direito da barreira [dB]
AT_{SU}	Perda por difração no lado superior da barreira [dB]
b	Distância entre os equipamentos ou menor dimensão do equipamento [m]
c	Maior dimensão do equipamento [m]
C	Velocidade do som [m/s]
c_k	Custo associado com um erro de classificação cometido
C_n	Tempo de exposição a um nível de ruído [min]
d	Distância [m]
d_0	Distância de referência [m]
f_s	Frequência de Schroeder [Hz]
$DI(\theta)$	Índice de diretividade
$f_k(X)$	Concentração (densidade) de membros da classe k ao redor da amostra desconhecida
h_k	Probabilidade da classe k
I	Intensidade Sonora [Watt/m ²]
I_o	Intensidade Sonora de referência [Watt/m ²]
NIS	Nível de Intensidade Sonora [dB]
NPS	Nível de Pressão Sonora [dB]
NWS	Nível de Potência Sonora [dB]
n	Número de entradas do neurônio
n_k	Números de amostras da k-ésima classe

P	Pressão Sonora [Pa]
P_o	Pressão Sonora de referência [Pa]
O_s	Pressão Estática [mmca]
Q	Fator de diretividade da superfície
Q_f	Velocidade de fluxo de volume (m ³ /h)
r	Distância da fonte de ruído ao ponto de medição [m]
R_b	Fator de correção
T	Limiar do Neurônio
T_n	Exposição diária permitida para aquele nível
T_r	Tempo de reverberação [s]
T_{sig}	Parâmetro que determina a suavidade da curva Sigmoidal
V	Volume da sala [m ³]
$W(d)$	Função de ponderação conhecida
w_{ij}	i-ésimo peso de ponderação associado a um neurônio artificial
X	Amostra desconhecida
x	Parâmetro de entrada da rede neural
x_i	i-ésimo parâmetro de entrada de uma rede neural
y	Parâmetro de saída da rede neural

Letras Gregas

α	Coeficiente de inclinação da reta
λ	Comprimento da onda sonora [m]
θ	Valor de ativação de um neurônio
$+\gamma$	Valor máximo da saída da rede neural
$-\gamma$	Valor mínimo da saída da rede neural
σ	Desvio padrão
σ_s	Parâmetro de escala que define a largura da curva sino centrada em cada membro da coleção de dados
∞	Infinito

Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAMT	Associação Nacional de Medicina do Trabalho
BERA	Audiometria de Resposta Elétrica do Tronco Encefálico
CAT	Comunicação de Acidente do Trabalho
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
CRM	Conselho Regional de Medicina
EOA	Emissões Otoacústicas Evocadas
EOAE	Emissões Otoacústicas Evocadas Espontâneas
EOAPD	Emissões Otoacústicas Evocadas por Produto de Distorção
EOAT	Emissões Otoacústicas Evocadas Transitórias ou Transientes
fdp	Função densidade de probabilidade para toda a coleção de amostras
IRF	Índice de Reconhecimento de Fala
ISO	International Standard Organization
LAV	Laboratório de Acústica e Vibrações
LRF	Limiar de Recepção da Fala
MCP	Modelo de McCulloch-Pitts
MSR	Método de Superfície de Resposta
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NC	Noise Criterion
NR	Norma Regulamentadora
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAIR	Perda de Audição Induzida Pelo Ruído
PAIRO	Perda de Audição Induzida Pelo Ruído Ocupacional
PCA	Programa de Conservação Auditiva
PCMSO	Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional
RNA	Rede Neural Artificial
RNP	Rede Neural Probabilística
SR	Superfície de Resposta
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

Capítulo I - Introdução e Motivações para o Trabalho	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos do Trabalho	9
1.4 Estrutura do Trabalho	10
 Capítulo II - Morfologia e Fisiologia do Sistema Auditivo Humano	 11
2.1 Introdução	11
2.2 Orelha Externa	12
2.3 Orelha Média	14
<i>2.3.1 Fisiopatologia da Transmissão Sonora</i>	<i>16</i>
2.4 Orelha Interna	17
2.5 Etapas da Fisiologia Auditiva	19
<i>2.5.1 Etapas da Fisiologia Coclear</i>	<i>19</i>
2.6 Fisiopatologia Decorrente do Ruído	20
<i>2.6.1 Alterações Cocleares</i>	<i>20</i>
 Capítulo III - Ruído: Caracterização e Efeitos sobre o Homem	 21
3.1 Definição	21
3.2 Efeitos do Ruído na Audição	22
3.2.1 Efeitos Auditivos	23
3.2.1.1 Perda Auditiva	23
3.2.1.2 Zumbido	24
3.2.1.3 Recrutamento	24
3.2.1.4 Deterioração da Discriminação da Fala	24
3.2.1.5 Otolgia	25
3.2.2 Efeitos Extra-Auditivos	25
3.3 Avaliação dos Efeitos do Ruído sobre o Homem	26
3.3.1 Mecanismo da Perda Auditiva	26

3.3.2 Níveis de Ruído Confortáveis e Perigosos	27
3.4 Controle do Ruído	29
3.4.1 Noções de Isolamento Acústico e Absorção Sonora	30
3.4.2 Controle do Ruído na Fonte	32
3.4.3 Controle do Ruído no Meio de Propagação	33
3.4.3.1 Redução da Propagação do Som pelo Ar	34
3.4.3.2 Redução da Propagação do Ruído pela Estrutura	35
3.4.4 Controle do Ruído no Receptor	35
3.4.4.1 Os Protetores Individuais	36
Capítulo IV - Identificação e Avaliação da Exposição ao Ruído Ocupacional	39
4.1 Avaliação Audiológica	40
4.1.1 As Características de uma Boa Avaliação Audiológica	40
4.1.2 Audiometria Tonal Liminar.....	41
4.1.3 Audiometria Vocal.....	42
4.1.4 Simulação e Dissimulação	42
4.1.5 Audiometria de Respostas Elétricas do Tronco Encefálico (BERA)	44
4.1.6 Emissões Otoacústicas Aplicadas à PAIRO	46
4.2 Avaliação Ocupacional	47
4.2.1 Conceito de Lesão e Incapacidade	49
4.2.2 Critérios das Entidades em Nível Nacional	49
4.3 Avaliação da Exposição ao Ruído	52
4.3.1 Monitoramento Ambiental de Ruído	52
4.3.2 Monitoramento Pessoal de Ruído	53
4.3.3 Definição de Grupos Homogêneos de Exposição(GHE)	54
4.3.4 Caracterização e Determinação do Exposto de Maior Risco (EMR)	57
4.3.5 Conceito e uso do Nível de Ação (NA)	58
4.3.6 Tipos de Amostras de Agentes Ambientais	59
4.3.7 Formas Amostrais em Saúde Ocupacional e sua Utilização Segundo o Tipo de Limite de Exposição.....	60
4.3.8 Limites de Exposição Tipo Valor Máximo, Valor Teto.....	61

4.3.9 Nota Sobre Avaliações (amostragens) de Situações de “Pior Caso”	62
4.3.10 Análise Estatística Para Limites de Exposição Tipo Média Ponderada	62
4.3.11 Análise Estatística de uma Jornada	63
4.3.12 Verificação de Limites de Exposição Tipo Valor Máximo, Valor Teto ou TLV-C (ACGIH) Aspectos Gerais e Análise Estatística	63
4.3.13 Abordagem para o Ruído em Termos de Análise Estatística de Dados Ambientais	64
4.3.14 Tipos de Limites de Exposição Aplicáveis em Saúde Ocupacional	64
4.3.15 Monitoramento de Grupos Expostos a Ruído de Impacto	66
Capítulo V - Fundamentos Teóricos	67
5.1 Redes Neurais Artificiais	67
5.1.1 Redes Biológicas	68
5.1.1.1 Neurônios Biológicos	68
5.1.2 Neurônios Artificiais	69
5.1.3 Funções de Ativação	70
5.1.4 Arquitetura das Redes Neurais	72
5.1.4.1 Nodos de Conexão Tipo Feedforward	72
5.1.4.2. Nodos de Conexão Tipo Feedback	73
5.1.5 Aprendizado das Redes Neurais Artificiais	74
5.1.5.1 Aprendizado Supervisionado	74
5.1.5.2 Aprendizado Não Supervisionado	75
5.1.5.3 Aprendizado por Reforço	75
5.1.6 Rede Neural Probabilística (PNN)	76
5.1.7. Método de Classificação de Bayes	77
5.1.8. Método de Estimativa da fdp	78
5.1.7 Arquitetura e Funcionalidade da Rede Neural Probabilística	79
5.2 Método de Monte Carlo	80
Capítulo VI - Metodologia	85
6.1 Definição da Unidade Industrial	86
6.2 Métodos Analíticos para Identificação dos NWS de Equipamentos	89

6.2.1 Bombas Hidráulicas	89
6.2.2 Motores Elétricos	90
6.2.3 Compressores de Ar	91
6.2.4 Ventiladores	92
6.3 Métodos Tradicionais para Identificação dos NWS de Equipamentos	93
6.4 Desenvolvimento de Métodos para Identificação dos NWS de Equipamentos	98
6.4.1 Identificação dos NWS Utilizando uma Rotina de Otimização dos NPS Mapeados ao Redor do Equipamento	99
6.4.2 Metodologia de Identificação de NWS de Motores Elétricos	101
6.5 Avaliação do Programa de Simulação	104
6.5.1 Apresentação da Forma de Simulação.....	104
6.5.2 Avaliação da Confiabilidade dos Resultados do Programa e Simulação.....	110
6.5.2.1 Cálculo de Refração em Borda de Barreiras	110
6.5.2.2 Avaliação do Módulo de Tratamentos Acústicos	111
6.6 Metodologias para Estimativa da Rota	114
6.7 Metodologias para Estimativa da Dose	118
6.7.1 Apresentação do Programa de Estimativa de Dose	120
 Capítulo VII - Resultados e Análises	 123
7.1 Resultados Obtidos com as Ferramentas Computacionais Desenvolvidos na Coleta de Dados.....	123
7.1.1 Resultado para a Identificação dos NWS Utilizando uma Rotina de Otimização	123
7.1.2 Resultado da Metodologia de Identificação de NWS de Motores Elétricos	124
7.2 Resultados da Avaliação da Confiabilidade dos Resultados do Programa e Simulação	126
7.2.1 Resultado do Cálculo de Refração em Borda de Barreiras	126
7.2.2 Resultados para a Avaliação do Módulo de Tratamentos Acústicos do Programa	127
7.3 Análises Preliminares	129

7.4 Aplicação das Metodologias na Planta Industrial	131
7.4.1 <i>Níveis de Pressão Sonora na Planta</i>	131
7.4.2 <i>Aplicação das Metodologias na Planta Industrial</i>	136
7.4.3 <i>Aplicação da Metodologia na Planta Industrial Levando em Consideração a Variação dos NPS e da Rota no Método Analítico</i>	139
7.4.3.1 <i>Estudo de Caso 01: Verificar possível Falha em 2 Queimadores da Caldeira, no 2º e 3º Piso</i>	140
7.4.3.2 <i>Estudo de Caso 02: Verificar Possível Vazamento no Desaerador</i>	141
7.4.3.3 <i>Estudo de Caso 03: Verificar Possíveis Falhas nas Turbinas dos Equipamentos no Prédio das Turbo Máquinas</i>	141
7.4.3.4 <i>Estudo de Caso 04: Verificar Possíveis Falhas em 1 dos Compressores na Área dos Compressores, 1 Bomba na Torre de Refrigeração e na Turbina de Acionamento do Ventilador da Caldeira</i>	142
Capítulo VIII - Conclusões	145
8.1 Proposta para Trabalhos Futuros	146
Capítulo IX - Referências Bibliográficas	149
Anexo 01 - Fundamentos e Acústica	159
A1.1 Acústica Básica	159
A1.2 Propagação do Som no Ar Livre	163

CAPÍTULO I

Introdução e Motivações para o Trabalho

1.1 Introdução

A poluição sonora, seja ela ambiental ou ocupacional, é uma forma de poluição bastante disseminada nas sociedades industrializadas, sendo uma das causas de perdas auditivas em adultos e crianças. Acarreta também comprometimentos não auditivos que afetam a saúde física geral e emocional dos indivíduos.(Santos, 1994 apud Almeida, 1999).

O ruído já faz parte do nosso dia-a-dia. E isso se inicia cada vez mais cedo, pois é possível observar em gestantes que trabalham expostas a níveis elevados de ruído, principalmente quando o trabalho é realizado em turnos, desde lesões auditivas irreversíveis no feto (Lalande; Hetú; Lambert, 1986 apud Brasil, 2006) até problemas na gestação, como hipertensão, hiperemese gravídica, parto prematuro e bebês de baixo peso (Nurminen; Kurpa, 1989, Nurminen, 1995, Hartikainen et al., 1994 apud Brasil, 2006).

Caso necessite de incubadora, o bebê ficará exposto a níveis de pressão sonora de aproximadamente 61 dB(A), que podem atingir até 130 ou 140 dB(A), de acordo com as manobras realizadas (Bess; Finlayson; Chapman, 1979 apud Brasil, 2006). Quando for para casa, o bebê, e depois a criança, terá ao seu redor brinquedos que podem atingir 100 dB(A) (Celani, 1991 apud Brasil, 2006) e eletrodomésticos que produzem ruídos de semelhante intensidade. Na escola, onde permanece em média quatro horas por dia, o ruído pode atingir até 94 dB(A), com a média de 70 dB(A) (Celani; Bevilacqua; Ramos, 1994, França, 2000, apud Brasil 2006 e Oliveira Filho et al., 2010). Quando se tornar um adolescente, serão agregados a essa exposição seus hábitos de lazer (motocicleta, discoteca, walkman) e o ruído urbano (Brasil, 2006). Ao entrar na fase adulta, esse indivíduo poderá passar de 8 a 12 horas

por dia, em média, exposto a elevados níveis de pressão sonora em seu ambiente de trabalho (Brasil, 2006).

Segundo Brasil (2006) a Conferência da Terra (ECO 92), realizada no Rio de Janeiro, em 1992, endossou a Agenda 21, um programa de ação mundial para a promoção do desenvolvimento sustentável, que envolve modificação de conceitos e práticas referentes ao desenvolvimento econômico e social. Neste contexto, o ruído foi considerado a terceira maior causa de poluição ambiental, atrás da poluição da água e do ar. O ruído pode ser visto como o risco de agravo à saúde que atinge maior número de trabalhadores. Estudos apresentados na ECO 92 indicam que 16% da população dos países ligados à Cooperação de Desenvolvimento Econômico (ODCE), algo em torno de 110 milhões de pessoas, está exposta a níveis de ruído que provocam doenças no ser humano. Esse estilo de vida, nem sempre opcional, leva à incorporação do ruído às nossas vidas, como se fosse algo natural e, portanto, inofensivo. Esse comportamento, bastante nocivo à saúde, torna-se mais perigoso quando se trata de ruído no ambiente de trabalho, pela sua intensidade, tempo de exposição e efeitos combinados com outros fatores de risco, como produtos químicos ou vibração (Silva, 2002 apud Brasil 2006).

Segundo Fernandes (2002), a permanência de pessoas em níveis de ruído elevados pode causar comprometimentos orgânicos diversos, como hipertensão arterial, estresse, aumento de tensão muscular e incapacidade de concentração. Também é responsável por distúrbios auditivos temporários e permanentes. A perda de audição induzida por ruído ocupacional (PAIRO) é a única patologia causada pelo ruído reconhecida pela legislação brasileira.

Quando se estuda a perda auditiva de origem ocupacional deve-se levar em consideração que existem outros agentes insalubres que podem potencializar os efeitos da exposição ao ruído. Podem ser citados a exposição a certos produtos químicos, as vibrações e o uso de alguns medicamentos (Brasil, 2006).

Morata e Lemasters (1995) apud Brasil (2006), propuseram a utilização do termo “perda auditiva ocupacional”, por ser mais abrangente, considerando o ruído, sem dúvida, como o agente mais comum, mas sem ignorar a existência de outros, com todas as implicações que estes pudessem originar em termos de diagnóstico, medidas preventivas, limites de segurança, legislação, dentre outros.

Em relação à psicoacústica, enquanto o som é utilizado para descrever sensações prazerosas, o ruído é usado para descrever sons indesejáveis ou desagradáveis, o que traz um aspecto de subjetividade à sua definição. Quando o ruído é intenso e a exposição a ele é

continuada, em média 85 dB(A) durante oito horas por dia, ocorrem alterações estruturais na orelha interna, que determinam a ocorrência da Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional (PAIRO) (CID 10 – H83.3). A PAIRO é o agravo mais frequente à saúde dos trabalhadores, estando presente em diversos ramos de atividade, principalmente siderurgia, metalurgia, gráfica, têxteis, papel e papelão, vidraria, entre outros (Brasil, 2006).

Em 1996, o National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) publicou o Guia Prático para Prevenção de Perda Auditiva Ocupacional, utilizando o termo “perda auditiva ocupacional”, que incorpora não só a perda auditiva induzida por ruído, mas também aquelas provocadas por exposições a solventes aromáticos, metais e alguns asfixiantes, além de vibração, incentivando a pesquisa desses e de outros fatores potencialmente geradores de perda auditiva (Fiorini; Nascimento, 2001 apud Brasil, 2006).

Agentes químicos ou ambientais podem, em alguns casos, causar perdas auditivas com as mesmas características audiométricas das perdas por ruído (Morata; Lemasters, 1995 apud Brasil 2006), havendo alta variabilidade entre os casos, a qual pode ser atribuída aos seguintes fatores: multiplicidade de produtos químicos existentes (com diferentes estruturas moleculares), diferenças entre ambientes de trabalho, infinitas combinações de produtos químicos e variações na intensidade e nos parâmetros de exposição – aguda, intermitente ou crônica (Brasil, 2006).

As investigações publicadas até o momento indicam que os efeitos dos solventes podem ser detectados a partir de dois ou três anos de exposição, mais precocemente do que os efeitos do ruído (Morata, 1993; Nudelmann, 1997 apud Brasil 2006). Outro estudo, entretanto, somente detectou efeito significativo dos solventes a partir de cinco anos de exposição (Jacobsen, 1993 apud Brasil, 2006). A questão da latência depende, certamente, do produto em consideração e das características da exposição, e necessita ser explorada mais extensivamente.

As propriedades ototóxicas de produtos químicos industriais e a interação destes com o ruído somente foram investigadas para um número reduzido de substâncias. Neste cenário, devem ser obtidas informações sobre a toxicidade e neurotoxicidade das exposições químicas e das queixas apresentadas pelas populações expostas. Estas servirão para uma avaliação preliminar de risco potencial à audição, para que então seja possível a tomada de decisões quanto às medidas de avaliação e prevenção a serem adotadas (Brasil, 2006).

Além dos sintomas auditivos frequentes (perda auditiva, dificuldade de compreensão de fala, zumbido e intolerância a sons intensos), o trabalhador portador de PAIRO também

apresenta queixas, como cefaléia, tontura, irritabilidade e problemas digestivos, entre outros. Morata e Lemasters (2001) apud Brasil (2006), observaram a importância de estudos sobre a PAIRO, utilizando o método epidemiológico, o que traz confiabilidade aos resultados obtidos e permite a reprodução desses mesmos estudos.

Os dados epidemiológicos sobre perda auditiva no Brasil são escassos e referem-se a determinados ramos de atividades e, portanto, não há registros epidemiológicos que caracterizem a real situação (Brasil, 2006).

Em um estudo realizado por Corrêa Filho et al. (2002), foi estimada a prevalência de perda auditiva induzida por ruído e hipertensão arterial em condutores de ônibus urbanos. A prevalência de perda auditiva induzida por ruído foi de 32,7% do total examinado. Segundo a classificação de Merluzzi, nos 31 casos classificados em primeiro e segundo graus, observou-se que a frequência audiométrica com perda auditiva mais acentuada foi a de 6 kHz (61,3%), seguida pela de 4 kHz (38,7%), sem diferenças significantes quanto à lateralidade. A prevalência de hipertensão arterial diastólica ($PAD \geq 90$ mmHG; $PAS \geq 140$ mmHG) foi de 13,2% dos examinados. O risco de disacusia induzida por ruído foi maior para os motoristas com mais de seis anos de trabalho, após ajuste para a perda relacionada com a idade, com um *odds ratio* (OR) de 19,25 ($1,59 < OR < 386,75$; $p < 0,01$) para aqueles com mais de 45 anos.

Em outro estudo, realizado por Harger e Barbosa-Branco (2004), foram avaliados 152 trabalhadores de marmoraria com mediana e moda de 30 anos e média de tempo de exposição ocupacional ao ruído de $8,3 \text{ anos} \pm 6,8$. Das audiometrias avaliadas, 48% apresentaram algum tipo de perda auditiva. Dentre os alterados, 50% apresentaram audiogramas compatíveis com perda auditiva induzida pelo ruído ocupacional (PAIRO) e 41% com início de PAIRO. Entre os trabalhadores com PAIRO, 57,1% apresentaram alteração bilateral, 17,1% em orelha direita e 25,7% em orelha esquerda. Entre aqueles com início de PAIRO, 13,9% foram bilaterais, 19,4% em orelha direita e 66,7% em orelha esquerda.

Caldart et al. (2006) realizou um estudo transversal em amostra causalizada de 184 trabalhadores do setor têxtil, divididos proporcionalmente em cada setor, avaliados através de entrevista, exame otoscópico e audiometria ocupacional. A prevalência de PAIRO foi 28,3%, com predomínio de perdas auditivas de grau I (46,2%), segundo a classificação de Merluzzi. Os sintomas mais frequentes foram hipoacusia (30,8%), dificuldade de compreensão da fala (25%), zumbido (9,6%), plenitude auricular (5,8%), tontura (3,8%) e otalgia (3,8%). O setor com maior índice de PAIRO foi engenharia industrial com 44,4%, seguidos da fiação com

38,9% e tecelagem com 38,8%, BET (beneficiamento, estamparia e tinturaria) com 23,8% e administração com 3,8%. A faixa etária mais acometida foi de 50 a 64 anos. Os trabalhadores com mais de 20 anos de empresa foram os mais afetados (42,9%). A ocorrência de PAIRO foi significativa no grau I, associada à hipoacusia. Os setores de maior risco na indústria são a engenharia, fiação e tecelagem. Houve um aumento dos casos com a idade e tempo de exposição.

Nota-se que os dados disponíveis sobre as ocorrências dão uma idéia parcial da situação de risco relacionada à perda auditiva (Brasil, 2006).

Estima-se que 25% da população trabalhadora exposta (Bergström; Nyström, 1986; Carnicelli, 1988; Morata, 1990; Próspero, 1999 apud Brasil, 2006) seja portadora de PAIRO em algum grau. Apesar de ser o agravo mais frequente à saúde dos trabalhadores, ainda são pouco conhecidos seus dados de prevalência no Brasil. Isso reforça a importância da notificação, que torna possível o conhecimento da realidade e o dimensionamento das ações de prevenção e assistência necessárias (Brasil, 2006).

Alguns trabalhos foram publicados com o objetivo de se estudar a possibilidade de desenvolvimento de medicamentos capazes de limitar os danos do aparelho auditivo provocados pela exposição ao ruído (Abdulla, 1998; Scheibe et al., 2001; Campbell et al., 2002). Trata-se de explorar novos caminhos na manipulação dos mecanismos de proteção endógenos da cóclea, de forma a salvaguardá-la de uma espécie de excitotoxicidade (Kopke et al., 2000). Este desenvolvimento vai mais longe, surgindo trabalhos com o objetivo de restaurar as células ciliadas por intermédio da manipulação genética. Segundo notícias publicadas na imprensa (Diário Digital, 2000), foram realizados testes com ratos em que, por manipulação genética, foi possível reconstituir ou regenerar algumas das células ciliadas destes.

Em termos de investigação neste campo, o desenvolvimento tem sido exponencial, sendo já identificados cerca de 40 genes relacionados com a perda auditiva hereditária, dos quais 10 durante os anos de 98 e 99 (Hallworth, 2000). Assim, estimam-se desenvolvimentos acerca da compreensão dos mecanismos biológicos subjacentes à grande variabilidade inter-individual na susceptibilidade aos efeitos do ruído, referindo-se exemplos como a utilização de marcadores genéticos para previsão da susceptibilidade individual (Quarantana et al., 2000).

Mas os avanços referidos não podem levar a pensar que o problema da exposição a ruído ocupacional está resolvido. Se, por um lado, são inúmeras as soluções técnicas de

combate ao ruído, o mesmo não se passa com a formação dos trabalhadores e a sensibilização para a adoção de comportamentos preventivos (Berger, 2001). Deve-se levar em consideração que um projeto ou procedimento para o controle dos níveis de ruído deve ser iniciado na própria fonte geradora e não no funcionário.

As técnicas de controle de ruído vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos, embora ainda sejam, em sua grande maioria, específicas de cada caso. Isso devido às particularidades de diversas características como as instalações industriais, a localização e o tipo de máquinas ruidosas e as condições sócio-econômicas e do meio ambiente (Mello, 1999).

Em parte por essa especificidade, mas também pelo descaso com as questões da saúde dos trabalhadores, atingiu-se uma situação crítica, a qual tem provocado manifestações e ações de cientistas e instituições. Roth (1999) afirma que este é o momento para agir no controle de ruído industrial. A própria Organização Mundial da Saúde publicou um livro sobre o assunto contando com a participação de alguns dos mais importantes pesquisadores da área (Goelzer et al., 2000).

Segundo Araújo Filho (2005), adquirir máquinas e elaborar processos silenciosos, tanto em novas fábricas como na substituição ou ampliação de instalações existentes, garante um ambiente industrial com nível de ruído adequado. Contudo na prática, nem sempre isso é possível, pois existe uma grande dificuldade em se adquirir equipamentos que geram baixo nível de ruído. Além disso, o ruído gerado pelas máquinas industriais depende, muitas vezes, das suas condições específicas de instalação e de operação. O comprador pode também ter dificuldades para analisar o produto entregue pelo fabricante, devido à falta de equipamento ou de conhecimento para a avaliação em uma situação não tão simples, como por exemplo, na presença de outras máquinas ruidosas. Assim, quando o controle não é feito no projeto, é necessário partir para a adoção de medidas corretivas de redução do ruído.

Junto com a geração do ruído, começa-se a registrar no ser humano as primeiras consequências decorrentes da sua exposição. Desenvolveram-se então as técnicas para proteger a audição humana, e muitos tipos e formas de protetores auditivos foram disponibilizados no mercado para uso, de forma a satisfazer as mais diferentes situações. Protetores auditivos de uso individual apresentam-se como um dos dispositivos mais comuns, econômicos e práticos para reduzir a dose de ruído, até que ações técnicas de controle do ruído sejam tomadas para reduzi-lo aos limites recomendados por norma (Riffel, 2001).

Mesmo com a diversificação dos tipos de protetores, as queixas mais comuns com relação ao uso dos mesmos são o desconforto, a dor além da dificuldade para ouvir os outros e o ruído das máquinas ou sinais de alerta (Casali, 1998 apud Riffel 2001). Do ponto de vista tecnológico, durante os últimos 40 anos, observamos que a tecnologia nesta área apresentou poucas alterações. Naturalmente houve algumas exceções como o surgimento de novos e resistentes polímeros como a espuma e os plásticos moldáveis na década de 70 e o desenvolvimento dos protetores auditivos do tipo ativo com componentes eletrônicos e os com atenuação plana, na década de 80 (Berger, 1991 apud Riffel 2001). Após este avanço os estudos foram direcionados à proteção real oferecida, ao conforto, à conscientização e ao treinamento dos usuários de protetores auditivos (Riffel, 2001).

Segundo Fernandes (2002), a Norma NBR-10.152 “Níveis de Ruído para Conforto Acústico” fixa limites de ruído visando o conforto ambiental. Para avaliação da insalubridade por ruído em locais de trabalho, a Consolidação das Leis do Trabalho, na Portaria 3.214, NR-15, estabelece os limites de exposição ao ruído para trabalhadores brasileiros, visando protegê-los de danos auditivos. Tal Portaria ainda constitui um enorme avanço para a prevenção das doenças ocupacionais, incluindo as disacusias sensorineurais ocupacionais por ruído. Esta Portaria, através da NR-7, estabelece a obrigatoriedade dos exames audiométricos admissionais, periódicos e demissionais sempre que o ambiente de trabalho apresentar níveis de pressão sonora superiores a 85 dB(A) em 8 horas contínuas de exposição. Estabelece limites de exposição e diferencia ruídos contínuos e impulsivos.

A Norma ISO 1999 (1990) atribui uma forma de cálculo para a previsão de risco de perda auditiva à população exposta, de acordo com a faixa etária e exposição, segundo o nível de pressão sonora equivalente contínuo - Leq de 8 horas diárias de exposição. Além da atribuição do risco, determina a perda auditiva de uma população otologicamente normal não-exposta ao ambiente ruidoso (Almeida, 2000).

A Norma de Higiene Ocupacional NHO 01 de 2001 redigida pela FUNDACENTRO estabelece critérios e procedimentos para a avaliação da exposição ocupacional ao ruído, que implique risco potencial de surdez ocupacional. Ainda introduz o conceito de nível de exposição como um dos critérios para a quantificação e caracterização da exposição ocupacional (dose) ao ruído contínuo ou intermitente, além de considerar a possibilidade de utilização de medidores integradores (dosímetros) ou ainda medidores de leituras instantâneas (decibelímetros) com o auxílio e um cronômetro.

Apesar de propiciar uma avaliação segura e posterior melhoria nas condições de trabalho dos colaboradores, fica evidente que é necessário a exposição ao ruído do colaborador em sua rotina de trabalho para que seja realizado o procedimento.

Foram realizados trabalhos de campo em diversas indústrias pelo Laboratório de Acústica e Vibrações (LAV) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), sendo verificado que, definindo postos de trabalho fixos ou delimitados por pequenas áreas, torna-se mais fácil a hierarquização das principais fontes de ruído responsáveis pelo aumento da dose de exposição ao ruído, facilitando então a escolha de tratamentos acústicos adequados. Contudo, quando a rotina de trabalho do funcionário é definida para uma unidade ou parte dela, sendo necessários deslocamentos significativos, a identificação das principais fontes de ruído se torna mais difícil. Ainda pôde-se constatar que, para estas grandes áreas, a rota do funcionário não era pré-definida, sendo passível de uma otimização para reduzir a dose exposição ao ruído.

Também foram realizados trabalhos de previsão de impacto ambiental, quanto ao ruído gerado, para novas unidades de processo. Nestes trabalhos foi verificada a necessidade de troca de determinados equipamentos por outros que emitissem menor nível de ruído, além de ser possível organizar a rotina de trabalho do funcionário juntamente com modificações na disposição dos equipamentos visando uma menor dose de exposição ao ruído.

Visando evitar tal exposição, foi levantada a hipótese de se criar um sistema de previsão da dose antes mesmo da execução da tarefa, sendo constatada a não existência de nenhuma linha de pesquisa sobre tal assunto.

Sabe-se que, para o cálculo da dose de exposição ao ruído ocupacional, é necessário o conhecimento de pelo menos três dados:

1. Os níveis de pressão sonora no ambiente de trabalho do colaborador ou grupo homogêneo analisado;
2. A rota traçada pelo colaborador durante sua rotina de trabalho;
3. O tempo gasto pelo colaborador em cada uma das atividades realizadas durante sua jornada de trabalho.

O cálculo da dose é realizado para um grupo homogêneo específico, formado por colaboradores lotados em um mesmo nicho, com as mesmas funções e tarefas.

Quando se analisa um grupo homogêneo, deve ser levado em consideração que existem pessoas de diferentes perfis, sendo algumas mais rápidas e outras mais lentas na

execução de tarefas, contudo a dosimetria de um único componente desse grupo é representativa de todos os outros membros do mesmo grupo.

Uma observação que deve ser feita sobre o método é que não é levada em consideração a possibilidade de intervenções fora da rotina de trabalho do colaborador, por exemplo, algum problema ocorrido no funcionamento da planta, liberação de área ou de serviço, dentre outros.

O que se pretendeu com o desenvolvimento deste trabalho foi prever um intervalo de confiança para dose de exposição ao ruído para o colaborador ou grupo homogêneo, utilizando para tanto somente os três dados já listados, mas cujo resultado consiga englobar qualquer interferência na rotina de trabalho, não sendo então tendencioso à rotina propriamente dita.

A metodologia utilizou uma rede neural probabilística e a relação entre a distância de cada ponto da rota a cada um dos pontos que formam a planta analisada para a previsão da probabilidade de o colaborador estar em cada um destes pontos durante a jornada de trabalho.

Foi verificada a necessidade de se realizar variações de até 6 dB(A) nos níveis de ruído do ambiente de trabalho, uma vez que tal variação foi constatada em plantas industriais de acordo com a carga de operação e demanda de produção em um intervalo de 15 dias de acompanhamento.

Através do Método de Simulação de Monte Carlo, consegue-se analisar as características estatísticas da distribuição, pela aproximação desta com uma distribuição Normal, sendo então possível estimar o intervalo com o nível de confiança desejado.

1.2 Objetivos do Trabalho

Propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de uma metodologia estatística que possibilite, através do mapeamento e ou identificação das fontes de ruído no ambiente de trabalho, além do conhecimento prévio da rotina de trabalho do colaborador, estimar um intervalo de confiança para a dose virtual de exposição ao ruído ocupacional.

1.4 Estrutura do Trabalho

- No primeiro capítulo é apresentada uma introdução contendo os principais estudos realizados acerca do tema em questão, obstáculos encontrados na área e identificação de possíveis falhas, além dos objetivos, justificativas e motivações para o desenvolvimento do trabalho.
- No segundo capítulo é apresentado um resumo acerca da morfologia e fisiologia do sistema auditivo humano.
- O terceiro capítulo conceitua o ruído, seus efeitos no homem, os limites aceitáveis e algumas formas de controle.
- O quarto capítulo apresenta uma breve abordagem sobre identificação e avaliação da Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional (PAIRO), sobre os principais exames audiométricos e como definir grupos homogêneos de avaliação e exposição.
- O quinto capítulo apresenta uma breve abordagem sobre Redes Neurais Artificiais e o Método de Simulação de Monte Carlo, seus conceitos e principais formulações.
- No sexto capítulo são apresentados a metodologia e procedimentos utilizados durante a coleta de dados, montagem e escolha do banco de dados, trabalhos desenvolvidos durante a elaboração da Tese bem como a caracterização da planta industrial utilizada no desenvolvimento do trabalho.
- No sétimo capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida e a aplicação em uma planta industrial fictícia, bem como as análises e discussões dos resultados.
- No oitavo capítulo são apresentadas as conclusões obtidas no trabalho.
- O trabalho se encerra no nono capítulo, que traz as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

CAPÍTULO II

Morfologia e Fisiologia do Sistema Auditivo Humano

Este capítulo foi elaborado tomando como referência os livros “Tratado de Fisiologia Médica” (Guyton e Hall, 2006), “*The Noise Manual*” (AIHA, 2003), “PAIR - Perda Auditiva Induzida pelo Ruído” (Nudelmann et. Al, 1997), “*Engineering Noise Control*” (Bies e Hansen, 2003), o protocolo “Perda Auditiva Induzida por Ruído” (PAIR) (Brasil, 2006) e o Manual de Consenso “O Estudo do Ruído” elaborado pelo Grupo de Especialistas em Saúde Ocupacional de Jundiaí. Preferiu-se citar as referências no início do capítulo para evitar possíveis cruzamentos ou omissões destas no desenvolvimento do texto.

2.1 Introdução

O sistema auditivo humano, Fig. 2.1 (retirada de <http://ouveosilencio.wordpress.com/surdez/morfologia-do-ouvido/> acessado em 15/03/2011), está contido no osso temporal e tem como funções principais o equilíbrio e a audição. Para efeitos didáticos é dividido em três partes: orelha externa, orelha média e orelha interna.

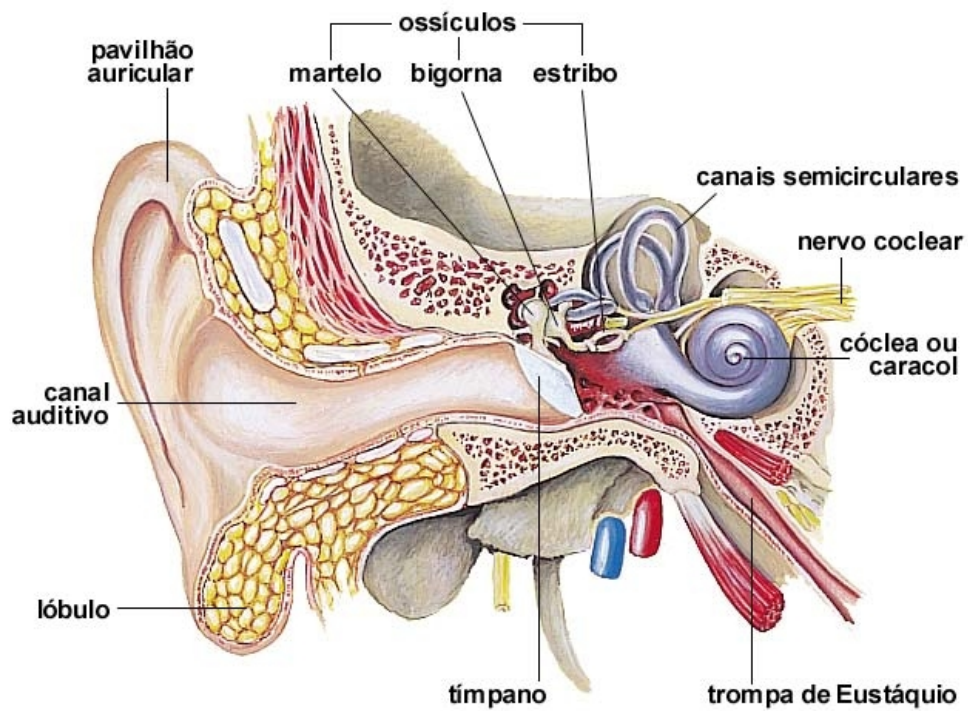


Figura 2.1 – Sistema Auditivo Humano.

2.2 Orelha Externa

A orelha externa, Fig. 2.2 (retirada de <http://www.maxisocial.com/forum/pediatria/audicao-t554.html> acessado em 15/03/2011), é constituída de:

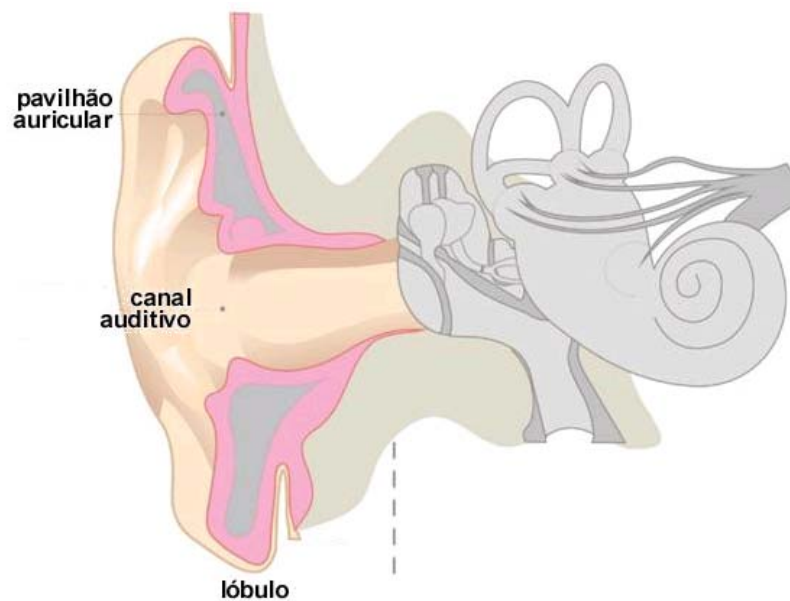


Figura 2.2 – Orelha externa.

- *Pavilhão*: apêndice flexível de fina cartilagem elástica recoberta de pele. Em sua porção anterior, a pele adere firmemente, enquanto posteriormente, entre ela e a cartilagem, interpõe-se uma camada de tecido conjuntivo subcutâneo. Sua função é coletar e encaminhar as ondas sonoras até a orelha média. O papel do pavilhão como captador de ondas sonoras tem valor relativo, pois a ausência do pavilhão não é incompatível com boa acuidade auditiva. Sua forma, dependendo da posição do ouvinte em relação à fonte sonora pode ser responsável por um acréscimo de 7 a 10 dB(A) na faixa de frequência de 2 a 5 kHz. Ainda contribui para a localização da fonte sonora (frente/atrás e direita/esquerda) e para discriminar mudanças na elevação da fonte sonora (acima/abaixo).
- *Meato acústico externo (canal auditivo)*: canal que se estende desde a concha (lateralmente) até a membrana do tímpano (medialmente). Apresenta trajeto sinuoso, possui uma porção cartilaginosa e uma óssea, é recoberto por pele, possui pêlos e glândulas produtoras de cera. Seu trajeto sinuoso determina a reflexão das ondas sonoras em suas paredes, o que contribui para proteger o aparelho auditivo contra o traumatismo dos sons de alta intensidade. A principal função do meato acústico externo, no entanto, é a de proteger a membrana do tímpano na profundidade e manter certo equilíbrio de temperatura e umidade necessário à preservação da mesma. Atua como um ressoador, aumentando, quando necessário, a intensidade sonora sobre a

membrana do tímpano, principalmente para os sons de frequência entre 2 e 5,5 kHz.

2.3 Orelha Média

Desempenha a função primordial de transmissão da onda sonora.

A orelha média, Fig. 2.3 (retirada de <http://www.maxisocial.com/forum/pediatria/audicao-t554.html> acessado em 15/03/2011), é constituída de:

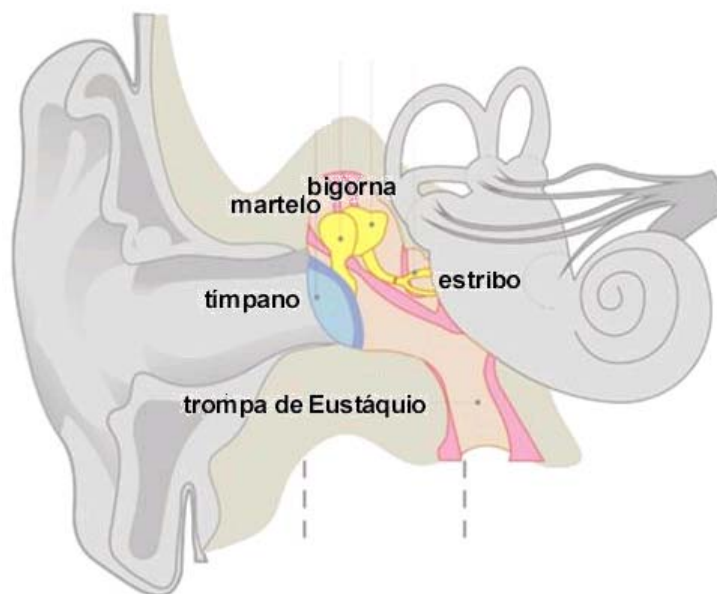


Figura 2.3 – Orelha média.

- *Cavidade timpânica*: é descrita como sendo um espaço irregular entre a orelha externa e a orelha interna. Esta cavidade é revestida por uma mucosa que envolve um espaço arejado, onde se encontra a cadeia ossicular.
- *Membrana Timpânica*: representa uma parede comum ao meato acústico externo e cavidade. É como um disco semitransparente de forma elíptica. Tem duas partes, a parte tensa e a parte flácida sendo que a maior delas é a tensa.

A tensão da membrana do tímpano, que é assegurada pela sua camada média de fibras, proporciona ótimas condições vibratórias. Sob o efeito do impacto de ondas sonoras sucessivas, a membrana do tímpano vibra no seu todo. Além da função vibratória desempenha o papel de anteparo protetor da janela redonda, de

modo que as ondas sonoras atingem a membrana da referida janela com a pressão acústica reduzida ao mínimo e em oposição de fase em relação às ondas sonoras que chegam à janela oval.

- *Ossículos da orelha média:* são três ossículos móveis. Eles se estendem desde a membrana do tímpano até a janela oval, colocando as duas estruturas em contato, a fim de transmitir as vibrações da membrana.

Um dos ossículos, o *martelo*, tem uma de suas extremidades ligada à porção mais central da membrana timpânica e a outra se encontra ligada a outro ossículo chamado *bigorna* e, este por sua vez articula-se com o terceiro ossículo da cadeia, chamado *estribo*, cuja base está inserida na janela oval.

A cadeia ossicular encontra-se suspensa por uma série de ligamentos. Estes ligamentos, e o formato dos ossículos, lhes permitem um padrão característico de movimentação.

A orelha média serve para corrigir a referida perda que se verifica no trânsito das ondas sonoras do meio aéreo para o líquido labiríntico.

Como a transmissão do som de um meio aéreo (orelha média) para um meio líquido (orelha interna) é ineficiente (há uma perda de energia correspondente a 30 dB(A)) devido a grande diferença de mobilidade entre os dois meios, a cadeia ossicular atua como um transformador mecânico que equaliza as impedâncias.

A diferença de área da estrutura que recebe as ondas de pressão sonora (a membrana timpânica tem 55 mm^2) e a estrutura que transmite essas ondas à orelha interna (base do estribo na janela oval com $3,2 \text{ mm}^2$) requer uma movimentação como de alavanca, que é realizada pela cadeia ossicular.

O sistema ossicular de alavanca aumenta a força de transmissão da membrana timpânica em 1,3 vezes. Esta relação, multiplicada pela diferença de área entre a membrana timpânica e a placa do estribo, que é de aproximadamente 17 vezes, faz com que a pressão sobre o líquido da cóclea seja aproximadamente 22 vezes maior que a exercida pela onda sonora na membrana timpânica.

- *Músculos da orelha média:*
 - *Tensor do tímpano (martelo):* “empurra” o estribo para o interior do vestíbulo aumentando a tensão perilinfática. Provoca maior rigidez no sistema e reduz a transmissão de sons principalmente de baixas frequências, menor que 1 kHz.

- *Músculo estapédio (estribo)*: mascara os sons de baixa frequência, em ambientes ruidosos, permitindo melhor desempenho auditivo nas frequências da fala; atenua nossa própria voz quando chega à orelha e protege contra os sons de grande intensidade. A atenuação oferecida varia de 15 a 33 dB(A).
- *Antro mastóideo (e espaços anexos)*: uma pequena abertura denominada ádito do antro na parte superior da parede posterior do recesso epitimpânico, comunica-se com uma câmara conhecida como antro mastóideo. Seu tamanho pode ser comparado ao de um feijão, mas varia muito em função da pneumatização da mastóide. Situa-se atrás e um pouco acima da cavidade timpânica e é revestido por um mucoperiósteo semelhante ao da cavidade e nele abrem-se numerosas células.
- *Tuba auditiva (ou trompa de Eustáquio)*: sua função é a de manter o arejamento das cavidades da orelha média, o que é assegurado graças à abertura intermitente da tuba no ato de deglutir, bocejar ou espirrar. Permite a orelha média igualar a pressão ao meio atmosférico (orelha externa). Quando a pressão da orelha externa é igual da orelha média, a vibração da unidade tímpano-ossicular ocorre em toda sua amplitude, transmitindo para a orelha interna o máximo de ganho auditivo.

2.3.1 Fisiopatologia da Transmissão Sonora

As diversas lesões anatomopatológicas da orelha média podem trazer repercussões negativas sobre a capacidade auditiva.

- *Perfurações da membrana do tímpano*: A perda de substância decorrente da perfuração vai reduzir a área vibratória normal da membrana e, portanto, a relação de superfície com a platina do estribo, determinando perdas auditivas que dependem do diâmetro da perfuração.
- *Lesões osteísticas da cadeia ossicular*: tais lesões podem levar a destruição total dos ossículos. O ramo longo da bigorna, devido sua deficiente vascularização é o mais vulnerável aos processos osteísticos. Sua destruição isolada pode acarretar uma perda auditiva em torno de 60 dB(A).
- *Fixação da cadeia ossicular*: A cadeia ossicular pode estar íntegra do ponto de vista anatômico, mas estar bloqueada em seus movimentos total ou parcialmente, trazendo distúrbios mais ou menos intensos de transmissão sonora, dependendo de vários fatores lesivos.

- *Obstrução da janela redonda:* Trará perda auditiva somente nos casos de bloqueio total por invasão de tecido ósseo ou fibroso cicatricial
- *Obstruções tubárias:* As obstruções da tuba auditiva, parciais ou totais, reduzindo ou anulando a entrada de ar na cavidade do tímpano, vão diminuir em grau variável, a capacidade vibratória dos elementos integrantes do sistema tímpano-ossicular, acarretando perdas auditivas de graus variáveis.
- *Secção do músculo estapédio:* ocorre nas cirurgias de otosclerose, como consequência podem surgir hiperacusias dolorosas que, não chegam a ter grande significado clínico pois o organismo estabelece recursos de adaptação e hábito ao fim de poucas semanas.

2.4 Orelha Interna

A orelha interna, Fig. 2.4 (retirada de <http://www.maxisocial.com/forum/pediatria/audicao-t554.html> acessado em 15/03/2011), localiza-se na porção petrosa do osso temporal e engloba os órgãos da audição e do equilíbrio.

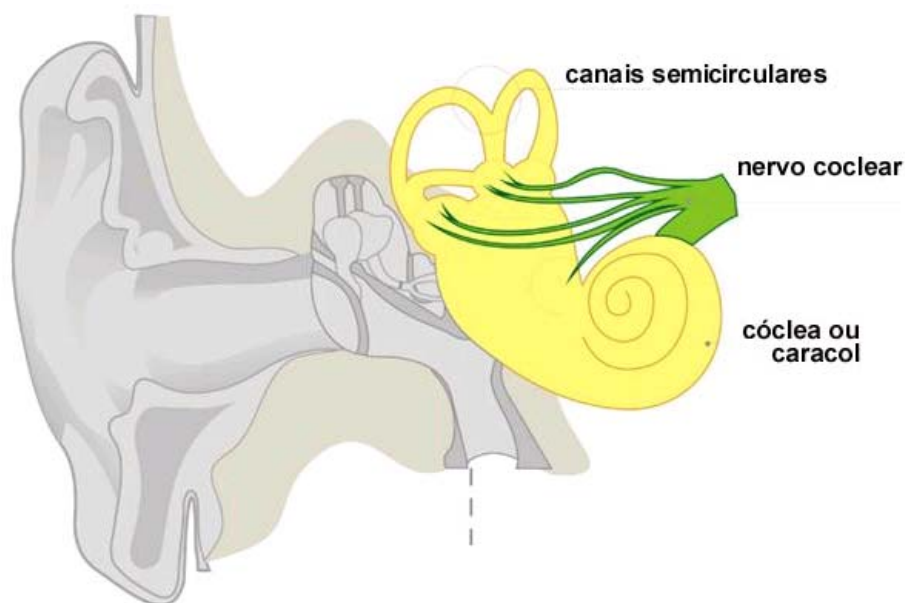


Figura 2.4 – Orelha interna.

Consiste em:

- *Labirinto endolinfático (membranoso)*: sistema de canais e tubos epiteliais, repleto de endolinfa. É quase totalmente envolvido pelo labirinto perilinfático e seu tecido de sustentação. Suas partes principais são: utrículo, sáculo, ducto e saco endolinfático, ductos semicirculares e suas ampolas e ducto coclear.

No assoalho do ducto coclear encontra-se o órgão de Corti que contém células altamente especializadas, as células ciliadas, que são elementos sensoriais. Os grandes aperfeiçoamentos do sistema auditivo humano foram no sentido de proporcionar melhor discriminação, ou seja, a capacidade de distinguir pequenas alterações de intensidade, frequência e tempo, o que permitiu o advento da comunicação humana.

- *Labirinto perilinfático (ósseo)*: é um arcabouço separado do osso petroso e é a cápsula ótica original. Divide-se em: vestíbulo, canais semicirculares e cóclea.
 - *Vestíbulo*: é uma câmara ovóide que está em contato com a cóclea e recebe as terminações dos canais semicirculares. Nele encontram-se várias aberturas: para o nervo, para o aqueduto do vestíbulo, para os canais semicirculares, cóclea e janela oval.
 - *Canais semicirculares*: são três canais ósseos, cada um desenha dois terços de um círculo e situa-se em ângulo reto um do outro, como os cantos de um cubo.
 - *Cóclea*: possui duas e meia espiras enroladas ao redor de uma área central, o modíolo, onde se encontram as fibras do nervo coclear e as células do gânglio de Corti. Os cortes da cóclea através do modíolo mostram a sua divisão em três partes ou escalas: a escala vestibular, ligada ao estribo, a escala timpânica, relacionada à janela redonda e a escala média ou ducto coclear, onde se encontra o órgão de Corti.
- *Cápsula ótica*: envolve o labirinto e é uma categoria óssea essencial pois se ossifica de numerosos centros, os centros unem-se sem formar suturas, deriva-se de cartilagem e tem seu máximo desenvolvimento no quinto mês de gestação. É o segmento do aparelho auditivo, que realiza a transdução das vibrações sonoras, que se transformam em estímulos nervosos específicos para o nervo acústico, que leva os impulsos aos centros corticais da audição, onde se dá o fenômeno consciente da sensação sonora.

2.5 Etapas da fisiologia auditiva

As ondas sonoras atingem a orelha externa, o som é conduzido pelo conduto auditivo externo até a membrana timpânica resultando em movimentação da membrana timpânica e da cadeia ossicular que geram um deslocamento da platina do estribo na janela oval e um deslocamento em sentido oposto da membrana da janela redonda. Os líquidos labirínticos também são movimentados.

A movimentação da perilinfa gera as ondas de propagação perilinfática. Cada frequência sonora transmitida pela perilinfa provoca excitação máxima em determinada área da membrana basilar. Os sons agudos têm seu ponto máximo de amplitude próximo à base, os sons médios no ponto médio e os sons graves próximo ao ápice.

A cóclea ativa: nos últimos dez anos os conceitos sobre a fisiologia coclear se modificaram fundamentalmente. No órgão de Corti existem dois sistemas de células ciliadas: o das células ciliadas externas e o das células ciliadas internas. Existem diferenças anatômicas entre elas que têm implicações na fisiologia coclear.

As células ciliadas externas têm uma função ativa e capacidade de contração. A energia mecânica liberada na contração destas células é responsável pelas otoemissões acústicas. Elas funcionam como um amplificador coclear e seriam capaz de acurada seletividade frequencial. Tornam a cóclea um verdadeiro amplificador mecânico permitindo um aumento de até 50 dB na intensidade de um estímulo.

As células ciliadas internas são transdutores sensoriais, os verdadeiros receptores da mensagem sonora, produzindo codificação em mensagem elétrica que seria enviada pelas vias nervosas aos centros auditivos do lobo temporal. Apresentam uma seletividade de frequência fina muito maior que as células ciliadas externas

2.5.1 Etapas da Fisiologia Coclear

- Primeira etapa – transdução mecanoelétrica nas células ciliadas externas:

As vibrações mecânicas da membrana basilar e órgão de Corti provocadas pelas vibrações da perilinfa determinariam deslocamentos das células ciliadas externas acopladas à membrana tectória, desencadeando a sua despolarização e hiperpolarização. Neste mecanismo de vibração há uma seletividade de frequências imprecisas. Há aparecimento de potenciais elétricos receptores, como os potenciais microfônicos cocleares.

- *Segunda etapa – transdução eletromecânica (ativa) nas células ciliadas externas:*

Os potenciais elétricos formados provocariam contrações mecânicas rápidas das células ciliadas externas. Estas contrações constituem a base da eletromotilidade e ocorrem em fase com a frequência sonora estimulante. A membrana tectória que está presa aos cílios das células ciliadas externas também se contrai. Este mecanismo constitui a base do funcionamento do amplificador coclear ativo.

- *Terceira etapa – transdução eletromecânica nas células ciliadas internas:*

O mecanismo ativo das células ciliadas externas provoca o contato dos cílios mais longos das células ciliadas internas com a membrana tectória e a consequente inclinação dos mesmos. Esta inclinação determina a despolarização das células ciliadas internas, sendo liberados neurotransmissores e ocorrendo a formação de uma mensagem sonora codificada em impulsos elétricos, que é transmitida ao sistema nervoso central pelo nervo acústico.

2.6 Fisiopatologia decorrente do ruído

2.6.1 Alterações Cocleares

- *Temporárias:* Durante os desvios temporários dos limiares auditivos há alterações discretas nas células ciliadas, edemas nas terminações nervosas auditivas, alterações vasculares, exaustão metabólica, modificações químicas intracelulares, diminuição da rigidez dos estereocílios, alterações do acoplamento entre cílios e membrana tectorial. Na maior parte das vezes, as alterações são reversíveis, havendo recuperação do limiar mesmo com presença de células lesadas.
- *Permanentes:* Durante os desvios permanentes dos limiares auditivos ocorrem alterações no fluxo coclear, alterações nos estereocílios (amolecimento, colapso, fusão, alongamento), aumento do número de células ciliadas lesadas ao longo da exposição, com redução dos processos ativos das células ciliadas externas, como a capacidade de contração rápida destas células, ocorrendo a degeneração de fibra nervosa do órgão de Corti. Quando estas alterações histológicas ocorrem, não há possibilidade de recuperação dos limiares auditivos.

CAPÍTULO III

Ruído: Caracterização e Efeitos sobre o Homem

3.1 Definição

Segundo Mello (1999), o termo “som” é utilizado para as sensações prazerosas, como música ou fala; mas, para ser percebido, é necessário que esteja dentro de uma faixa de frequência captável pelo mecanismo de audição. Esta faixa de audição compreende a área de frequências de 20 a 20000 Hz. Ele é definido como variação de pressão atmosférica dentro dos limites de amplitude e banda de frequências aos quais a orelha humana responde. É uma variação de pressão que ocorre em meios elásticos, propagando-se em forma de ondas ou oscilações mecânicas longitudinais e tridimensionais, que produz uma sensação auditiva (Mello, 1999).

Um ruído é apenas um tipo de som, mas um som não é necessariamente um ruído. Almeida et al. (1995) relata que, em 1978, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) definiu ruído como sendo um fenômeno acústico dissonante ou anárquico, aperiódico e indesejável; mistura de sons cujas frequências diferem entre si por valor inferior à discriminação em frequências da orelha. O ruído é uma onda sonora aperiódica e, sendo assim, é muito difícil ou quase impossível prever a forma da onda em um intervalo de tempo, a partir do conhecimento de suas características, durante outro intervalo de tempo de igual duração. O movimento vibratório de uma onda aperiódica como o ruído ocorre ao acaso, é aleatório e, por esta razão, imprevisível (Mello, 1999).

Russo (1993) conceituou o ruído, segundo diferentes critérios de classificação:

- *Subjetivamente*, o ruído é um som desagradável e indesejável.

- *Objetivamente*, o ruído é um “Sinal acústico aperiódico, originado da superposição de vários movimentos de vibração com diferentes frequências, as quais não apresentam relação entre si” (Feldman; Grimes, 1985 apud Russo, 1993).
- *Quantitativamente*, o ruído é definido pelos atributos físicos indispensáveis para o processo de determinação da sua nocividade – sua duração em tempo, espectro de frequência e intensidade.
- *Qualitativamente*, de acordo com a Norma ISO 2204/1973 (International Standard Organization), os ruídos podem ser classificados segundo a variação de seu nível de intensidade com o tempo em:
 - *Contínuos*: ruído com variações de níveis desprezíveis durante o período de observação;
 - *Intermitentes*: ruído cujo nível varia continuamente de um valor apreciável durante o período de observação;
 - *De impacto*: ruído que se apresenta em picos de energia acústica de duração inferior a um segundo. O ruído de impacto é um fenômeno acústico associado a explosões e é considerado um dos tipos de ruídos mais nocivos à audição, com intensidades, que variam de 100 dB para o ruído de impacto e acima de 140 dB para o ruído impulsivo (Feldman e Grimes, 1985, apud Russo, 1993).

3.2 Efeitos do Ruído na Audição

O ruído não prejudica somente a audição, apesar de seus efeitos serem percebidos e bem caracterizados nesse sentido; seus efeitos dependem da intensidade e da duração da exposição (Mello, 1999).

Okamoto e Santos (1996) afirmam que o estímulo auditivo, antes de chegar ao córtex cerebral, passa por inúmeras estações subcorticais, principalmente pelas funções vegetativas, que explicam os efeitos não-auditivos induzidos pelo ruído.

3.2.1 Efeitos Auditivos

3.2.1.1 Perda Auditiva

Segundo Mello (1999), a ação do ruído sobre a audição pode ocasionar uma perda auditiva por dois mecanismos:

- a) por exposição aguda – conhecida como trauma acústico;
- b) por exposição crônica – trata-se da perda auditiva induzida pelo ruído.

Os indivíduos afetados começam a ter dificuldades para perceber os sons agudos, tais como os de telefones, apitos, tique taque do relógio, campainhas, dentre outros. E logo a deficiência se faz extensiva até a área média do campo audiométrico, comprometendo frequências da chamada zona de conversação, e consequentemente afetando o reconhecimento da fala (Werneer et al. 1990 apud Nudelmann et al., 1997).

A perda auditiva induzida pelo ruído pode ser classificada em três tipos: trauma acústico, perda auditiva temporária e perda auditiva permanente.

- *Trauma Acústico* (Saliba, 2008): O trauma acústico consiste numa perda auditiva de instalação súbita, provocada por ruído repentino e de grande intensidade, como uma explosão ou uma detonação. Em alguns casos, a audição pode ser recuperada total ou parcialmente com tratamento (antiinflamatórios expansores do plasma e ativadores da micro circulação). Eventualmente, o trauma acústico pode acompanhar-se de ruptura da membrana timpânica e/ou desarticulação da cadeia ossicular, o que pode exigir tratamento cirúrgico.
- *Perda Auditiva Temporária* (Saliba, 2008): A perda auditiva temporária, conhecida também como mudança temporária do limiar de audição, ocorre após a exposição a ruído intenso, por um curto período de tempo. Um ruído capaz de provocar uma perda temporária será capaz de provocar uma perda permanente, após longa exposição. Entretanto, os mecanismos de perda são distintos nas duas situações, e as alterações observadas no órgão de Corti são de natureza diferente.
- *Perda Auditiva Permanente* (Saliba, 2008): A exposição repetida ao ruído excessivo pode levar, ao cabo de alguns anos, a uma perda auditiva irreversível – permanente. Como sua instalação é lenta e progressiva, a pessoa só se dá conta da deficiência quando as lesões já estão avançadas. A audiometria exhibe um traçado bem característico, com um entalhe inicial em torno de 4000 e 6000 Hz. Com a continuação da exposição sem proteção, o entalhe tende a se aprofundar e a se alargar

na direção das frequências vizinhas. Na maioria das vezes, a perda é bilateral e mais ou menos simétrica, mas isso pode não ocorrer em todos os casos.

3.2.1.2 *Zumbido*

Segundo Mello (1999), os zumbidos ou acufenos ou tinnitus são um sintoma e não uma doença. Essa sua característica subjetiva leva à incapacidade de mensurá-los objetivamente. Constituem-se queixa constante em trabalhadores com lesões auditivas induzidas pelo ruído. Sanchez et al. (1997) apud Mello (1999) afirma que o zumbido tem sido associado predominantemente com problemas da cóclea ou do nervo auditivo, apesar de não ter sido ainda esclarecido qual seria o seu substrato anatomofisiológico. Os zumbidos não têm tratamento específico, mas podem desaparecer espontaneamente. As pessoas que associam o zumbido a uma situação desagradável ou indício de perigo não são capazes de se habituar ao seu som, enquanto outras são capazes de ignorá-lo totalmente. Depois de ter certeza de que não existe nenhum problema clínico a ser tratado, o processo de habituação pode iniciar-se esclarecendo ao paciente as características do zumbido e convencendo-o de que ele não representa nenhuma ameaça a sua saúde (Mello, 1999).

3.2.1.3 *Recrutamento*

Entende-se por recrutamento a sensação de incômodo para sons de alta intensidade (Mello, 1999). No recrutamento, a percepção de “altura” do som cresce de modo anormalmente rápido à medida que a intensidade aumenta. É próprio das patologias cocleares desenvolverem o recrutamento, independentemente da perda auditiva. A orelha normal opera numa faixa de audição que se estende desde um limiar mínimo (de audibilidade) até um limiar máximo (de desconforto). Esta faixa chama-se campo dinâmico. Os recrutantes têm o limiar de desconforto menor e, muitas vezes, o limiar auditivo maior, o que reduz sensivelmente seu campo dinâmico de audição (Mello, 1999).

3.2.1.4 *Deterioração da Discriminação da Fala*

Costa e Kitamura (1995) apud Mello (1999) relatam que os portadores de PAIRO (perda auditiva induzida pelo ruído ocupacional) podem ter reduzida a capacidade de distinguir detalhes dos sons da fala em condições ambientais desfavoráveis, principalmente nos momentos de conversação em grupo ou para acompanhar um programa de televisão em

meio ao ruído doméstico, pois apresentam a cóclea lesada, o que acarreta a incapacidade de distinguir frequências superpostas ou subsequentes, assim como os micro intervalos de tempo.

3.2.1.5 Otalgia

Sons excessivamente intensos, acima do limiar de desconforto, podem provocar otalgias, às vezes acompanhadas de distúrbios neurovegetativos e eventualmente até mesmo de rupturas timpânicas, afirma Costa e Kitamura (1995) apud Mello (1999).

3.2.2 Efeitos Extra-Auditivos

Os efeitos extra-auditivos podem ser mais prejudiciais e complexos do que os efeitos provocados por outra estimulação sensorial (Russo; Santos, 1993).

Okamoto e Santos (1996) apud Mello (1999) relatam pesquisas cujo resultado evidenciou que a exposição a ruído contínuo diminui a habilidade e o rendimento do indivíduo, acarretando um provável aumento de acidentes de trabalho.

O ruído age diretamente sobre o calibre vascular, podendo desencadear hipertensão arterial leve a moderada, taquicardia, aumento da viscosidade sanguínea, influenciando assim a oxigenação das células e levando a possíveis alterações teciduais (Seligman, 1993 apud Andrade et al., 1998 apud Mello, 1999) A reação visual à exposição a ruído é a dilatação da pupila. Okamoto e Santos (1996) apud Mello (1999) acreditam que, na prática, estes efeitos, em trabalhos de precisão, (que exigem controle visual intenso) poderiam ter vital importância uma vez que o trabalhador teria de reajustar continuamente a distância do foco, o que aumentaria sua fadiga e probabilidade de erros.

Verifica-se que ruídos de baixas frequências são captados por barorreceptores de órgãos ocos (vasos de grosso calibre, estômago e intestino) desencadeando a estimulação neuroquímica com indução de vasoconstrição e, conseqüentemente, estimulação do sistema nervoso central com ocorrência de hipermotilidade e hipersecreção gastroduodenal (Okamoto; Santos, 1996 apud Mello, 1999), ocasionando gastrite, úlcera gastroduodenal, diarreia e prisão de ventre. As alterações neuropsíquicas mais frequentes que podem decorrer da exposição a ruído são: ansiedade, inquietude, desconfiança, insegurança, pessimismo, depressão, alteração de sono/vigília, irritabilidade e agitação, falta de memória e atenção. As pessoas expostas num período maior de tempo são as mais afetadas. Tal exposição também pode ser responsável por altas taxas de absenteísmo, cefaléia e acidentes de trabalho e em condução de veículos.

A maioria das glândulas endócrinas é regulada por hormônios produzidos no hipotálamo. Com isto, é fácil compreender que, se o ruído causa alterações cerebrais, essas irão repercutir também nas glândulas endócrinas. Costa, (1994) apud Andrade et al. (1998), afirma que mesmo as glândulas que não são diretamente reguladas por hormônios hipotalâmicos, como o pâncreas, vão sofrer ação prejudicial do ruído através da ação neurológica ou de outros hormônios alterados.

O sistema imunológico permite que o organismo se defenda das agressões representadas por elementos estranhos a ele, tais como bactérias, vírus e células cancerosas. Já foi demonstrado que o ruído excessivo altera elementos que atuam na defesa imunológica (Segala, 1993 apud Andrade et al., 1998).

3.3 Avaliação dos Efeitos do Ruído sobre o Homem

3.3.1 Mecanismo da Perda Auditiva

Segundo Fernandes (2002), as perdas de audição causadas por exposição ao ruído ocupacional se caracterizam por iniciarem na faixa de 3000 a 5000 Hz, sendo mais aguda em 4000 Hz.

A perda auditiva de um indivíduo pode ser causada, isoladamente ou em combinação, por quatro fatores (Mello, 1999):

- Presbiacusia – é a inevitável perda auditiva relacionada com a idade;
- Nosoacusia – patologia otológica ou condição médica que afeta a audição;
- Socioacusia – perda que não se limita à provocada pelo trabalho, mas que é induzida pelo ruído não ocupacional (serviço militar, lazer e esporte);
- Perda auditiva induzida pelo ruído ocupacional – relacionada ao trabalho, é uma diminuição gradual da acuidade auditiva, decorrente da exposição contínua a níveis elevados de pressão sonora.

De acordo com sua etiologia, as perdas auditivas podem ser (Mello, 1999):

- *Perdas auditivas condutivas*: aquelas que resultam de patologias que atingem a orelha externa e/ou média, reduzindo, dessa forma, a quantidade de energia sonora a ser transmitida para a orelha interna.

- *Perdas auditivas neurossensoriais*: aquelas que resultam de distúrbios que comprometem a cóclea ou o nervo coclear.
- *Perdas auditivas mistas*: aquelas onde aparecem componentes condutivos e neurossensoriais em uma mesma orelha.

Levando em consideração o grau (Davis e Silvermann, 1978, Apud Mello, 1999):

- 0 – 25 dB(A): audição normal;
- 26 – 40 dB(A): perda auditiva leve;
- 41 – 70 dB(A): perda auditiva moderada;
- 71 – 90 dB(A): perda auditiva severa;
- Maior que 90 dB(A): perda auditiva profunda.

São quatro os fatores que contribuem para a perda auditiva (Brasil, 2006):

1. A intensidade;
2. O tempo de exposição;
3. A frequência do ruído;
4. A suscetibilidade individual.

Os três primeiros itens são conhecidos e fáceis de medir. O quarto item (suscetibilidade individual) é bastante interessante, pois indivíduos que se encontram num mesmo local ruidoso podem reagir de maneiras diferentes: alguns são extremamente sensíveis ao ruído, enquanto outros parecem não ser atingidos pelo mesmo (Fernandes, 2002).

3.3.2 Níveis de Ruído Confortáveis e Perigosos

Os efeitos do ruído podem ser tratados de duas formas: do ponto de vista do conforto, e do ponto de vista da perda da audição (Fernandes, 2002).

Sobre conforto, os níveis recomendados estão na Norma Brasileira NBR 10152 (ou ABNT NB-95), e podem avaliados através das curvas NC (Noise Criterion), ou pela medição do ruído em dB(A) (Fernandes 2002).

Fernandes (2002) relata que, quanto aos problemas de saúde causados pelo ruído, não existe um valor exato de nível sonoro que, a partir do qual existe perda de audição. Como visto, existem pessoas mais sensíveis ao ruído, enquanto outras não acusam tal problema.

A NBR 7731 cita que os critérios para avaliação do risco auditivo são encontrados nas normas internacionais ISO R 1999, ISO R 1996 e ISO R 532. Essa norma, porém, não tem aplicação prática na área de Engenharia de Segurança do Trabalho no Brasil.

A CLT (Consolidação das Leis do Trabalho) é bem mais objetiva que as Normas Regulamentadoras Brasileiras. Na Portaria Nº 3214, de 08/06/78, na Norma Regulamentadora nº 15, Anexo Nº 1, são estabelecidas todas as condições de insalubridade por ruído.

É importante lembrar que a Portaria Nº 3214 pertence ao Capítulo V, Título II da Consolidação das Leis do Trabalho. Portanto, essa Portaria tem força de lei, sendo obrigatório o seu cumprimento em todo o território nacional, sendo que mesmo não acontece com as Normas Regulamentadoras Brasileiras.

Para ruídos contínuos ou flutuantes a NR 15 apresenta uma tabela com a máxima exposição diária permissível, como reproduzida na Tab. 3.1.

Deve-se notar que a Portaria Nº 3214 é rigorosa ao atuar sobre níveis de ruído acima de 85 dB(A) (e não 90 dB(A) como outras normas), mas se torna menos exigente ao usar como *taxa de divisão* 5 dB(A).

Existe uma tendência mundial em se adotar como início da prevenção o nível de 80 dB(A), e uma taxa de divisão de 3 dB(A). A legislação da Comunidade Européia para Segurança do Trabalho já estipulou esses dados, assim como a NIOSH (USA) estuda modificações em suas normas.

Para períodos de exposição a níveis diferentes deve ser considerada a dose de ruído e efetuada a soma das frações demonstradas na Eq. 3.1.

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \leq 1 \quad (3.1)$$

onde :

C_n = tempo de exposição a um determinado nível de ruído;

T_n = exposição diária permitida para determinado nível de ruído.

Se a soma das frações ultrapassar a unidade, a exposição estará acima do limite de tolerância.

Para ruído de impacto, os níveis superiores a 140 dB (linear) medidos na resposta de impacto, ou superiores a 130 dB(C) medidos na resposta rápida (fast), oferecerão risco grave e iminente.

Tabela 3.1. - Limites de Tolerância para ruído contínuo ou flutuante (Brasil, 2006).

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	08 minutos
115	07 minutos

3.4 Controle do Ruído

Controle de ruído são medidas que devem ser tomadas, no sentido de atenuar o efeito do ruído sobre as pessoas. Controle não significa supressão da causa, mas sim, uma manipulação do efeito. É importante lembrar que não existem soluções mágicas que indiquem

quais as medidas que irão solucionar um problema de excesso de ruído. Devem ser utilizados os conhecimentos sobre acústica, além de um conhecimento detalhado do processo industrial (Fernandes, 2002).

Antes de uma análise mais detalhada do problema, é preciso observar alguns dados de ordem geral, para se ter uma idéia mais precisa sobre a dimensão do problema e, ao mesmo tempo, provocar reflexões quanto a soluções.

Alguns fatores que devem ser observados (Fernandes, 2002):

- Avaliação da exposição individual;
- Características do campo acústico;
- Condições de comunicação oral;
- Tipo de ruído;
- Tipo de exposição;
- Número de empregados expostos;
- Características do local;
- Ruído de fundo.

De um modo geral, o controle do ruído pode ser executado tomando-se as seguintes medidas, preferencialmente nesta ordem (Fernandes, 2002):

- Controle do ruído na fonte;
- Controle do ruído no meio de propagação;
- Controle do ruído no receptor.

A fonte é a própria causa do ruído. O meio é o elemento transmissor do ruído, que pode ser o ar, o solo ou a estrutura do prédio. O receptor é o operário. É importante esclarecer a hierarquização dos três elementos envolvidos no fenômeno: em primeiro lugar o controle na fonte, depois o controle no meio e por último o controle no operário.

3.4.1 Noções de Isolamento Acústico e Absorção Sonora

O isolamento acústico refere-se à capacidade de certos materiais formarem uma barreira, impedindo que a onda sonora (ou ruído) passe de um recinto a outro. Nestes casos se deseja impedir que o ruído alcance o homem. Normalmente são utilizados materiais densos (pesados) como por ex: concreto, vidro, chumbo, dentre outros (Egan, 1988 apud Bolognesi, 2008).

A absorção acústica trata do fenômeno que minimiza a reflexão das ondas sonoras num mesmo ambiente, ou seja, diminui ou elimina o nível de reverberação (que é uma

variação do eco) num mesmo ambiente. Nestes casos se deseja, além de diminuir os níveis de pressão sonora do recinto, melhorar o nível de inteligibilidade. Contrariamente aos materiais de isolamento, os materiais de absorção são leves (baixa densidade), fibrosos ou de poros abertos, como por exemplo, espumas poliéster de células abertas, fibras cerâmicas e de vidro, tecidos, carpetes, dentre outros (Bolognesi, 2008).

Praticamente todos os materiais acústicos existentes no mercado ou isolam ou absorvem ondas sonoras, embora com diferente eficácia. Aquele material que tem grande poder de isolamento acústico quase não tem poder de absorção acústica, e vice-versa. Alguns outros materiais têm baixo poder de isolamento acústico e também baixo poder de absorção acústica (como plásticos leves e impermeáveis), pois são de baixa densidade e não possuem poros abertos. Espumas de poliestireno (expandido ou extrudado) têm excelentes características de isolamento térmico, porém não são recomendados em acústica. A cortiça (muito utilizada no passado) já não apresenta os resultados acústicos desejados pelo consumidor da atualidade, e também apresenta problemas de higiene e deterioração (trata-se de um produto orgânico que se deteriora facilmente).

A indústria tem desenvolvido novos materiais com coeficientes de isolamento acústico e/ou de absorção muito mais eficientes que os materiais até então considerados "acústicos". Desta maneira tem sido possível se obter, mediante variações de sua composição, resultados acústicos satisfatórios que atendam as necessidades do usuário.

Cada recinto, conforme sua utilização requer critérios bem definidos de Níveis de Pressão Sonora e de reverberação para permitir o conforto acústico e/ou eliminar as condições nocivas a saúde. Níveis de Pressão Sonora muito baixos podem tornar o recinto monótono e cansativo, induzindo as pessoas às condições de inatividade e sonolência.

Normalmente um bom projeto acústico prevê o isolamento e a absorção acústica utilizadas com critérios bem definidos, objetivando a melhor eficácia no resultado final. Para isto, deve-se levar em consideração o desempenho acústico dos materiais que serão aplicados, sua fixação, posição relativa à fonte de ruído e facilidade de manutenção, sem restringir a funcionalidade do recinto.

A aplicação de um material acústico, fornecido ou utilizado sem critérios rígidos de projeto, não significa a solução do problema.

A princípio, todos os materiais têm características acústicas que podem ser desejadas, ou não, para a questão que se busca. Por exemplo:

- O ar é acústico, pois é ele quem "transmite" os sons para o sistema auditivo humano;
- O vácuo absoluto é acústico, pois por ele não são transmitidos sons (é o isolante acústico perfeito);
- Uma parede de concreto, maciça, é acústica, pois apresenta um índice de redução sonora elevado, mas também apresenta elevados níveis de reflexão sonora;
- As fibras (lã de rocha, lã de vidro, lã cerâmica), espumas de poros abertos, tecidos, carpetes, e outros materiais deste tipo têm razoável poder de evitar a reflexão sonora, mas não isolam o som.

Quando o problema é vazamento de sons de um ambiente para outro, a solução deve ser direcionada para o uso de materiais densos, como o concreto, o vidro, o aço, dentre outros. Nestes casos não se deve utilizar materiais do tipo fibras, tecidos, carpetes e similares, pois não significará a solução definitiva.

Caso o problema seja falta de inteligibilidade da palavra falada dentro de um mesmo ambiente, a solução deve ser direcionada para o uso de fibras e/ou espumas de poros abertos. Não se deve utilizar materiais densos ou que sejam impermeáveis ao ar.

A melhor solução final, normalmente, requer o uso dos dois tipos (isolantes e absorvedores) de forma muito criteriosa.

Não existem materiais melhores ou piores para soluções acústicas. O que existe é a adequação (ou não) de determinado material para a finalidade que se deseja. Muito cuidado deve ser dado à utilização de um determinado material devido à sua eficiência em outro local ou outra aplicação. Existem muitos exemplos reais nos quais um determinado material é eficiente para uma aplicação e ineficiente em outra.

Existem materiais cujas características acústicas são tão baixas que sua utilização é inviável. Estes materiais são, normalmente, muito baratos, o que motiva sua utilização.

A aplicação de um material acústico, fornecido ou utilizado sem critérios rígidos de projeto, não significa a solução do problema.

3.4.2 Controle do Ruído na Fonte

O ruído na fonte pode ser causado por fatores, dentre eles pode-se citar (Fernandes (2002):

- Mecânicos;
- Pneumáticos;

- Explosões e implosões;
- Hidráulicos;
- Magnéticos;
- Manutenção.

As causas mecânicas dos ruídos são devido a choques, atritos ou vibrações. Portanto, deve-se observar nas fontes causadoras de ruído, a possível substituição do elemento nessas condições, ou então, a diminuição da intensidade desses choques, atritos ou vibrações.

Os ruídos pneumáticos ocorrem pela turbulência do ar dentro do duto, e por vibrações da tubulação. Geralmente esses ruídos são causados por variações da secção do duto ou por sua rugosidade superficial interna. O maior ruído causado por fontes pneumáticas reside no escape do gás sob pressão.

As causas hidráulicas são semelhantes às pneumáticas. Deve-se lembrar que, em tubulações hidráulicas, podem ocorrer bolhas e o fenômeno da cavitação, que são grandes causadores de ruído. A solução para o ruído em sistemas hidráulicos é a eliminação de grandes variações de pressão.

As explosões e implosões se referem à mudança súbita de pressão do gás contido numa câmara. Para máquinas que trabalham a explosão, dada a própria natureza da máquina, controlar a explosão significa mudar a essência da máquina. Nesses casos procura-se controlar o ruído na trajetória.

As causas magnéticas são devidas à vibração das bobinas elétricas. Deve-se sempre ter em mente que os choques, atritos e vibrações são causas de ruídos em máquinas.

Quando se realiza a manutenção em máquinas e sistemas, normalmente são necessários manobras e procedimentos que geram níveis de ruído, algumas vezes, mais altos que os da própria operação da máquina.

3.4.3 Controle do Ruído no Meio de Propagação

Quando não é possível o controle do ruído na fonte, ou a redução obtida foi insuficiente, é necessário considerar medidas que visem controlar o ruído na sua trajetória de propagação. Isso é alcançado de duas maneiras (Fernandes, 2002):

- Evitando que o som se propague a partir da fonte;
- Evitando que o som chegue ao receptor.

Isolar a fonte significa construir barreiras que separem a máquina do meio que a rodeia, evitando que o som se propague. Isolar o receptor significa construir barreiras entre o

meio e o operário. Em qualquer uma das opções existem vantagens e desvantagens: no isolamento da fonte existe a dificuldade de evitar a propagação do som, pois a energia acústica é maior em torno da fonte; enquanto tem-se a vantagem do ruído não se propagar por todo o ambiente, mantendo o local salubre. O isolamento do receptor tem a facilidade de isolar o som, pois ao chegar ao receptor sua intensidade será pequena, mas terá a desvantagem da propagação do som por todo o ambiente (Fernandes, 2002).

O som, normalmente, se propaga por duas vias:

1. Aérea;
2. Estrutural.

3.4.3.1 *Redução da Propagação do Som pelo Ar*

Segundo Fernandes (2002), só é possível o controle da transmissão do som pelo ar através da instalação de obstáculos à sua propagação.

Antes, porém, cabe lembrar que os sons de baixa frequência se transmitem mais facilmente pelo ar que os sons de alta frequência. Assim, quando possível, deve-se transformar os ruídos para a faixa mais aguda do espectro, fazendo com que percam sua intensidade numa distância menor.

O isolamento do som na fonte ou no receptor pode ser feito por paredes.

- *Isolamento da fonte*

Existem três maneiras de isolar a fonte de ruído:

1. Executar a operação ruidosa à distância, e fazer a proteção individual apenas se necessário;
2. Executar a operação ruidosa fora do turno de trabalho, protegendo os operários envolvidos;
3. Isolar acusticamente a máquina.

A terceira hipótese é a mais usada e pode ser muito eficiente se bem projetada. No enclausuramento da fonte, como é conhecida, deve-se usar uma caixa que cobre a máquina, isolando-a acusticamente do meio externo. A construção do enclausuramento deve ser de material isolante e, se possível, internamente com material absorvente.

- *Mudança das Condições Acústicas do Local*

Alterando as condições de propagação do som, pode-se diminuir o ruído de um local. Para tal precisa-se estudar a situação em que se encontra a fonte de ruído e as condições de reflexão, absorção ou difração do som no local.

- *Isolamento do Receptor*

Caso a opção seja o isolamento do receptor, isso pode ser feito através de painéis ou paredes. O isolamento do receptor só é possível para os operários que não trabalhem diretamente na máquina. É bastante usado para separar o pessoal da administração, escritórios, controle de qualidade, almoxarifado, dentre outros.

Quando se isola o pessoal em salas e escritórios, não se deve esquecer das portas e janelas, que geralmente são os pontos mais vulneráveis do isolamento. A vedação das janelas se faz com dois vidros, de espessuras diferentes e, separados por alguns centímetros. Quanto às portas, há a necessidade de se projetar portas e batentes especiais com vedação acústica.

3.4.3.2 Redução da Propagação do Ruído pela Estrutura

O som pode se propagar não só pelo ar, mas também pela estrutura do prédio, alcançando grandes distâncias. Isso ocorre quando a máquina em funcionamento gera uma vibração no solo, que se propaga, fazendo toda a estrutura vibrar e, gerando o ruído. Mesmo existindo a atenuação do ruído aéreo, o som alcançará o ambiente via estrutura (Fernandes, 2002).

3.4.4 Controle do Ruído no Receptor

Quando todas as medidas de controle de ruído falharem, ou quando não for possível executá-las, deve-se considerar a proteção individual. Deve-se sempre lembrar que somente se recorre ao controle individual em casos extremos e nunca como primeira ou única medida.

Antes da aplicação de aparelhos de proteção individual, existem algumas medidas que podem diminuir os efeitos do ruído sobre os operários (Fernandes, 2002):

- Rotação de turnos: a diminuição do tempo de exposição diminui o risco de perda auditiva. Essa rotação é de difícil aplicação na prática e cria sérios problemas à produtividade.
- Cabines de repouso: são cabines a prova de som, onde o trabalhador exposto a altos níveis de ruído pode descansar por alguns minutos. Na Europa, muitas empresas têm

implantado essas cabines. Normalmente o tempo de repouso é de 5 minutos para cada 55 minutos de trabalho.

Segundo Fernandes (2002), o pesquisador de doenças do trabalho Dr. W. Dixon Ward descobriu que o problema de expor uma pessoa ao ruído intenso e depois deixá-la repousar, faz com que o tempo de recuperação da sensibilidade auditiva seja cada vez maior. Assim, fica em dúvida a eficiência das cabines de repouso ou os ciclos de exposição/repouso, bem como a rotação de turnos.

3.4.4.1 Os Protetores Individuais

O último dos recursos a ser considerado num problema de redução dos efeitos do ruído são os protetores individuais. Podem ser de três tipos:

1. Inserção (tampões);
2. Circum-auriculares (conchas);
3. Elmos (capacetes).

Os protetores de inserção são dispositivos colocados dentro do canal auditivo, podendo ser descartáveis ou não-descartáveis. Os descartáveis podem ser de material fibroso, de cera, ou de espuma. Os não-descartáveis, de borracha, devem ser esterilizados todos os dias. Os de espuma (moldável) são descartáveis, perdendo sua eficiência na primeira lavagem (Fernandes, 2002).

Os protetores circum-auriculares, também conhecidos como conchas, são semelhantes aos fones de ouvido, recobrem totalmente o pavilhão auditivo, assentando-se no osso temporal. Fornecem uma boa proteção ao ruído, ao mesmo tempo permitindo uma boa movimentação do operário e reduzindo as precauções higiênicas ao mínimo (Fernandes, 2002).

Os protetores de elmo (capacetes) são pouco usados. Eles cobrem hermeticamente a cabeça, se constituindo numa tentativa de solucionar os problemas de ruído, proteção dos olhos, respirador e capacete. Tiram a liberdade de movimentação do operário, além de causar ressonâncias internas que podem aumentar os problemas de ruído (Fernandes, 2002).

Atualmente, os protetores mais usados são os de inserção (plugs ou tampões) e os circum auriculares (conchas).

Segundo Fernandes (2002), é importante lembrar que:

- Os protetores tipo concha são mais eficientes que os tampões;

- Ambos os tipos são mais eficientes nas altas frequências, sendo praticamente nula a sua proteção para sons graves;
- A utilização de protetores auriculares em uma empresa deve ser precedida de um programa de treinamento e conscientização dos funcionários;
- Os protetores de inserção (tampões) são de difícil adaptação, podendo gerar infecções e irritações no canal auditivo;
- A atenuação citada pelas indústrias de protetores, se refere à ensaios realizados em laboratório, dificilmente alcançada no ambiente industrial.

Deve-se sempre lembrar que os protetores individuais diminuem o contato do trabalhador com o meio ambiente. Isso tem sérios desdobramentos, como:

- Aumento dos acidentes de trabalho;
- Não comunicação com os outros funcionários;
- Aumento da tensão e irritação;
- Queda da produtividade.

Portanto os protetores individuais devem ser considerados apenas como última solução, ou numa situação de emergência.

CAPÍTULO IV

Identificação e Avaliação da Exposição ao Ruído Ocupacional

Para a elaboração deste capítulo foram utilizadas as seguintes referências bibliográficas:

1. *Occupational Exposure Sampling Strategy Manual* (NIOSH, 1977): apesar de ser uma referência mais antiga, trata muito bem a parte escolha de grupos homogêneos, avaliação ocupacional e levantamento de dados em campo;
2. *Preventing Occupational Hearing Loss - A Practical Guide* (NIOSH, 1996) e *The Noise Manual* (AIHA, 2003): abordam todo o assunto de uma forma mais direta, além de serem fontes de consulta mais recentes;
3. NHO 01 da FUNDACENTRO e NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego: descrevem a metodologia adotada no Brasil para o cálculo da dose de exposição ao ruído ocupacional.
4. Manual de Consenso “O Estudo do Ruído” elaborado pelo Grupo de Especialistas em Saúde Ocupacional de Jundiaí: foi utilizado para desenvolver a parte de avaliação da saúde do colaborador, possui uma revisão a cerca dos principais exames realizados na identificação, triagem e avaliação da doença ocupacional.

Foi preferida a citação no início do capítulo para evitar possíveis cruzamentos ou omissões de referência no desenvolvimento do texto.

4.1 Avaliação Audiológica

4.1.1 As Características de uma Boa Avaliação Audiológica

A Audiologia refere-se à ciência da audição e ao estudo do processo auditivo e tem sua base científica na Psicoacústica, inter-relacionando-se com outras ciências. A Psicoacústica lida com os atributos de sensação do indivíduo para a frequência, intensidade e, ainda, em relação a ruídos, sons musicais e vozes humanas.

A avaliação da função auditiva é realizada por meio de inúmeros testes subjetivos que necessitam da colaboração do indivíduo para fornecer a resposta do exame, além de testes objetivos, que avaliam a audição do indivíduo sem que ele tenha que fornecer qualquer resposta ao teste. Estes exames buscam informações acerca da audição humana.

O conhecimento da anatomia, fisiologia e fisiopatologia da audição e dos elementos da Acústica e Psicoacústica são pré-requisitos essenciais ao Audiologista. O sucesso do diagnóstico dependerá de testes bem elaborados, realizados com critérios científicos e analisados corretamente.

Apesar da relativa facilidade na sua aplicação, a audiometria exige certas decisões a serem tomadas durante sua execução, sendo a pessoa mais qualificada, aquela que teve formação teórico-prática apropriada para a tarefa.

Dos cursos de nível superior no Brasil, o de Fonoaudiologia é o que tem dedicado maior carga horária ao assunto. Além disso, os Conselhos Federais de Medicina e de Fonoaudiologia são unânimes em apontar os Médicos (qualquer médico pode realizar a audiometria, no entanto, se for o caso, esse médico responderá penalmente por imperícia) e os Fonoaudiólogos como os únicos profissionais habilitados a executarem exames audiológicos, dentre estes, a audiometria.

Atualmente, a avaliação auditiva ocupacional tem grande importância sanitária, ética, social e legal no monitoramento das perdas auditivas nas indústrias, de acordo com a legislação vigente, pois há a necessidade de um controle mais rigoroso com o objetivo principal de preservar a saúde auditiva do trabalhador.

A audiometria é de grande importância para a detecção da PAIRO (Perda Auditiva Induzida por Ruído Ocupacional), mas não deve ser usada como o único instrumento para o diagnóstico. As alterações nos limiares auditivos detectados na audiometria tonal podem indicar um diagnóstico preliminar, compatível ou sugestivo de PAIRO. A confirmação só pode ser realizada dentro de um contexto amplo, com uma análise mais completa de dados.

Na avaliação audiológica ocupacional deve constar a anamnese e a avaliação auditiva propriamente dita.

Na anamnese devem-se investigar dados de:

- História laborativa: existência de exposição ao ruído ou às substâncias ototóxicas (atual e pregressa) e qual o ambiente de trabalho e a função (atual e pregressa);
- Antecedentes pessoais: se fez uso de medicação ototóxica, a existência de doenças anteriores que possam alterar a audição, a história familiar e a exposição ao ruído fora do ambiente de trabalho;
- História clínica: pesquisar se o indivíduo apresenta zumbidos, hipoacusia ou intolerância a determinados sons.

Com relação à avaliação audiológica, deve-se realizar a Otoscopia ou a Meatoscopia. Tem como objetivo detectar a presença de fatores que podem influenciar temporariamente o resultado do exame, como rolha de cera ou corpo estranho e fatores que não são reversíveis em curto prazo como, por exemplo, perfuração ou retração da membrana timpânica ou secreção no conduto auditivo externo.

4.1.2 Audiometria Tonal Liminar

É a determinação da menor intensidade necessária para provocar a sensação auditiva em cada frequência testada. Os limiares auditivos podem ser determinados por:

- Via Aérea, testada com fones pela passagem da onda sonora através da orelha externa e média chegando à cóclea;
- Via Óssea, testada com vibrador ósseo colocado na mastóide, sendo que as vibrações aplicadas são transmitidas diretamente para a cóclea.

Na pesquisa dos limiares auditivos, devem ser testadas as frequências de 0,25 a 8 kHz por Via Aérea e de 0,5 a 4 kHz por Via Óssea.

O teste por Via Óssea só pode ser dispensado quando o audiograma por Via Aérea estiver com os limiares de audibilidade dentro dos padrões de normalidade (até 25 dB(A)).

Para a realização da audiometria, o repouso auditivo é fundamental e deve ser de 14 horas, no mínimo, segundo a Portaria 19 do Ministério do Trabalho. Além disso, necessita-se de um ambiente adequado e de um aparelho específico.

O exame audiométrico deve ser realizado em cabine acústica, isto é, ambiente acusticamente tratado de modo que os níveis de pressão sonora em seu interior não

ultrapassem as recomendações internacionais (ANSI 3.1, 1991 ou parâmetro OSHA 81, apêndice D). Esta cabine deve estar acomodada em local silencioso, distante de fontes de vibração e isento de interferências que venham trazer prejuízo na execução do teste ou na atenção do paciente, uma vez que a garantia da qualidade e fidedignidade do exame depende diretamente da resposta do paciente.

O aparelho utilizado é o audiômetro que consiste, essencialmente, em um gerador de correntes alternadas de varias frequências, dotado de dispositivos eletrônicos para produção de tons puros, de um potenciômetro para graduar as intensidades destes tons e de fones receptores para convertê-los em som.

A calibração deste instrumento se faz necessária para a padronização da frequência e da intensidade, já que é o equipamento utilizado no processo de determinação dos limiares tonais dos indivíduos. O audiômetro deve ser submetido à aferição anual e calibração acústica, se necessário, e a cada cinco anos a calibração eletroacústica deverá ser realizada.

4.1.3 Audiometria Vocal

Esta etapa do exame complementa e confirma os resultados obtidos na Audiometria Tonal. Os testes básicos são:

- Limiar de recepção de fala ou LRF, definido como a menor intensidade na qual o indivíduo consegue identificar 50% das palavras que lhe são apresentadas;
- Índice de Reconhecimento de Fala ou IRF, um teste supra liminar, que avalia a maneira pela qual o indivíduo reconhece os sons da fala.

Na interpretação dos testes básicos da avaliação auditiva, existe a necessidade da análise conjunta dos dados obtidos para determinar o grau e o tipo da deficiência auditiva.

As perdas auditivas podem ser classificadas quanto ao tipo e ao grau, de acordo com o descrito no item 3.3.2.1.

4.1.4 Simulação e Dissimulação

Na prática da Audiologia Ocupacional, são encontrados, frequentemente, trabalhadores que simulam ou dissimulam uma perda auditiva.

A dissimulação ocorre, quando um indivíduo que tem uma patologia auditiva, simula não tê-la, com a finalidade principal de obter um emprego, aprovação em concurso ou

ascensão profissional. Portanto, esses casos são mais frequentemente encontrados nos exames pré admissionais.

Na suspeita de um caso de dissimulação, algumas dicas podem ajudar, como: colocar o indivíduo de costas para o examinador, de forma que não veja os seus movimentos em relação ao audiômetro; utilizar sons de ritmo e formas de apresentação variadas, com intervalos irregulares; mascarar a orelha contra lateral; realizar os testes de Logaudiometria (LRF e IRF).

Métodos mais sofisticados de pesquisa não são necessários para o diagnóstico de dissimulação.

No caso da simulação propriamente dita, o indivíduo simula apresentar uma perda auditiva inexistente, com o objetivo de obter vantagens, como indenizações ou outros benefícios. Esse tipo de simulação geralmente ocorre nos exames periódicos ou demissionais.

Suspeita-se de simulação quando:

- Houver incoerência entre as respostas da audiometria tonal e a sua habilidade comunicativa fora do teste; exagero na dificuldade de captar as informações pela pista visual; evitar contato visual;
- Pedir para escrever as instruções; houver incoerência entre a qualidade e intensidade vocal e o grau da perda auditiva, não apresentando alterações articulatórias mesmo em perdas profundas;
- Parecerem nervosos;
- Houver perdas auditivas severas, de característica sensorineural, com percentuais de discriminação elevados;
- O sujeito portador de perda auditiva unilateral agir como se apresentasse problema em ambas as orelhas e não responder (lado da suposta deficiência auditiva) às mais elevadas intensidades (via aérea/via óssea) sem mascaramento contra lateral.

Com relação a esses casos de simulação, a conduta básica é a mesma da avaliação dos casos de dissimulação, entretanto, existem diversas provas específicas e fáceis de serem aplicadas, como audiometrias repetidas e testes de Logaudiometria.

Além dos testes já referidos que necessitam da colaboração do indivíduo, existem os métodos objetivos, dentre os quais pode-se citar:

- Medida da Imitância Acústica (medida do nível mínimo de resposta do reflexo acústico do músculo estapédio);

- Audiometria de tronco cerebral (BERA);
- Emissões Otoacústicas Evocadas.

Quando um Fonoaudiólogo lida com um indivíduo suspeito de apresentar perda auditiva funcional, é preciso selecionar procedimentos com validade perante os juízes nos possíveis processos de indenização para compensação da invalidez.

É necessário tornar claro que uma avaliação correta, ao contrário de prejudicar, poderá beneficiar o trabalhador, evitando o agravamento de uma deficiência auditiva e propiciando seu aproveitamento em áreas onde possa produzir melhor, sem os inconvenientes, para si e para a empresa, que esse agravamento poderia acarretar.

4.1.5 Audiometria de Resposta Elétrica do Tronco Encefálico (Brainstem Electric Response Audiometry)

Segundo o grupo de especialistas em saúde ocupacional de Jundiaí, a Audiometria de Resposta Elétrica do Tronco Encefálico, também chamada BERA, é um exame que detecta, capta e registra as atividades elétricas dos neurônios das vias acústicas no nervo auditivo e na via auditiva central, áreas ditas retro cocleares. Não é um teste tonal liminar de audição, mas uma medida do conjunto, desde a condução auditiva na orelha média, a transformação da energia mecânica da onda sonora em energia elétrica na cóclea, até os impulsos elétricos que percorrem o complexo neural, não incluindo o processamento cortical, isto é, a percepção real do som. Analisa os potenciais precoces ou de curta latência, de 1 a 10 milissegundos (*ms*). Direciona os exames de imagem, não é invasivo, pois utiliza eletrodos de superfície, não utiliza contraste, seu custo-benefício é baixo, é altamente sensível, fornecendo alto nível de informação.

A integridade periférica e central do sistema auditivo é essencial para a aquisição da linguagem verbal e para o seu desenvolvimento, bem como durante toda a vida do indivíduo, sendo fundamental salientar-se a importância das avaliações objetivas da audição no auxílio diagnóstico, tratamento mais precoce possível e consequentes benefícios no desenvolvimento global da criança. Em muitos casos indica-se a adaptação de aparelhos de amplificação sonora individual ou próteses auditivas para crianças nascidas com perdas auditivas congênitas diagnosticadas no berçário. Trata-se de uma avaliação auditiva neurofisiológica objetiva muito útil, de alta sensibilidade e tem grande importância topodiagnóstica, isto é, localiza o sítio da doença.

O estímulo usado para a realização do BERA é o clique, que é um som agudo e de curta duração que avalia a audição numa faixa de frequências de 2000 a 4000 Hz.

O BERA apresenta similaridade temporal e duplicabilidade em indivíduos normais. Em alta intensidade, cinco ou seis ondas maiores principiam em 1,5 a 2 ms e apresentam-se em intervalos de aproximadamente 1 ms, podendo ser detectadas nos primeiros 10 ms após a estimulação. Em casos patológicos, uma variedade de sinais mostra anormalidades quanto ao tempo de latência, morfologia das ondas ou ambos.

As principais indicações do BERA, segundo o grupo de especialistas em saúde ocupacional de Jundiaí, são:

- Determinação do nível mínimo de resposta:
 - Neonatos normais e lactentes de alto risco para deficiência auditiva (DA), em condições vitais estáveis, sem patologias das orelhas média e externa: 2 a 10% destes serão surdos, 1:2000 nascimentos em nosso meio. As aplicações do BERA em neonatos de alto risco são:
 - neuro-otológica: pesquisa do grau de maturidade das vias auditivas centrais em prematuros e lactentes;
 - audiológica: detecção precoce de deficiência auditiva, mas também pesquisa da função auditiva em crianças maiores, estabelecendo se o retardo de linguagem é de causa auditiva.
 - Crianças e adultos em que não é possível realizar uma audiometria convencional, por exemplo: psicóticos, autistas, deficientes mentais e outros;
 - Pesquisa de indivíduos simuladores da perda auditiva.
- Hipoacusia neurossensorial e/ou zumbidos unilaterais ou assimétricos, pois sugere problema loco regional, incluindo o neurinoma do acústico;
- Caracterização do tipo de perda auditiva da orelha interna, coclear ou retro coclear;
- Diagnóstico da hidropsia endolinfática, que é o aumento da pressão dos líquidos na orelha interna, embora o melhor exame seja a Eletrococleografia;
- Topodiagnóstico de doenças neurológicas que afetam o 8º par de nervos cranianos e o tronco cerebral, como a esclerose múltipla ou em placas, doenças desmielinizantes, tumores retro cocleares e outras;
- Incapacidade de aprendizagem em crianças com má discriminação vocal, geralmente com distúrbio articulatorio e comportamento inconsistente;

- Estabelecimento do grau de coma;
- Audiometria tonal normal com ausência de reflexos estapedianos contralaterais, com ipsilaterais presentes;
- Surdez súbita.

As vantagens de se utilizar o BERA em casos de suspeita de PAIRO são:

- Auxilia na detecção de simuladores;
- Enfatiza as frequências entre 2000 e 4000 Hz;
- Não encontra aplicabilidade se a perda auditiva for severa ou profunda.

4.1.6 Emissões Otoacústicas Aplicadas a PAIRO

Na atualidade, a prática da Audiologia clínica nas diversas áreas de atuação tem contado com a realização de exames complementares e objetivos que fornecem dados relevantes para um diagnóstico preciso.

Os achados das Emissões Otoacústicas Evocadas (EOA) e da Audiometria Eletrofisiológica (BERA e ECOCHG) complementam, em alguns casos, a avaliação audiológica, para o topodiagnóstico da alteração auditiva, localizando a perda auditiva como de origem coclear ou retro coclear. Além disso, por serem testes objetivos, que não dependem da resposta do indivíduo, fornecem dados sobre perdas auditivas funcionais quando analisados com os resultados da imitanciometria e com as respostas para o exame audiométrico.

Os tipos de EOA estudados e mais usados clinicamente são:

- EOA espontâneas (EOAE) que podem ser captadas na ausência de estimulação sonora e que atualmente, não têm aplicação clínica;
- EOA transitórias ou transientes (EOAT) que necessitam de estímulo acústico para serem desencadeadas e são captadas em quase todas as orelhas com limiares auditivos até 25 dB(A);
- EOA por produto de distorção (EOAPD): são evocadas por dois tons puros (f_1 e f_2), apresentados simultaneamente e com frequências sonoras diferentes. Surgem da incapacidade da cóclea de amplificar sob forma linear dois estímulos diferentes, ocorrendo uma intermodulação ($2 f_1$ e f_2). Podem estar presentes em perdas auditivas de até 50 dB(A).

Como aplicações clínicas, pode-se citar a triagem auditiva neonatal, o monitoramento auditivo em casos cirúrgicos de hidropsia endolinfática e no uso de drogas potencialmente ototóxicas.

Pode-se evidenciar também a utilização das EOA para monitoramento e prevenção das perdas auditivas induzidas por ruído. Pesquisas na área ocupacional têm sido desenvolvidas para contribuir com o Programa de Conservação Auditiva nas empresas. O objetivo principal é associar às audiometrias referenciais e sequenciais o exame objetivo para avaliar a sensibilidade das células ciliadas externas à exposição ao ruído.

Também se pode utilizar EOA para pacientes com dificuldades na realização do exame audiométrico ou aqueles simuladores da perda auditiva.

Portanto, deve-se ressaltar que a associação de exames objetivos à avaliação audiológica é útil em alguns casos, permitindo maior especificidade no topodiagnóstico das deficiências auditivas sensorineurais fornecendo, assim, ao médico melhores condições para determinar sua conduta e o processo de reabilitação do indivíduo.

4.2 Avaliação Ocupacional

Embora a evolução dos sistemas sanitarista, de higiene e saúde do trabalhador no Brasil tenha tido nomes de extrema expressão em nível Nacional e Internacional antes da recomendação da OIT de 1953, foi após esse evento que, anos mais tarde, e devido aos altos índices de acidentes de trabalho no País, o Governo se viu obrigado a normatizar a inserção de profissionais na área de Saúde e Segurança nas empresas.

A FUNDACENTRO organizou, a partir de 1973, cursos de capacitação para médicos, engenheiros ou arquitetos, enfermeiros e técnicos, visando atender rapidamente a oferta na área de saúde e segurança no trabalho.

Muitos desses profissionais, principalmente médicos fizeram, dessa 2ª especialidade, uma fonte para complementação salarial sem se preocuparem com a verdadeira missão que a especialidade exigia. Esse pensamento, infelizmente, ainda persiste embora em menor número.

Porém as exigências legais que normatizam as relações Saúde/Trabalho têm levado os Médicos do Trabalho a, cada vez mais, abraçar a Saúde Ocupacional como sua atividade

principal. Quando não são seguidas tornam vulneráveis, do ponto de vista legal, médicos e empresas.

Uma delas, devido à falta de critério único, é a definição da aptidão de trabalhador portador de PAIRO, ao se candidatar a emprego em uma empresa com demanda de ruído acima de 80 - 85 dB(A).

Os avanços obtidos nas demais áreas da saúde não tiveram o acompanhamento da saúde do trabalhador. Como pode ser visto, em muitas empresas ainda impera o modelo da história natural da doença. Existem serviços bem estruturados e verifica-se que as empresas vêm trabalhando bem essas questões, no entanto, muitos ainda encaram, por exemplo, a SIPAT como um evento a mais, de caráter obrigatório, normalmente cumprido através de palestras.

O modelo da história natural da doença, proposto por Leavell e Clark (1965) (Fig. 4.1), ilustra o equilíbrio das relações entre o agente causador da patologia, o meio ambiente e o hospedeiro (trabalhador).



Figura 4.1 – Triângulo epidemiológico (Leavell e Clark, 1965).

O desequilíbrio do triângulo epidemiológico é o responsável pelo início das doenças, que passam despercebidas por certo período de tempo, chamado pré-patogênico. No caso da PAIRO, este período pode ser longo até o surgimento dos primeiros sinais de alteração no audiograma de rotina. As ações primárias de saúde devem ser realizadas nesse período com a finalidade de evitar o desequilíbrio e consequentemente o aparecimento da doença. São elas basicamente, no caso de surdez ocupacional, as palestras educativas, medidas de proteção coletiva e individual, etc.

No período patogênico, quando as defesas do indivíduo foram vencidas e a patologia emerge, as ações secundárias de saúde trabalham no sentido de tratar e evitar que o agente causador do desequilíbrio agrave ainda mais a lesão estabelecida.

No caso do candidato portador de PAIRO, ele já se encontra no período patogênico, comumente assintomático. Apesar da iniciativa, de estar pronto para o trabalho, as leis pedem para não haver discriminação, mas do ponto de vista ético e epidemiológico o médico do trabalho fica em uma situação delicada.

4.2.1 Conceito de Lesão e Incapacidade

O entalhe no audiograma em 3, 4 e 6 kHz, por si só, não deve ser interpretado como lesão da orelha interna que apresente incapacidade auditiva. Este conceito é muito mais amplo e necessita de outros testes para ser afirmado. É comum trabalhadores com perdas moderadas e até severas, na faixa de alta frequência, não se queixarem de dificuldade auditiva, e outros com perdas menores nessas frequências, associadas ou não a zumbido, apresentarem dificuldade de comunicação oral dentro ou fora do ambiente ruidoso.

Por todos esses motivos a incapacidade para o trabalho não deve ser analisada somente pela audiometria tonal. A logaudiometria, a demanda auditiva do posto de trabalho, o tipo de profissão, e o PCA da empresa são elementos importantes para o médico do trabalho tomar sua decisão.

A OMS, em 1980, conceituou as deficiências da seguinte maneira.

- 1) impairment: distúrbio em nível de órgão - anormalidade na função ou estrutura;
- 2) disability: distúrbio em nível da pessoa - consequência da anormalidade na atividade e no desempenho da função;
- 3) handicap: desvantagem na integração com o ambiente (social e profissional).

4.2.2 Critérios das Entidades em Nível Nacional

Segundo o Ministério do Trabalho e Emprego:

- NR- 7 - Portaria n.º 19, de 9 de Abril de 1998 - Instrui sobre os parâmetros de monitoramento da exposição ocupacional ao risco de exposição a pressão sonora elevada;
- Critério de aptidão é do médico coordenador do PCMSO e não deve ter caráter discriminatório;
- Além do audiograma, levar em consideração a anamnese, idade, exame otoscópico, a demanda auditiva na função, exposição não ocupacional, capacitação profissional e o PCA da empresa;
- Enquadrar o funcionário no relatório anual do PCMSO.

Segundo o Instituto Nacional de Segurança Social:

- Ordem de Serviço n.º 608 5/O8/98 - Norma técnica de avaliação de incapacidade para fins de Benefício - Surdez Ocupacional. SEÇÃO II (Resumo):
 - A perda neurossensorial, por si só, não incapacita o indivíduo para o trabalho, na maioria das vezes;
 - Avaliar repercussão da doença na capacidade de trabalho;
 - O bem jurídico não se centra na lesão ou integridade física e sim na capacidade do segurado exercer a profissão;
 - Redução na capacidade auditiva só gera benefício para profissões que necessitam 100% de acuidade da audição.

Nos casos de nexo técnico confirmado, e na remissão dos sinais e sintomas que fundamentaram a existência da incapacidade laborativa, cessa o auxílio-doença, que pode ocorrer no exame inicial, e o retorno deverá dar-se em ambiente e função adequados sem o risco de exposição (CRM adicionado de carta de recomendação para a empresa).

Segundo o Conselho Federal de Medicina:

- Resolução n.º 1488/98 - Aos médicos que prestam assistência aos Trabalhadores. Cabe aos Médicos (Resumo):
 - Estudo do local do trabalho;
 - Identificação dos riscos;
 - Avaliar as condições de Saúde do Trabalhador para determinadas funções e / ou ambientes, indicando sua locação para trabalhos compatíveis com sua condição de saúde;
 - Caso promova o acesso ao trabalho a portadores com afecções, a atividade não as agrave ou ponha em risco uma vida;
 - Serão responsabilizados por atos que concorram para agravos à saúde.

Segundo a Associação Nacional de Medicina do Trabalho – ANAMT:

- Procedimentos médico-administrativos:
 - Candidatos portadores de audiogramas compatíveis com PAIRO com perdas leves poderão ser admitidos nas empresas com um adequado PCA;

- Considerar de baixo risco: limiares auditivos estabilizados (3 audiometrias semestrais semelhantes) que irá ser exposto em ambiente de ruído semelhante ou menor que o que desenvolveu a PAIRO;
- Considerar de alto risco: jovens com PAIRO em ambientes com ruído acima de 90 dB(A), trabalhador com anacusia (falta de audição, incapacidade de se ouvir qualquer som) em ambiente com ruído maior que 80 dB(A), trabalhador com perda neurossensorial de outra causa nas baixas frequências sendo portador de otite crônica.

De forma geral, analisando todos os critérios expostos, nenhuma norma, lei, parecer ou sugestão define o que é a aptidão no termo exato. O parecer está sempre a critério do médico responsável pelo exame. Se de um lado não pode haver discriminação, do outro, expor um indivíduo, mesmo assintomático ao mesmo risco que o levou a adquirir aquela lesão, parece não ser muito ético.

Não se pode esquecer que o candidato portador de lesão coclear com perda ou não da capacidade auditiva já se encontra no período patogênico da história natural da doença e, portanto com desequilíbrio no triângulo epidemiológico onde as ações secundárias da saúde já se fazem necessária e uma delas é o afastamento do ambiente insalubre.

O médico deve esclarecer ao empregador sobre a condição ideal para locar um candidato em um determinado posto de trabalho, principalmente quanto à necessidade de implementar um PCA eficaz, e alertar para as possíveis sanções judiciais caso a doença pré-existente se agrave.

Cabe ao médico, quando aprovar um candidato com PAIRO, emitir o atestado como apto com restrição a ambientes ruidosos acima de 85 dB(A), ou 80 dB(A) em casos mais graves, sendo de responsabilidade da empresa o contrato administrativo.

A ANAMT sugere em caso de admissão:

- a) Esclarecer a condição auditiva para o candidato;
- b) Colher sua assinatura no exame audiométrico;
- c) Oficializar com a área o plano de conservação auditiva específico para aquele trabalhador, colhendo assinatura da chefia que optou pela admissão e do próprio trabalhador;
- d) Discutir com o trabalhador e a empresa a conveniência de se obter a CAT da empresa anterior (ou pelo próprio candidato), registrando-a na Previdência Social, junto com a audiometria alterada.

4.3 Avaliação da Exposição ao Ruído

Existem duas principais correntes para a avaliação da exposição ocupacional a ruído. A primeira é adotada principalmente na Europa, denominada “hipótese de mesma energia”, e o nível de exposição é codificado por L_{EX} . A segunda é adotada no Brasil, Estados Unidos e em outros poucos países, conhecida pela “regra dos 5 dB” ou “regra da OSHA”, e o nível de exposição é codificado atualmente por L_{OSHA} – da *Occupational Safety and Health Administration* do Departamento de Trabalho dos Estados Unidos.

O nível de exposição ao ruído (dose) é determinado a partir de medições acústicas envolvendo pressão sonora e tempo. É um parâmetro diferente da avaliação apenas do ruído existente nas áreas operacionais das indústrias, que é independente do indivíduo. Nos Programas de Conservação Auditiva (PCA's) as medições têm por objetivo principal identificar os grupos ocupacionalmente expostos e os equipamentos que controlam ou contribuem para a exposição. Constituem levantamentos diferentes, conduzidos sob procedimentos diferentes, mas com resultados que se complementam.

Os monitoramentos acústicos são ferramentas indispensáveis para o estabelecimento e avaliação dos PCA's. Seus resultados subsidiam decisões em âmbitos diferentes da empresa, como segurança e saúde ocupacional, medicina do trabalho, engenharia e até mesmo decisões de ordem jurídica.

No Brasil a metodologia oficial para o levantamento acústico em áreas industriais está descrita nos Anexos I e II da NR-15 da Portaria 3.214. Segundo descrito em Nudelmann (1997), tanto a metodologia de medições quanto o conteúdo dos dois anexos são resumidos, superficiais e em descompasso com o conhecimento científico acumulado sobre conservação auditiva nas últimas décadas.

4.3.1 Monitoramento Ambiental de Ruído

Quando se faz um monitoramento ambiental objetiva-se:

- Levantar dados para a classificação acústica de unidades operacionais. Utiliza-se a denominação Área Acusticamente Classificada para todas as áreas com nível de ruído acima de 85 dB(A). Para ingresso de qualquer indivíduo em uma área classificada, que deve ser sinalizada ostensiva e padronizadamente, será obrigatório o uso de protetores auditivos individuais;

- Localizar as regiões ou equipamentos mais ruidosos dentro de uma unidade operacional;
- Identificar e caracterizar a influência de eventos intermitentes no campo sonoro da área, como a presença de vazamentos de vapor, intervenções de manutenção ou manobras operacionais específicas;
- Coletar dados básicos para a seleção de protetores auditivos individuais.

Para a realização do monitoramento, é recomendável que as medições de ruído cubram toda a unidade operacional sob investigação, sem preocupação específica em monitorar apenas os postos de trabalho. Para tanto, é conveniente o estabelecimento de uma malha imaginária de pontos cobrindo a área, em cujos encontros são determinadas diversas posições de monitoramento. As dimensões da malha são escolhidas pela precisão a ser alcançada, tipo de arranjo físico e como as curvas de ruído obtidas pelo monitoramento serão montadas. Em arranjos físicos muito congestionados, opta-se por uma malha refinada, aproximadamente 1,5 metros. Para arranjos bem distribuídos, onde se torna fácil identificar cada fonte de ruído, pode-se utilizar malhas de 3,0 metros. No caso de locais pouco ocupados, poucos pontos de medição são suficientes para modelar a área. A malha deve ser feita sobre uma planta de arranjo físico do local, sendo este levado a campo para lançamento dos valores medidos em cada ponto.

Com tal dado em mãos, interpolam-se os valores de nível de pressão sonora medidos e cria-se uma curva de isopressão sonora do local.

4.3.2 Monitoramento Pessoal de Ruído

Quando se faz um monitoramento pessoal objetiva-se:

- Quantificar o nível de pressão sonora que os indivíduos recebem ao longo da jornada de trabalho;
- Coletar dados para a seleção de protetores auditivos individuais;
- Identificar os grupos expostos a risco auditivo;
- Auxiliar no controle e análise de audiometrias alteradas.

Devido à abrangência de aplicação das informações obtidas, o monitoramento pessoal é considerado a medição mais importante no âmbito da saúde ocupacional dos PCAs.

Para a avaliação, é utilizada a “Dose”, sendo este um parâmetro para a caracterização da exposição ocupacional ao ruído, expresso em porcentagem de energia sonora, tendo por referência o valor máximo da energia sonora diária admitida, definida com

base em parâmetros preestabelecidos, como o Critério de Referência (CR), Nível Limiar de Integração (NLI), e o Incremento de Duplicação de Dose (q):

- CR: expressa o nível para o qual a exposição, por um período de 8 horas, corresponderá a uma dose de 100%.

- NLI: expressa o nível a partir do qual os valores devem ser computados na integração para fins de determinação de nível médio ou da dose de exposição.

- q : indica o valor para o qual o aumento do nível de pressão sonora ambiente equivale à duplicação da dose de exposição.

Para a realização do monitoramento pessoal de ruído é necessário identificar o nível de ruído e o tempo de exposição. Para tanto, podem ser utilizados um medidor sonoro com um cronômetro ou um dosímetro.

As medições devem ser feitas em condições operacionais normais ou habituais. Cada condição anormal deve ser avaliada e registrada em relatório específico. O monitoramento durante as paradas de manutenção é altamente recomendado, pois nesta situação podem ser encontrados níveis de ruído bastante elevados e, por vezes, não usuais nas condições normais.

4.3.3 Definição de Grupos Homogêneos de Exposição (GHE)

A demanda por uma adequada estratégia de amostragem evoluiu e se consolidou quando se verificou, de forma crescente, que o simples ato de medir, intuitivamente, não assegurava certeza da situação de exposição. O ato de avaliar representa que se vai obter uma determinação de um dado ambiental, um valor isolado. Estratégia de Amostragem é mais que isso, mais que uma simples medição.

O processo do conhecimento gradativo e adequado da exposição de trabalhadores envolve uma série de considerações, abordagens e planificação de um trabalho, que em seu conjunto, pode ser chamado de estratégia de amostragem. A estratégia de amostragem começa quando se estuda uma população exposta, ou seja, quando se determina quais os expostos, a quais agentes, em quais tarefas ou funções, em quais locais (edificações ou sites operacionais).

A Estratégia de Amostragem é um processo de conhecimento da exposição de trabalhadores, que se inicia com uma adequada abordagem do ambiente (processo, pessoas, tarefas, agentes) e termina com afirmações estatisticamente fundamentadas sobre essa exposição, para que o ciclo da saúde ocupacional possa prosseguir, até o controle dos riscos.

A caracterização básica é um conceito presente em uma publicação da AIHA (American Industrial Hygiene Association). Representa um processo inicial de conhecimento, em saúde ocupacional, que permite a obtenção dos GHE, assim como a estruturação de amostragens representativas dos trabalhadores da empresa. Trata-se de conhecer as 3 dimensões da questão: os ambientes de trabalho, os expostos e os agentes ambientais.

Conhecer o ambiente significa conhecer os processos principais, secundários e complementares, como o de manutenção, com detalhe suficiente para a inferência dos agentes ambientais que podem produzir. Também significa conhecer todos os materiais utilizados nos mesmos, sejam como matéria prima, subprodutos, produtos acabados e rejeitos.

Conhecer os expostos significa apreender todas as funções desempenhadas, as atividades e tarefas realizadas, relacionando-as em termos de exposições ocupacionais aos processos e aos agentes identificados.

Conhecer os agentes significa correlacioná-los às tarefas, processos e expostos, pois é centrado nos agentes que deve ter início o estudo. Também significa conhecer bem os efeitos que podem ser causados, os limites de exposição aplicáveis e as características físico-químicas relevantes.

Deste estudo integrado deve-se definir a unidade de trabalho, que é o GHE, conceito este dado pelo NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health). A AIHA usa o termo "grupos de exposição similar", que é considerado equivalente. Os GHE deverão ser identificados a partir da caracterização básica. Eles são definidos por agente ambiental e por local de trabalho ou sítio operacional (em plantas de processo, por exemplo).

Por definição, o GHE corresponde a um grupo de trabalhadores que experimentam exposição semelhante de forma que o resultado fornecido pela avaliação da exposição de qualquer trabalhador do grupo seja representativo da exposição do restante dos trabalhadores do mesmo grupo.

Os GHE são obtidos a partir da caracterização básica, que é dada pela observação e conhecimento do processo, das atividades e dos agentes, ou seja, das exposições que ocorrem nos ambientes de trabalho. Observando e conhecendo as exposições, pode-se reunir os trabalhadores em grupos que possuem as mesmas características (perfil) de exposição a um dado agente.

Essa "homogeneidade" provém da execução de mesmas rotinas e tarefas pelos seus componentes e, portanto com um mesmo perfil de exposição ambiental, confirmando-se estatisticamente por permitir que o grupo seja representado por uma determinada distribuição

de probabilidades. A definição inicial do GHE é assegurada pela observação e julgamento do profissional de saúde ocupacional em relação ao perfil de exposição ambiental que apresentam seus componentes.

- Pontos básicos para a determinação dos GHE:

- Inicia-se pela função, pois numa mesma função é de se esperar que as atividades sejam essencialmente iguais e, portanto sejam iguais as chances de exposição associada;
- É necessária atenção aos desvios de função, não se fixando no nome do cargo, mas sim no que realmente é feito, do ponto de vista operacional;
- Realizar uma boa entrevista com os trabalhadores e complementá-la com a supervisão, visando conhecer o que se faz e quem faz;
- Ter atenção às nuances que a função tem, se há subgrupos com atividades diferenciadas (serão outros GHE);
- Ter atenção quanto às variantes entre turnos (ambiente, operações e equipamentos podem variar);

Os GHE só fazem sentido numa mesma edificação ou sítio operacional (em áreas de processamento aberto, por exemplo). Não se podem agrupar trabalhadores que estejam lotados em locais diferentes. O GHE se inicia pelo ambiente (edificação ou sítio), e pelo agente. Dentro dessas premissas, buscam-se as funções ou subgrupos cujas atividades tornam a exposição similar.

Um grupo é homogêneo no sentido estatístico, e isso permite que um número relativamente pequeno de amostras possa definir as tendências de exposição de todo o grupo.

A exposição dos trabalhadores não será idêntica, pois quem é homogêneo é o caráter estatístico do grupo, e as variabilidades serão normais dentro dele.

Os GHE são uma expectativa formulada pelo profissional que atua em saúde ocupacional, baseada no seu conhecimento e experiência, dentro de seu julgamento profissional. Mais tarde, no processo de avaliação da exposição dos grupos, isso será validado ou reformulado.

Indivíduos expostos a ruído podem ser monitorados em sua totalidade e analisados como indivíduos ou como parte de um grupo.

O monitoramento de todos os empregados pode ser demorado e oneroso, embora forneça alto padrão de confiabilidade. A análise considerando “indivíduos” perde significado no contexto do PCA, como em outras atividades na área da saúde ocupacional. Já o monitoramento em grupos facilita decisões e análise global do problema, permitindo

abordagens dirigidas para um universo, com a vantagem de diminuir o número de medições necessárias.

Se os empregados forem organizados em grupos homogêneos de exposição, os resultados do monitoramento para um indivíduo dentro do grupo devem representar uma informação confiável para os demais indivíduos do mesmo grupo.

Na caracterização de grupos homogêneos de exposição deve-se considerar:

- A caracterização e definição de grupos utilizados nos demais trabalhos de saúde ocupacional;
- A definição de “empregado exposto a ruído”, conforme descrito nas Diretrizes de Conservação Auditiva da companhia;
- A caracterização do local de trabalho, da força de trabalho, do agente e a definição do grupo.

Em Nudelmann (1997) foi publicada uma recomendação (Tabela 4.1) para estabelecer o tamanho das amostras de monitoramento, com 95% de nível de confiabilidade e topo de 20% de distribuição, considerando N o tamanho do grupo e n o número de amostras necessárias.

Tabela 4.1 – Tamanho das Amostras (n) de acordo com o tamanho do grupo analisado (N).

N	≤6	7 - 8	9 - 11	12 - 14	15 - 18	19 - 26	27 - 43	44 - 50	≥51
n	N=n	6	7	8	9	10	11	12	14

4.3.4 Caracterização e Determinação do Exposto de Maior Risco (EMR)

O conceito de Exposto de Maior Risco (EMR) é importante para a otimização de ações de Estratégia de Amostragem. Grupos Homogêneos inteiros podem ser caracterizados a partir da avaliação da exposição do EMR, sob circunstâncias adequadas.

- Definição: Exposto de Maior Risco, ou EMR, é o trabalhador de um grupo homogêneo de exposição (GHE) que é julgado como possuidor da maior exposição relativa em seu grupo. O entendimento de “mais exposto” do grupo é dado no sentido qualitativo.
- Caracterização e Determinação:
 - Por julgamento profissional: O EMR será determinado por possuir uma ou mais das seguintes características, que lhe conferem o maior potencial de exposição: exercer

suas atividades mais próximas da fonte do agente; exercer suas atividades em região do ambiente onde ocorre maior concentração ou intensidade aparente do agente; exercer suas atividades de maneira a se expor por mais tempo ao agente; exercer as rotinas operacionais (*modus operandi*) de forma a se expor mais ao agente. A determinação será feita por observação de campo, sendo importante o conhecimento acurado das operações e atividades, assim como a experiência e o conhecimento do profissional relativamente ao agente e à forma de exposição.

- Por ferramenta estatística: Seguir o método descrito no Manual de Estratégia de Amostragem do NIOSH.

4.3.5 Conceito e uso do Nível de Ação (NA)

Este conceito é definido na NR-9. O nível de ação de um agente ambiental, segundo a NR-9, é um valor de 50% do seu limite de exposição por jornada de trabalho.

O nível de ação é um valor referencial, a partir do qual certas ações devem ser tomadas, num programa de saúde ocupacional, por essa razão há ações específicas previstas na norma regulamentadora, ao ser excedido o valor do NA.

No Manual de Estratégia de Amostragem do NIOSH, o conceito original resultou da seguinte questão: como fazer afirmações sobre as exposições experimentadas ao longo dos dias por um GHE, a partir de uma dada determinação da exposição de um integrante do grupo, em um dia típico?

Para responder isso, os estatísticos assumiram certas premissas para a distribuição estatística que se ajusta às exposições inter-dias (ao longo dos dias) de um grupo homogêneo, considerada como uma distribuição lognormal, e sua variabilidade, expressa pelo desvio padrão geométrico da mesma, o qual foi fixado em 1,22.

Também foi pré-definido o coeficiente de variação dos métodos de medição da exposição, que exprime sua precisão (variabilidade dos procedimentos e instrumentos), em 0,1 (10%). A partir daí, resultou um nível de ação de 0,5 com um significado bem específico, ou seja:

“Se o nível de ação for excedido em um dia típico, existe uma probabilidade maior que 5% de que o limite de exposição será excedido em outros dias de trabalho”.

Colocando o conceito de outra forma, pode-se dizer:

“Se o nível de ação for respeitado em um dia típico, existe uma probabilidade maior que 95% de que o limite de exposição será respeitado, em outros dias de trabalho”.

O teste estatístico em si tem um nível de confiança de 95%.

GHE com NA excedido devem ser estudados até um conhecimento, com adequado detalhe, de sua exposição.

GHE com NA respeitado, podem ser considerados como de exposição preliminarmente tolerável, pois não implicam em excedência do limite de exposição segundo as premissas do teste e dos critérios estatísticos habituais (95% de probabilidade de atendimento da premissa, com 95% de confiança). É a forma estatística de se dizer que o limite de exposição está sendo respeitado.

Se os condicionantes do teste forem todos atendidos (avaliação de um dia típico de trabalho, desvio padrão geométrico e coeficiente e variação dentro dos valores citados), então esse GHE não é preliminarmente relevante para as prioridades da saúde ocupacional, podendo sua exposição ser revisada periodicamente a intervalos de até 3 anos ou antes, ou ainda, se houver mudanças no processo, procedimentos ou produtos em uso, índices biológicos de exposição excedidos ou outras evidências de sobre-exposição.

Se um particular GHE for representado por uma distribuição lognormal com desvio padrão geométrico maior que 1,22 deve-se corrigir o valor do NA conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Tabela de ajuste do Nível de Ação segundo o Desvio Padrão Geométrico da distribuição de probabilidades de exposição.

Desvio Padrão Geométrico	Nível de Ação
1,22	0,5
1,45	0,3
2,00	0,1

4.3.6 Tipos de Amostras de Agentes Ambientais

- Amostras pessoais ou individuais: São amostras tomadas de maneira que o amostrador é portado pelo indivíduo amostrado, e situado na zona corporal de interesse (por exemplo, zona auditiva ou zona respiratória).
 - Aplicabilidade: tipo preferível para amostragem de exposição ocupacional, por sua adequada representatividade da exposição experimentada pelo indivíduo ao longo do intervalo amostrado.
 - Limitações: apenas estritas aos aspectos de recursos instrumentais disponíveis e econômicos da amostragem.

- Amostras de Zona Corporal de Interesse: são amostras tomadas por um terceiro, que mantém o amostrador na zona corporal de interesse (por exemplo, auditiva, respiratória).
 - Aplicabilidade: tipo aceitável para amostragem de exposição ocupacional, podendo representar adequadamente a exposição experimentada pelo indivíduo, respeitadas as limitações amostrais e a análise estatística aplicável.
 - Limitações: são amostras limitadas a funções ou tarefas de pouca movimentação em área fisicamente restrita, durante a tomada de cada amostra. Considerar seu uso nos casos de dificuldade de aplicação de amostras pessoais.
- Amostras de Área: São amostras tomadas em pontos fixos da área de trabalho, não vinculadas ao trabalhador.
 - Aplicabilidade: tipo não aceitável para amostragem de exposição ocupacional. Amostras de área não guardam relação específica com a exposição dos trabalhadores; não é permitida nenhuma inferência sobre a exposição de pessoas a partir de amostras de área. A aplicabilidade está restrita ao controle da emissão de processos, situações de emergência.
 - Limitações: absoluta inadequação para exposições de pessoas.
 - Observação: As considerações deste item não se aplicam ao Anexo 13A da NR-15.

4.3.7 Formas Amostrais em Saúde Ocupacional e sua Utilização Segundo o Tipo de Limite de Exposição

Estas formas amostrais se referem a determinações (amostras) feitas ao longo de uma jornada, e o seu tratamento de cálculo fornecerá “uma amostra” da exposição diária do trabalhador.

Amostra única de período completo: Esta amostra é tomada sobre toda a base de tempo do limite de exposição. A base de tempo do limite de exposição é dependente do tipo de limite. Esta forma amostral é a segunda melhor forma do ponto de vista estatístico, para decisões sobre a exposição de uma jornada.

Amostras Consecutivas de Período Completo: Esta forma amostral utiliza várias amostras, sendo que o tempo total das mesmas equivale à base de tempo do limite. As amostras não se superpõem no tempo, nem há qualquer período da base de tempo que não seja amostrado, ou seja, as amostras são consecutivas e justapostas. As amostras não necessitam

ter a mesma duração. Esta forma amostral é a de melhor benefício do ponto de vista estatístico, para decisão sobre a exposição de uma jornada.

Amostras de Período Parcial: Consistem em uma ou mais amostras que não cobrem integralmente a base de tempo do limite. Esta forma amostral é muito limitada do ponto de vista estatístico, não sendo recomendada, a menos que o profissional de saúde possa assegurar, pelo conhecimento das atividades e do processo e pelo acompanhamento feito durante a amostragem, que o período não amostrado é essencialmente igual ao amostrado do ponto de vista da exposição ao agente. Neste caso, o valor médio ponderado no tempo do período amostrado pode ser considerado o valor médio ponderado para a jornada, e a amostra passa a ser, do ponto de vista estatístico, como uma amostra de período completo. No caso do ruído, a dose pode ser extrapolada através de regra de três simples, ou por recurso do próprio instrumento, para o período completo; o profissional de saúde possa assegurar, pelas mesmas razões supracitadas, que a exposição ocupacional no período não amostrado, foi nula (exposição zero). Nesse caso, o valor médio ponderado no tempo para a jornada deve ser calculado considerando-se o tempo não amostrado como de exposição zero. No caso do ruído, a dose da jornada será representada pela dose da amostra. Se as condições não forem atendidas, não há tratamento estatístico adequado para a decisão sobre a exposição da jornada, sendo recomendável outra forma amostral.

Amostras pontuais de curta duração – *grab samples*: Esta forma amostral consiste de várias amostras, de duração breve (de alguns segundos a vários minutos), aleatórias quanto ao momento da realização de cada amostra, distribuídas pela jornada de trabalho. Cada amostra é considerada uma determinação. A duração da amostra não interfere na precisão da decisão estatística, bastando que haja amostra suficiente para o processamento analítico. Medidores de leitura direta podem ser utilizados, sendo cada leitura uma amostra. Esta forma amostral é a de menor poder de decisão estatístico. Para se obter benefício estatístico desta forma amostral, recomenda-se tomar pelo menos 9 a 11 amostras durante a jornada, até um máximo sugerido de 25. A partir das mesmas, obter-se-á a exposição média dessa jornada de trabalho.

4.3.8 Limites de Exposição Tipo Valor Máximo, Valor Teto

As amostras deverão ser tão curtas quanto exequível do ponto de vista analítico, ou tomadas por instrumentos de leitura direta. Devem ainda ser tomadas nos momentos de máxima exposição esperada.

Se for necessário cobrir um intervalo de tempo onde se espera uma máxima exposição, devem ser tomadas tantas amostras quantas necessárias, com a menor duração exequível, cobrindo tal intervalo. O procedimento pode ser descontinuado quando qualquer amostra exceder o LE. (valor máximo ou valor teto).

A amostra de maior valor obtido é que deve ser comparada com o LE. Não são calculadas médias das amostras obtidas.

Se todos os momentos com máximos esperados foram amostrados, e nenhuma amostra excedeu o LE, realizar análise estatística sobre o maior valor. Se não foram amostrados todos os momentos de máximos esperados, também é possível uma análise estatística. Para a verificação de conformidade ou excedência com o Limite de Exposição, deve ser feita uma análise estatística dos dados.

4.3.9 Nota Sobre Avaliações (Amostragens) de Situações de “Pior Caso”

Deve ser respeitada a seguinte orientação, tendo-se em vista avaliações de situações de pior caso:

- O uso de exposições de pior caso é a base para a avaliação do EMR (exposto de maior risco), como primeira informação a respeito de um GHE;
- O uso de exposições de pior caso também é a forma de abordar a verificação de limites do tipo “que não pode ser excedido em nenhum momento da jornada”;
- Não devem ser realizadas amostras de pior caso como forma de verificação de limites tipo média ponderada no tempo, pois, neste caso, ou as amostras (uma ou mais) cobrem toda a jornada, ou são do tipo parcial, que podem eventualmente ser estendidas para toda a jornada, ou são do tipo “amostras pontuais de curta duração”, as quais deverão ser, necessariamente, aleatórias.

4.3.10 Análise Estatística Para Limites de Exposição Tipo Média Ponderada

Exposição do EMR: Como se trata de um dia típico, é uma análise sobre uma jornada.

Dados do GHE (diferentes jornadas): A análise estatística deve ser realizada com o ajuste de uma distribuição estatística que melhor se conforme aos dados.

Devem ser obtidos os seguintes parâmetros da distribuição, para uso nos processos de decisão:

- Média geométrica;

- Desvio Padrão Geométrico;
- Probabilidade de Atendimento ao Limite de Exposição.

A obtenção dos dados pode ser feita através de cálculos ou de papéis probabilísticos, ou ainda através de softwares dedicados para saúde ocupacional. Recomenda-se o uso de papéis probabilísticos ou planilhas gráficas, de forma a se verificar anomalias na distribuição, que possam sugerir:

- Se há dados que não se referem a dias típicos;
- Se há dados que não se referem aos componentes do GHE;
- Se os dados sugerem que não se trata de um GHE, devendo ser o mesmo fracionado (revisão do reconhecimento de campo).

O ajuste da distribuição também pode ser validado por testes estatísticos como o *W – test* da planilha eletrônica da AIHA (parte da publicação da AIHA sobre estratégia de amostragem).

4.3.11 Análise Estatística de uma Jornada

Este item se refere à obtenção da exposição média da jornada, para fins da verificação do EMR (exposto de maior risco), basta o cálculo da média amostral.

Para uma análise de conformidade de uma particular jornada, para outros fins de verificação (apoio legal, auditoria), recomenda-se usar limites de confiança definidos segundo a forma amostral. Referir-se ao Manual do NIOSH.

4.3.12 Verificação de Limites de Exposição Tipo Valor Máximo, Valor Teto ou TLV-C (ACGIH) Aspectos Gerais e Análise Estatística

As amostras deverão ser tão curtas quanto exequível do ponto de vista analítico, ou tomadas por instrumentos de leitura direta, podendo incluir monitoramento contínuo no período de avaliação. As amostras devem ser tomadas nos momentos de máxima exposição esperada.

Da mesma forma como exposto no item 4.3.8, se for necessário cobrir um intervalo de tempo onde se espera uma máxima exposição, devem ser tomadas tantas amostras quantas necessárias, com a menor duração exequível, cobrindo tal intervalo.

O procedimento pode ser finalizado quando qualquer amostra exceder o LE. A amostra de maior valor obtido é a que deve ser comparada com o LE. Se todos os momentos

com máximos esperados foram amostrados, e nenhuma amostra excedeu o LE, realizar análise estatística sobre o maior valor. Ver item a seguir.

Se não foram amostrados todos os momentos de máximos esperados, também é possível uma análise estatística, levando em conta os momentos amostrados e não amostrados.

4.3.13 Abordagem para o Ruído em Termos de Análise Estatística de Dados Ambientais

O ruído é um agente ambiental como qualquer outro, mas possui uma diferença importante: a grandeza básica, a pressão sonora, está expressa em dB, que é uma transformação logarítmica. Dessa forma, o uso do dB como parâmetro para uma análise estatística pode ficar complicado por essa transformação. Essa limitação é superada pela consideração de que a verdadeira expressão do limite de exposição ao ruído é dada pela dose recebida.

Quando se trabalha com amostras pontuais de curta duração (*grab-samples*), estas serão efetivamente níveis de pressão sonora, mas nesse caso usa-se um artifício: calcula-se a dose diária provocada pelo nível (se a exposição ao mesmo durasse 8 horas). Feita essa transformação, as aplicações podem ser feitas sem dificuldades. Deve-se rejeitar amostras com níveis inferiores a 80 dBA, que seria o limiar de integração da dose, se esta fosse realizada instrumentalmente.

4.3.14 Tipos de Limites de Exposição Aplicáveis em Saúde Ocupacional

Base de Tempo do Limite de Exposição (LE): período sobre o qual um LE Tipo Média Ponderada é verificado. A base de tempo de verificação depende do agente ambiental e do tipo de LE.

Limite de Exposição Tipo Média Ponderada no Tempo (LE-MP): para verificação deste LE, são permissíveis valores de exposição variáveis ao longo da base de tempo, tanto acima quanto abaixo do valor fixado. A exposição média ponderada no tempo deve respeitar o LE-MP.

Um agente com LE-MP só pode ser considerado respeitado, quando o seu Valor Máximo associado (VM) também for respeitado, no caso da Legislação Brasileira, assim como o seu limite suplementar associado STEL, no caso da ACGIH.

Os LE na Legislação Brasileira são denominados Limites de Tolerância, e o LE-MP é baseado em semanas de 48 horas.

- Limite de Exposição Tipo TWA (time weighted average): a concentração média ponderada pelo tempo para uma jornada normal de 8 horas diárias e 40 horas semanais, à qual a maioria dos trabalhadores pode estar repetidamente exposta, dia após dia, sem sofrer efeitos adversos à saúde.
- Limite de Exposição Tipo Valor Teto (LE-TETO): para este LE não são permissíveis exposições acima do valor fixado em nenhum momento da jornada de trabalho. Na ACGIH, o conceito correspondente é o do limite de exposição valor teto, sendo este a concentração que não pode ser excedida durante nenhum momento da exposição do trabalhador.
- Valor Máximo (VM) de um LE-MP (apenas no Brasil): valor associado a um LE-MP, conforme definido no Anexo 11 da NR 15, o qual não pode ser excedido em nenhum momento da jornada de trabalho. O VM só existe associado ao respectivo LE-MP.
- Limite de Exposição tipo STEL (Short Term Exposure Level - ACGIH): Limite de exposição suplementar, tipo média ponderada no tempo, associado a um LE-MP tipo TWA (ACGIH) com as características que seguem: A base de tempo do STEL é de 15 minutos; concentração a que os trabalhadores podem estar expostos, de forma cotidiana, por um período curto de tempo, mas cuidando-se para que o limite de exposição - média ponderada (TLV - TWA) não seja ultrapassado, de modo que o trabalhador não venha a sofrer irritação, lesão tissular crônica ou irreversível, narcose em grau suficiente para aumentar a predisposição a acidentes, impedir auto-salvamento ou reduzir significativamente a eficiência no trabalho.

O STEL não é um limite de exposição independente, mas sim um limite suplementar ao limite de exposição média ponderada, nos casos em que são reconhecidos efeitos tóxicos agudos para substâncias cujos efeitos tóxicos são primordialmente de natureza crônica. Os STEL's são recomendados apenas nos casos em que já foram relatados efeitos tóxicos em seres humanos ou animais como resultado de exposições elevadas em curtos períodos

Um STEL é definido como uma exposição média ponderada pelo tempo durante 15 minutos, que não pode ser excedida em nenhum momento da jornada de trabalho, mesmo que a concentração média ponderada para 8 horas esteja dentro dos limites de exposição - média ponderada. Exposições acima do TLV-TWA, mas abaixo do STEL, não podem ter duração superior a 15 minutos, nem se repetir mais de 4 vezes ao dia. Deve existir um intervalo mínimo de 60 minutos entre as exposições sucessivas nesta faixa. Pode-se recomendar um

período médio, diferente dos 15 minutos, desde que garantido por observação dos efeitos biológicos.

4.3.15 Monitoramento de Grupos Expostos a Ruído de Impacto

De acordo com a NR-15, ruído de impacto é aquele que apresenta picos de energia acústica de duração inferior a 1 segundo, a intervalos superiores a 1 segundo. Para avaliação do campo acústico nesta condição, a NR estabelece que os níveis de ruído de impacto deverão ser avaliados em dB, com o medidor operando no circuito linear e circuito de resposta para impacto, nos intervalos entre os picos o ruído deverá ser avaliado como ruído contínuo. Em caso de não se dispor de medidor de nível de pressão sonora com circuito de resposta para impacto, será válida a leitura no circuito de resposta rápida e circuito de compensação C.

A orientação da diretiva da Comunidade Européia para ruído ocupacional estabelece que a exposição deva ser limitada em L_{EX} 85 dB(A) e 200 Pa, ou 140 dB Pico. Recomenda-se a utilização deste padrão para as análises no âmbito da saúde ocupacional do PCA. Para as questões de ordem legal, seguir o estipulado pela NR.

No monitoramento de ruído de grupos expostos a ruído de impacto impulsivo, verificar a adequabilidade da instrumentação para esta finalidade.

CAPÍTULO V

Fundamentos Teóricos

5.1 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA's) foram desenvolvidas na década de 40, pelo neurologista McCulloch e pelo matemático Walter Pitts (1943), os quais fizeram uma analogia entre os neurônios do cérebro e o processo eletrônico (Fig 5.1).

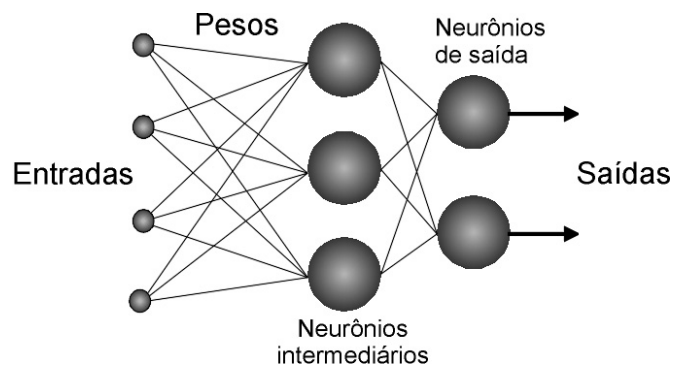


Figura 5.1. Esquema de uma rede neural artificial (Tafner, 1998).

O final da década de 80 marcou o ressurgimento da área das RNA's, também conhecida como connexionismo ou sistemas de processamento paralelo e distribuído. Esta forma de computação não algorítmica é caracterizada por sistemas que, em algum nível, relembram a estrutura do cérebro humano (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

As RNA's são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples (nodos) que computam determinadas funções matemáticas (normalmente não-lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e

interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede. O funcionamento dessas redes é baseado em uma estrutura física concebida pela natureza: o cérebro humano (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

Em RNA's, o procedimento usual na solução de problemas passa inicialmente por uma fase de aprendizagem, onde um conjunto de exemplos é apresentado para a rede, a qual extrai automaticamente as características necessárias para representar a informação fornecida. Essas características são utilizadas posteriormente para gerar respostas para o problema (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

Segundo Braga, Carvalho e Ludermir (1998), a capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar a informação aprendida são, sem dúvida, os atrativos principais da solução de problemas através das RNA's. Não obstante, estas são capazes de atuar como mapeadores universais de funções multi variáveis, com custo computacional que cresce apenas linearmente com o número de variáveis. Outras características importantes são a capacidade de auto-organização e de processamento temporal que fazem das redes neurais uma ferramenta computacional extremamente poderosa e atrativa para a solução de problemas complexos.

5.1.1 Redes Biológicas

O cérebro humano é responsável pelo que se chama de emoção, pensamento, percepção e cognição, assim como pela execução de funções senso motoras e autônomas. Além disso, sua rede de nodos tem a capacidade de reconhecer padrões e relacioná-los, usar e armazenar conhecimento por experiência, além de interpretar observações. Apesar do estudo contínuo, não se sabe ao certo a forma como as funções cerebrais são realizadas, utilizando-se até o momento, apenas modelos. No entanto, a estrutura fisiológica básica destas redes de nodos naturais é conhecida e é exatamente nesta estrutura fisiológica que se baseiam as RNA's. Essas tentam reproduzir as funções das redes biológicas, buscando implementar seu comportamento básico e sua dinâmica (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

5.1.1.1 Neurônios Biológicos

O neurônio biológico é a unidade celular fundamental do sistema nervoso do cérebro humano. Os nodos são divididos em três seções: o corpo da célula, os dendritos e o axônio,

cada um com funções específicas, porém complementares. Os dendritos têm por função receber as informações, impulsos nervosos, oriundas de outros nodos e conduzi-las até o corpo celular. Ali, a informação é processada e novos impulsos são gerados. Estes impulsos são transmitidos a outros nodos, passando através do axônio até os dendritos dos nodos seguintes (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

Uma vez captado o estímulo nas terminações nervosas, ele é transmitido em um impulso elétrico. Esse potencial em ação (impulso) percorre o axônio e atinge outras células. Os neurônios proporcionam um fluxo preciso das informações. Um forte (fraco) potencial em ação entre os contatos sinápticos, que ocorrem no núcleo ou soma de um neurônio, estimula um fluido neurotransmissor a produzir uma carga elétrica que acelera (retarda) o fluxo das informações a outros dendritos de milhares de neurônios. Quando existem fortes combinações sinápticas, diz-se que as condutâncias ou impedâncias das cargas elétricas estão ajustadas, o que permite ao cérebro aprender e armazenar as informações processadas (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

5.1.2 Neurônios Artificiais

McCulloch e Pitts (1943) desenvolveram um modelo matemático análogo ao neurônio biológico, denominado neurônio artificial McCulloch-Pitts (modelo MCP), que possui múltiplas entradas ($x_1, x_2, \dots, x_n$) e uma única saída (y), onde cada uma das entradas possui um peso associado ($w_1, w_2, \dots, w_n$).

O neurônio artificial possui duas fases de processamento. Na primeira fase, calcula-se o somatório do produto das entradas pelos pesos associados. Na segunda fase, é atribuída uma função não linear, chamada de função de ativação, a qual é aplicada ao somatório resultante da primeira fase. A Fig. 5.2 mostra o neurônio de McCulloch e Pitts.

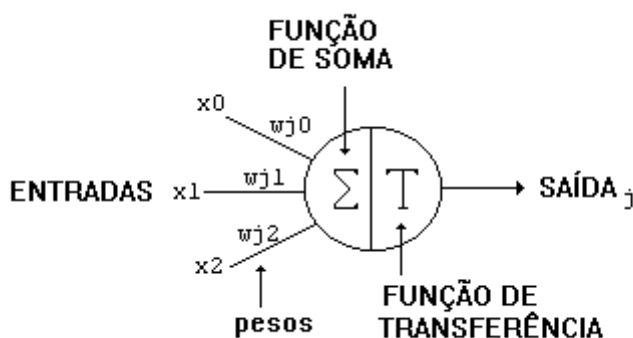


Figura 5.2. Neurônio artificial (Tafner, 1998).

Na descrição original do modelo MCP, a função de ativação é dada pela função de limiar descrita na Eq. (5.1). O nodo MCP terá então sua saída ativa quando:

$$\sum_{i=1}^n x_i w_{ji} \geq T \quad (5.1)$$

onde:

- n é o número de entradas do neurônio;
- x_i são as entradas do neurônio;
- w_{ji} é o peso associado à entrada;
- T é o limiar do neurônio.

5.1.3 Funções de Ativação

A partir do modelo proposto por McCulloch e Pitts foram derivados vários outros modelos que permitem a produção de uma saída qualquer, não necessariamente zero ou um, e com diferentes funções de ativação processadas (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998). Em nível de exemplo, a Fig. 5.3 representa graficamente quatro funções de ativação diferentes, sendo elas: função linear, função rampa, função degrau (*step*) e função sigmoidal.

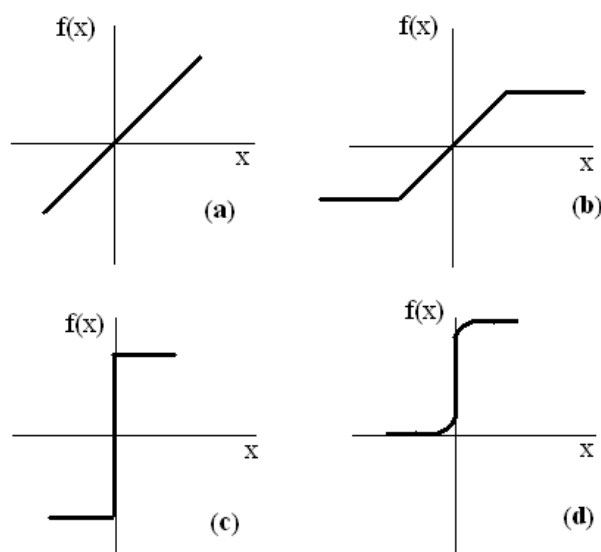


Figura 5.3. Algumas Funções de Ativação utilizadas em redes neurais artificiais (Braga; Carvalho; Ludermir (1998), apud Meola (2005)).

A função de ativação linear na Fig. 5.3a é definida pela Eq. (5.2).

$$y = \alpha x \quad (5.2)$$

onde:

- α é um número real que define a saída linear para os valores de entrada;
- y é a saída;
- x é a entrada.

A função linear pode ser restringida para produzir valores constantes em uma faixa $[-\gamma, +\gamma]$.

Neste caso a função passa a ser a função rampa como mostrada graficamente na Fig. 5.3b e definida pela Eq. (5.3).

$$y = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x \geq +\gamma \\ x & \text{se } |x| < +\gamma \\ -\gamma & \text{se } x \leq -\gamma \end{cases} \quad (5.3)$$

Os valores máximo e mínimo da saída são $+\gamma$ e $-\gamma$, respectivamente. A função rampa é geralmente usada como uma função não linear simplificada.

A função degrau, apresentada na Fig. 5.3c produz a saída $+\gamma$ para os valores de x maiores que zero, caso contrário a função produz o valor $-\gamma$. A função degrau é definida pela Eq. (5.4).

$$y = \begin{cases} +\gamma & \text{se } x > 0 \\ -\gamma & \text{se } x \leq 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

A função sigmoidal, conhecida também como *S-shape*, mostrada na Fig. 5.3d, é uma função semilinear, limitada e monotônica. É possível definir várias funções sigmoidais. Uma das mais importantes delas é a função logística representada pela Eq. (5.5).

$$y = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-x}{T_{sig}}\right)} \quad (5.5)$$

onde o parâmetro T_{sig} determina a suavidade da curva.

5.1.4 Arquitetura das Redes Neurais

Segundo Teixeira (2001), uma rede neural consiste em um sistema de processamento de dados, com muitos neurônios artificiais interconectados e organizados em sequências de camadas. Este arranjo entre camadas de neurônios configura a arquitetura de uma rede neural artificial, inspirado na estrutura cerebral do córtex. As camadas de uma rede são interconectadas através de parâmetros internos denominados pesos (w). A camada de entrada somente apresenta os dados à rede neural, não tendo neurônios de processamentos e a camada de saída resulta nos valores de saída da rede. As outras camadas são chamadas de intermediárias ou ocultas. A Fig. 5.4 representa uma rede cuja arquitetura é composta por uma camada de entrada com dois neurônios, uma de saída com um neurônio e uma oculta com quatro neurônios.

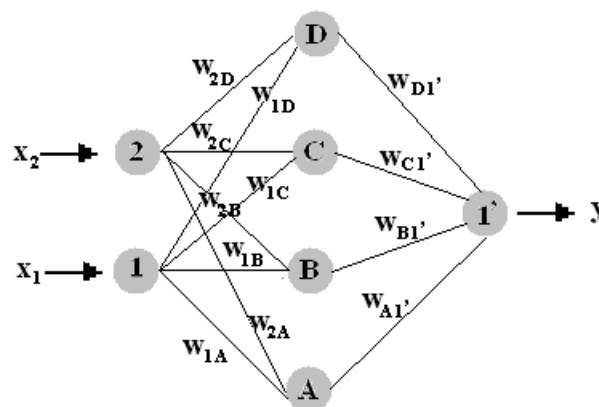


Figura 5.4. Arquitetura típica de redes neurais artificiais (Braga; Carvalho; Ludermir (1998), apud Meola (2005)).

5.1.4.1 Nós de Conexão Tipo Feedforward

Quando a rede neural não apresenta em sua arquitetura interconexões entre os neurônios de uma mesma camada ou interconexão de realimentação com neurônios de camadas anteriores, e é caracterizada por um fluxo unidirecional, recebe o nome de rede

neural *feedforward*. Neste caso, o vetor de entradas é aplicado à camada de entrada e as funções de ativação são rapidamente calculadas, com o processo fluindo, posteriormente, da camada de entrada para a oculta e desta para a camada de saída. Tal arquitetura pode ser verificada na Fig. 5.5.

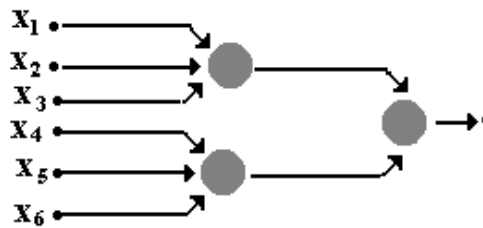


Figura 5.5. Exemplo de arquitetura da rede neural *feedforward* (Braga; Carvalho; Ludermir (1998), apud Meola (2005)).

5.1.4.2. Nós de Conexão Tipo Feedback

Quando a rede neural apresenta arquitetura com conexões de realimentações, tanto entre neurônios de uma mesma camada como entre neurônios de camadas anteriores, recebe o nome de *feedback*. O processo de obtenção das operações matemáticas para saídas é mais complexo, porém após o treinamento as saídas são calculadas instantaneamente. Uma rede realimentada é chamada de recorrente, cujo exemplo está ilustrado na Fig. 5.6. São exemplos de redes recorrentes as redes de Hopfield (1982) e Kohonen (1984), as quais apresentam uma realimentação após a propagação, o que favorece o treinamento. Deste modo, a rede é treinada com propagações e realimentações, até que haja um equilíbrio entre as entradas, os pesos e as saídas ou algum critério de convergência seja atingido.

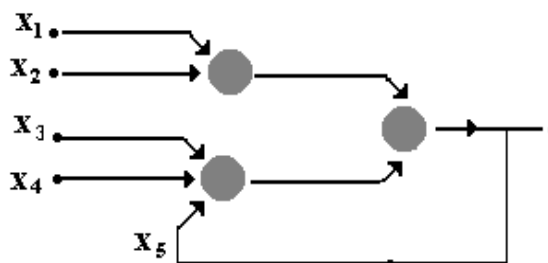


Figura 5.6. Exemplo de arquitetura da rede neural *feedback* (Braga; Carvalho; Ludermir (1998), apud Meola (2005)).

5.1.5 Aprendizado das Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais possuem a capacidade de aprender por exemplos e fazer interpolações e extrapolações do que aprendem. Um conjunto de procedimentos bem definidos para adaptar os parâmetros de uma RNA para que a mesma possa aprender uma determinada função é chamado de algoritmo de aprendizado. O que se tem é um conjunto de ferramentas representadas por diversos algoritmos, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Esses algoritmos basicamente diferem pela maneira através da qual o ajuste dos pesos é feito (Braga; Carvalho; Ludemir, 2000).

A etapa de aprendizagem consiste em um processo iterativo de ajuste de parâmetros da rede, também conhecidos como os pesos das conexões entre as unidades de processamento que guardam, ao final do processo, o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente em que está operando (Braga; Carvalho; Ludemir, 2000).

Diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos, podendo estes ser agrupados em dois paradigmas principais: Aprendizado Supervisionado e Aprendizado Não Supervisionado. Outros dois paradigmas bastante conhecidos são os de Aprendizado por Reforço e Aprendizado por Competição (Braga; Carvalho; Ludemir, 2000).

5.1.5.1 Aprendizado Supervisionado

Segundo Braga, Carvalho e Ludermir (2000), este método de aprendizado é supervisionado porque a entrada e saída desejadas para a rede são fornecidas por um supervisor (professor) externo. O objetivo é ajustar os parâmetros da rede, de forma a encontrar uma ligação entre os pares de entrada e saída fornecidos. O professor indica explicitamente um comportamento bom ou ruim para a rede, visando direcionar o processo de treinamento. A rede tem uma saída corrente (calculada) comparada com a saída desejada, recebendo informações do supervisor sobre o erro da resposta atual. A cada padrão de entrada submetido à rede, compara-se a resposta desejada com a resposta calculada, e ajustando-se os pesos das conexões para minimizar o erro. A minimização da diferença é incremental, já que pequenos ajustes são feitos nos pesos à cada etapa de treinamento, de tal forma que estes caminhem, se possível, para uma solução. A soma dos erros médios quadráticos de todas as saídas é normalmente utilizada com medida de desempenho da rede e também como função de custo a ser minimizada pelo algoritmo de treinamento.

A desvantagem do aprendizado supervisionado é que, na ausência do professor, a rede não conseguirá aprender novas estratégias para situações não cobertas pelos exemplos do

treinamento da rede. Os exemplos mais conhecidos de algoritmos para aprendizado supervisionado são a regra delta e a sua generalização para redes de múltiplas camadas, o algoritmo *backpropagation* (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

Segundo Miranda (2002), esse aprendizado pode ser implementado basicamente de duas formas: *off-line* e *on-line*. Para aquela, os dados do conjunto de treinamento não mudam, sendo que uma vez obtida uma solução para a rede, esta deve permanecer fixa. Caso novos dados sejam adicionados ao conjunto de treinamento, novo treinamento, envolvendo também os dados anteriores, deve ser realizado para se evitar inferência no treinamento anterior. Por sua vez, no aprendizado *on-line*, o conjunto de dados muda continuamente, sendo que a rede deve estar em contínuo processo de adaptação.

5.1.5.2 *Aprendizado Não Supervisionado*

Neste aprendizado, como o próprio nome sugere, não há um professor ou supervisor para acompanhar o processo de aprendizado. Para esses algoritmos, somente os padrões de entrada estão disponíveis para a rede, ao contrário do supervisionado, cujo conjunto de treinamento possui pares de entrada e saída. A partir do momento em que a rede estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada de dados, desenvolve-se nela uma habilidade de formar representações internas para codificar características da entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente. Este tipo de aprendizado só é possível se houver redundância nos dados de entrada, pois, caso contrário, seria impossível encontrar quaisquer padrões ou características dos dados de entrada (Braga; Carvalho; Ludermir, 2000).

O Aprendizado Hebbiano, o Modelo de Linsker, a Regra de Oja e a Regra de Yuille são exemplos de aprendizado não supervisionado, os quais não serão detalhados neste trabalho, uma vez que não foram utilizados como ferramentas de análise (Braga; Carvalho; Ludermir, 1998).

5.1.5.3 *Aprendizado por Reforço*

No aprendizado por reforço, o qual é um caso particular de aprendizado supervisionado, a única informação de realimentação fornecida à rede é se uma determinada saída está correta ou não, isto é, não é fornecida à rede a resposta correta para o padrão de entrada (Braga; Carvalho; Ludermir, 2000).

Este aprendizado é uma forma de aprendizado on-line obtido por um mapeamento de entrada-saída através de um processo de triagem e erro desenvolvido para maximizar o índice de desempenho escalar chamado de sinal de reforço.

Segundo Braga, Carvalho e Ludermir (2000), o paradigma de aprendizagem por reforço pode ter:

- Aprendizagem Associativa: o meio fornece outras informações além do reforço e um mapeamento, na forma estímulo-ação, deve ser aprendido.
- Aprendizagem Não Associativa: o sinal de reforço é a única entrada que o sistema recebe do meio. O sistema seleciona uma única ação ótima, ao invés de associar diferentes ações com diferentes estímulos.

5.1.6 Rede Neural Probabilística (RNP)

Apesar dos vários modelos de redes neurais artificiais existentes, neste trabalho será apresentada apenas a Rede Neural Probabilística, pois foi esta a ferramenta utilizada para o desenvolvimento do procedimento de estimativa de tempo de permanência do operador na planta. A escolha da RNP é explicada pela necessidade de se obter a probabilidade de uma pessoa estar em determinado local de uma área pré-definida tendo como dados de entrada para o treinamento da rede uma matriz contendo as coordenadas de todos os pontos pertencentes à área estudada e uma matriz da trajetória dentro da planta, contendo as coordenadas da rota e o tempo de permanência em cada ponto (Meola, 2005).

O algoritmo padrão para as Redes RNP foi baseado na teoria dos Classificadores Bayesianos (desenvolvido nos anos 50) e descrito por Meisel (1972). Este algoritmo leva em consideração a probabilidade relativa dos eventos ocorridos e usa esta informação para predição. As RNP também utilizam os conceitos de Estimadores Parzen, que foram desenvolvidos para construir as funções densidade de probabilidade requeridas pela teoria Bayesiana (Masters, 1995).

Apesar de ser uma ferramenta extremamente poderosa, o algoritmo permaneceu no esquecimento em função das exigências de elevado processamento computacional. Entretanto, Specht (1990) mostrou que o algoritmo poderia ser implementado na forma de rede neural, bastando para isso, que fosse dividido em vários componentes individuais (neurônios ou processadores) para operação em paralelo. É esta capacidade de operação em paralelo que permite a associação do algoritmo de Meisel (1972) à uma rede neural, pois a grosso modo, as RNP operam segundo conceitos consolidados da estatística tradicional (Masters, 1995).

A RNP é intrinsecamente um algoritmo projetado para executar tarefas de classificação, sendo treinada para avaliar amostras desconhecidas e associá-las com uma determinada classe do conjunto de treinamento (Meola, 2005).

As redes neurais diretas com múltiplas camadas também são excelentes classificadoras. De qualquer forma apresentam dois problemas: o primeiro é o desconhecimento da forma de operação e o comportamento esperado do mesmo. O segundo e mais sério, é a velocidade de treinamento da rede, a qual pode ser extremamente baixa. Por outro lado, as RNP têm um modelamento matemático consolidado, são treinadas rapidamente e classificam significativamente bem, comparadas com as redes diretas de múltiplas camadas (Masters 1995).

As principais desvantagens das redes probabilísticas são a relativa lentidão para classificar e a exigência de grande quantidade de memória computacional. No entanto, uma RNP pode ser implementada através de vários processadores, facilitando o processamento pela máquina (Meola, 2005).

5.1.7. Método de Classificação de Bayes

A rede neural probabilística tem como base o método estatístico de Bayes, o qual será detalhado a seguir (Masters, 1995 apud Miranda, 2002).

Considerando-se uma coleção de amostras aleatórias de K populações, onde cada amostra, indexada de $k = 1, 2, \dots, K$, é um vetor $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]$. Num caso geral, admite-se que tais amostras tenham diferentes probabilidades, denominadas h_k . Quando um erro de classificação é cometido com um caso que certamente pertence à população k , o custo associado com este erro é c_k , entretanto, em muitos casos, segundo (Masters, 1995), as probabilidades h_k são admitidas iguais para todas as amostras, e o mesmo é feito para o custo c_k .

A coleção completa é chamada de conjunto de treinamento, contendo n_1 amostras da classe 1, n_2 da classe 2 e n_k da classe k . Um algoritmo apto a associar corretamente uma amostra desconhecida à uma das classes do conjunto de treinamento, deve ser gerado a partir desse procedimento. O algoritmo taxado como um Bayes ótimo ocorre para o caso em que o mesmo tenha um custo de erro de classificação maior do que qualquer outro.

Prova-se que haverá uma regra de decisão de Bayes ótima caso seja fornecida a verdadeira função densidade de probabilidade (*fdp*) para toda a coleção de amostras. Faz-se a classificação de uma amostra desconhecida X como pertencente à uma classe i se:

$$h_i c_i f_i(X) > h_j c_j f_j(X) \quad \text{para toda amostra } j \neq i \quad (5.6)$$

onde $f_k(X)$ é a concentração (densidade) de membros da classe k ao redor da amostra desconhecida.

De acordo com a regra de Bayes, deve-se favorecer a classe que possui maior densidade de membros na vizinhança da amostra desconhecida. Há, no entanto, um problema da regra de Bayes, em que não se conhece a verdadeira fdp $f_k(X)$. Neste caso, deve-se utilizar uma estimativa para a fdp . (Parzen, 1962) apresenta um excelente estimador para a fdp unidimensional que converge para a verdadeira fdp quando o número de amostras cresce.

5.1.8. Método de Estimativa da fdp

O estimador da fdp de Parzen utiliza uma função de ponderação $W(d)$, conhecida como função Kernel, a qual possui os maiores valores para $d=0$ e, decresce rapidamente com o valor absoluto de d . Um Kernel é centrado em cada ponto da amostra, com o valor de cada uma dessas funções, em uma coordenada x , determinado pela distância d entre x e o ponto da amostra. O estimador da função densidade de probabilidade da amostra é a soma escalonada destas funções para todos os casos da amostra (Masters, 1995 apud Miranda, 2002).

Dada uma amostra de uma variável aleatória unidimensional de tamanho (n), a sua fdp pode ser estimada por:

$$g(x) = \frac{1}{n\sigma} \sum_{i=1}^n W\left(\frac{x - x_i}{\sigma_s}\right) \quad (5.7)$$

onde σ_s é o parâmetro de escala que define a largura da curva sino centrada em cada membro da coleção de dados.

Para um valor muito pequeno de σ , o estimador tende a valorizar os pontos amostrais demasiadamente, e para valores muito grandes, o estimador despreza quase que completamente a influência dos pontos amostrais vizinhos.

As propriedades impostas para as funções candidatas à janela Kernel foram estabelecidas por Parzen (1962) e Specht (1990), como segue:

➤ A função deve ser limitada

$$\max_x |W(x)| < \infty \quad (5.8)$$

- A magnitude de função de ponderação deve tender a zero à medida que o módulo do seu argumento aumenta. Tal restrição é representada pelas Eqs. (5.9) e (5.10).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |W(x)| dx < \infty \quad (5.9)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |W(x)| dx = 0 \quad (5.10)$$

- A função de ponderação deve ser apropriadamente normalizada, atendendo à Eq. (5.11).

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(x) dx = 1 \quad (5.11)$$

- A função de ponderação deve estreitar-se com o aumento do tamanho amostral, com intuito de se obter um comportamento assintótico. As Eqs. (5.12) e (5.13) representam ambas as condições que devem ser satisfeitas para o parâmetro de escala em função de n .

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sigma_n = 0 \quad (5.12)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \sigma_n = \infty \quad (5.13)$$

5.1.9 Arquitetura e Funcionalidade da Rede Neural Probabilística

Numa rede treinada para executar tarefas de classificação, o número de entradas é exatamente igual ao número de parâmetros necessários para identificar uma determinada classe. A camada de entrada é fictícia, uma vez que seus neurônios não executam nenhuma operação. A camada de classificação é constituída de um neurônio para cada caso do conjunto de treinamento. O processo de classificação inicia com a apresentação da amostra desconhecida para todos os neurônios da camada de classificação. Cada neurônio de classificação calcula a distância medida entre a amostra de entrada e o caso do conjunto de treinamento ao qual ele está associado. Esta distância será o argumento da função de ativação

do neurônio, que é necessariamente uma janela Parzen. Cada neurônio da camada de somatório simplesmente soma a saída dos neurônios da camada de classificação correspondente à sua classe. O nível de ativação do neurônio somador k é o valor da fdp estimada da população k . O neurônio da camada de saída é um classificador simples, que decide qual das entradas provenientes da camada de somatório possui o valor máximo (Masters, 1995 apud Miranda, 2002).

5.2 Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo é um procedimento que investiga as distribuições aleatórias de várias estatísticas e determina os efeitos de violar suposições subjacentes sobre as distribuições. No livro de Hammersley (1964), a definição do Método de Monte Carlo é dada como sendo “a parte da matemática experimental que está preocupada em experiências com números aleatórios”. Esta é uma definição bem geral, mas é uma das definições que cercam as muitas aplicações que foram utilizadas durante anos.

O termo “Método de Monte Carlo” foi dado na segunda guerra mundial, devido à similaridade entre os processos estatísticos e os “jogos de azar”. Originou-se do nome da cidade de Mônaco no mediterrâneo conhecida pelos seus cassinos.

Os métodos de Monte Carlo são simulações estatísticas que utilizam sequências de números aleatórios. Esta técnica foi aplicada inicialmente pelo matemático, John Von Neumann, quando ele e seus colegas usaram este método para estudar a difusão de nêutrons durante o desenvolvimento da bomba Atômica em Los Alamos (McCracken, 1955).

Podemos localizar as origens da simulação estocástica até uma experiência realizada no século XVIII por Georges Louis Leclerc, Conde de Buffon. Foi utilizada durante a guerra civil americana para aliviar a monotonia das tropas, onde o método foi aplicado para estudar o problema da agulha de Buffon, um problema de interesse para matemáticos da época. Neste problema, foi mostrado que quando lançado uma agulha aleatoriamente com comprimento k em direção a linhas paralelas separadas por uma distância $2k$, a razão entre o número de lançamentos pelo número de acertos (número de vezes em que a agulha cruza uma linha) resultaria aproximadamente no valor de π (3,1416). Com o aumento dos lançamentos, o valor desta razão chega mais próximo do valor de π .

“Se a pessoa não tem nada para fazer, talvez existam coisas menos excitantes do que lançar agulhas!” (McCracken, 1955) podem-se encontrar relatórios onde McCracken executou a experiência com a agulha, mas depois de aproximadamente cem tentativas, ele pensou que poderia ser mais agradável escrever um programa computacional para simular estes lançamentos. Seu artigo descreve a discussão sobre o problema da agulha de Buffon, e os parâmetros que envolveram este experimento. Ele discute, também, como computadores podem ser utilizados para executar o Método de Monte Carlo, discute o problema da difusão de nêutrons, e outros problemas mais. Ele fornece uma descrição útil das vantagens e desvantagens destes tipos de procedimentos.

William Sealy Gossett, que trabalhou com o pseudônimo de "Student" (e foi quem propôs a distribuição hoje conhecida como “distribuição t de Student”), realizou experimentos de amostragem em Matemática Estatística. Gossett trabalhou com números aleatórios em seus experimentos e, para gerar os números, utilizou o método Top-Hat (rotação de discos). A partir dessa época a quantidade de números aleatórios necessários nos experimentos era cada vez maior. Passou-se a estocar os números em tabelas que eram publicadas para uso dos que delas precisavam.

Essa foi uma idéia de L. H. C. Tippett que, em 1927, publicou uma tabela com 40000 dígitos extraídos aleatoriamente de dados do censo americano. Ela foi publicada em "Random Sampling Numbers", Tracts for Computers, nº 15, Cambridge University Press, New York, 1927.

Em 1908, W. S. Gossett usou procedimentos aleatórios (obviamente sem a ajuda de um computador) para lhe ajudar a entender a distribuição aleatória do coeficiente de correlação, como também o da estatística t que ele desenvolveu (Hammersley; Handscomb 1964). Desde então, houve pesquisas consideráveis para o uso do Método de Monte Carlo. Pode-se citar vários artigos sobre a investigação do Método de Monte Carlo envolvendo, por exemplo, análise de variância (Lindquist, 1953; Glass et al., 1972); o teste t (Boneau, 1960); testes de médias *hoc post* para análise de variância (Petrinovich; Hardick, 1969); análise de variância multivariada (Hummel; Sligo, 1971); coeficiente de correlação (Havlicek e Peterson, 1977); modelos causais (Tanaka, 1987); entre outros.

Há duas aplicações básicas do Método de Monte Carlo. Uma das aplicações é para avaliar a distribuição aleatória empírica de uma estatística. Em alguns casos, a distribuição teórica de uma estatística pode ser conhecida, assim esta aplicação é planejada para demonstrar empiricamente um fenômeno matemático simples. Esta é uma aplicação muito

informativa, e parece ser muito útil para propósitos pedagógicos. Um livro de ensino estatístico (Walker; Lev, 1953 apud Barros, 2005) apresenta um exercício laboratorial no qual a classe executou o Método de Monte Carlo para estudar as distribuições Normal, *t-Student*, *F* e χ^2 . Este método consumia muito tempo, mas com os computadores atuais, prontamente disponíveis, talvez hoje seu tempo de desenvolvimento diminua.

Uma segunda aplicação, e talvez até mesmo mais comum, é o uso do Método de Monte Carlo para estudar os efeitos de violar suposições que estão por trás de algumas estatísticas (Barros, 2005).

Por exemplo, sabe-se que para o uso do teste-t, quando se testa diferenças entre duas médias, deve-se assumir que as duas amostras aleatórias são retiradas de populações Normais. O teste-t é robusto com respeito a violações da suposição de normalidade, e utilizando-se o Método de Monte Carlo, pode-se mostrar esta robustez (Barros, 2005).

Para executar o Método de Monte Carlo, há três passos básicos que devem ser seguidos (Barros, 2005):

- O primeiro passo envolve o estabelecimento da(s) população(ões) de interesse. Estas populações devem ter certos parâmetros (por exemplo, média, desvio padrão, moda, dentre outros.) e podem apresentar vários comportamentos (por exemplo, Normal, Exponencial, Uniforme, dentre outros.);
- O segundo passo para executar o Método de Monte Carlo é obter amostras aleatórias da(s) população(ões), e calcular a(s) estatística(s) de interesse. Para obter amostras aleatórias, é preciso obter uma sequência de números aleatórios. Computacionalmente, esta sequência é facilmente obtida, utilizando um gerador de números aleatórios. Geradores de números aleatórios geralmente produzem uma distribuição uniforme de valores R no intervalo 0,0000... até 0,9999... . Porém, pode-se obter números aleatórios fazendo uma transformação para definir um número inteiro L variando de 1 a K , utilizando a Eq. (5.14).

$$L = \text{Inteiro} [(R * K) + 1] \quad (5.14)$$

Os números gerados por esta técnica são pseudo-aleatórios, porém, eles geralmente são suficientes para obter aproximações razoáveis de números aleatórios inteiros, e podem ser usados para obter amostras aleatórias de alguma população de interesse.

- O terceiro passo para executar o Método de Monte Carlo é criar a distribuição de frequência da estatística de interesse. Esta distribuição de frequência é normalmente chamada de distribuição aleatória empírica, e pode ser comparada com a distribuição aleatória teórica apropriada.

Para fazer isto, deve-se comparar o comportamento da distribuição aleatória empírica com a distribuição aleatória teórica da estatística. A distribuição empírica, às vezes, pode ser comparada com outra distribuição empírica, ou seja, o pesquisador pode executar dois Métodos de Monte Carlo, por exemplo, um no qual nenhuma das suposições foram violadas, e uma no qual alguma suposição foi violada. Então, pode-se fazer comparações entre as duas distribuições aleatórias empíricas.

John Von Neumann propôs, em 1946, o primeiro algoritmo gerador de números pseudo-aleatórios, tendo-o chamado de “método do meio dos quadrados”. O seguinte exemplo será ilustrativo deste algoritmo (Blum et al., 1986).

- Considere um valor inicial qualquer, um número com quatro casas decimais dado, como o número $x_0 = 0,9876$;
- Eleva-se x_0 ao quadrado, obtendo-se $x_0^2 = 0,97535376$;
- Forma-se, a seguir, o número x_1 com as quatro casas decimais do meio: $x_1 = 0,5353$;
- Repete-se em seguida o procedimento, obtendo-se: $x_1^2 = 0,28654609$ e $x_2 = 0,6546$, $x_3 = 0,8501$, $x_4 = 0,2670$, $x_5 = 0,1289$, e assim por diante.

Constatou-se, porém, uma preponderância de pequenos valores entre os números gerados por este método, levando à elaboração de diversos outros algoritmos. Vários deles estão descritos no livro “*Numerical Recipes*” (PRESS, 1986) e em vários artigos espalhados pela literatura especializada (Eichenauer-Herrmann, 1993, 1995; L'ecuyer, 1990, 1994; Tezuka, 1995).

O método de solução numérica de problemas que se baseia na simulação usando variáveis aleatórias é conhecido como Método de Monte Carlo. Sua origem data de 1949, com a publicação do artigo “*The Monte Carlo Method*” (Metropolis; Ulan, 1949). O princípio do Método de Monte Carlo já era conhecido antes da publicação do artigo de Metropolis e Ulan (1949): era utilizado, por exemplo, no tratamento de dados de amostras aleatórias em estatística. Mas a sua ampla aplicação não era viável antes do aparecimento dos computadores eletrônicos (Fishman, 1996).

Com o avanço da informática, os cientistas começaram a utilizar o computador para gerar e armazenar números aleatórios, baseados em métodos deterministas como o de Lemer, e as tabelas perderam a sua utilidade.

CAPÍTULO VI

Metodologia

Sabe-se que, para se calcular a dose de exposição ao ruído ocupacional é necessário conhecer pelo menos duas variáveis: o nível de ruído ambiente e o tempo de exposição. Os métodos de cálculo de dose dados pelo anexo 1 da NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) e pela NHO-01 da FUNDACENTRO utilizam os tempos de exposição aos níveis de ruído e o tempo de exposição máximo a determinado nível. O colaborador utiliza um dispositivo integrador instantâneo (dosímetro) durante a sua jornada de trabalho e, ao final desta, o resultado encontrado para uma única pessoa deve ser representativo para o restante do grupo homogêneo.

A metodologia almejada deve ser capaz de estimar um intervalo e confiança para a dose de exposição ao ruído ocupacional para um determinado grupo homogêneo, levando em consideração não somente a rotina de trabalho, mas também os possíveis desvios desta, como atendimento a paradas, liberação de área e de serviço, alterações na rota devido a reformas ou manutenções, diferenças no ritmo de trabalho de cada colaborador pertencente ao grupo analisado, dentre outras possíveis variáveis.

Uma vez que se torna inviável a utilização de uma unidade industrial real para fins de estudo, devido a aspectos legais, optou-se neste trabalho por criar uma unidade fictícia a partir da experiência adquirida no Laboratório de Acústica e Vibrações (LAV) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) de vários trabalhos de medições dos níveis de pressão sonora em unidades de processo, identificação dos níveis de potência sonora das principais fontes de ruído e, propostas de medidas de controle para as fontes de ruído críticas, realizados em grandes empresas.

Alguns destes trabalhos também se estenderam às obras de ampliação e projeto de novas unidades de processo onde, através de metodologias analíticas (equações e tabelas de previsão de níveis de ruído de máquinas dados por diversos autores), foram realizadas análises de previsão do impacto, ou seja, aumento do nível de ruído causado pela implantação de tais unidades e novos equipamentos.

Contudo, como dito anteriormente, para o cálculo da dose de exposição ao ruído ocupacional é necessário conhecer os níveis de ruído no ambiente. Para a estimativa dos níveis de pressão sonora na planta, foi utilizado o programa de simulação de campo acústico do laboratório, sendo permitido exportar tais valores em uma malha pré-definida de espaçamento de um metro. O programa de simulação de campo acústico utiliza com dados de entrada as propriedades acústicas (perda de transmissão sonora, coeficiente de absorção sonora, coeficiente de reflexão sonora) de cada um dos materiais que constituem a estrutura da planta analisada, o nível de potência sonora de cada fonte de ruído bem como sua diretividade e tempo de funcionamento durante a jornada de trabalho, a existência de locais fechados (casas de máquinas, biombos de operação, enclausuramento, dentre outros) além do plano receptor do ruído (a que altura em relação ao solo se encontra a orelha do colaborador analisado, podendo ser analisadas várias alturas diferentes).

Para a previsão de dose foi necessário desenvolver métodos de previsão estatística da probabilidade do funcionário estar presente em um determinado local da unidade tomando como base para isso o a sua rotina de trabalho. Para a elaboração das rotinas de trabalho foram utilizados dados coletados nos trabalhos de acompanhamento de funcionários em indústrias.

Apresenta-se no próximo tópico a planta industrial utilizada no trabalho.

6.1 Definição da Unidade Industrial

Foi escolhida uma unidade de geração e distribuição de vapor, sendo esta normalmente utilizada para geração de energia, acionando turbo geradores ou mesmo para a alimentação de turbo bombas e turbo compressores, pré-aquecimento de produtos além de outras finalidades.

Esta escolha decorre do fato de que, nos trabalhos realizados, observou-se que tais unidades possuem composição e níveis de ruído semelhantes, sendo utilizado um banco de

dados com os níveis de potência sonora identificados para as principais fontes de ruído do tipo de unidade industrial escolhida.

Desta forma, optou-se por criar uma planta que simulasse o funcionamento de uma central de geração e distribuição de vapor para o desfecho do trabalho.

A unidade desenvolvida consiste de:

- Uma caldeira de grande porte com três plataformas de acesso onde serão considerados como fontes de ruído:
 - seis queimadores;
 - dois pirômetros;
 - um turbo ventilador de tiragem forçada para admissão de ar que também pode ser acionado por um motor elétrico;
 - três compressores utilizados no funcionamento da caldeira;
 - corpo da caldeira;
- Um desaerador com duas descargas para atmosfera (vents);
- Uma torre de resfriamento de água com duas quedas de água e cinco moto bombas;
- Uma edificação de três pavimentos, onde será alocado um turbo gerador, um turbo expansor, duas moto bombas de condensado, um exaustor para o tanque de óleo, dois exautores de vapor de selagem, além das tubulações;
- Um parque constituído de três turbo bombas e duas moto bombas;
- Uma área coberta onde estão alocados três moto compressores, sendo dois destes com descarga para a atmosfera;
- Uma edificação de dois pavimentos onde estarão localizados os painéis elétricos e a sala de operações.

A Fig. 6.1 ilustra o modelo acústico simplificado para a unidade industria em questão. As cruzes em vermelho indicam a posição das fontes de ruído descritas acima.

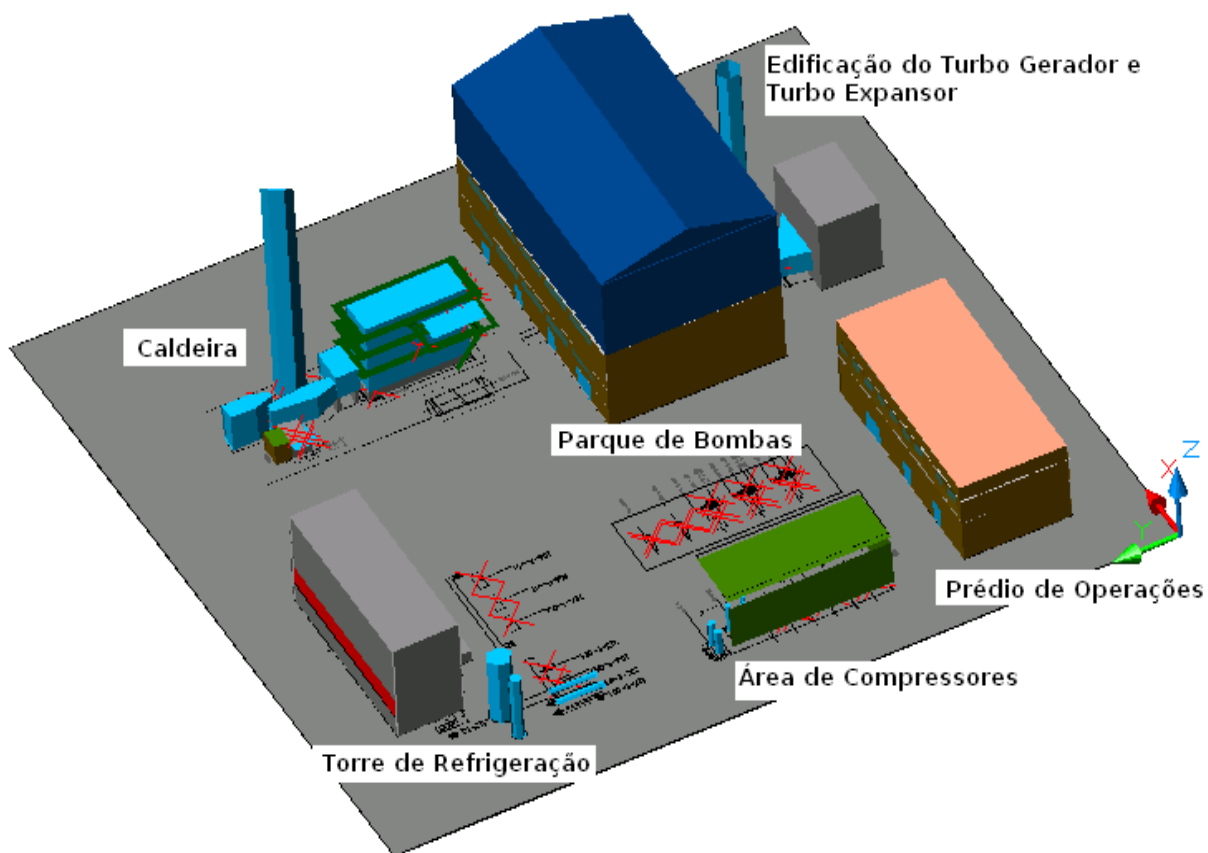


Figura 6.1 - Modelo acústico simplificado da área industrial.

Definida a unidade industrial, os próximos passos consistem em:

- Obtenção de isocurvas de pressão sonora para as áreas estudadas;
- Definição da rota do colaborador para a execução de suas tarefas;
- Definição do procedimento de estimativa e avaliação da dose de exposição ao ruído.

Em função do envolvimento do autor, serão apresentados nos itens 6.2, 6.3 e 6.4 os fundamentos teóricos, procedimentos e técnicas utilizadas para medição de níveis de ruído, identificação, estimativa e cálculo de níveis de potência sonora (NWS) de alguns equipamentos constituintes de plantas industriais.

6.2 Métodos Analíticos para Identificação dos NWS de Equipamentos

6.2.1 Bombas Hidráulicas

Bombas hidráulicas não são, em geral, fontes de ruído significativas quando estas estão operando na faixa de velocidade de rotação aceitável e na capacidade especificada pelo fabricante. O ruído de bombas envolve tanto fontes hidráulicas quanto mecânicas (Gerges, 2000).

O ruído gerado por bombas pode ser assim caracterizado: bombas de médio porte em geral produzem ruído de banda larga sem componentes tonais, já as bombas de grande porte, comumente geram tanto ruído de banda larga quanto componentes tonais significativos nas médias frequências (Beranek; Vér, 1992).

Estas fontes se caracterizam por serem omnidirecionais e a principal fonte de ruído presentes nas bombas é o fenômeno da cavitação, além de flutuações de pressões do fluido, impacto de partículas sólidas, desbalanceamento do rotor, entre outros.

O ruído pode ser radiado de uma bomba através do ar circunvizinho ou da tubulação e estrutura da mesma.

Segundo Bies e Hansen (2003), para estimativa dos níveis de pressão sonora total a um metro da fonte de ruído (bomba hidráulica), utiliza-se a Tab. 6.1, a qual usa a potência e a rotação do equipamento como parâmetros de entrada.

Tabela 6.1 – Níveis de Pressão sonora total do ruído da bomba a um metro.

Faixa de Rotação (rpm)	Nível de Pressão Sonora Total (dB)	
	Potência do motor de acionamento	
	Abaixo de 75 kW	Acima de 75 kW
3000 – 3600	$10.\log(\text{kW}) + 72 \text{ dB}$	$3.\log(\text{kW}) + 86 \text{ dB}$
1600 – 1800	$10.\log(\text{kW}) + 75 \text{ dB}$	$3.\log(\text{kW}) + 89 \text{ dB}$
1000 – 1500	$10.\log(\text{kW}) + 70 \text{ dB}$	$3.\log(\text{kW}) + 84 \text{ dB}$
450 - 900	$10.\log(\text{kW}) + 68 \text{ dB}$	$3.\log(\text{kW}) + 82 \text{ dB}$

Os níveis de pressão sonora em bandas de 1/1 oitava poderão ser estimados aplicando-se ao nível de pressão sonora total as correções listadas na Tab. 6.2.

Tabela 6.2 – Correções do nível de pressão sonora da bomba em bandas de 1/1 oitava.

Fatores de Correção por bandas de oitava								
Frequências [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Correção [dB]	-12	-11	-9	-9	-6	-9	-13	-19

Para o cálculo dos níveis de potência sonora, é utilizada a Eq. (6.1):

$$NWS = NPS + 20 \log(d) + 11 \text{ dB} - 10 \log(Q) \quad (6.1)$$

onde:

- NWS é o nível de potência sonora;
- NPS é o nível de pressão sonora, calculada pela Tab. 6.1;
- d é a distância da fonte ao receptor (pela Tab. 6.1, d equivale a 1 metro);
- Q é o fator de diretividade da superfície, sendo escolhido de acordo com a localização da fonte, segundo a Fig. A1.3 do Anexo 1.

6.2.2 Motores Elétricos

Segundo Bies e Hansen (2003), o nível de pressão sonora total a 1 metro de pequenos motores elétricos pode ser estimado, para motores totalmente enclausurados ou para motores com ventoinhas, através das Eqs. (6.2) para motores de até 40 kW e (6.3) para motores acima de 40 kW.

$$NPS = 17 \log(kW) + 15 \log(rpm) + 17 \text{ dB} \quad (6.2)$$

$$NPS = 10 \log(kW) + 15 \log(rpm) + 28 \text{ dB} \quad (6.3)$$

Motores à prova de respingos geram níveis de pressão sonora 5 dB abaixo dos níveis de pressão sonora de motores de ventoinha.

Os níveis de pressão sonora em bandas de oitava poderão ser obtidos aplicando-se, ao nível de pressão sonora total estimado pelas Eqs. (6.2) e (6.3), as correções listadas na Tab. 6.3.

Tabela 6.3 – Correções (em dB) dos níveis de pressão sonora total, para obtenção do nível máximo de pressão sonora em bandas de oitava do ruído de motores elétricos pequenos.

Tipo de Motor	Frequências centrais das bandas de oitava [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
À prova de respingos correções em dB	-9	-7	-7	-6	-9	-12	-18	-27
Enclausurado e com ventoinha correções em dB	-14	-11	-9	-6	-6	-7	-12	-20

Para o cálculo dos níveis de potência sonora, é utilizada a Eq. (6.1).

6.2.3 Compressores de Ar

Compressores de ar são fontes comuns de ruído. No caso de compressores pequenos e médios, e conforme sua faixa de potência, os dados apresentados na Tab. 6.4 poderão ser utilizados na estimativa do nível de pressão sonora a 1 metro de distância. Na maioria das situações, os valores obtidos a partir da Tab. 6.4 são conservativos, isto é, ligeiramente superestimados.

Contudo, os compressores que serão instalados são de grande porte, com potência nominal acima de 400 kW, sendo então utilizada a metodologia proposta por Bies e Hansen (2003), que estimam os níveis de potência sonora, externos aos compressores (neste caso, para compressores centrífugos), pela Eq. (6.4):

$$NWS = 79 \text{ dB} + 10 \log(kW) \quad (6.4)$$

Os níveis de potência sonora em bandas de oitava poderão ser obtidos aplicando-se, ao nível de potência sonora total estimada pela Eq. (6.4), as correções listadas na Tab. 6.5.

Tabela 6.4 - Níveis de pressão sonora em bandas de oitava (dB), a um metro, em função da potência de compressores de ar.

Frequência Central da Banda de Oitava (Hz)	Nível de Pressão Sonora a um metro (dB)		
	Potência do compressor (kW)		
	Até 1,5	2 a 6	7 a 75
31,5	82	87	92
63	81	84	87
125	81	84	87
250	80	83	86
500	83	86	89
1000	86	89	92
2000	86	89	92
4000	84	87	90
8000	81	84	87

Tabela 6.5 – Correções (em dB) dos níveis de potência sonora total, para obtenção do nível máximo de potência sonora em bandas de oitava do ruído gerado por grandes compressores centrífugos.

	Frequências centrais das bandas de oitava [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Correção em dB	-10	-11	-13	-13	-11	-7	-8	-12

Foi verificado que, para o acionamento de tais equipamentos, são utilizados motores de indução acoplados a caixas de engrenagens (amplificadores ou redutores de rotação). Para estimar os NWS dos motores elétricos, utiliza-se a metodologia mostrada no item 6.2.2.

Para estimar os níveis de pressão sonora a 1 metro de distância dos amplificadores, é utilizada a Eq. (6.5) (Bies; Hansen, 2003).

$$NPS = 78 \text{ dB} + 4 \log(kW) + 3 \log(rpm) \quad (6.5)$$

Para o cálculo dos níveis de potência sonora, é utilizada a Eq. (6.1).

6.2.4 Ventiladores

Segundo Gerges (2000) existem vários métodos para a predição da potência sonora de rotores (ventiladores ou exaustores). Um dos trabalhos mais antigos sobre este tópico foi desenvolvido por Beranek, Kamperman e Allen em 1995. Neste método o nível de potência

sonora em cada banda de frequência de 1/1 oitava pode ser estimado pelas Eqs. (6.6), (6.7) ou (6.8).

$$NWS = R_b + 77 + 10 \log (kW) + \log (Ps) \quad (6.6)$$

$$NWS = R_b + 25 + 10 \log (Q_f) + 20 \log (Ps) \quad (6.7)$$

$$NWS = R_b + 130 + 10 \log (kW) - 10 \log (Q_f) \quad (6.8)$$

onde:

- R_b é o fator de correção para cada banda de oitava, dado na Tab. 6.6;
- Ps é a pressão estática (mmca);
- kW é a potência do motor (quilowatts);
- Q_f é a velocidade de fluxo de volume (m³/h).

Tabela 6.6 – Valores do fator R_b , em dB(A), usado nas equações 6.6, 6.7 e 6.8.

Frequências (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Centrífugo: pás curvadas para trás	-4	-6	-9	-11	-13	-16	-19	-22
Centrífugo: pás curvadas para frente	-2	-6	-13	-18	-19	-22	-25	-30
Centrífugo: pás radiais	-3	-5	-11	-12	-15	-20	-23	-26
Axial	-7	-9	-7	-7	-8	-11	-16	-18
Fluxo Misto	0	-3	-6	-6	-10	-15	-21	-27

Qualquer uma das três equações (6.6, 6.7 e 6.8) pode ser usada. Neste método não é envolvida a contribuição do componente discreto na frequência de passagem das pás.

6.3 Métodos Tradicionais para Identificação dos NWS de Equipamentos

A potência sonora irradiada por uma fonte de ruído é igual, em valor, à integral do produto escalar do vetor intensidade sonora e o vetor área elementar associada sobre qualquer superfície que cubra toda a fonte. As Normas ISO 3740 a 3747, sem exceção, especificam o nível de pressão sonora como a principal variável acústica a medir.

A relação entre o nível de intensidade sonora e o nível de pressão sonora em qualquer

ponto depende das características da fonte, do ambiente de medição, e da posições de medição em relação à fonte. Desta forma, as Normas ISO 3740 a ISO 3747 necessariamente especificam a característica da fonte, o ambiente de teste, características e procedimentos de qualificação, juntamente com os métodos de medição que se espera para restringir a incerteza da determinação do nível de potência sonora dentro de limites aceitáveis.

Os procedimentos especificados nas Normas ISO 3740 a ISO 3747 não são sempre adequados, pelas seguintes razões:

- a) Instalações dispendiosas são necessárias se alta precisão é necessária e frequentemente não é possível instalar e operar grandes equipamentos em tais instalações.
- b) Não podem ser utilizados na presença de níveis elevados de ruídos gerados por outras fontes senão aquela sob investigação.

Para a identificação de fontes de ruído em ambientes abertos, utilizam-se os conceitos estabelecidos nas normas ISO 9614, ISO 3745 e ISO 3746.

O objetivo da ISO 9614 é especificar métodos pelos quais os níveis de potência sonora das fontes pode ser determinada, dentro dos limites específicos de incerteza, sob condições de teste que são menos restritas do que as exigidas pela ISO série 3740 a 3747. A potência sonora é a potência sonora *in situ*, conforme determinado pelo procedimento desta parte da ISO 9614, é fisicamente uma função do ambiente, podendo em alguns casos, diferir a partir da potência sonora da mesma fonte sob outras condições.

A ISO 9614 ainda complementa a série ISO 3740 a ISO 3747 que especificam diversos métodos para determinação dos níveis de potência sonora de máquinas e equipamentos. Ela se difere destas normas internacionais, principalmente em três aspectos:

- a) São realizadas medições de intensidade sonora e de pressão sonora;
- b) A incerteza do nível de potência sonora determinado pelo método especificado nesta parte do ISO 9614 é classificada de acordo com os resultados de determinados testes auxiliares e cálculos efetuados em colaboração com as medições do teste;
- c) Limitações atuais dos equipamentos de medição de intensidade restringem o intervalo de um terço de oitava de 50 Hz a 6,3 kHz. Valores de limite de banda são

determinados a partir do componente de banda uma oitava ou de um terço de oitava e não por medidas diretas.

A ISO 9614 também fornece um método para determinar o nível de potência sonora de uma fonte de ruído estacionário a partir de medições da intensidade do som em uma superfície ao redor da fonte. Em princípio, a integral, sobre qualquer superfície que cubra totalmente a fonte, do produto escalar do vetor intensidade sonora e o vetor associado à área elementar, fornece uma medida da potência sonora irradiada diretamente para a atmosfera por todas as fontes localizadas no interior da superfície, e exclui o som emitido por fontes situadas fora desta superfície. Na presença de fontes sonoras que operem fora da superfície de medição, qualquer sistema dentro da superfície pode absorver uma parte da energia incidente sobre ele. A potência sonora total absorvida na superfície de medição, aparecerá como um contributo negativo para o fonte de energia, e pode produzir um erro na determinação de potência sonora, a fim de minimizar o erro associado, é necessário remover qualquer material de absorção de som na superfície de medição que não está normalmente presente durante a operação da fonte em teste.

A ISO 9614 é baseada em amostragem ponto-discreta do campo de intensidade normal para a superfície de medição. O erro de amostragem resultante é uma função da variação espacial da componente intensidade normal sobre a superfície de medição, que depende da direcionalidade da fonte, da superfície de amostragem escolhida, da distribuição das posições da amostra, e da proximidade de fontes estranhas fora da superfície medida.

A precisão da medição do componente normal de intensidade sonora em uma posição é sensível à diferença entre o nível local de pressão sonora e o nível de intensidade sonora normal local. A grande diferença pode ocorrer quando o vetor intensidade em uma posição de medição é direcionado em um ângulo grande (aproximando-se 90°) para o local normal à superfície de medição. Alternativamente, o nível de pressão sonora local pode conter contribuições fortes de fontes externas à superfície de medição, mas pode ser associado com pouco fluxo de energia sonora, como em um campo reverberante em um enclausuramento, ou o campo pode ser fortemente reativo, devido à presença do campo próximo e ondas estacionárias.

A Norma ISO 9614 utiliza como superfícies preferenciais para medição as apresentadas na Fig. 6.2.

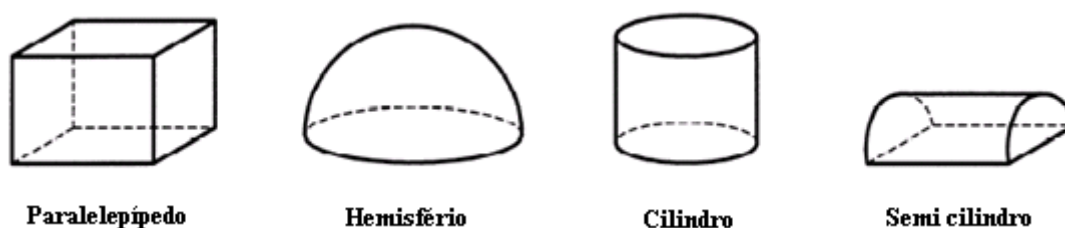


Figura 6.2 - Superfícies preferenciais para medição para identificação de NWS pela Norma ISO 9614.

A Norma ISO 3745 especifica os métodos para medir os níveis de pressão sonora numa superfície de medição que envolve uma fonte de ruído em câmaras anecóicas e semi anecóicas, sendo tais locais representativos de grandes ambientes abertos, para determinar o nível de potência sonora ou nível de energia do som produzido pela fonte de ruído. Ainda dispõe requisitos para o ambiente de teste e instrumentação, assim como técnicas para a obtenção do nível de pressão sonora superficial a partir do qual o nível de potência sonora ou nível de energia do som é calculado.

Os métodos especificados na norma são adequados para as medições de todos os tipos de ruído. A fonte de ruído pode ser um dispositivo, máquina, componente ou sub montagem. O tamanho máximo da fonte sob teste depende da dimensão da superfície hipotética criada, utilizada como superfície de medição.

A Norma ISO 3746 especifica um método para medir os níveis de pressão sonora numa superfície de medição que envolve a fonte sonora, a fim de calcular o seu nível de potência sonora. Fornece ainda requisitos para o ambiente de teste e instrumentação, bem como técnicas para a obtenção do nível de pressão sonora superficial, a partir do qual o nível de potência sonora da fonte é calculado.

É importante que os códigos de teste de ruído específicos para vários tipos de equipamento sejam estabelecidos e utilizados em conformidade com tal Norma. Para cada tipo de equipamento, os códigos de tal teste de ruído darão exigências detalhadas sobre a montagem, carga e condições de funcionamento do equipamento sob teste, assim como uma seleção da superfície de medição e do microfone.

As Figs. 6.3 e 6.4 ilustram um hemisfério e um paralelepípedo hipotéticos, normalmente utilizado para posicionamento dos microfones nos métodos de identificação dos NWS propostos pelas Normas.

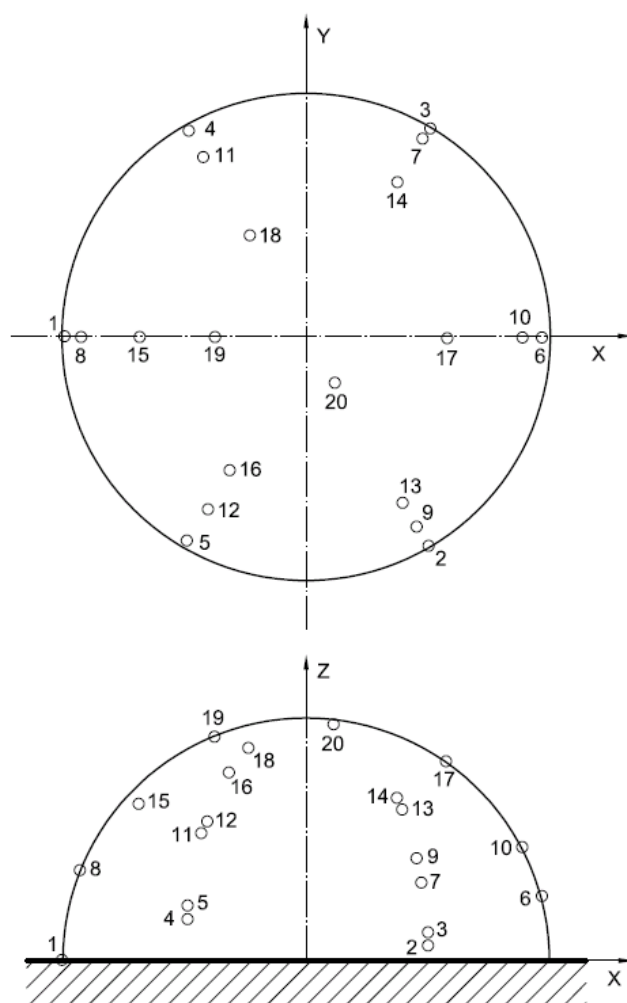


Figura 6.3 - Hemisfério hipotético utilizado como superfície de medição para identificação de NWS pelas Normas ISO 3745 e ISSO 3746.

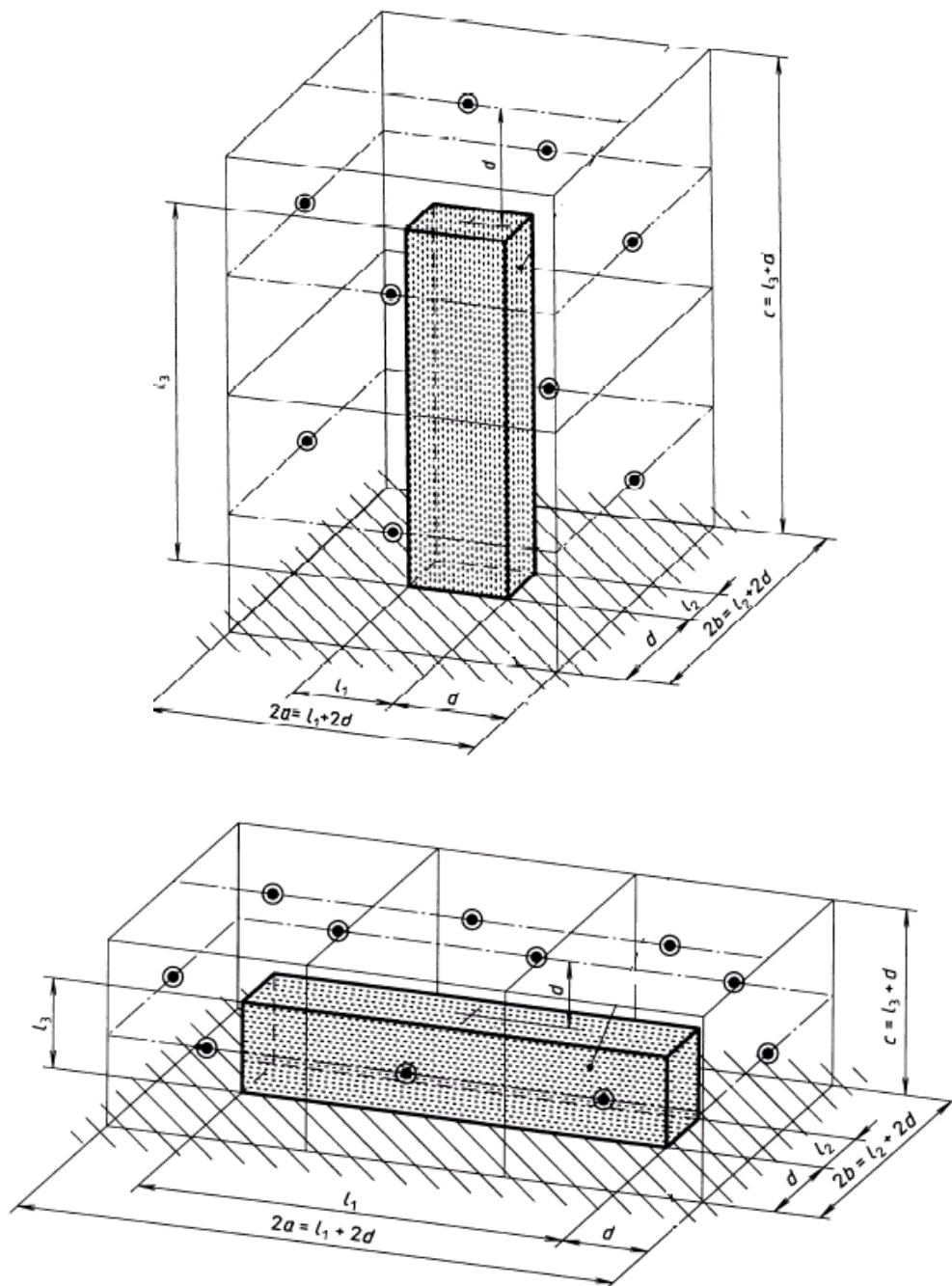


Figura 6.4 - Paralelepípedo hipotético utilizado como superfície de medição para identificação de NWS pela Norma ISO 3746.

6.4 Desenvolvimento de Métodos para Identificação dos NWS de Equipamentos

Muitas vezes é muito difícil a identificação de fontes sonoras devido às suas dimensões, elevados níveis de ruído e interferências externas. Uma tentativa de contornar tal

problema é através da técnica de intensiometria, que por sua vez é dispendiosa de tempo. Para tanto, desenvolveu-se um método numérico utilizando um procedimento de otimização via algoritmos genéticos (Nishida et. al, 2008).

Quando as fontes de ruídos emitem baixos níveis de ruído, se comparados aos demais equipamentos ao seu redor, torna-se muito difícil a sua identificação. Um exemplo que pode ser citado é a identificação dos NWS de motores elétricos. Apesar de possuírem baixos NWS, são encontrados em grande quantidade na maioria das empresas, exercendo então influência significativa no aumento dos NPS na área. Foram realizadas várias análises dentre os métodos analíticos existentes em Mateus et. al (2008) e desenvolvida uma nova técnica para prever os NWS de motores elétricos em Fagundes Neto et. al (2009).

6.4.1 Identificação dos NWS Utilizando uma Rotina de Otimização dos NPS Mapeados ao Redor do Equipamento

Para a utilização da rotina de otimização é necessário conhecer os níveis de pressão sonora (NPS) emitidos pelos equipamentos a distâncias pré-estabelecidas. Para isto, os NPS foram medidos a distâncias constantes de um metro das fontes de ruído que se deseja identificar e a 1 metro entre pontos medidos. Para exemplificar, a Fig. 6.5 ilustra um conjunto compressor, esquematicamente têm-se os equipamentos e pontos de medição.

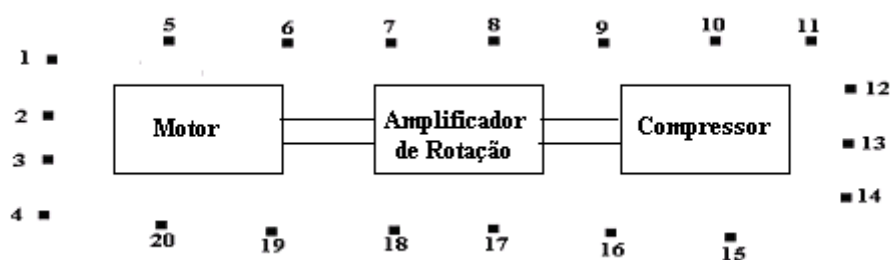


Figura 6.5 - Representação esquemática das posições de medição.

Nishida et al. (2008), assim como em Nunes e Duarte (2005), utilizou para a realização da identificação dos níveis de potência sonora das fontes, um método de otimização via algoritmos genéticos. A função objetivo, erro quadrático, da qual se deseja obter o valor mínimo, é dada pela Eq. (6.9).

$$Obj = \sum_{i=1}^n \left(NPS_{medido_i} - NPS_{teorico_i} \right)^2 \quad (6.9)$$

onde:

$$NPS_{teorico_i} = 10 \log \left(10^{\frac{NPS_{m_i}}{10}} + 10^{\frac{NPS_{a_i}}{10}} + 10^{\frac{NPS_{c_i}}{10}} \right) \quad (6.10)$$

em que:

$$NPS_{m_i} = NWS_{motor} + 10 \log \left(\frac{Q_i}{4 \pi r_{1i}^2} \right) \quad (6.11)$$

$$NPS_{a_i} = NWS_{amplificador} + 10 \log \left(\frac{Q_i}{4 \pi r_{2i}^2} \right) \quad (6.12)$$

$$NPS_{c_i} = NWS_{compressor} + 10 \log \left(\frac{Q_i}{4 \pi r_{3i}^2} \right) \quad (6.13)$$

onde:

r_{1i} : distância do ponto de medição ao motor em metros;

r_{2i} : distância do ponto de medição ao amplificador de rotação em metros;

r_{3i} : distância do ponto de medição ao compressor em metros;

Q_i : índice de diretividade da fonte de ruído.

Foi necessário ainda o desenvolvimento de uma função cujos valores de entrada são dados pelos níveis de potência sonora (NWS), e cujo valor de saída é o valor minimizado do erro, dado pela Eq. (6.9). Observa-se que tanto os valores de NWS quanto o valor do erro médio, são incógnitas da função utilizada no algoritmo genético. A solução numérica se dá a partir de um intervalo inicial dado para os valores de NWS, e em seguida a convergência do método busca o menor valor possível da função erro.

Realizou-se esse procedimento, para as bandas de 1/1 oitava de 63 Hz a 8000 Hz, obtendo-se os valores estimados dos NWS e do erro médio.

Para a validação da metodologia, foram realizadas comparações entre os resultados da otimização com os estimados teoricamente pelos métodos descritos 6.3.2 e 6.3.3, e com o mapeamento da área industrial. Os resultados serão apresentados no capítulo correspondente.

6.4.2 Metodologia de Identificação de NWS de Motores Elétricos

Inicialmente foram utilizados métodos analíticos para prever os níveis de potência sonora de motores elétricos, sendo que, em Mateus et. al (2008), uma análise entre as metodologias de vários autores foi realizada para averiguar qual dentre eles era o mais eficaz, concluindo que a proposta por Bies e Hansen (2003) se destacou dentre as demais. Contudo, apesar de apresentar o menor erro quando comparado aos outros métodos analíticos, o método de Bies e Hansen apresentava um erro significativo quando comparado à identificação real da fonte de ruído utilizando os NPS medidos ao redor desta.

Visando contornar tal problema, foram desenvolvidos dois novos métodos analíticos de previsão de NWS utilizando somente os dados de potência e rotação do motor elétrico:

- Treinar uma Rede Neural Artificial;
- Criar uma Superfície de Resposta.

Foi utilizado um banco de dados com a identificação de 141 motores elétricos previamente identificados em trabalhos de campo. Destes, 80% foram usados para o ajuste da superfície de resposta e para o treinamento da rede neural, 10% foram utilizados para a validação dos métodos e 10% para a comparação entre métodos.

O MSR foi criado por George Edward Pelham Box na década de 50 e consiste em analisar a influência de um grupo de variáveis, em algumas variáveis de resposta, e desde então tem sido usado com grande sucesso na modelagem de processos industriais diversos (Barros Neto et. al, 2001). Consiste de planejamento e análise de experimentos, que procura relacionar os níveis de respostas com os fatores quantitativos que afetam tais respostas (Box e Draper, 1987).

Na primeira, Box sugeriu o MSR aplicado a uma equação de segundo grau, com o intuito de otimizar os parâmetros de segmentação de uma resposta desejada. Para determinar um modelo polinomial de primeiro grau, a abordagem comum consiste em utilizar um experimento fatorial projetado, tais como planejamento fatorial 2^2 ou 2^3 . O projeto 2^2 (ou 2×2 , onde cada elemento tem dois níveis em torno, em um tetraedro, um ponto central da parte analisada) mostrado na Fig. 6.6 foi o projeto fatorial escolhido para estimar a superfície de resposta.

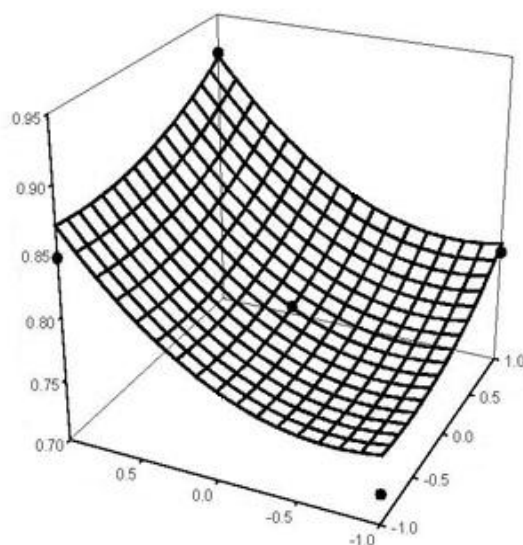


Figura 6.6 - Um exemplo de experimento fatorial 2^2 com superfície de resposta equivalente.

As aplicações mais extensas do MSR estão no mundo industrial, particularmente em situações em que muitas variáveis de entrada influenciam potencialmente alguma medida de desempenho ou característica de qualidade do produto ou do processo (Myers; Montgomery, 2002). O caso abordado consiste em dois parâmetros (potência e rotação), cuja contribuição para a função (nível de potência sonora) será determinado pela SR, trabalhando com uma regressão linear múltipla.

Uma vez que os níveis de potência sonora usam uma escala logarítmica (dB) as variáveis da equação devem estar na mesma escala, desta forma, a equação que a SR irá ajustar é apresentada na Eq. (6.14).

$$NWS = A \log (CV) + B \log (RPM) + C \quad [\text{dB}] \quad (6.14)$$

onde:

- NWS é o nível de potência sonora do motor elétrico (em dB);
- CV é a potência do motor (em cv);
- RPM é a rotação de seu eixo (em rpm);
- A , B e C são constantes.

A e B representam a contribuição da potência do motor e a contribuição da rotação para o seu nível de potência sonora gerado, respectivamente, e C é um o valor médio.

A metodologia de SR foi utilizada para localizar os valores constantes: A , B e C .

As Redes Neurais Artificiais, que são referidas como redes neurais, conexões, redes de adaptação, neuro computadores e transformadores de distribuição paralela, são redes paralelas interconectadas de elementos simples e têm sido usadas para resolver uma variedade de problemas de ciência e engenharia que envolve extração de informações úteis de dados complexos e incertos (Jalel et. al, 1991).

As redes neurais são definidas por três características: a arquitetura, o algoritmo de treinamento e a função de ativação. O nome vem de sua semelhança com o sistema neural presente em biologia neural. A função de ativação é a relação entre entrada e saída dos neurônios (A_1 , A_2 , A_3 e B na Fig. 6.7), a arquitetura é definida pelas ligações entre esses neurônios (f_1 , f_2 e f_3 na Fig. 6.7) e o algoritmo de treinamento é usado para determinar a arquitetura.

Basicamente, o algoritmo de treinamento buscará as melhores funções (ligações) entre os nós (ou neurônios), utilizando dados já existentes (dados experimentais), a fim de treinar a rede neural para retornar uma certa saída, de acordo com valores aleatórios de entrada.

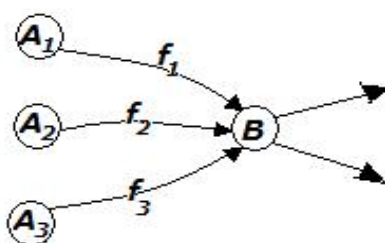


Figura 6.7 - Representação esquemática de uma rede neural básica.

Cada neurônio ou nó, depois de apresentar a sua entrada para a função de ativação, pode enviá-la para vários outros neurônios, mas este valor é o mesmo para todas essas sinapses. O que vai definir a diferença sobre os sinais do neurônio irradiados são as conexões (as funções determinadas pela arquitetura) entre o neurônio e os outros que levam o sinal como entrada.

A rede neural utilizada foi uma RNA (Rede Neural Artificial) já existente, cujo esquema não é conhecido, treinada pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt. Uma vez que esta etapa do trabalho não visa um estudo profundo de redes neurais, mas apenas a sua eficácia para o caso abordado, a rede neural é usada como uma ferramenta computacional e

nenhuma informação sobre ela foi necessária. Os resultados serão apresentados no capítulo correspondente.

6.5 Avaliação do Programa de Simulação

Com as fontes de ruído já identificadas, e as propriedades dos materiais retirados de livros, catálogos e sites de fabricantes, passou-se à fase de simulação, para a estimativa dos NPS locais. Para tanto foi utilizado o programa de simulação de campo acústico desenvolvido para o laboratório.

6.5.1 Apresentação da Forma de Simulação

A Acústica Previsional é um conjunto de técnicas utilizado para prognosticar o nível de ruído em um ambiente determinado, destacando-se as técnicas clássicas, teoria dos raios acústicos e técnicas de elementos finitos.

Nas técnicas clássicas, as fontes de ruído são discretizadas em fontes acústicas do tipo monopolo e o campo de pressão sonora é obtido a partir de expressões empíricas para a difusão do som. Uma excelente revisão bibliográfica sobre as técnicas clássicas pode ser encontrada em Kortchmar e Slama (1996).

A teoria dos raios acústicos é baseada na hipótese da superposição do efeito de fontes monopulares, gerando raios acústicos divergentes que são refletidos nas paredes (método das imagens), perdendo energia até atingir o observador.

Nas técnicas de elementos finitos, a região a ser analisada é discretizada em volumes elementares. A pressão sonora nestes elementos é representada por uma função de interpolação, e os parâmetros que definem tal função são numericamente obtidos a partir de um princípio variacional.

Apesar de apresentar excelentes resultados para ambientes fechados, a técnica de elementos finitos tem como principal problema a exigência de que as dimensões básicas do volume elementar sejam menores do que um décimo do comprimento da onda acústica analisada, o que a limita para regiões pequenas e ruído de baixa frequência.

Do exposto, e considerando as dimensões e afastamentos envolvidos, optou-se por utilizar neste programa, uma técnica clássica de análise previsional, baseada na equação de

difusão de Thompson (Korthmar; Slama, 1996), sendo a técnica dos elementos finitos, utilizada para modelar a eficiência de soluções acústicas específicas.

O modelo adotado para ambientes fechados só pode ser utilizado para fins de previsão e controle de níveis de ruído industriais, ou seja, não existe possibilidade de cálculos envolvendo a qualidade acústica do ambiente, os quais são necessários para projetos de acústica arquitetônica. O modelo foi escolhido de forma a permitir que as simulações em ambientes internos sejam realizadas com o menor custo computacional possível de forma a viabilizar o projeto.

O modelo utilizado é a teoria de raios acústicos, cujos resultados são válidos a partir da frequência de Schroeder dada pela Eq. (6.15), onde T_r é o tempo de reverberação em segundos e V é o volume da sala em metros cúbicos.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_r}{V}} \quad [Hz] \quad (6.15)$$

Exemplificando, a frequência de Schroeder para uma sala de 10 m x 5 m x 2,8 m com um coeficiente de absorção médio de 10% é de aproximadamente 190 Hz. Isto indica que na banda de 1/1 oitava, na faixa de 250 a 8000 Hz não haverá problemas na utilização da teoria em ambientes industriais os quais são caracterizados por grandes dimensões.

Dois problemas surgem quando da utilização da teoria de *ray-tracing* em grandes ambientes fechados:

- Proximidade de teto e piso e respectivos baixos coeficientes de absorção acústica;
- Número excessivo de barreiras acústicas representadas por máquinas, salas e regiões de estoque temporário de produtos.

O primeiro problema implica num grande número de reflexões de raios acústicos, o que penaliza sobremaneira a eficiência do procedimento computacional.

O problema das barreiras ainda é pior, visto que para cada raio acústico necessita-se de uma infinidade de cálculos envolvendo existência ou não de barreiras e se houver, as perdas de transmissão equivalentes das mesmas.

As hipóteses básicas, assumidas para a propagação do som em ambientes internos foram:

- As leis da acústica geométrica são válidas;

- Não são considerados os fenômenos de onda;
- As superfícies são planas e refletem um espectro de energia sonora similar a um plano infinito;
- Qualquer superfície absorve a energia sonora de acordo com seus coeficientes de absorção;
- Ruído é tratado em função da energia e não em função da pressão;
- As energias podem ser diretamente somadas e não há efeitos de fase.

Estimados os valores das componentes omnidirecionais (W_a) e direcionais (W_b) do Nível de Potência Sonora [dB(A)] das fontes monopolos, em bandas de 1/1 oitava (63 a 8000 Hz), calculam-se os Níveis de Pressão Sonora nas áreas estudadas utilizando-se a equação de difusão (Eq. (6.16)).

$$L_{fi}(DW) = NWS + DI - A \quad (6.16)$$

onde:

- A é a atenuação da banda de oitava [dB] que ocorre durante a propagação da fonte pontual, e pode ser calculada pela Eq. (6.17).

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{bar} + A_{misc} \quad (6.17)$$

onde:

- A_{div} é a atenuação devido à divergência geométrica;
- A_{atm} é a atenuação devido à absorção atmosférica;
- A_{bar} é a atenuação devido a barreiras;
- A_{misc} é a atenuação devido a outros efeitos.

A divergência geométrica devido à expansão esférica em campo aberto para uma fonte pontual (Fig. 6.8) é calculada pela Eq. (6.18), onde d é a distância da fonte ao receptor [m] e d_0 é a distância de referência (1 m) (Gerges, 2000).

$$A_{div} = \left[20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \right] \quad (6.18)$$

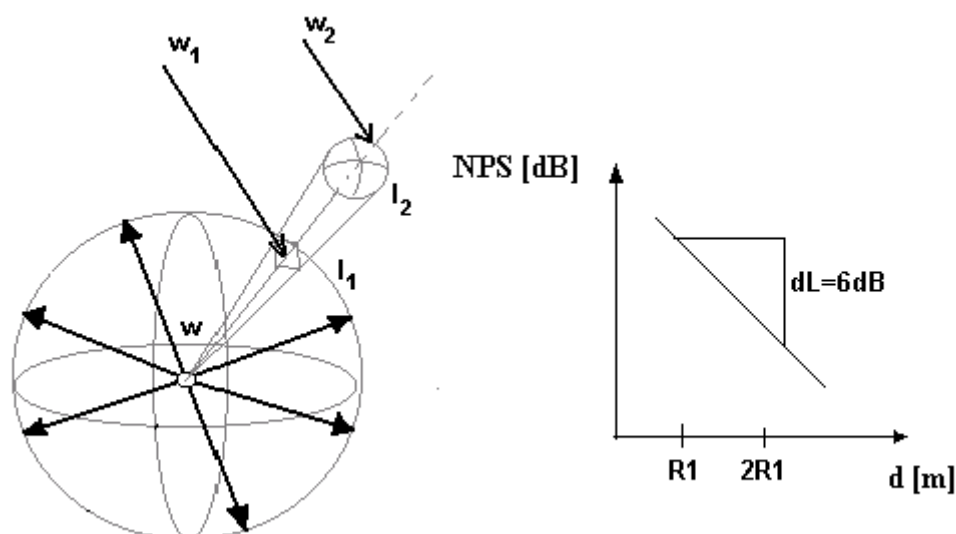


Figura 6.8 - Divergência geométrica para fontes pontuais em campo aberto.

Para fontes lineares (Fig. 6.9), duas equações são utilizadas para calcular a divergência geométrica (Gerges, 2000):

- A Eq. (6.18) para distâncias perpendiculares à fonte maiores do que c/π , onde c é o comprimento da fonte conforme pode ser observado na Fig. 6.9. Neste caso d é calculado em relação ao centro de gravidade da fonte linear.
- A Eq. (6.19) para distâncias menores do que c/π .

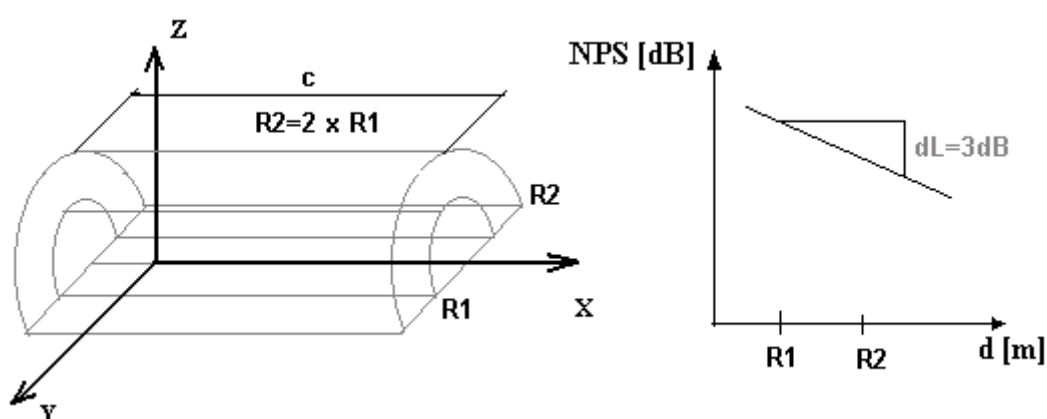


Figura 6.9 - Divergência geométrica para fontes lineares em campo aberto.

$$A_{div} = \left[10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \right] \quad (6.19)$$

Para superfícies planas, três equações são utilizadas para calcular a divergência geométrica (Gerges, 2000):

- A Eq. (6.18) para distâncias perpendiculares à fonte maiores do que c/π , onde c é o comprimento da fonte conforme pode ser observado na Fig. 6.17. Neste caso d é calculado em relação ao centro de gravidade da fonte plana.
- A Eq. (6.19) para distâncias perpendiculares à fonte entre b/π e c/π , onde b e c são o lado menor e maior, respectivamente, da fonte plana, conforme pode ser observado na Fig. 6.10.
- A Eq. (6.20) para distâncias menores do que b/π .

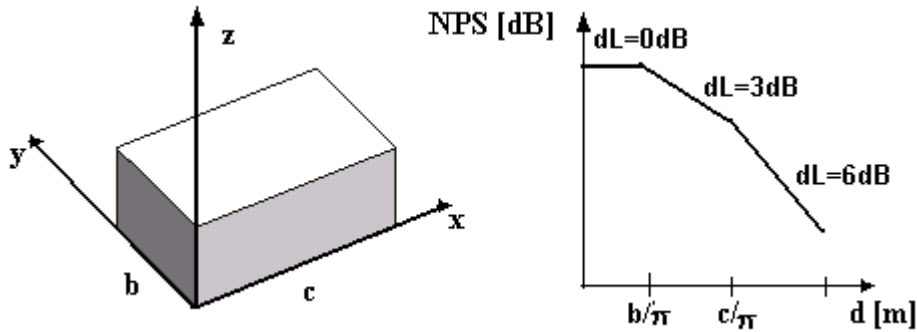


Figura 6.10 - Divergência geométrica para fontes planas em campo aberto.

$$A_{div} = 0 \quad (6.20)$$

A atenuação do som devido ao fato do ar não ser perfeitamente elástico é calculada em função da distância d , umidade relativa e temperatura, utilizando fórmulas específicas baseadas na ISO 9318-1.

Para calcular a atenuação devido ao efeito sombra das barreiras $AT_{tot}(f)$ foi utilizada a Eq. (6.21), apresentada por Gerges (1992) para a avaliação da redução dos níveis de ruído, devido à presença de barreiras próximas das fontes ou do receptor.

$$AT_{tot}(f) = AT_d(f) - 10 \log \left\{ 1 + 10^{\frac{[AT_d(f) - AT_t(f)]}{10}} \right\} \quad (6.21)$$

onde:

- $AT_t(f)$ é a atenuação devido à transmissão da barreira [dB];
- $AT_d(f)$ é a atenuação devido à difração da barreira [dB] dado pela Eq. (6.22):

$$AT_d(f) = -10 \log \left[10^{\frac{AT_{LE}}{10}} + 10^{\frac{AT_{LD}}{10}} + 10^{\frac{AT_{SU}}{10}} \right] \quad (6.22)$$

onde:

- AT_{LE} é a perda por difração no lado esquerdo da barreira [dB];
- AT_{LD} é a perda por difração no lado direito da barreira [dB];
- AT_{SU} é a perda por difração no lado superior da barreira [dB];

AT_{LE} , AT_{LD} e AT_{SU} são calculados pela fórmula de Maekawa [dB] (Eq. (6.23)).

$$AT(f) = \begin{cases} 20 \log \left[\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh(2\pi N)} \right] + 5 & \text{para } N \geq -0,2 \\ 0 & \text{para } N \leq -0,2 \end{cases} \quad (6.23)$$

onde N é o número de Fresnel, dado pela Eq. (6.24).

$$N = \frac{A + B - C}{\lambda / 2} \quad (6.24)$$

onde:

- A é a distância entre a fonte até a ponta da barreira [m];
- B é a distância entre o receptor até a ponta da barreira [m];
- C é a distância entre a fonte e o receptor [m];
- λ é o comprimento da onda sonora [m].

O efeito das múltiplas reflexões (reverberação) é calculado pela teoria dos raios acústicos como esquematizado na Fig. 6.11.

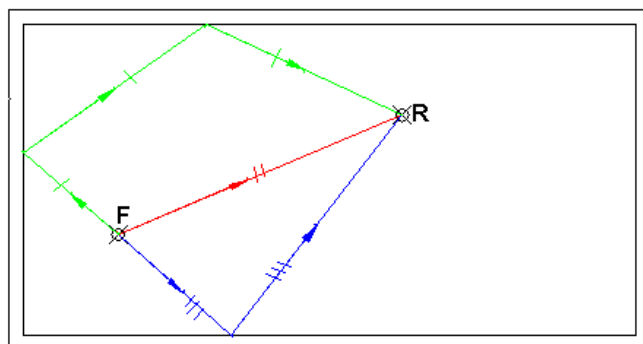


Figura 6.11 - Caminho direto (---|---), reflexão simples (---|---|---) e reflexão dupla (---|---|---) na propagação de um raio acústico.

6.5.2 Avaliação da Confiabilidade dos Resultados do Programa e Simulação

Antes de ser utilizado, o programa de simulação passou por uma série de testes, visando sua validação.

6.5.2.1 Cálculo de Refração em Borda de Barreiras

Em Duarte e Duarte (2008), foi feita a avaliação dos cálculos de refração em bordas de barreiras. Utilizou-se um galpão da Universidade Federal de Uberlândia com um ventilador industrial, cujo NWS já era conhecido, para simbolizar uma área industrial. A Fig. 6.12 ilustra o modelo acústico utilizado no trabalho.

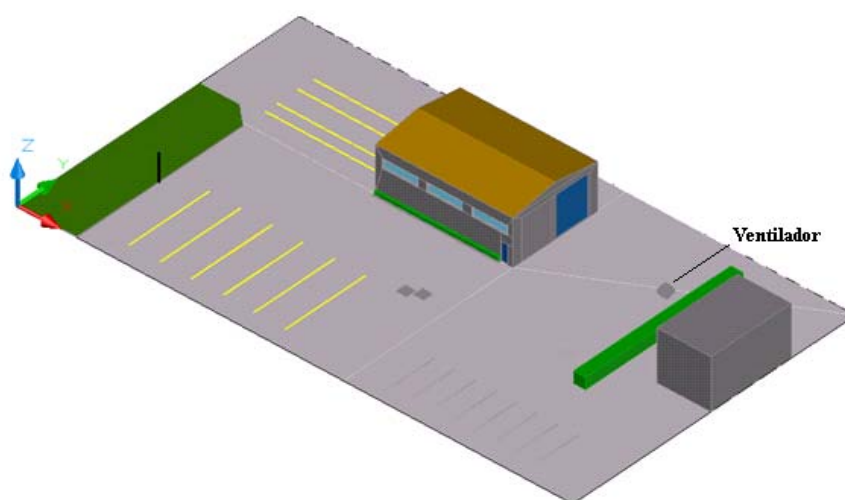


Figura 6.12 - Modelo acústico do galpão utilizado para a avaliação da refração em bordas de barreiras.

Inicialmente foi realizado o mapeamento dos níveis de ruído no local, obedecendo a uma malha de medição com espaçamento entre pontos de três metros.

Foram comparados três metodologias para cálculo de refração em borda de barreiras, a primeira seguindo o método de Maekawa, e a segunda e terceira de acordo com a Norma ISO 9613, sendo diferenciados pelo método do cálculo de reflexões no solo. Os resultados serão apresentados no capítulo correspondente.

6.5.2.2 Avaliação do Módulo de Tratamentos Acústicos

O programa de simulação conta ainda com um módulo específico para avaliar tratamentos acústicos. Em um estudo mais recente realizado, foi a eficiência de tal módulo. Foi utilizado o mesmo galpão da UFU com as seguintes fontes de ruído:

- Uma caixa de som com potência sonora regulável emitindo um ruído rosa a fim de representar um equipamento industrial em funcionamento;
- Um tubo de PVC alimentado com ar comprimido dotado de um furo para a saída do ar;
- Um ventilador industrial.

A caixa de som e o tubo foram instalados no interior do galpão, e o ventilador industrial na parte externa em frente ao galpão. A Fig.6.13 ilustra os equipamentos utilizados para os ensaios.



Figura 6.13 - Equipamentos utilizados para os ensaios (da esquerda para direita: caixa de som, tubo de PVC com 1 furo e ventilador industrial)

Na Fig. 6.14, é apresentando a planta do local, indicando o posicionamento dos equipamentos.

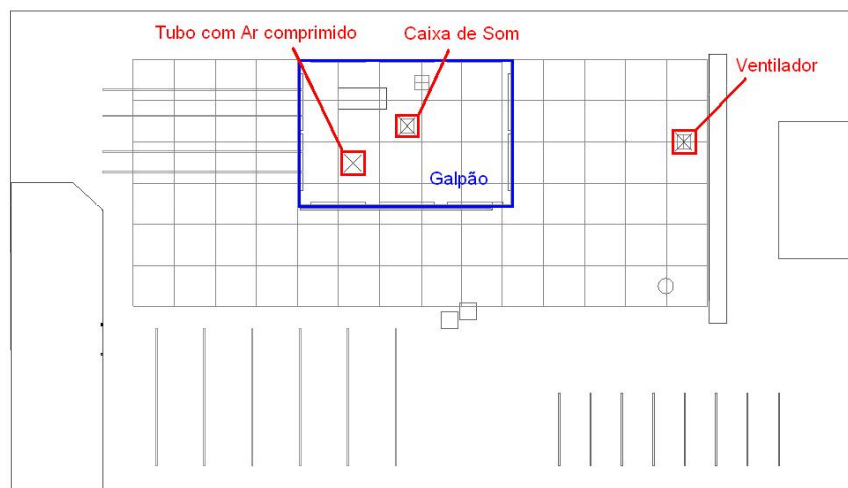


Figura 6.14 - Planta da área em estudo indicando a posição dos equipamentos.

Com as fontes sonoras em funcionamento, foi realizado o mapeamento dos NPS no ambiente, obedecendo a uma malha de 3 metros de espaçamento entre pontos.

Para identificação dos NWS dos equipamentos, foram utilizadas as técnicas já descritas. Após validado o modelo de simulação, iniciou-se a execução dos tratamentos acústicos. As soluções acústicas propostas foram a instalação de um enclausuramento na caixa de som e a troca do tubo de PVC. O enclausuramento utilizado foi construído com madeira compensada e revestido internamente com espuma na parte frontal, local de incidência direta do som. O tubo de PVC com um furo foi trocado por outro tubo com quatro furos, cuja soma das áreas resulta na área do furo do primeiro tubo, a fim de manter a vazão da saída de ar. Na Fig 6.15 pode-se visualizar o enclausuramento utilizado e o tubo de PVC com quatro furos.



Figura 6.15 - Sistemas utilizados para os tratamentos propostos (da esquerda pra direita: enclausuramento e tubo de PVC com quatro furos).

Para simular os tratamentos propostos, tornou-se necessário, além dos valores de NWS dos equipamentos, a obtenção dos valores de perda de transmissão, coeficiente de absorção acústica dos materiais do enclausuramento (madeira compensada e espuma) e também os valores de atenuação obtidos com a troca dos tubos. Tais dados do enclausuramento foram obtidos a partir de tabelas em livros texto e experimentos realizados pelo laboratório através de um tubo de impedância (Masini et al., 2009) e estão listados na Tab. 6.7, enquanto os valores de atenuação dos tubos foram calculados a partir da comparação entre os NWS identificado para cada tubo, sendo obtida uma atenuação de até 14 dB(A).

Tabela 6.7 - Valores de coeficiente de absorção e perda de transmissão (PT) dos materiais do enclausuramento por banda de 1/1 oitava.

Material	Propriedade	Frequências Centrais (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Madeira	Absorção (%)	11,7	11,7	11,7	12,9	12,9	10,6	10,6	10,6
	PT (dB)	15	19	23	25	30	37	42	46
Espuma	Absorção (%)	19	19	88	91	86	86	86	86
	PT (dB)	6	6	6	11	16	22	27	32

Para tornar a validação da metodologia mais consistente, a simulação dos tratamentos foi realizada de duas formas:

- Situação 01: Desenhando-se o enclausuramento no modelo acústico tridimensional, conforme a Fig. 6.16, realizando outra simulação e modificando os NWS do tubo de PVC para o valor identificado para o tubo com 4 furos;

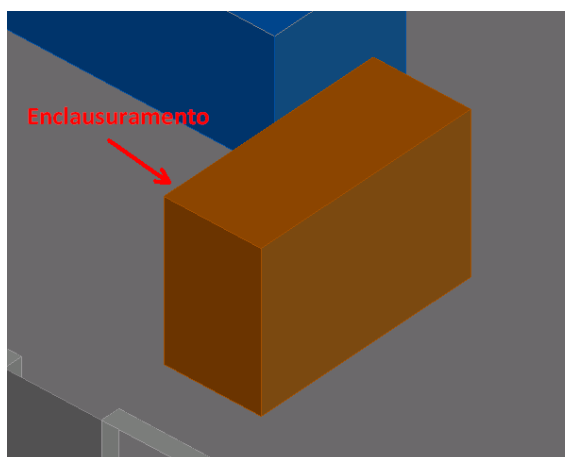


Figura 6.16 - Enclausuramento construído no modelo de simulação.

- Situação 02: Utilizando as ferramentas de tratamentos acústicos do programa (projeto do enclausuramento e subtração da atenuação na tubulação).

Os resultados obtidos no trabalho serão apresentados no capítulo correspondente.

6.6 Metodologias para Estimativa da Rota

Para o cálculo da dose de exposição ao ruído, é necessário conhecer o tempo gasto em cada ponto da rota além do tempo gasto em cada vistoria e manobra nos equipamentos. Para tanto, foi utilizada uma matriz, denominada a partir daqui como Matriz de Rota, onde a primeira e segunda colunas listam as coordenadas (x,y) da rota e a terceira coluna o tempo gasto em cada ponto.

Para se estimar o tempo gasto em cada ponto, foi considerada durante o trajeto (deslocamento entre equipamentos) uma velocidade média de 0,8 m/s, sendo que tal valor pode ser mudado pelo funcionário, resultando em um tempo médio de exposição ao ruído de 1,25 segundos por ponto analisado em cada rotina de vistoria.

Para o cômputo do tempo gasto em manobras e vistoria de cada equipamento, foi inserido, manualmente, o tempo médio estimado para cada operação. Tais dados foram conseguidos nos trabalhos realizados pelo laboratório em várias indústrias.

Tendo posse dos NPS da área e da rotina de trabalho a ser avaliada, iniciou-se o desenvolvimento do método de estimativa de dose. Foram criados inicialmente 2 métodos.

O Método 1 utiliza como dados de entrada uma matriz de duas colunas contendo todos os pontos que definem a área estudada (coordenadas (x,y) de todos os pontos em um malha de espaçamento de um metro) denominada a partir daqui como Matriz de Coordenadas e a Matriz de Rota.

Para cada ponto da rota, são avaliados todos os pontos da planta e estimada a probabilidade de o funcionário estar em cada um destes pontos, sendo tal probabilidade inversamente proporcional à distância entre os pontos da rota e o avaliado. Através de vários testes e simulações realizadas, os melhores resultados obtidos foram através das relações dadas pelas Eqs. (6.25) e (6.27).

$$P(p_2) = \frac{P(p_1)}{1 + d(p_1, p_2)} \quad (6.25)$$

onde:

- p_1 é um ponto pertencente à rota definida pelo colaborador;
- $P(p_1)$ é a probabilidade de o colaborador estar no ponto p_1 calculada pelo tempo de permanência em tal ponto e pelo tempo total da jornada de trabalho;
- p_2 é um ponto qualquer da planta que se deseja avaliar;
- $P(p_2)$ é a probabilidade de o funcionário estar no ponto p_2 ;
- $d(p_1, p_2)$ é a distância entre os pontos p_1 e p_2 .

O Método 2 utiliza um procedimento de estimativa de tempo de permanência em cada ponto de toda a área através do treinamento de uma rede neural probabilística (RNP).

A RNP em questão não foi desenvolvida, utilizou-se um algoritmo já testado e utilizado por vários pesquisadores, sendo retirada do livro de Timothy Masters (Masters, 1995).

Para o treinamento da RNP foram utilizados como dados de entrada, assim como no Método 1, as Matrizes de Coordenadas e de Rota.

A saída da rede neural é a uma matriz de três colunas, onde as duas primeiras identificam os pontos da planta pelas coordenadas (x,y) e a terceira coluna é a probabilidade de o colaborador estar em nestes pontos.

Para a primeira análise e evolução da metodologia, foi considerada uma área industrial menor, composta de biombo de operação (garante 60 dB(A) de exposição máxima ao ruído), 6 moto bombas (que emitem 90 dB(A) a 1 metro de distância), 3 moto compressores (que emitem 95 dB(A) a 1 metro de distância) e 1 turbo expensor (que emite 110 dB(A) a 1 metro de distância). A Fig. 6.17 ilustra o layout de tal área, onde os círculos ao redor das fontes demarcam o campo de ação utilizado pelo operador durante a vistoria e manobras nos equipamentos. As linhas vermelhas representam o caminho normalmente traçado durante a vistoria e manobras (passando por todos os equipamentos), e a linha azul (cruzando a planta) o caminho de retorno ao biombo de operação. A malha ilustrada na figura tem espaçamento de 1x1 metro quadrado, e será utilizada para analisar a trajetória do operador.

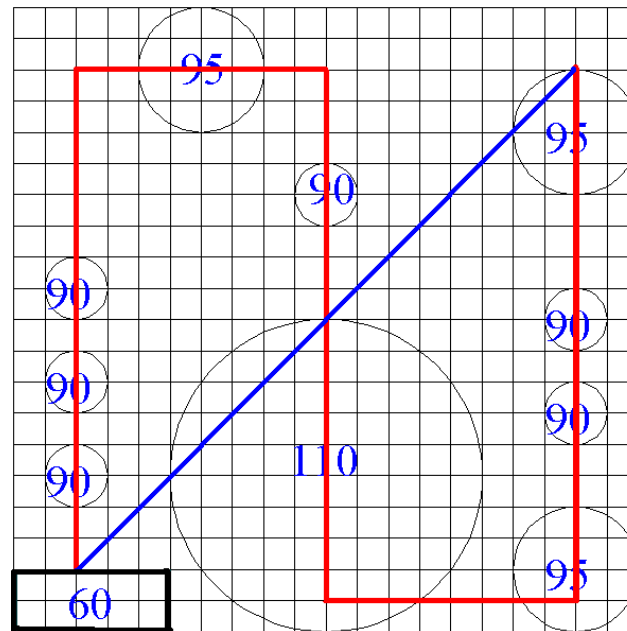


Figura 6.17 – Modelo simplificado utilizado para validar a metodologia.

No programa de simulação, exportaram-se os dados referentes aos níveis de pressão (matriz que define as coordenadas X, Y e Z e o NPS de cada ponto simulado). Com tal informação, foi traçada a rota do funcionário, obedecendo à trajetória definida na Fig. 6.19.

No caso analisado, o tempo gasto em cada equipamento por jornada de trabalho foi assim considerado:

- Moto bombas: 7 minutos em cada uma;
- Moto compressores: 11 minutos em cada um;
- Turbo Expansor: 21 minutos;
- Sala de Operação: 373 minutos;
- Deslocamento: 11 minutos.

Foi calculada analiticamente a dose de exposição para a rota considerada pelo método proposto na NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego (Eq. 3.1), sendo este comparado com a dose estimada pelos Métodos e calculado o erro porcentual dado pela Eq. (6.26).

$$Erro\% = \left(\frac{|Dose\ Analitica - Dose\ Metodo|}{Dose\ Analitica} \right) \quad (6.26)$$

onde:

- *Dose Analítica* é o valor da dose calculado analiticamente pela Eq. 3.1;
- *Dose Método* é o valor da dose estimado pelo Método avaliado.

Após vários testes e análises, foi verificado que, para a melhora da metodologia seria necessário algumas mudanças nos métodos desenvolvidos.

Criou-se então o Método 1.1, sendo este o Método 1 considerando que a variação da proporcionalidade se dê de acordo com a Eq. (6.27).

$$P(p_2) = \frac{P(p_1)}{4 + (d(p_1, p_2))^3} \quad (6.27)$$

Criou-se também o Método 2.1, sendo este o Método 2 impondo que pelo menos 20% da planta, deverão ter algum tempo de permanência. Para não tornar o método tendencioso, os pontos excedentes à rota terão probabilidade de o funcionário estar 0,5 segundos, sendo tal valor irrelevante para o cálculo de dose.

Já para a aplicação da metodologia na unidade industrial desenvolvida para o trabalho, era necessário impor uma rotina para a jornada de trabalho a ser analisada. Para se estimar o tempo gasto, foi considerada durante o trajeto (deslocamento entre equipamentos) uma velocidade média de 0,8m/s, resultando em um tempo médio de exposição ao ruído de 1,25 segundos por ponto analisado em cada rotina de vistoria. Para o cômputo do tempo gasto em manobras e vistoria de cada equipamento, foi inserido, manualmente, o tempo médio estimado para cada operação. No caso analisado, o tempo gasto em cada equipamento por jornada de trabalho foi assim considerado:

- Sala de Operações: 256,18 minutos no posto de trabalho, 5 deslocamentos até a copa, 3 deslocamentos até o sanitário, 5 deslocamentos até a porta de acesso da sala (entrada e saída do expediente, 2 rotinas de vistorias e 2 liberações de área), 30 minutos de permanência na copa, 30 minutos de permanência no sanitário e 5 minutos nas escadas;
- Área dos compressores: 2,5 minutos para cada compressor;
- Torre de refrigeração: 1 minuto para verificação da torre de resfriamento e 1 minuto para cada uma de suas moto bombas;
- Caldeira: 2 minutos em cada queimador e pirômetros, 0,5 minutos em cada escada e transposição de plataforma, 3 minutos para o motor de acionamento do ventilador, 6 minutos para a turbina de acionamento do ventilador, 1 minuto para cada compressor no térreo;

- Desaerador: 1 minuto para verificação dos vent's e 0,5 minutos para transposição de plataforma;
- Prédio nas Turbo Máquinas: 3 minutos em cada ponto de avaliação das turbo máquinas nos 1º e 2º pisos e 1 minuto para cada ponto de avaliação no térreo;
- Parque de bombas: 2,5 minutos para cada moto bomba.

6.7 Metodologias para Estimativa da Dose

Para o cálculo da dose de exposição ao ruído, foram feitas algumas considerações:

- Conforme visto em trabalhos de campo, normalmente uma área industrial não possui os mesmos NPS durante toda a jornada de trabalho nem mesmo esta se repete de forma idêntica todos os dias. Variações de até 6 dB(A) já foram observadas durante coleta de dados em uma mesma unidade no período de uma semana. Desta forma, ao considerar o NPS de cada ponto, serão realizadas 30 variações aleatória de até 6 dB(A) do NPS simulado em cada ponto da planta, tentando assim reproduzir de forma o mais correta possível a realidade de uma planta industrial;
- Foram utilizados os limites de exposição permissíveis da NR 15 do Ministério do Trabalho, com fator de troca igual a 5.

Com tais dados, foram realizadas 12 repetições dos Métodos 1 e 2. Para verificar a eficiência de cada metodologia, foi calculada analiticamente a dose de exposição ao ruído para cada área. O cálculo analítico foi feito levando em consideração somente os pontos que descrevem o trajeto e o tempo de permanência nos equipamentos, descartando a hipótese de permanência de pontos aleatórios da planta.

Foi necessário ainda criar o Método 3, que agrupava os Métodos 1, 2 e 2.1 sendo a cada um deles aplicados a um determinado local, dependendo do tamanho e nível de pressão sonora local:

1. Para áreas de até 50 m² e com NPS máximo superior a 95 dB(A), ou áreas de 50 m² a 1000 m² e NPS máximo superior a 104 dB(A): será utilizado o Método 1 considerando somente um raio de 1 metro ao redor de cada ponto do trajeto para a estimativa da possibilidade do funcionário estar presente durante a jornada de trabalho;

2. Para áreas de até 50 m² e NPS máximo inferior a 95 dB(A) ou de 50 m² a 1000 m² e NPS máximo inferior a 104 dB(A), será utilizado o Método 2;
3. Para áreas maiores que 1000 m², independente dos NPS, será utilizado o Método 2.1.

Para ampliar as possibilidades de abordagem da metodologia de estimativa de dose de exposição o ruído ocupacional, desenvolveu-se uma nova forma de avaliação do tempo de permanência do funcionário nos pontos da planta. A nova metodologia se baseia no Método de Simulação de Monte Carlo, consiste em estimar a probabilidade de o funcionário estar em qualquer ponto da planta através do Método 3, dividir a jornada de trabalho em intervalos de tempo iguais a 10 minutos (a escolha do intervalo e tempo fica por conta de quem estiver realizando a análise), escolher aleatoriamente pontos da planta e avaliar qual a probabilidade de o funcionário estar nestes pontos no intervalo de tempo pré definido. Acumulam-se as probabilidades estimadas para cada período de tempo em cada ponto. Após os cálculos e estimativas levando em consideração as variações de 0 a 6 dB(A) para os NPS simulados para a planta e por fim calcula-se a dose de exposição ao ruído.

A utilização de tal metodologia se justifica pela necessidade de se obter uma faixa de aceitação para a estimativa de dose. O Método de Simulação de Monte Carlo torna possível o cálculo dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e variância) de uma população com distribuição desconhecida, através da distribuição *Normal*, *t de Student* ou *Qui-quadrado*.

O Método 4, utiliza como base o Método 3, e após a estimativa da probabilidade de o funcionário estar em qualquer local da planta, é utilizado o princípio do Método de Simulação de Monte Carlo para previsão da dose.

Por fim, foi necessário encontrar uma faixa de aceitação, definida pelo intervalo de confiança de 95% das 30 repetições do experimento. Para tanto, foram consideradas as 30 variações aleatórias dos NPS de até 6 dB(A) de modo a representar um (1) mês de coleta de dados, além de incluir nas rotinas de vistoria os translados à planta para verificação de equipamentos com possíveis falhas. Para a avaliação dos resultados foram utilizados os valores médios estimados nas simulações que seguem, sendo estes comparados com o valor de dose obtido no Método 6 com um intervalo de confiança definido pelas 30 repetições.

Foi calculado um intervalo de 95% de confiança através da Eq. (6.28) considerando que a população siga uma distribuição Normal.

$$\left(\bar{x} - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{x} + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (6.28)$$

onde:

- $\bar{x}$ é o valor médio para a Dose estimado pelas 30 repetições do método 6;
- σ é o desvio padrão para a Dose estimado pelas 30 repetições do método 6;
- n é a quantidade de indivíduos na população (30).

Para a validação da metodologia foram realizados quatro estudos de casos onde o colaborador necessitasse executar tarefas fora de sua rotina de trabalho, sendo o incremento da dose devido a estes tipos de situações nem sempre computado para o grupo homogêneo, por se tratarem de situações não cotidianas. A faixa de avaliação definida ao término da metodologia deve ser passível de abordar tais imprevistos.

6.7.1 Apresentação do Programa de Estimativa de Dose

Antes de aplicar os métodos, foi necessário desenvolver um sistema de fácil manuseio e objetivo, que possibilite ao funcionário traçar a sua rota durante toda a jornada de trabalho, além da vistoria inserindo ainda o trajeto feito para se ir ao sanitário ou à copa, sendo possível ainda inserir o tempo gasto em cada operação. A Fig. 6.18 ilustra a interface desenvolvida.

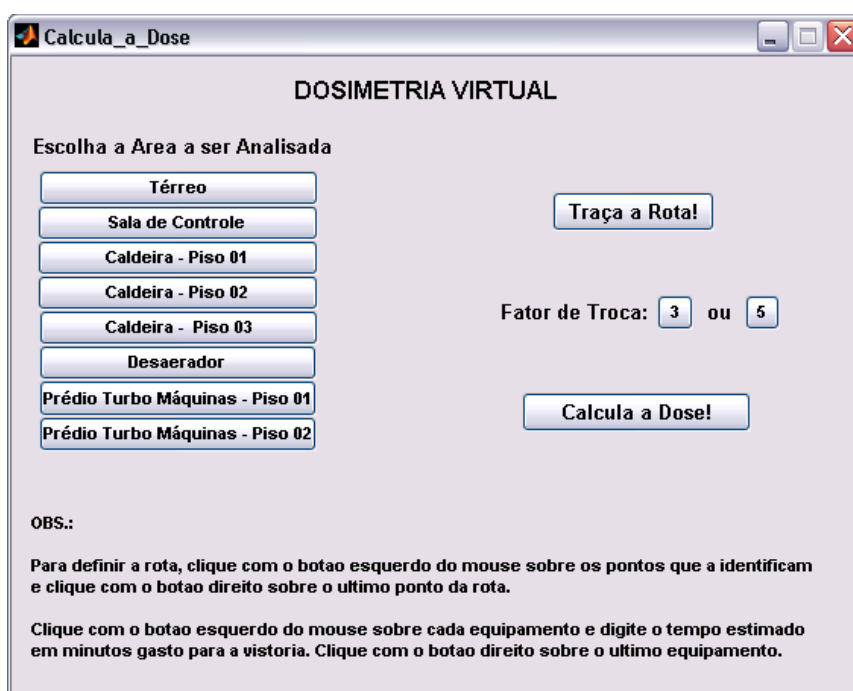


Figura 6.18 - Interface desenvolvida para aplicação industrial.

A interface foi elaborada de forma a garantir simplicidade em sua operação:

1. O primeiro passo é escolher qual local a ser avaliado clicando-se sobre o botão que o identifica;
2. Em seguida, clica-se no botão “Traça a Rota!” e é aberta uma janela com a figura do local analisado (Fig. 6.19);
3. Para traçar a rota clica-se nos pontos que a identificam e uma linha azul vai se formando, como exemplo, na Fig. 6.19, demonstrando a rota do funcionário na planta;
4. Após traçada a rota, é aberta outra janela semelhante à anterior, mas desta vez clica-se em cada equipamento que será vistoriado, bem como em postos de liberação de serviço e escadas, sendo criadas marcações para definir tais pontos, como por exemplo, as cruzes vermelhas da Fig. 6.19. Assim que cada ponto é escolhido, é necessário inserir o tempo gasto, em minutos, para cada operação ou transposição;
5. Inseridos os pontos, escolhe-se o incremento de duplicação de dose a ser utilizado, podendo este ser 3 (princípio de equivalência de energia, adotado pela OSHA) ou 5 (adotado pela ISO 1.999 e NR 15);

- Escolhido o incremento de duplicação de dose, clica-se no botão “Calcula a Dose!”. Ao acionar tal opção, são feitas as 30 variações aleatórias de até 6 dB(A) nos NPS simulados para a área em estudo. O programa escolhe qual dentre os Métodos será utilizado, levando em consideração a dimensão e NPS na área, para estimar a probabilidade de o funcionário estar em qualquer local da planta.

Após o calculo da dose para cada área, realiza-se a simples soma aritmética dos valores encontrados, sendo obtida a dose total de exposição ao ruído resultante da jornada de trabalho.

É indicado que o procedimento seja realizado com uma devida repetibilidade, sendo avaliados os possíveis desvios de rota impostos pelo funcionário.

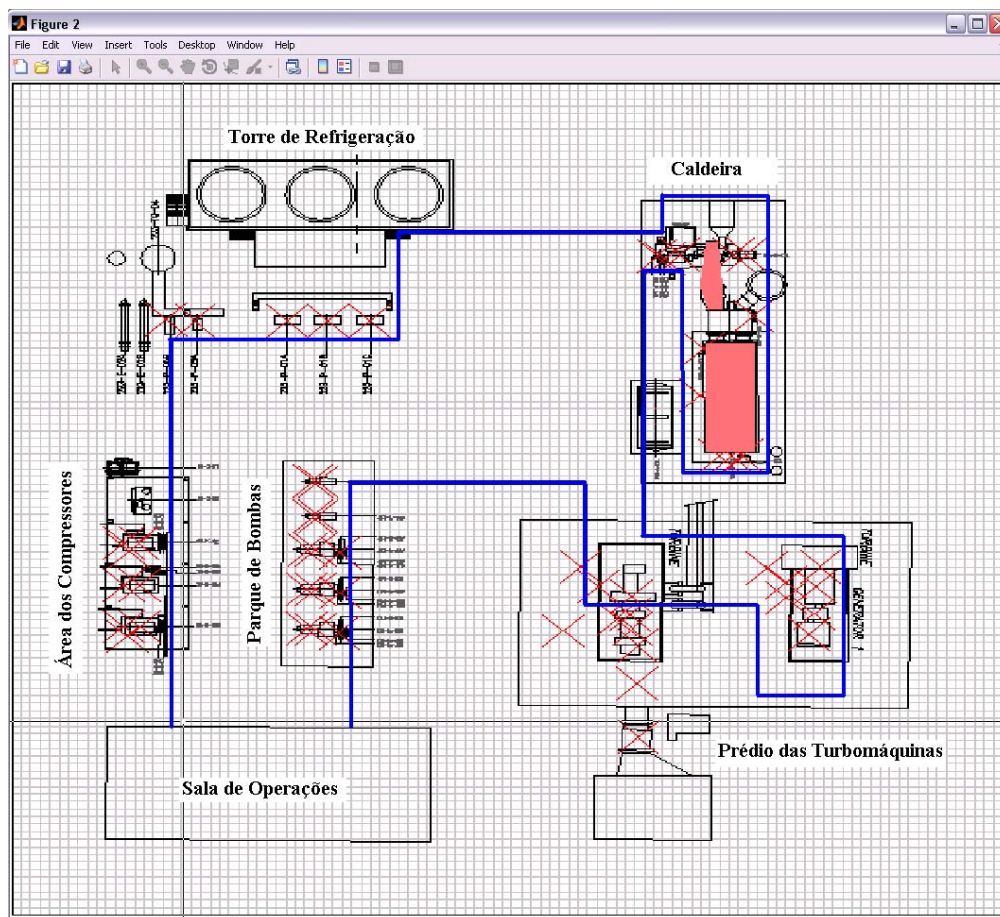


Figura 6.19 – Janela com a planta do local analisado, neste caso, o térreo da unidade.

CAPÍTULO VII

Resultados e Análises

Uma vez definido o escopo da unidade industrial a ser utilizada para a aplicação da metodologia proposta no trabalho, foi necessário atribuir os níveis de potência sonora de cada uma das fontes de ruído constituintes da planta. Foram utilizados valores já identificados em trabalhos de campo realizados pelo laboratório em diversas empresas. Além das técnicas tradicionais de identificação existentes, foi necessário o desenvolvimento algumas ferramentas computacionais para auxiliar nos trabalhos.

7.1 Resultados Obtidos com as Ferramentas Computacionais Desenvolvidos na Coleta de Dados

7.1.1 Resultado para a Identificação dos NWS Utilizando uma Rotina de Otimização

Através do procedimento mostrado no item 6.4.1, utilizando um algoritmo genético para estimar a contribuição de cada componente do conjunto (motor, amplificador de rotação e compressor) no nível de ruído medido no ponto avaliado, calculando o NWS de cada equipamento a partir dos NPS medidos, tendo como base para o espectro de frequências uma estimativa teórica do NWS dada pelas características operacionais de cada equipamento, pode-se verificar que os menores erros entre os valores otimizados e calculados, foram observados para as médias e altas frequências. Os maiores níveis de potência sonora foram encontrados para os valores calculados, uma vez que os métodos analíticos tendem a ser conservativos.

As maiores diferenças, na análise dos resultados, foram observadas para o amplificador de rotação. Tais diferenças podem ser explicadas devido à influência do motor e do compressor no procedimento de identificação da fonte, uma vez que o amplificador se localiza entre o motor e o compressor, e não é possível o desligamento de fontes no procedimento de identificação.

Para se verificar a eficiência do método, foram feitas simulações de campo acústico com os valores otimizados dos NWS de fontes de ruído de uma unidade de processo (Fig. 7.1a) os quais foram comparados com o mapeamento dos NPS em campo realizados na mesma unidade (Fig. 7.1b). Observou-se uma variação máxima entre os valores dos níveis de pressão sonora em pontos específicos da área foi de 3 dB(A). Deve-se ressaltar que tais variações são aceitáveis para medições acústicas em ambientes abertos.

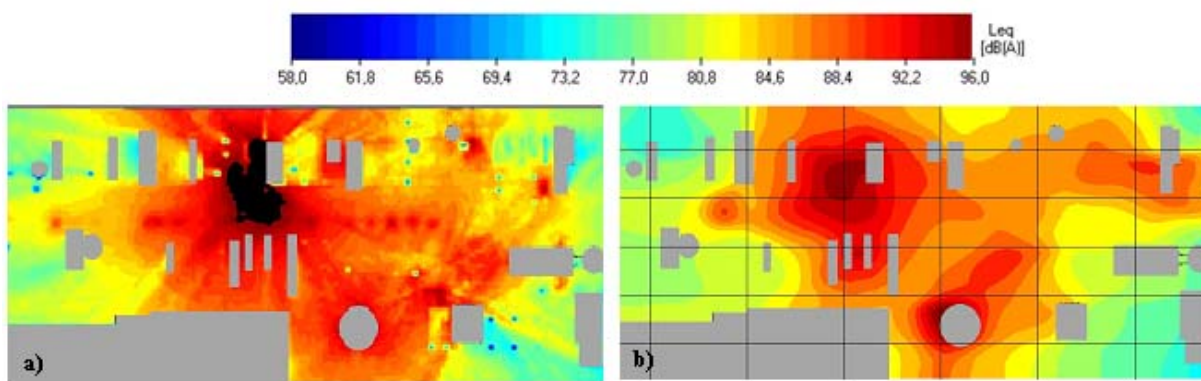


Figura 7.1 - a) Isocurvas obtidas através da simulação com os valores de NWS otimizados. b) Isocurvas obtidas através da interpolação dos valores de NPS medidos *in situ*.

A escolha de um método numérico, especificamente um algoritmo genético, simplifica significativamente a solução de um problema inicialmente complexo de identificação de fontes, com boa convergência e baixo custo computacional, além de fornecer resultados confiáveis, possíveis de serem utilizados nas simulações da metodologia de mitigação de ruídos do LAV.

7.1.2 Resultado da Metodologia de Identificação de NWS de Motores Elétricos

Foi verificado que os métodos analíticos (teóricos) para estimativa de NWS de equipamentos não apresentam grande confiabilidade. Foi proposto o desenvolvimento de uma superfície de resposta e uma rede neural artificial visando uma melhor previsão de tais dados.

Foi utilizado um banco de dados com a identificação de 141 motores elétricos. Destes, 80% foram usados para o ajuste da superfície de resposta e para o treinamento da rede neural, 10% foram utilizados para a validação dos métodos e 10% para a comparação entre métodos.

O MSR foi utilizado para localizar os valores constantes: A , B e C da Eq. 6.14.

Seguindo o senso comum entre os autores dos livros de acústica adotados pelo LAV (Beranek e Vér (1992), Gerges (2000), Bies e Hansen (2003), Barron (2003), Bistafa (2006)), os motores elétricos foram classificados em 3 faixas de potência e obtidas a Eqs. 7.1 (para motores cuja potência esteja na faixa de 1 a 49 cv), 7.2 (de 50 a 149 cv) e 7.3 (acima de 150 cv) pelo MSR.

$$NWS = 6,17 \log(CV) + 7,94 \log(RPM) + 63,46 + X_1 \quad (7.1)$$

$$NWS = 1,5 \log(CV) + 10 \log(RPM) + 64,55 + X_2 \quad (7.2)$$

$$NWS = 4,4 \log(CV) + 367,4 \log(RPM) - 1213,4 + X_3 \quad (7.3)$$

onde X_1 , X_2 e X_3 , representam os coeficientes de ajuste para bandas de oitava (Tab. 7.1).

Tabela 7.1. Valores de X_1 , X_2 e X_3 para ajustar os NWS encontrados nas Eqs. 7.1, 7.2 e 7.35 para bandas de oitava potência.

	Frequências centrais das bandas de oitava [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
X_1 em dB(A)	-38,23	-26,19	-15,78	-6,85	-4,77	-5,98	-10,11	-16,89
X_2 em dB(A)	-36,70	-23,53	-12,88	-6,14	-4,62	-6,59	-11,69	-18,03
X_3 em dB(A)	-36,90	-24,91	-14,94	-8,53	-8,53	-7,31	-11,06	-17,18

Foi utilizada uma RNA (Rede Neural Artificial) já existente, treinada pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt.

A metodologia utilizando redes neurais resultou em um erro médio no NWS estimado para equipamentos de 1,2% em relação à identificação utilizando os NPS medidos *in situ* contra 1,1% resultante da estimativa de NWS utilizando-se a superfície de resposta com três equações.

7.2 Resultados da Avaliação da Confiabilidade dos Resultados do Programa e Simulação

Antes de se aplicar a planta industrial criada para o trabalho no simulador, viu-se a necessidade de avaliar a sua precisão.

7.2.1 Resultado do Cálculo de Refração em Borda de Barreiras

Foi realizado o mapeamento dos NPS na área analisada. A Figura 7.2 ilustra a interpolação resultante destas medições.

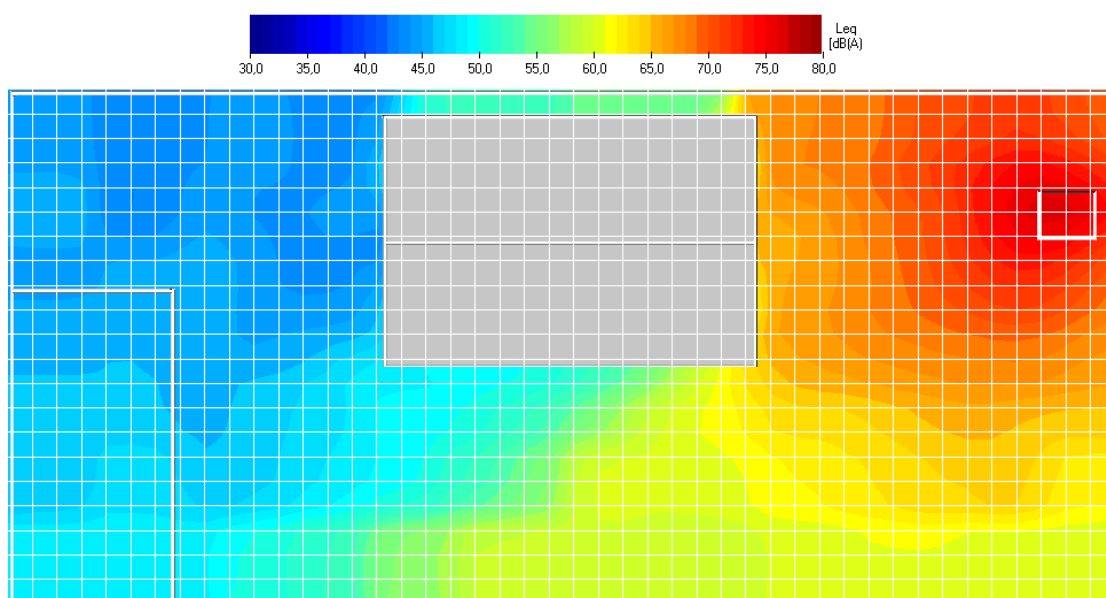


Figura 7.2 - Isocurvas de pressão sonora interpoladas para os NPS na área analisada.

Foram comparados três metodologias para cálculo de refração em borda de barreiras, a primeira seguindo o método de Maekawa, e a segunda e terceira de acordo com a Norma ISO 9613, sendo diferenciados pelo método do cálculo de reflexões no solo (para $c_2=20$ está incluso as reflexões do solo e para $c_2=40$ as reflexões do solo são calculadas separadamente). As Figs. 7.3a, 7.3b e 7.3c ilustram os resultados das simulações para cada um dos métodos respectivamente.

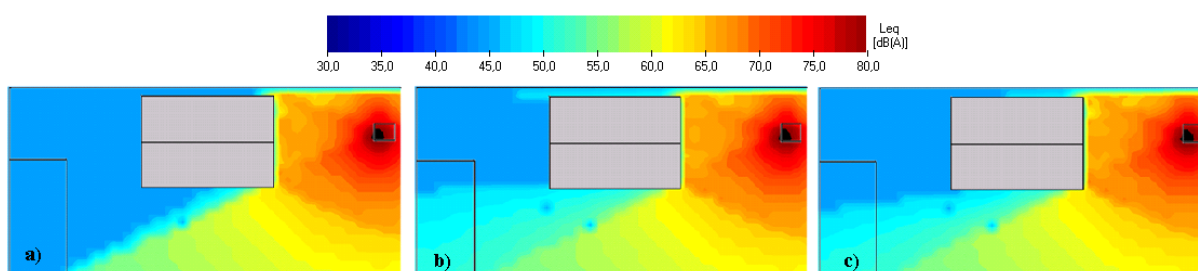


Figura 7.3 - a) Simulação utilizando o método de Maekawa. b) Simulação utilizando a Norma ISO 9613 com $c_2=20$. c) Simulação utilizando a Norma ISO 9613 com $c_2=40$.

Para a avaliação das metodologias é realizada a comparação entre os NPS medidos e simulados em pontos pré-definidos. Utilizando o método de Maekawa, observou-se uma boa concordância entre os valores experimentais e os obtidos através de simulação para a região de refração primária, já para a região de refração secundária os valores foram inferiores aos medidos.

Utilizando a norma ISO 9613, observou-se boa concordância com os valores experimentais para qualquer valor de c_2 . Isto ocorreu visto que o solo é composto de asfalto crespo, gerando uma influência reflexiva baixa.

7.2.2 Resultados para a Avaliação do Módulo de Tratamentos Acústicos do Programa

Inicialmente foi necessário realizar a validação do modelo de simulação acústica para o experimento. Comparando-se os NPS em pontos de controle da situação real (Fig. 7.4a) com a simulação para a mesma situação (Fig. 7.4b), verifica-se um bom ajuste do modelo. Apesar de existirem locais próximos às fontes, onde os valores simulados se apresentam mais elevados que os medidos, verifica-se que as diferenças máximas encontradas nos NPS são de 3 dB(A).

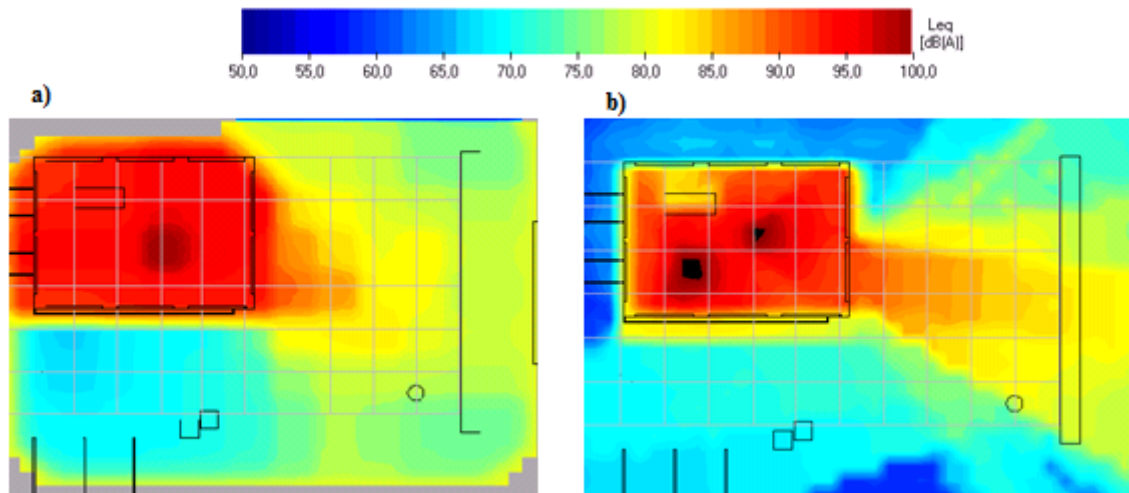


Figura 7.4 - a) Isocurvas de pressão sonora interpoladas para o mapeamento de ruído realizado. b) Simulação dos níveis de ruído no local.

Na Fig. 7.4a, as áreas em cinza representam locais onde não foram realizadas medições, não sendo possível a interpolação de NPS. Na Fig. 7.4b, os locais em preto representam NPS maiores que 100 dB(A).

Comparando-se os NPS em pontos de controle da situação real (Fig. 7.4a) com a simulação para a mesma situação (Fig. 7.4b), verifica-se um bom ajuste do modelo. Apesar de existirem locais próximos às fontes, onde os valores simulados se apresentam mais elevados que os medidos, verifica-se que as diferenças máximas encontradas nos NPS são de 3 dB(A).

Com as todas as soluções implantadas (aumento da quantidade de furos na descarga de ar comprimido e enclausuramento da caixa de som), outras medições de NPS foram realizadas na área para a obtenção das isocurvas de pressão sonora resultantes do tratamento (Fig. 7.5a). Nas Figs. 7.5b e 7.5c têm-se, respectivamente, o resultado obtido na Situação 1 (modificação dos NWS da tubulação de descarga de ar comprimido e projeto do enclausuramento no modelo acústico) e na Situação 2 (subtração dos NWS referentes à troca da tubulação no programa e utilização do módulo de tratamento acústico do programa para simular o enclausuramento).

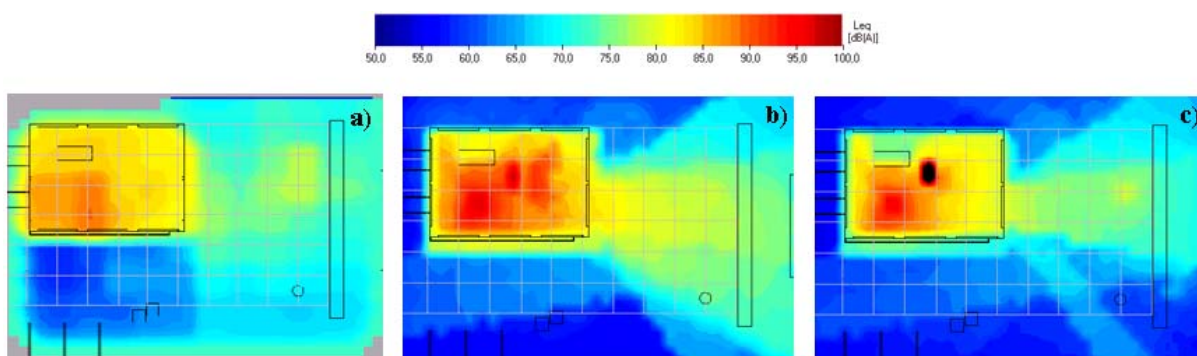


Figura 7.5 - a) Isocurvas de Pressão Sonora medidas após a execução das soluções acústicas propostas. b) Isocurvas de Pressão Sonora obtidas da simulação da Situação 01. c) Isocurvas de Pressão obtidas da simulação da Situação 02.

Comparando-se os resultados das simulações com as isocurvas medidas após a execução dos tratamentos, notou-se uma boa concordância nos NPS locais, sendo a diferença máxima encontrada de 3 dB(A). Constatou-se ainda que a ferramenta de tratamentos acústicos do programa se mostrou mais eficiente do que inserindo o tratamento acústico diretamente no modelo acústico tridimensional.

Concluiu-se, embasado no exposto do item 7.2, que o programa é confiável e preciso para aplicações em tratamentos e projetos acústicos de caráter industrial e ambiental. Desta forma, serão utilizados os NPS obtidos da simulação da planta industrial proposta para o desenvolvimento da Tese.

7.3 Análises Preliminares

No item 6.6 foram descritos os Métodos 1 e 2, inicialmente desenvolvidos para a estimativa da probabilidade de o funcionário estar em qualquer local da planta.

Para se testar a metodologia proposta, optou-se por utilizar uma área industrial menos complexa, para simplificar os cálculos e diminuir o custo computacional. Depois de validada a metodologia, esta foi aplicada na área industrial fictícia criada para o desenvolvimento da Tese.

A planta desenvolvida para a análise preliminar, conforme descrita no item 6.6, está ilustrada na Fig. 7.6.

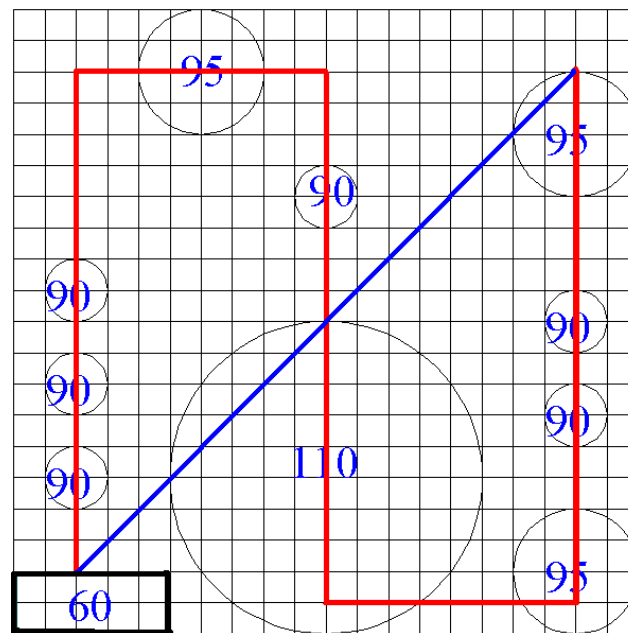


Figura 7.6 – Modelo simplificado utilizado para validar a metodologia.

A Fig. 7.7 ilustra as isocurvas de pressão sonora simuladas para tal área a 1,6 metros de altura do solo.

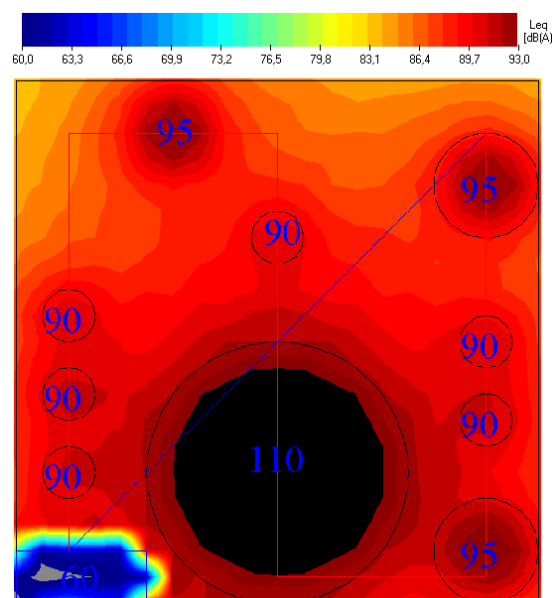


Figura 7.7 – Isocurvas de pressão sonora simuladas para a área.

Após 12 repetições dos Métodos 1 e 2 foram obtidos os seguintes resultados:

- Método 1: valores de dose variaram de 2,55 a 2,72, dose média: 2,61.
- Método 2: valores de dose variaram de 2,27 a 2,49, dose média: 2,35.

Para verificar a eficácia da metodologia, foi calculada analiticamente a dose de exposição para a rota considerada pelo método proposto na NR 15 do Ministério do Trabalho, resultando em uma dose de 1,5.

As metodologias não se mostraram eficientes, com desvios de aproximadamente 74 e 56%.

Após vários testes e análises, foi verificado que, para a melhora das metodologias, seriam necessárias algumas mudanças, sendo criados os Métodos 1.1 e 2.1.

Novamente foram realizadas 12 repetições de cada ensaio e obtidos os seguintes resultados:

- Método 1.1: valores de dose que variaram de 1,51 a 1,58, dose média: 1,55;
- Método 2.1: valores de dose que variaram de 1,64 a 1,72, com uma dose média: 1,68.

Desta vez, as metodologias se mostraram bem mais eficientes, com desvios de aproximadamente 3,3 e 12% quando comparadas ao valor analítico de dose.

Apesar do desvio do Método 2.1 aparentar ser de grande magnitude, variações da ordem de 10% já eram esperadas, uma vez que foi imposta uma faixa de variação de 6 dB(A) aos NPS da planta.

7.4 Aplicação da Metodologia na Planta Industrial

7.4.1 Níveis de Pressão Sonora na Planta

Como os resultados obtidos na análise preliminar se mostraram bem fundamentados e dentro de uma faixa já esperada, optou-se por aplicar ambos os métodos na planta industrial criada para o trabalho (Fig. 6.1).

Como os principais dados de entrada são os valores de NPS simulados para a planta, e devido ao programa de simulação realizar a análise em uma determinada altura em relação ao solo de cada vez, foi criado um projeto para cada nível (ou andar) existente na planta, sendo assim classificados:

- Térreo: aborda todo o térreo da planta, sendo o plano receptor a 1,6 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.8);

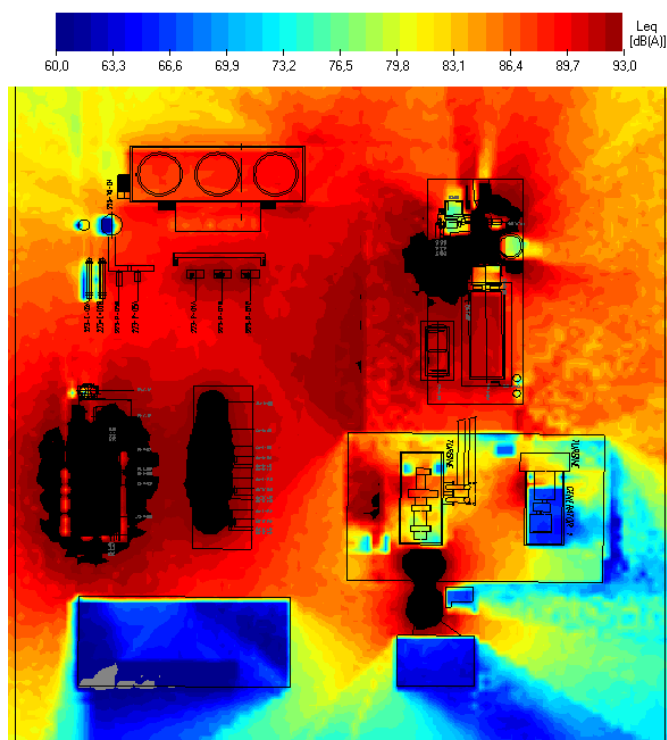


Figura 7.8 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para o Térreo.

- Sala de Operações: aborda o segundo andar do prédio de operações, onde o funcionário passa a maior parte de sua jornada de trabalho, sendo o plano receptor a 6,6 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.9);

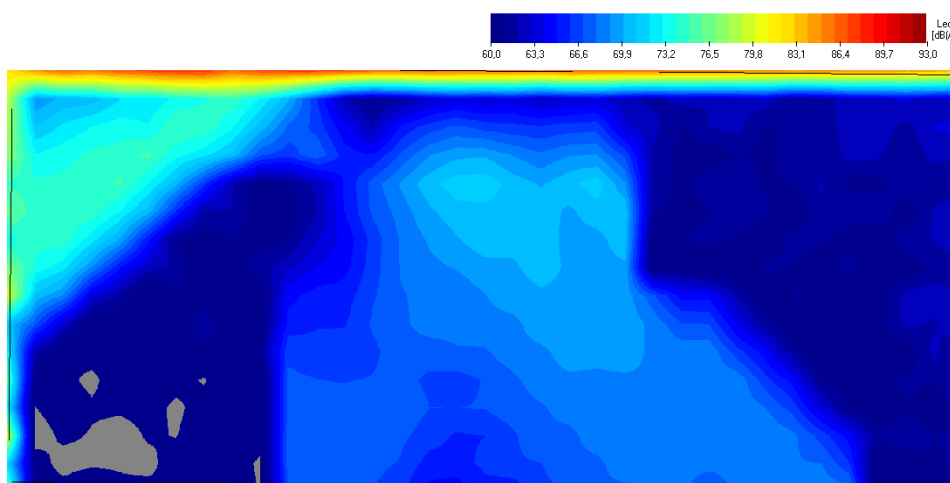


Figura 7.9 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para a Sala de Operações.

- 1º Piso da Caldeira: aborda a primeira plataforma elevada na caldeira, sendo o plano receptor a 6,1 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.10);

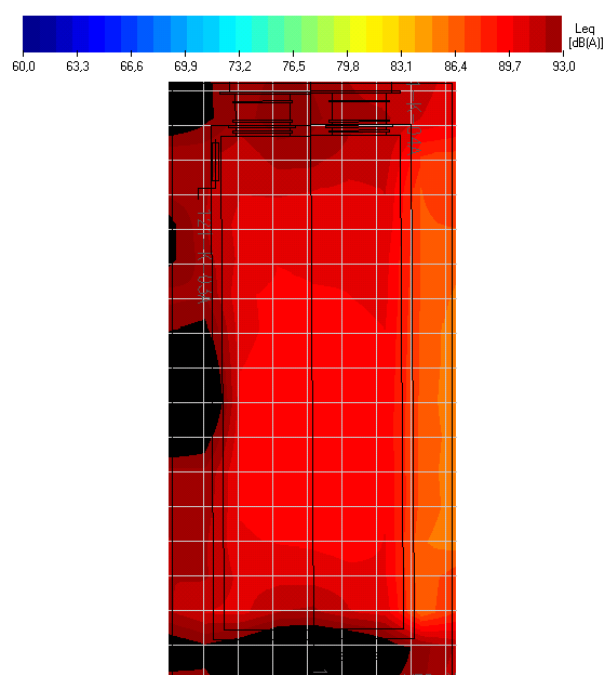


Figura 7.10 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para o 1º Piso da Caldeira.

- 2º Piso da Caldeira: aborda a segunda plataforma elevada na caldeira, sendo o plano receptor a 8,7 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.11);

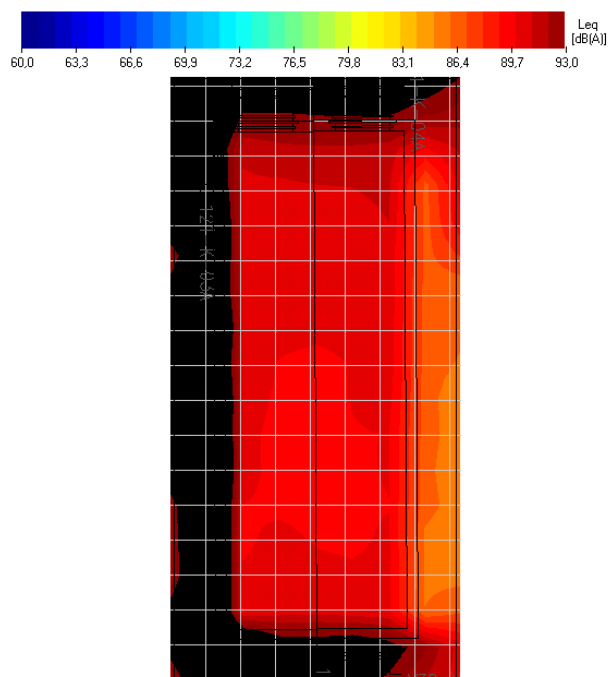


Figura 7.11 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para o 2º Piso da Caldeira.

- 3º Piso da Caldeira: aborda a terceira plataforma elevada na caldeira, sendo o plano receptor a 11,1 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.12);

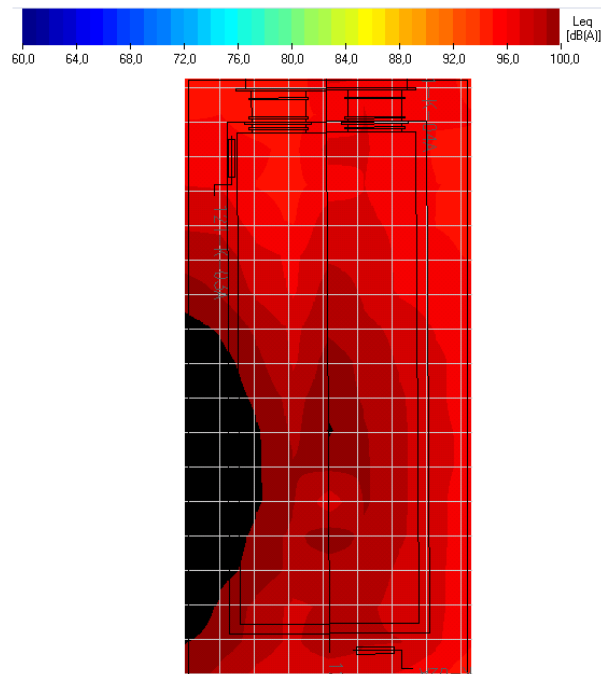


Figura 7.12 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para o 3º Piso da Caldeira.

- Des aerador: aborda a plataforma elevada ao lado da caldeira, onde se tem acesso ao desaerador, sendo o plano receptor a 11,6 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.13);

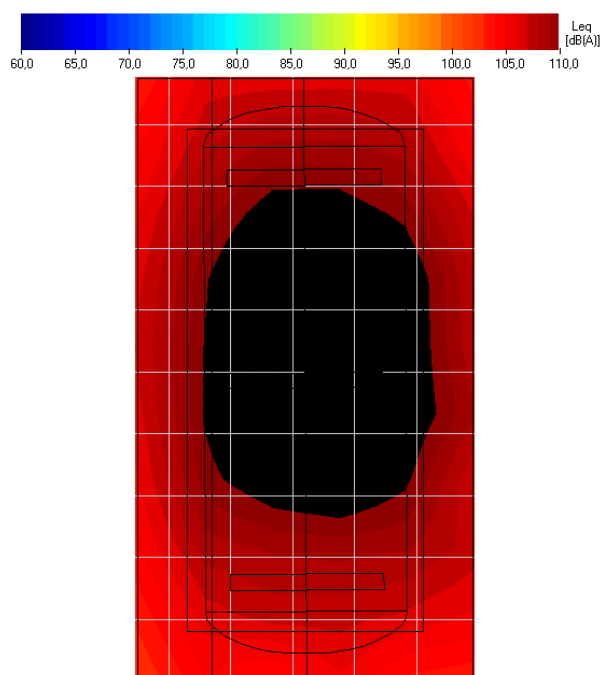


Figura 7.13 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para o Desaerador.

- 1º Piso da Edificação das Turbo Máquinas: aborda o primeiro andar da edificação onde se localizam o turbo expansor e o turbo gerador, sendo o plano receptor a 6,6 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.14);

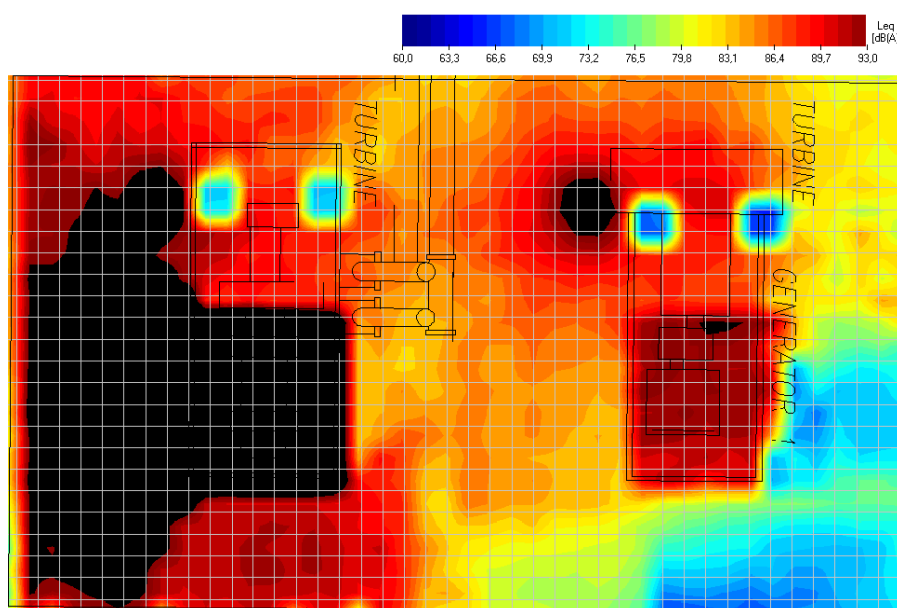


Figura 7.14 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para o 1º Piso da Edificação das Turbo Máquinas.

- 2º Piso da Edificação das Turbo Máquinas: aborda o primeiro andar da edificação onde se localizam o turbo expansor e o turbo gerador, sendo o plano receptor a 11,6 metros de altura em relação ao solo (Fig. 7.15).

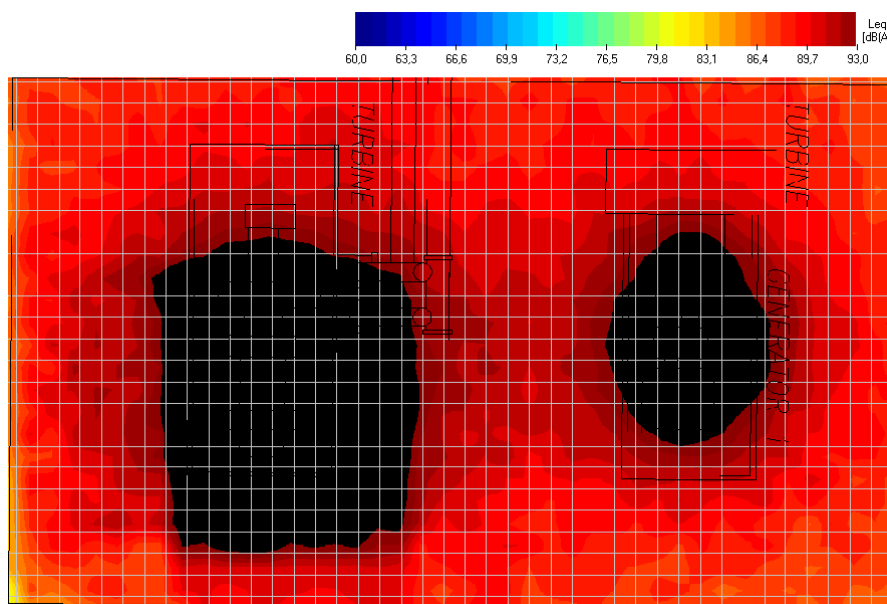


Figura 7.15 - Isocurvas de Pressão sonora simuladas para o 2º Piso da Edificação das Turbo Máquinas.

Cada uma destas áreas será analisada separadamente, uma vez que nem sempre é necessário que o funcionário percorra toda a unidade para a realização de sua rotina de trabalho.

7.4.2 Aplicação da Metodologia na Planta Industrial

A partir dos dados estipulados para a rotina de trabalho do colaborador, foram realizadas 12 repetições dos Métodos 1 e 2. Para verificar a eficiência de cada metodologia, foi calculada analiticamente a dose de exposição ao ruído para cada área. O cálculo analítico foi feito levando em consideração somente os pontos que descrevem o trajeto e o tempo de permanência nos equipamentos, descartando a hipótese de permanência de pontos aleatórios da planta. Na Tab. 7.1 tem-se o comparativo dos resultados.

Tabela 7.2 - Comparativo dos resultados obtidos para a previsão da dose com as duas metodologias com o valor de dose calculado analiticamente.

Área Analisada	Método 1	Método 2	Analítico
Sala de Operações	0,14	0,17	0,14
1º Piso da Caldeira	0,09	0,09	0,09
2º Piso da Caldeira	0,11	0,11	0,11
3º Piso da Caldeira	0,08	0,07	0,04
Desaerador	0,22	0,21	0,17
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,23	0,21	0,10
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,23	0,23	0,15
Térreo	0,35	0,35	0,55
Dose de Exposição Total	1,45	1,44	1,34
Erro %	8,25	7,26	

Analisando a Tab. 7.2 verifica-se que ambos os métodos superestimam a dose de exposição ao ruído. Analisando a dose estimada por área, constata-se que ambas as metodologias superestimam áreas pequenas com altos NPS, como o 3º Piso da Caldeira, Desaerador, 1º e 2º Pisos do Prédio das Turbo Máquinas e subestimam o Térreo.

Optou-se então por testar as metodologias com as mudanças impostas na avaliação preliminar (Métodos 1.1 e 2.1).

Na Tab. 7.3 tem-se o comparativo dos resultados obtidos pelas duas metodologias em com o cálculo analítico da dose.

Tabela 7.3 - Comparativo dos resultados obtidos para a previsão da dose com os Métodos 1.1 e 2.1 com o valor de dose calculado analiticamente.

Área Analisada	Método 1.1	Método 2.1	Analítico
Sala de Operações	0,16	0,17	0,14
1º Piso da Caldeira	0,10	0,09	0,09
2º Piso da Caldeira	0,15	0,11	0,11
3º Piso da Caldeira	0,08	0,07	0,04
Desaerador	0,22	0,21	0,17
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,20	0,22	0,10
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,21	0,24	0,15
Térreo	0,39	0,54	0,55
Dose de Exposição Total	1,51	1,66	1,34
Erro %	12,21	23,41	

Comparando os resultados obtidos nas Tabs. 7.2 e 7.3 verifica-se que os Métodos 1.1 e 2.1 obtiveram resultados piores, aumentando o erro em relação ao calculado analiticamente quando comparados com os Métodos 1 e 2.

Avaliando a Tab. 7.2, é verificado que os Métodos 1 e 2 são bons estimadores de dose para áreas pequenas com níveis baixos e médios de ruído como a Sala de Operações, 1º e 2º Pisos da Caldeira. Já na Tab. 7.3, observa-se que o Método 2.1 é o melhor estimador de dose para o Térreo, ou seja, para grandes áreas.

Outra conclusão tirada da análise é que, para locais pequenos e expostos a altos NPS, como o Desaerador, 3º Piso da Caldeira, 1º e 2º Pisos do Prédio da Turbo Máquinas, todas as metodologias superestimam, acima do desejado a dose de exposição ao ruído, isso porque, apesar do trajeto imposto, ambas calculam a probabilidade de o funcionário estar em todos os pontos da área analisada. Para tentar contornar tal problema, foi elaborado o Método 3.

Na Tab. 7.4 tem-se o comparativo dos resultados obtidos com o Método 3 com o cálculo analítico da dose.

Tabela 7.4 - Comparativo dos resultados obtidos para a previsão da dose com a nova metodologia com o valor de dose calculado analiticamente.

Área Analisada	Método 3	Analítico
Sala de Operações	0,18	0,14
1º Piso da Caldeira	0,09	0,09
2º Piso da Caldeira	0,11	0,11
3º Piso da Caldeira	0,05	0,04
Desaerador	0,18	0,17
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,13	0,10
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,17	0,15
Térreo	0,51	0,55
Dose de Exposição Total	1,42	1,34
Erro %	5,75	

Pela análise da Tab. 7.4 conclui-se que o Método 3 é um bom estimador da dose de exposição ao ruído ocupacional, com um erro de 5,75%, valor dentro do limite esperado, devido à variação de até 6 dB(A) imposta nos NPS da área.

Para ampliar as possibilidades de abordagem da metodologia de estimativa de dose de exposição o ruído ocupacional, foi desenvolvido o Método 4, que tem como base para o cálculo de permanência em qualquer local da planta o Método 3. Diferencia-se por utilizar o

Método de Simulação de Monte Carlo para possibilitar o cálculo dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e variância). Na Tab. 7.5 tem-se o comparativo dos resultados obtidos com o Método 4 e com o cálculo analítico da dose.

Tabela 7.5 - Comparativo dos resultados obtidos para a previsão da dose com o Método 4 com o valor de dose calculado analiticamente.

Área Analisada	Método 4	Analítico
Sala de Operações	0,19	0,14
1º Piso da Caldeira	0,09	0,09
2º Piso da Caldeira	0,12	0,11
3º Piso da Caldeira	0,08	0,04
Desaerador	0,24	0,17
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,14	0,10
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,18	0,15
Térreo	0,54	0,55
Dose de Exposição Total	1,57	1,34
Erro %	17,10	

Pela análise da Tab. 7.5 conclui-se que o Método 4 possa ser suficiente para estimar a dose de exposição ao ruído ocupacional. Apesar do valor de erro de 17,1% ser mais alto que no Método 3 (5,75%), tal método será o adotado para estimar a dose, pois foi o que mais aproximou o valor estimado para áreas grandes.

Ainda pode-se dizer que o Método 4 é melhor que o Método 3 por possuir um algoritmo de estimativa da probabilidade de permanência em pontos da planta não tendencioso, possibilitando o funcionário estar em qualquer ponto da área e enfatizando os locais de maior permanência de maneira estatística, sem ficar preso à rota.

7.4.3 Aplicação da Metodologia na Planta Industrial Levando em Consideração a Variação dos NPS e da Rota no Método Analítico

Escolhida a metodologia, viu-se a necessidade de realizarem-se estudos de caso, aproximando o máximo possível da realidade de uma planta industrial.

Foi calculado um intervalo de 95% de confiança através da Eq. (6.27) considerando que a população siga uma distribuição Normal.

O intervalo de confiança encontrado foi de 1,413 a 1,734, com valor médio de 1,574.

Tais intervenções na área foram escolhidas para as simulações devido a sua constante ocorrência, estas presenciadas durante os trabalhos de campo realizados. Como constatado no Manual de Estratégias de Amostragem para Exposição Ocupacional do NIOSH de 1977, é indicada a adição de 1 a 3σ para a estimativa da dose de exposição ao ruído. Nos estudos de caso, como o intuito é testar a eficiência da metodologia desenvolvida, foi considerado o caso crítico, somando-se 3σ ao valor estimado da dose de exposição ao ruído ocupacional.

7.4.3.1 Estudo de Caso 01: Verificar possível Falha em 2 Queimadores da Caldeira, no 2º e 3º Piso

Para tal caso, foi inserido na rota do funcionário 2 translados até a caldeira, além de aumentar a permanência nos queimadores a avaliar em mais 2 minutos cada.

A Tab. 7.6 ilustra o comparativo dos resultados obtidos no Estudo de Caso 01 e na aplicação do Método 4 na planta.

Tabela 7.6 - Comparativo dos resultados obtidos para a previsão da dose com o Método 4 com o valor de dose estimado no Estudo de Caso 01.

Estudo de Caso 01		
Área Analisada	Método 4	Valor Médio
Sala de Operações	0,190	0,142
1º Piso da Caldeira	0,092	0,128
2º Piso da Caldeira	0,118	0,142
3º Piso da Caldeira	0,077	0,065
Desaerador	0,239	0,208
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,135	0,101
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,182	0,177
Térreo	0,541	0,631
Dose de Exposição Total	1,574	1,594

Intervalo de Confiança	1,413	1,734
-------------------------------	--------------	--------------

Pela análise da Tab. 7.6, verificou-se que o Método 4 subestimou a dose simulada, quando comparadas as doses médias, em 1,27%. Já para a faixa de avaliação que leva em consideração a variância obtida nas 30 repetições variando o NPS o resultado se mostra satisfatório, pois a dose estimada no Estudo de Caso 01 está dentro do intervalo de confiança estimado.

7.4.3.2 Estudo de Caso 02: Verificar Possível Vazamento no Desaerador

Nesta simulação, foi inserido na rota do funcionário 1 translado até a caldeira e aumento da permanência no ponto de verificação dos Vent's em 1 minuto.

A Tab. 7.7 ilustra o comparativo dos resultados obtidos no Estudo de Caso 02 e na aplicação do Método 4 na planta.

Tabela 7.7 - Comparativo dos resultados obtidos para a previsão da dose com o Método 4 com o valor de dose estimado no Estudo de Caso 02.

Estudo de Caso 02		
Área Analisada	Método 4	Valor Médio
Sala de Operações	0,190	0,125
1º Piso da Caldeira	0,092	0,106
2º Piso da Caldeira	0,118	0,125
3º Piso da Caldeira	0,077	0,063
Desaerador	0,239	0,336
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,135	0,101
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,182	0,177
Térreo	0,541	0,549
Dose de Exposição Total	1,574	1,582

Intervalo de Confiança	1,413	1,734
-------------------------------	--------------	--------------

Pela análise da Tab. 7.7, verificou-se que o Método 4 subestimou a dose simulada, quando comparadas as doses médias, em 0,51%. Já para a faixa de avaliação o resultado se mostra satisfatório, pois a dose estimada no Estudo de Caso 02 está dentro dos valores esperados.

7.4.3.3 Estudo de Caso 03: Verificar Possíveis Falhas nas Turbinas dos Equipamentos no Prédio das Turbo Máquinas

Para tanto, foi inserido na rota do funcionário 2 translados até o prédio das turbo máquinas, além de aumentar a permanência no ponto de verificação de cada turbina em 3 minutos para cada piso.

A Tab. 7.8 ilustra o comparativo dos resultados obtidos no Estudo de Caso 03 e na aplicação do Método 4 na planta.

Tabela 7.8 - Comparativo dos resultados obtidos com o Método 4 com o valor de dose estimado no Estudo de Caso 03.

Estudo de Caso 03		
Área Analisada	Método 4	Valor Médio
Sala de Operações	0,190	0,132
1º Piso da Caldeira	0,092	0,092
2º Piso da Caldeira	0,118	0,118
3º Piso da Caldeira	0,077	0,065
Desaerador	0,239	0,208
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,135	0,127
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,182	0,287
Térreo	0,541	0,580
Dose de Exposição Total	1,574	1,608

Intervalo de Confiança	1,413	1,734
-------------------------------	--------------	--------------

Pela análise da Tab. 7.8, verificou-se que o Método 4 subestimou a dose simulada, quando comparadas as doses médias, em 2,16%. Já para a faixa de avaliação o resultado se mostra satisfatório, pois a dose estimada no Estudo de Caso 03 está dentro dos valores esperados.

7.4.3.4 Estudo de Caso 04: Verificar Possíveis Falhas em 1 dos Compressores na Área dos Compressores, 1 Bomba na Torre de Refrigeração e na Turbina de Acionamento do Ventilador da Caldeira

Para esta simulação, foi inserido na rota do funcionário 1 translado até a área dos compressores e permanência de 5 minutos no compressor a avaliar, 1 translado até a torre de refrigeração e permanência de 5 minutos a bomba a avaliar, 1 translado até o pátio de bombas e permanência de 5 minutos na bomba a avaliar e 1 translado até a Caldeira com permanência de 15 minutos na turbina de acionamento do ventilador.

A Tab. 7.9 ilustra o comparativo dos resultados obtidos no Estudo de Caso 04 e na aplicação do Método 4 na planta.

Tabela 7.9 - Comparativo dos resultados obtidos com o Método 4 com o valor de dose estimado no Estudo de Caso 04.

Estudo de Caso 04		
Área Analisada	Método 4	Valor Médio
Sala de Operações	0,190	0,130
1º Piso da Caldeira	0,092	0,092
2º Piso da Caldeira	0,118	0,118
3º Piso da Caldeira	0,077	0,065
Desaerador	0,239	0,208
1º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,135	0,101
2º Piso do Prédio das Turbo Máquinas	0,182	0,177
Térreo	0,541	0,835
Dose de Exposição Total	1,574	1,726

Intervalo de Confiança	1,413	1,734
-------------------------------	--------------	--------------

Pela análise da Tab. 7.9, verificou-se que o Método 4 subestimou a dose simulada, quando comparadas as doses médias, em, 9,65%. Já para a faixa de avaliação o resultado se mostra satisfatório, pois a dose estimada no Estudo de Caso 04 está dentro dos valores esperados.

Sintetizando, a metodologia desenvolvida consistiu em:

1. Avaliar os níveis de ruído da unidade industrial em estudo, dividindo-a segundo os níveis de ruído e área de predominância de tais níveis para a escolha do método aplicado:
 - Para áreas de até 50 m² e com NPS máximo superior a 95 dB(A) ou áreas de 50 m² a 1000 m² e NPS máximo superior a 104 dB(A): serão avaliados todos os pontos da planta e estimada a probabilidade de o funcionário estar em cada um destes pontos, sendo tal probabilidade inversamente proporcional à distância entre os pontos da rota e o avaliado conforme a Eq. (6.25) (Método 1). Será considerando somente um raio de 1 metro ao redor de cada ponto do trajeto para a estimativa da possibilidade do funcionário estar presente durante a jornada de trabalho;
 - Para áreas de até 50 m² e NPS máximo inferior a 95 dB(A) ou de 50 m² a 1000 m² e NPS máximo inferior a 104 dB(A): será utilizado um procedimento de estimativa de tempo de permanência em cada ponto de toda a área através do treinamento de uma rede neural probabilística (RNP) (Método 2) sem imposição de quantidade de pontos além da rota;

- Para áreas maiores que 1000 m², independente dos NPS: Será utilizada a RNP do Método 2.1, que considera que 20% dos pontos da planta deverão ter pelo menos 0,5 segundos de permanência (Método 2.1).
2. Após classificar as áreas de acordo com a dimensão e os níveis de ruído, dividir a jornada de trabalho em intervalos de tempo iguais, escolher aleatoriamente pontos da planta e avaliar qual a probabilidade de o funcionário estar em tais pontos nos intervalos pré-definidos. Acumulam-se as probabilidades estimadas para cada período de tempo em cada ponto;
 3. Realizar repetições levando em consideração variações de 0 a 6 dB(A) para os NPS simulados para a planta, sendo tal faixa de variação foi observada durante coleta de dados em uma mesma unidade industrial no período de uma semana;
 4. Calcular a dose de exposição ao ruído;
 5. Calcular uma faixa de aceitação com 95% de confiança utilizando as repetições com variações de 0 a 6 dB(A) nos NPS da área estudada.

CAPÍTULO VIII

Conclusões

As principais conclusões deste trabalho foram:

1. A metodologia de identificação de NWS de fontes de ruído via otimização dos NPS mapeados ao redor do equipamento foi validada, sendo que a comparação dos NPS simulados com os valores medidos em campo resultou em erros inferiores a 3 dB(A).
2. Para a identificação de NWS de motores elétricos, o Método da Superfície de Resposta (MSR) se mostrou melhor que a Rede Neural Artificial (RNA). Comparando os resultados dos NWS estimados com as identificações *in situ*, os erros resultantes foram de 1,1% para o MSR contra 1,2% da RNA.
3. A avaliação da eficiência do programa de simulação de campo acústico do LAV apresentou bons resultados. Os níveis de ruído simulados se aproximaram satisfatoriamente dos valores medidos *in situ*, sendo ainda validados os cálculos de refração em bordas de barreiras e o módulo de tratamento acústico do programa através de comparação com situações reais, resultando em erros inferiores a 3 dB(A) em todas as avaliações.
4. Dentre os quatro métodos testados para estimar a probabilidade de o funcionário estar em qualquer ponto da planta durante a jornada de trabalho (Métodos 1, 2, 1.1 e 2.1), somente três deles (Métodos 1, 2 e 2.1) tiveram algum tipo de aplicação:
 - Para áreas de até 50 m² e com NPS máximo superior a 95 dB(A), ou áreas de 50 m² a 1000 m² e NPS máximo superior a 104 dB(A), foi utilizado o Método 1 considerando somente um raio de 1 metro ao redor de cada ponto do trajeto para a estimativa da possibilidade do funcionário estar presente durante a jornada de trabalho;

- Para áreas de até 50 m² e NPS máximo inferior a 95 dB(A) ou de 50 m² a 1000 m² e NPS máximo inferior a 104 dB(A), foi utilizado o Método 2;
 - Para áreas maiores que 1000 m², independente dos NPS, foi utilizado o Método 2.1.
5. O Método 3, resultante de um arranjo dos Métodos 1, 2 e 2.1, se mostrou um bom estimador da dose de exposição ao ruído ocupacional, com um erro inferior a 6% quando comparado ao valor analítico da dose.
 6. O Método 4, resultante do Método 3 e da utilização do Método de Simulação de Monte Carlo, apresentou um erro para a estimativa do valor da dose de 17,1% quando comparado ao valor analítico de dose. Apesar do valor significativo de erro, tal método foi adotado, pois foi o que mais aproximou o valor estimado analisando áreas grandes. Ainda pode-se dizer que o Método possui um algoritmo de estimativa da probabilidade de permanência em pontos da planta imparcial e não tendencioso, possibilitando o funcionário estar em qualquer ponto da área e enfatizando os locais de maior permanência de maneira estatística.
 7. Para os 4 estudos de caso realizados, houve variação significativa nos valores de dose estimados, os quais evidenciaram e comprovaram o aumento substancial na dose devido ao aumento do tempo de permanência e também ao aumento dos NPS locais. Mesmo com todas as intervenções adicionais, o intervalo de confiança de 95% utilizado foi suficiente para abranger todas as situações avaliadas.

Desta forma, como conclusão geral do trabalho, foi possível desenvolver uma metodologia que estime a dose de exposição ao ruído ocupacional, o que, avaliado no aspecto de um programa de conservação auditiva, é de grande significância, uma vez que será possível intervir na rotina do funcionário ou ainda na fonte de ruído antes que ocorra a exposição a valores de dose que prejudiquem sua audição.

8.1 Propostas para Trabalhos Futuros

Para a continuação desta linha de pesquisa, indica-se:

1. Desenvolver um sistema de otimização das rotas do funcionário, diminuindo o tempo de exposição na área propriamente dita ou em pontos de vistoria com elevados níveis de ruído, além de alteração de trajetos, dando preferência à locais

com menor concentração de máquinas ou com fontes de ruído menos significativas, visando a diminuição da dose;

2. Implementar um sistema de hierarquização de fontes de ruído que contribuem para o aumento dos níveis de ruído no ponto analisado, possibilitando a visualização do espectro de frequências, oque facilitaria a escolha da solução adequada para a situação, seja ela a manutenção do sistema ou a adequação acústica.

CAPÍTULO IX

Referências Bibliográficas

ABDULLA, S. Pills may replace ear-muffs for protection against damaging noise, **The Lancet**, v. 351 Issue 9113, may 1998.

ALMEIDA, S. I. C.; ALBERNAZ, P. L. M; ZAIA, P. A; XAVIER, O. G; KARAZAWA, E. H. I. História natural da perda auditiva ocupacional provocada por ruído. **Rev. Assoc. Med. Bras.**, São Paulo, v. 46, n. 2, jun. 2000.

ALMEIDA, K.; RUSSO, I. C. P.; SANTOS, T. M. **Aplicação do mascaramento em audiologia**. São Paulo: Lovise, 1995, 55p.

ALMEIDA, C. M. **Sobre a Poluição Sonora**. 1999. Monografia de Conclusão do Curso de Especialização em Audiologia Clínica, CEFAC - Centro de Especialização em Fonoaudiologia Clínica, Rio de Janeiro.

AMERICAN INDUSTRIAL HYGIENE ASSOCIATION (AIHA). **The Noise Manual**. 5 ed. USA: Press, 2003.

ANDRADE, D. R.; FINKLER, C.; CLOSS, M.; MARINI, A. L.; CAPP, E. Efeitos do ruído industrial no organismo. **Revista Pró-Fono**, v. 10 n 1, p. 17- 20, 1998.

ARAUJO FILHO, N. C. **A gestão do agente ambiental ruído: análise crítica de uma unidade marítima de produção de petróleo**. 2005. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10.152: **Níveis de ruído para o conforto acústico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 7p.

BARRON, R. F. **Industrial Noise Control and Acoustic**. 1.ed. N.Y: Marcel Dekker Inc., 2003. 534p.

BARROS, E. A. C. **Aplicações de Simulação de Monte Carlo e Bootstraps**. 2005. Monografia de Conclusão de Curso - Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Campinas, Brasil: Ed. UNICAMP, 2001.

BERANEK, L. L.; VÉR, I. L. **Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications**. 1 ed. N.Y: John Wiley & Sons Inc., 1992. 804p.

BERGER, E. H. Hearing Protection The State of the Art (circa1990), and Research Priorities for the Coming Decade. **Sound and Vibration**. Indianapolis, p.8-14, 1991.

BERGER, E. H. The Ardent Hearing Conservationist, Invited Paper at the 26th **Annual Conference of the National Hearing Conservation Association**. NC: Raleigh. 2001.

BERGSTRÖM, B.; NYSTRÖM, B. Development of hearing loss during long term exposure to occupational noise. **Scandinavian Audiology**. Germany, v. 15, p. 227-234, 1986.

BESS, F. H.; FINLAYSON, P. B.; CHAPMAN, J. J. Pediatrics observation on noise level in infant incubators. **Pediatrics**, [S. l.], v. 63, n. 1, 1979.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice**. 3.ed. NY: Spon Press, 2003. 719p.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2006. 368p.

BLUM, L.; BLUM, M.; SCHUB, M. A simple unpredictable pseudo random number generator. **SIAM Journal on Computing**, v. 15(2), p. 364-383, 1986.

BOLOGNESI, T. M. **Acústica e intervenção no ambiente construído: mapeamento dos riscos e estimativa de redução do ruído a partir de propostas de intervenção em uma indústria metalúrgica**. 2008. Dissertação de Mestrado – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

BONEAU, C. A. The effects of violations of assumptions underlying the t test. **Psychological Bulletin**, 57:49–64, 1960.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Empirical model building and response surfaces**. N.Y: J. Wiley, 1987. 669p.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Fundamentos de Redes Neurais Artificiais**, 11^a Escola de Computação da UFRJ, 1998. 223p.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais – Teoria e Aplicações**, São Paulo: LTC. 2000. 280p.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Ações Programáticas Estratégicas. Perda auditiva induzida por ruído (Pair)** – Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2006.

BRASIL. **Ministério do Trabalho. Portaria nº 3.214, de 8 de Junho de 1978.** Aprova as Normas Regulamentadoras - NR - do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a Segurança e Medicina do Trabalho. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, jun. 1978.

CAMPBELL, K. Developing otoprotective agents for ototoxic and noise-induced hearing loss: D-methionine and other compounds, **NHCA Spectrum**, v. 19 (2), p. 12-14, 2000.

CALDART, A. U.; ADRIANO, C. F.; TERRUEL, I.; MARTINS I.; MOCELLIN, M. Prevalência da Perda Auditiva Induzida pelo Ruído em Trabalhadores de Indústria Têxtil. **Arquivos Internacionais de Otorrinolaringologia**. S.P. v.10, n.3, p. 192-196. 2006.

CARNICELLI, M. V. F. **Audiologia preventiva voltada à saúde do trabalhador: organização e desenvolvimento de um programa audiológico numa indústria têxtil da cidade de São Paulo.** 1988. Dissertação de Mestrado– Pontifícia Universidade Católica, São Paulo.

CASALI, J. G. Proteção Auditiva Visão Mundial. **Revista Proteção**, Porto Alegre, ed.79, p. 8-14, 1998.

CELANI, A. C. Brinquedos e seus níveis de ruído. **Rev. Dist. Com.**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 49-58, 1991.

CELANI, A. C.; BEVILÁQUA, M. C.; RAMOS, C. R. Ruído em escolas. **Fono: Rev. Atual. Cient**, [S. I.] v. 6, n. 2, p. 1-4, 1994.

CORRÊA FILHO, H. R.; COSTA, L. S.; HOEHNE, E. L.; PÉREZ, M. A. G.; NASCIMENTO, L. C. R.; MOURA, E. C. Perda auditiva por ruído e hipertensão em condutores de ônibus. **Rev. Saúde Pública**, S.P. v.36 n.6, dec. 2002.

COSTA, E. A.; KITAMURA, S. Órgãos dos sentidos: audição. In: MENDES, R. (Org). **Patologia do Trabalho**. Rio de Janeiro: Atheneu, 1995. p. 365-87.

Diário Digital (2000). **Restaurar pêlos do ouvido através de terapia genética.** Artigo de 17/05/2000, Secção Ciência e Tecnologia.

DUARTE, J. B.; DUARTE, M. A. V. Validação experimental de uma metodologia para prever o desempenho e eficiência acústica de barreiras múltiplas localizadas ao ar livre. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DOS ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA - CREEM, 2008, Curitiba. **Anais do XV CREEM**.

EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. New York: MCGRAW-HILL, 1988.

EICHENAUER-HERRMANN, J. Statistical independence of a new class of inversive congruential pseudorandom numbers. **Math. Comp.** 60:375-384, 1993.

EICHENAUER-HERRMANN, J. Pseudorandom number generation by nonlinear methods. **International Statistical Reviews**, v. 63, p. 247-255. 1995.

FAGUNDES NETO, M. G.; MATEUS, D. A.; OLIVEIRA FILHO, R. H.; DUARTE, M. A. V.; TEODORO, E. B. A neural network approach to estimate sound power levels generated by electric motors. 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 2009. Gramado. **Annals of the 20º COBEM**.

FERNANDES, J. C. **Acústica e Ruídos**, Apostila do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP - Campus Bauru, SP, 2002.

FIORINI, A. C.; NASCIMENTO, P. E. S. Programa de Prevenção de Perdas Auditivas. In: NUDELMANN, A. A.; COSTA, E. A.; SELIGMAN, J.; IBANEZ, R. N. **Pair – Perda Auditiva Induzida pelo Ruído**: volume II. Rio de Janeiro: Revinter, 2001. 297p.

FISHMAN, G. S. **Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications**. N.Y: Springer-Verlag, 1996.

FRANÇA, D. O ruído presente nas salas de aula em Curitiba: um assunto a ser refletido pelos fonoaudiólogos. **Rev. Soc. Bras. Fono.**, [S. l.], v. 4, n. 6, p. 65-67, jun. 2000.

FUNDACENTRO. **Avaliação da exposição ocupacional ao ruído**. NH01. São Paulo, 2001.

GERGES, S. N. Y. **Ruído - Fundamentos e Controle**. Florianópolis: CBSSI, 1992.

GERGES, S. N. Y. **Ruído - Fundamentos e Controle**. 2.ed. Florianópolis: NR, 2000. 674p.

GLASS, G. V.; PECKHAM, P. D.; SANDERS, J. R. Consequences of failure to meet assumptions underlying the analysis of variance and covariance. **Review of Education Research**, p. 42:237-288, 1972.

GOELZER, B.; HANSEN, C.; SEHRNDT, G. Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control, **World Health Organization**, 2000.

GRUPO DE ESPECIALISTAS EM SAÚDE OCUPACIONAL DE JUNDIAÍ. Manual de Consenso. O estudo do ruído.

GUYTON, A. C.; HALL, J. E. Tratado de fisiologia médica. 11ed. São Paulo: Elsevier. 2006.

HALLWORTH, R. Recent advances in understanding and alleviating sensorineural hearing loss, **Military Audiology Short Course**, disponível online em www.militaryaudiology.org, acessado em 15/03/2001.

HAMMERSLEY, J.M; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo Methods**. 1 ed. London: Wiley, 1964.

HARGER, M. R. H. C.; BARBOSA-BRANCO, A. Efeitos auditivos decorrentes da exposição ocupacional ao ruído em trabalhadores de marmorarias no distrito federal. **Rev. Assoc. Med Bras**. S.P., v. 50 n.4 oct./dec. 2004.

HARTIKAINEN, A. L.; SORRI, M.; ANTTONEN, H.; TUIMALA, R.; LÄÄRÄ, E. Effect of occupational noise on the course and outcome of pregnancy. **Scand. J. Work Environ. Health**, [S. l.], v. 20, n. 6, p. 444-450, dec. 1994.

HAVLICEK, L. L. E PETERSON, N. L. Effect of the violation of assumptions upon significance levels of the pearson r. **Psychological Bulletin**, p. 84:373-377, 1977.

HOPFIELD, J. J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities, **Proceedings of the National Academy of Science**, p. 2554-2558, 1982.

HUMMEL, T. J. E SLIGO, J. R. Empirical comparison of univariate and multivariate analyses. **Psychological Bulletin**, p. 76:49-57, 1971.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1973). ISO 2204 - **Acoustic - Guide to the measurement of airborne acoustical noise and evaluation of its effects on man**. Geneve, Switzerland.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1990). ISO 1999 - **Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment**. Geneve, Switzerland, 17p.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1993). ISO 3746 - **Acoustic - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity**. Geneve, Switzerland, 28p.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1995). ISO 3746 - **Acoustic - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane**. Geneve, Switzerland, 36p.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1996). ISO 9613 - **Acoustic - Attenuation of sound during propagation outdoors**. Geneve, Switzerland, 24p.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (2003). ISO 3745 - **Acoustic - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms**. Geneve, Switzerland, 51p.

J. M. HAMMERSLEY; D. C. HANDSCOMB. **Monte Carlo Methods**. N.Y: John Wiley and Sons, 1964.

JACOBSEN, P. Mixed solvent exposure and hearing impairment: an epidemiological study of 3284 men: the Copenhagen male study. **Occup. Med.**, [S. l.], v. 43, p. 180-184, 1993.

JALEL, N.A.; MIRZAI, A.R.; LEIGH, J.R.; NICHOLSON, H. Application of Neural Network in **Process Control Proceedings of the Second British Neural Network Society Meeting** (NCM91), London, October 1991.

KOHONEN, T. **Self-Organization and Associative Memory**, Berlin: Springer-Verlag, 1984.

KORTCHMAR, L.; SLAMA, J. G. Exposição ao ruído no ambiente de trabalho industrial: panorama internacional. In: I SIMPOSIO BRASILEIRO DE METROLOGIA EM ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, 1996, Petrópolis. **Anais do I Simposio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações**, p. 191-194.

KOPKE, R.; COLEMAN, J.; HUANG, X.; JACKSON, R.; LIU, J.; WEISSKOPF, P.; HOFFER, M.; WOOD, K. Noise strategies to prevent and reverse noise-induced hearing loss. NOISE POLLUTION AND HEALTH INTERNATIONAL CONFERENCE NOPHER'2000, 2000. Cambridge. **Abstracts of the NOPHER'2000**

LALANDE, N. M.; HETÚ, R.; LAMBERT, J. Is occupational noise exposure during pregnancy a risk factor of damage to the auditory system of the fetus? **American Journal of Industrial Medicine**, Quebec, Canada, 1986.

LEAVELL, H; CLARK, E.G. **Preventive Medicine for the Doctor in his Community**. N.Y: MacGraw –Hill, 1965.

L'ECUYER, P. Random numbers for simulation. **Communications of the ACM**. v. 33(10), p. 85-97, 1990.

L'ECUYER, P. Uniform random number generation. **Annals of Operations Research**, v. 53, p. 77-120, 1994.

LINDQUIST, E. F. **Design and analysis of experiments in psychology and education**. Boston: Houghton Mifflin, 1953.

MASINI, H. F.; OLIVEIRA FILHO, R. H.; TEODORO, E. B. Medição do coeficiente de absorção acústica de materiais através do método de um microfone utilizando labview. XVI CONGRESSO NACIONAL DOS ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA – CREEM 2009. **Anais do XVI CREEM**.

MASTERS, T. **Advanced Algorithms for Neural Networks**, N.Y: John Wiley & Sons, 1995.

MATEUS, D.A.; DUARTE, J.B.; OLIVEIRA FILHO, R. H.; DUARTE, M. A. V. Precisão dos Métodos Analíticos na Predição de Níveis de Potência Sonora para Motores Elétricos. XXII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC, Belo Horizonte, 2008. **Anais do XXII encontro da SOBRAC**.

MEOLA, T. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações, utilizando inteligência artificial**. 2005. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MCCRACKEN, D. D. **The monte carlo method**. Scientific American, p. 192:90–95, 1965.

MCCULLOCH, W.; WALTER PITTS, W. A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity, **Bulletin of Mathematical Biophysics**, 1943.

MEISEL, W. **Computer-Oriented-Approaches to Pattern Recognition**. N.Y: Academic Press, 1972.

MELLO, A. **Alerta ao Ruído Ocupacional**. 1999. Monografia de Especialização em Audiologia Clínica - Centro de Especialização em Fonoaudiologia, Porto Alegre.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. **The Monte Carlo Method**. **J. Amer. Statistical Assoc.**, v. 44, p. 335-341, 1949.

MIRANDA, H. C. **Reconhecimento e controle da transferência metálica no processo MIG/MAG pulsado**. 2002. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MORATA, T. C.; LEMASTERS, G. K. Epidemiologic considerations in the evaluation of occupational hearing loss. **Occup. Med. State Art. Rev.**, [S. I.], v. 10, n. 3, p. 641-56, 1995.

MORATA, T. C. Efeitos da exposição a ruído e tolueno na audição e equilíbrio de trabalhadores. **Acústica e Vibrações**, [S. l.], v. 12, p. 2-16, 1993.

MORATA, T. C. **An epidemiological study of the effects of exposure to noise and organic solvents on workers hearing and balance**. 1990. Tese (Doutorado) – University of Cincinnati, Cincinnati.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. USA: John Wiley & Sons, 2002.

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). **Occupational exposure sampling strategy manual**. Cincinnati, 1977.

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). **Preventing occupational hearing loss: a practical guide**. Atlanta, 1996. Revised october 1996.

NISHIDA, P. P. R.; MARQUES, V. A. S.; OLIVEIRA FILHO, R. H.; DUARTE, M. A. V. Identificação de fontes sonoras utilizando uma rotina de otimização via algoritmos genéticos. XXII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC, Belo Horizonte, 2008. **Anais do XXII encontro da SOBRAC**.

NISHIDA, P. P. R.; OLIVEIRA FILHO, R. H.; DUARTE, M. A. V. Forecast acoustics for industrial and environmental noise control. 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 2009. Curitiba. **Annals of the 20º COBEM**.

NUDELMANN, A. A.; COSTA, E. A.; SELIGMAN, J.; IBANEZ, R. N. **Perda auditiva induzida pelo ruído**. Porto Alegre: Bagagem, 1997.

NUNES, M. A. A. **Uma metodologia para quantificação da contribuição sonora de fontes de ruído industrial no meio ambiente**. 2006. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

NUNES, M. A. A.; DUARTE, M. A. V. Identification of noise sources using genetic algorithm. THE 2005 CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING – INTER-NOISE, 2005. Rio de Janeiro. **Annals of the INTER-NOISE 2005**.

NURMINEN, T. Female noise exposure, shift work and reproduction. **J. Occup. Environ. Med.**, [S. l.], v. 37, n. 8, p. 945-950, aug. 1995.

NURMINEN, T.; KURPA, K. Occupational noise exposure and course of pregnancy. **Scand. J. Environ. Health**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 117-124, apr. 1989.

OKAMOTO, V. A.; SANTOS, V. P. Outros efeitos do ruído no organismo. In: SANTOS, V. de P. (org). – **Ruído, riscos e prevenção**. São Paulo: Hecitec, 1996. p. 89-91.

OLIVEIRA FILHO, R. H.; SOUSA, M. M.; FRANCO, V. L. D. S.; DUARTE, M. A. V.; TEODORO, E. B. Modelagem e estudo de solução para a mitigação dos níveis de ruído em escolas da cidade de Uberlândia – MG. VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 2010. Campo Grande. **Anais do VI COBEM**.

PARZEN, E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode, **Annals of Mathematical Statistics**, V. 33, p. 1065-1076, 1962.

PETRINOVICH, L. F.; HARDYCK, C. D. Error rates for multiple comparison methods: Some evidence concerning the frequency of erroneous conclusions. **Psychological Bulletin**, p. 71:43–54, 1969.

PRESS, W. H. **Numerical Recipes**. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. 818p.

PRÓSPERO, A. C. **Estudo dos efeitos do ruído em servidores do Centro Técnico Aeroespacial**. 1999. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica, São Paulo.

QUARANTANA, A.; SALLUSTIO, V.; QUARANTANA, N. Noise induced hearing loss: summary and perspectives. NOISE POLLUTION AND HEALTH INTERNATIONAL CONFERENCE NOPHER'2000, 2000. Cambridge. **Abstracts of the NOPHER'2000**.

RIFFEL, G. **Desenvolvimento de um sistema para medição e avaliação da atenuação dos protetores auditivos: estudo de caso comparativo em laboratório e em campo**. 2001. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROTH, S. Industrial noise control – its time is now. **Noise/News**. President's Column, 1999.

RUSSO, I. C. P.; SANTOS, T. M. M. **A prática da audiologia clínica**. São Paulo: Cortez, 1993. 253p.

SALIBA, T. M. **Manual prático de avaliação e controle do ruído**. São Paulo, 2008.

SANCHEZ, T. G.; ZONATO, A. I.; BITTAR, R. S. M.; BENTO, R. F. Controvérsias sobre a fisiologia do zumbido. **Arquivos da Fundação de Otorrinolaringologia**, v. 1, p. 2-8, 1977.

SCHEIBE, F.; HAUPT, H.; MAZUREK, B.; KONIG, O. Therapeutic effect of magnesium on noise-induced hearing loss, **Noise and Health**, vol. 3(11), p. 79-84, 2001.

SILVA, L. F. **Estudo sobre a exposição combinada entre ruído e vibração de corpo inteiro e os efeitos na audição de trabalhadores**. 2002. Tese de Doutorado–Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SPECHT, D. Probabilistic Neural Network, **Neural Network**, V. 3, p. 109-118, 1990.

TAFNER, M. A. Redes Neurais Artificiais: Aprendizado e Plasticidade. **Revista Cérebro & Mente**, n. 5, 1998.

TANAKA, J. S. How big is big enough?: Sample size and goodness of fit in structural equation models with latent variables. **Child Development**, p. 58:134–146, 1987..

TEIXEIRA, R. L. **Uma Metodologia de Projeto de Controladores Híbridos Inteligentes com aplicações no Controle Ativo de Vibrações Mecânicas**. 2001. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TEZUKA, S. **Uniform Random Numbers: Theory and Practice**. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1995. 228p.

WALKER, H. M.; LEV, J. **Statistical inference**. NY: Holt, 1953.

ANEXO 1

Fundamentos de Acústica

A1.1 Acústica Básica

Uma onda sonora se caracteriza por uma perturbação a qual se propaga em um meio elástico, ou compressível, o qual pode ser um gás, um líquido ou um sólido (Beranek e Vér, 1992). No entanto, estas perturbações causam flutuações de pressão no meio, as quais produzem a sensação de audição quando atingem o sistema auditivo humano. A sensação de som só ocorrerá quando a amplitude destas flutuações ($20 \mu\text{Pa}$ a $2000000 \mu\text{Pa}$) e a frequência com que elas se repetem estiverem dentro de determinada faixa de valores (20 a 20000 Hz). Ressalta-se que na faixa de frequência auditiva a orelha não igualmente sensível, ou seja, nas baixas frequências há uma maior atenuação do som do que nas altas frequências, sendo que na frequência de 1000 Hz nenhuma atenuação ocorre (Nunes, 2006).

O som é parte da vida diária e apresenta-se, por exemplo, como: música, canto dos pássaros, uma batida na porta, as ondas do mar, entre outros. Entretanto, na sociedade moderna, muitos sons são desagradáveis e alguns indesejados, e esses são definidos como ruído (Nunes, 2006).

Na prática, a geração do ruído é causada pela variação da pressão ou da velocidade das moléculas do meio. Desta maneira, o som é uma forma de energia que é transmitida pela oscilação das moléculas do meio de propagação. Portanto, o som pode ser representado por uma série de compressões e rarefações do meio em que se propaga, a partir da fonte sonora (Fig. A1.1). Ressalta-se que não há deslocamento de moléculas, ou seja, não há transferência de matéria, apenas de energia (com exceção, por exemplo, nas proximidades de grandes explosões ou muito próximos das fontes sonoras) (Nunes, 2006).

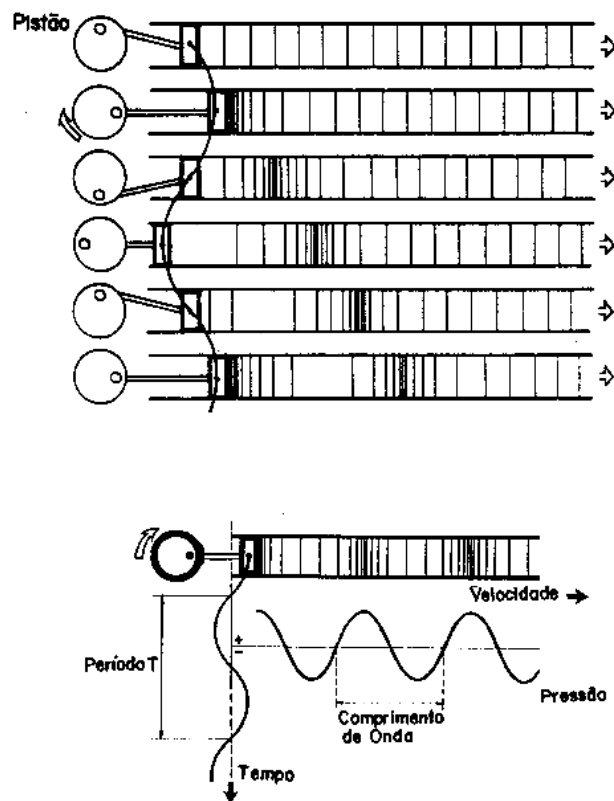


Figura A1.1 – Modelo de propagação do som pela variação de pressão no ar (Nunes, 2006).

Na faixa de frequência de 20 a 20000 Hz as ondas de pressão no meio são audíveis. Sendo a sensibilidade da orelha tal que, uma pressão de 20 μPa pode ser detectada, caso a frequência esteja na faixa mais sensível de audição, que é aproximadamente 1000 a 4000 Hz. Na Fig. A1.2 está mostrada a curva de audibilidade humana (Nunes, 2006).

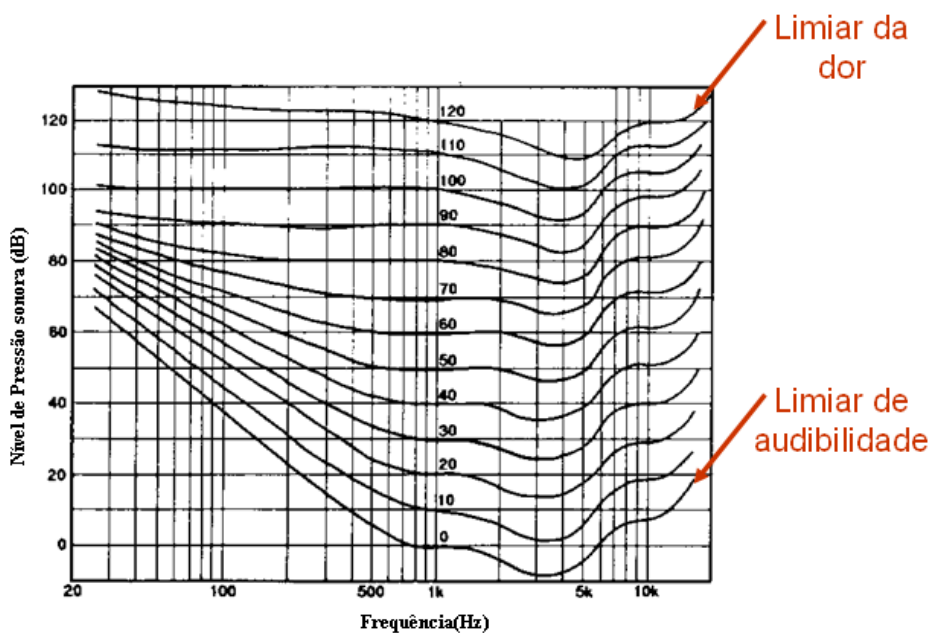


Figura A1.2 – Contornos padrão de audibilidade para tons puros (Nunes, 2006).

A velocidade com que a variação de pressão se propaga no meio é dependente da elasticidade e da densidade do meio de propagação (Beranek e Vér, 1992). No entanto, há outros fatores aos quais a velocidade de propagação do som é dependente, tais como a frequência de propagação e a umidade do meio, bem como a altitude e temperatura (Bies e Hansen, 2003).

Segundo Beranek e Vér (1992), assumindo um modelo simplificado, o som se propaga a uma velocidade que depende apenas da temperatura do meio. Por exemplo, para o ar a 25 °C, a velocidade do som C é de 346,4 m/s. Uma fórmula aproximada para determinação da velocidade do som no fluidos, C em m/s, é dada pela Eq.(A1.1) (Gerges, 2000):

$$C = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \quad (\text{A1.1})$$

onde:

- γ é ao índice adiabático do meio;
- P é a pressão [Pa];
- ρ é a densidade do meio [Kg/m³].

O sistema auditivo humano responde a uma larga faixa de pressão sonora, desde o limiar de audição até o limiar da dor, como mostrado na Fig. A1.1. Por exemplo, a 1000 Hz, a

intensidade acústica capaz de causar a sensação de dor é 10^{12} vezes a intensidade acústica capaz de causar a sensação de audição.

É visível a dificuldade de se expressar números de ordem de grandeza tão diferentes numa mesma escala linear, portanto usa-se a escala logarítmica.

Portanto, um decibel corresponde a $10^{1/10} = 1,26$, ou seja, é igual a variação na intensidade de 1,26 vezes. Então, uma mudança de 3 dB corresponde a $10^{3/10} = 2$, ou seja, dobrando-se a intensidade sonora resulta em um acréscimo de 3 dB.

O Nível de intensidade sonora (NIS) é dado pela Eq. (A1.2):

$$NIS = 10 \log\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad [\text{dB}] \quad (\text{A1.2})$$

onde I é a intensidade acústica em Watt/m^2 e I_o é a intensidade sonora de referência, igual a $10^{-12} \text{ Watt/m}^2$.

Num campo livre, o nível de pressão sonora é dado pela Eq. (A1.3):

$$NPS = 10 \log\left(\frac{P^2}{P_o^2}\right) = 20 \log\left(\frac{P}{P_o}\right) \quad [\text{dB}] \quad (\text{A1.3})$$

onde P_o é a pressão de referência ($20 \mu\text{Pa}$) e corresponde ao limiar da audição em 1000 Hz.

Outro aspecto importante da escala dB é que ela apresenta uma correlação com a audibilidade humana muito melhor do que a escala absoluta (N/m^2). Sendo que um (1) dB é a menor variação que o sistema auditivo humano pode perceber.

Uma importante propriedade de qualquer fonte é a potência sonora W ou energia acústica total emitida pela mesma na unidade de tempo. A potência sonora é apenas dependente da própria fonte e independe do meio onde a fonte se encontra.

É, portanto, importante a medição da potência sonora emitida por qualquer máquina. A partir dos dados obtidos é possível calcular a pressão acústica em qualquer ambiente de tamanho, forma e absorção das paredes conhecidas.

Em campo livre, o nível de potência sonora, NWS , para fonte omnidirecional é dado pela Eq. (A1.4).

$$NWS = NPS + 20\log(d) + 11 \quad [\text{dB}] \quad (\text{A1.4})$$

onde NPS é o nível de pressão sonora em dB, medido em pontos específicos próximo à fonte, e d é a distância entre a fonte e o microfone utilizado em metros.

A potência sonora pode ser determinada em câmaras anecóicas, câmara reverberante ou usando o medidor de intensidade sonora (técnica de dois microfones). A potência sonora pode também ser determinada em campo através do método de comparação usando uma fonte calibrada.

A1.2 Propagação do Som no Ar Livre

Segundo Gerges (2000), a energia gerada por fontes sonoras sofre atenuação ao se propagar em ar livre. Os fatores causadores de atenuação são: distância percorrida, barreiras, absorção atmosférica, vegetação, variação de temperatura e efeito do vento. Na análise do campo acústico e comunidade é importante desenvolver relações entre a potência sonora das fontes, os níveis de pressão sonora no receptor e a influência dos vários caminhos de propagação.

A predição de níveis de pressão sonora em áreas externas adjacentes a fontes de ruído requer a análise da propagação de som no ar livre. Esta propagação é afetada pela atenuação ao longo do caminho de transmissão e é estimada através de correções aditivas para divergência esférica, absorção no ar, reflexões, efeito da vegetação, efeito da topografia do solo, efeito de barreiras e espalhamento nas próprias instalações.

A propagação externa também é afetada por variações nas condições atmosféricas, como unidade relativa do ar e temperatura.

A atenuação do nível de pressão sonora com a distância depende da distribuição das fontes de ruído. Vários tipos de distribuição podem ser considerados:

- Fonte Pontual Simples: O nível de pressão sonora pode ser calculado pela Eq. (A1.5).

$$NPS(\theta) = NWS + DI(\theta) - 20\log(r) - 1 \quad (\text{A1.5})$$

onde: DI é o índice de diretividade = $10\log(Q)$ e Q é o fator de diretividade de superfície.

A Fig. A1.3 ilustra o efeito da presença da superfície na escolha do fator de diretividade.

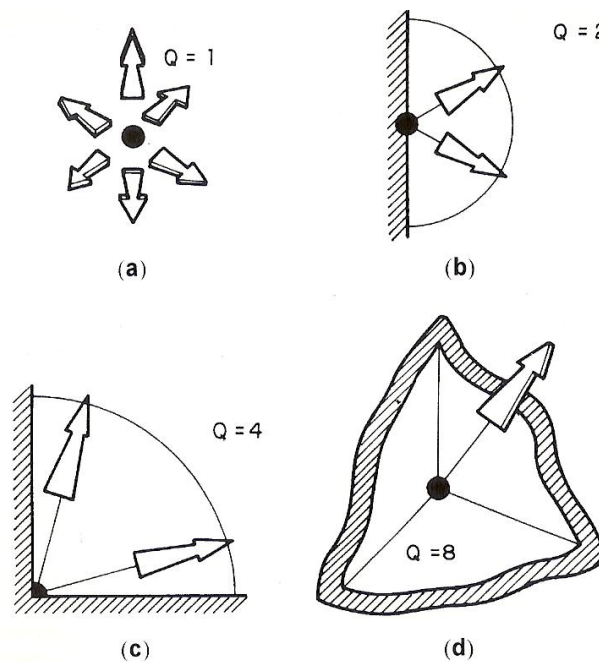


Figura A1.3 – Efeito da presença de superfície na diretividade (Gerges, 2000).

- Fonte Linear: um duto longo carregando um fluxo de fluído turbulento ruidoso pode ser considerado como fonte sonora em linha de comprimento l . O nível de pressão sonora neste caso é calculado pela Eq. (A1.6).

$$NPS(\theta) = NWS + DI(\theta) - 20\log(r) - 8 \quad (A1.6)$$

- Fontes Pontuais em Linha: uma linha de máquinas idênticas pode ser considerada uma linha de fontes, conforme ilustrado na Fig. A1.4.

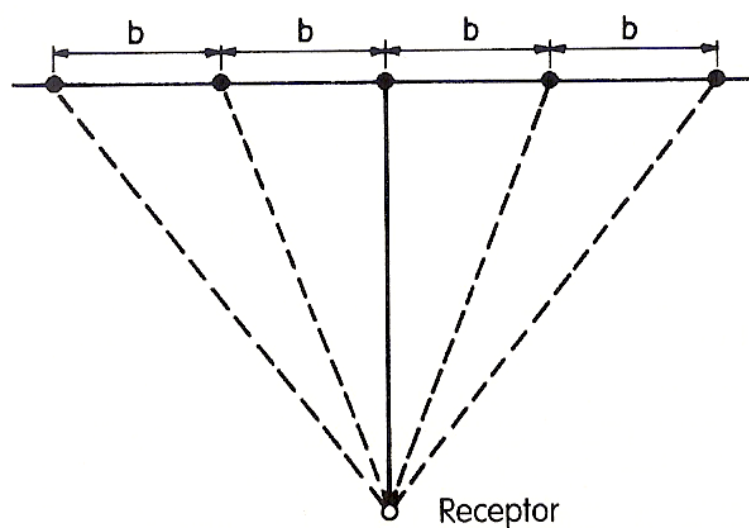


Figura A1.4 – Fontes em linha (Gerges, 2000).

Para fontes incoerentes, ao longo da distância radial $r < b/\pi$, onde b é a distância entre as fontes, a propagação do som é similar ao de fonte pontual simples com atenuação de 6 dB para cada duplicação da distância (a contribuição da fonte afastada é pequena). Entretanto, para $r > b/\pi$, a propagação é similar ao caso da fonte linha, com atenuação de 3 dB para cada duplicação da distância (a contribuição de todas as fontes é significativa). Tais características são ilustradas na Fig. A1.5.

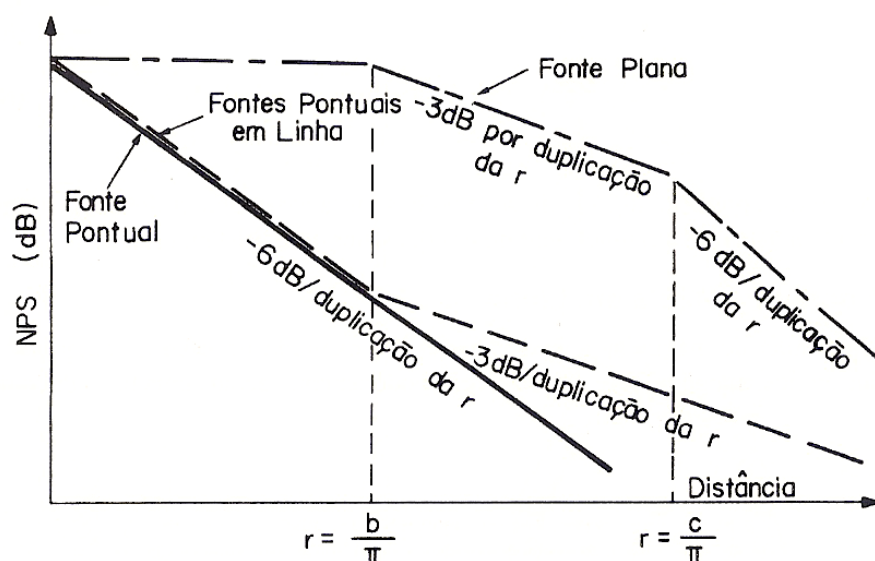


Figura A1.5 – Atenuação com a distância para vários tipos de fontes (Gerges, 2000).

- Fonte Plana: A transmissão de ruído através de uma porta, janela ou parede de uma casa de máquinas, pode ser considerada como fonte plana finita. Para $r < b/\pi$ não existe atenuação e para $b/\pi < r < c/\pi$ tem-se uma atenuação de 3 dB por duplicação da distância (fonte linear), e para $r > c/\pi$ tem-se uma atenuação de 6 dB por duplicação da distância (fonte pontual).