



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HELDER FÁBIO SANTOS CARDOSO

**SOLUÇÕES NUMÉRICAS DE CONTROLE DE RUÍDO EM USINAS
HIDRELÉTRICAS DA CHESF**

BELÉM
2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

HELDER FÁBIO SANTOS CARDOSO

**SOLUÇÕES NUMÉRICAS DE CONTROLE DE RUÍDO EM USINAS
HIDRELÉTRICAS DA CHESF**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Vibrações e Acústica.
Orientador: Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo.

BELÉM

2010

Dados Internacionais de catalogação-na-publicação (CIP), Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém, PA

C266s Cardoso, Helder Fábio Santos

Soluções numéricas de controle de ruído em usinas hidrelétricas da CHESF/ Helder Fábio Santos Cardoso; orientador Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo. – Belém, 2010.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

1. Hidrelétrica. 2. Acústica. I. Gustavo da Silva Vieira de Melo, orientador. II. Companhia Hidrelétrica do São Francisco. III. Título.

CDD 19.ed. 621.312 134

HELDER FÁBIO SANTOS CARDOSO

SOLUÇÕES NUMÉRICAS DE CONTROLE DE RUÍDO EM USINAS

HIDRELÉTRICAS DA CHESF

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Vibrações e Acústica.

Data da aprovação: 06 de agosto de 2010

BANCA EXAMINADORA:

_____ - Orientador
Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo, PPGEM/UFPA.

_____ - Membro Externo
Prof^a. Dr^a. Stelamaris Rolla Bertoli, PPGE/UNICAMP.

_____ - Membro Interno
Prof. Dr. Newton Sure Soeiro, PPGEM/UFPA.

_____ - Membro Interno
Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita, PPGEM/UFPA.

*À minha mãe Valdilene,
À minha querida Tia Cica,
Aos meus irmãos Helderson, Heverson e Walquiria,
Ao meu filho Tiago.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, o Altíssimo, por me proporcionar encontrar pessoas maravilhosas em minha vida;

À CAPES pelo auxílio financeiro, na forma de bolsa de mestrado, durante todo meu curso;

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na pessoa da Coordenadora Prof^a. Dr^a. Daniele Guerra;

Ao Grupo de Vibrações e Acústica e todos seus integrantes;

Aos meus amigos de classe com os quais compartilhei dois anos de estudos, em especial aos meus amigos Fábio Setúbal, Marcos, Ednelson, Pedro e Odorico Ribeiro;

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelos conhecimentos adquiridos no curso;

À Companhia Hidrelétrica do São Francisco pelo financiamento do projeto que abrange o presente trabalho e toda a equipe de Segurança e Saúde Ocupacional da Regional de Paulo Afonso pela boa vontade de nos ajudar;

A todas as minhas Tias, por serem grandes apoios durante essa caminhada;

Ao meu Padrinho e minha Madrinha, sua esposa, Irandir e Deusa, juntamente com seus filhos, Thyago, Dhyego e Dhyogo, pelo seguro abrigo em seu Lar e por me proporcionarem boas oportunidades;

A todos aqueles que ajudaram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho e que, infelizmente, eu não escrevi seus nomes.

“Quem decidir se colocar como juiz da
verdade e do conhecimento é naufragado
pela gargalhada dos Deuses.”

Albert Einstein

RESUMO

Uma usina hidrelétrica envolve energias de grandes magnitudes e a emissão de energia acústica pelas unidades geradoras e por seus sistemas auxiliares proporcionam condições insalubres, com níveis de ruído acima de 85 dBA. Tal nível é o valor limite a que uma pessoa pode ficar exposta durante uma jornada de 8 h de trabalho, tal como estipulado pela NR-15. Caso esse valor seja excedido, faz-se necessário o uso de protetor auricular, além de um estudo para desenvolvimento e aplicações de medidas de controle de ruído. Assim, a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), através de projetos de P&D, desenvolveu em parceria com a UFPA, UFPE e UFSC um estudo de medidas de controle de ruído, do qual esse trabalho é fruto, nas Usinas Hidrelétricas de Paulo Afonso I, II, III e IV que integram o complexo de Paulo Afonso, gerenciado pela CHESF. A metodologia adotada consistiu no desenvolvimento de modelos computacionais, validados a partir de dados experimentais, que permitiram a busca por soluções virtuais de controle de ruído através do *software* Odeon, o qual se fundamenta na Acústica Geométrica/Estatística, através de algoritmos híbridos de raios acústicos e fontes imagem, para simular o campo acústico dos ambientes investigados. As soluções de controle de ruído pesquisadas indicam a possibilidade de redução dos níveis sonoros em todos os ambientes investigados, a partir da utilização de medidas de controle de forma conjunta.

Palavras-Chave: Usina hidrelétrica, acústica, condições insalubres, medidas de controle de ruído, modelos computacionais, dados experimentais, acústica geométrica/estatística.

ABSTRACT

A hydroelectric power plant involves large magnitudes of energy and the emission of acoustic energy by generating units and their auxiliary systems provide unhealthy conditions, with noise levels above 85 dBA. This level is the limit to which a person may be exposed during eight hours of work, as stipulated by the NR-15 Brazilian standard. If this value is exceeded, the use of ear protection becomes necessary, followed by a study for the development and application of noise control measures. Thus, the São Francisco Hydroelectric Company (CHESF) developed in partnership with UFPA, UFPE and UFSC a noise control study, from which this work results, in the hydroelectric power plants of Paulo Afonso I, II, III and IV, that comprise the complex of Paulo Afonso, managed by CHESF. The methodology adopted consisted in the development of computational models, validated from experimental data, which allowed the search for virtual solutions of noise control, using the software Odeon, which is based on Statistical/Geometrical Acoustics, through hybrid algorithms of acoustic beams and image sources, to simulate the investigated environments' sound fields. The noise control solutions surveyed indicate the possibility of reducing noise levels in all investigated environments, from the use of control measures jointly.

Keywords: Hydroelectric power plant, acoustic, unhealthy conditions, noise control measures, computational models, experimental data, Statistical/Geometrical Acoustics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Represamento das usinas de Paulo Afonso I, II e III.	24
Figura 1.2 – Topo do gerador das unidades geradoras (01G1, 01G2 e 01G3) da usina PA I.....	25
Figura 1.3 – Topo do gerador das unidades geradoras (02G1, 02G2, 02G3, 02G4, 02G5 e 02G6) da usina PA II.	26
Figura 1.4 – Topo do gerador das unidades geradoras (03G1, 03G2, 03G3 e 03G4) da usina PA III.....	26
Figura 1.5 – Reservatório da usina Paulo Afonso IV.....	27
Figura 1.6 – Topo do gerador das unidades geradoras (04G1, 04G2, 04G3, 04G4, 04G5 e 04G6) da usina PA IV.....	27
Figura 2.1 – Relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora produzido por algumas fontes de ruído.....	42
Figura 2.2 – Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica.....	45
Figura 2.3 – Corte transversal da Usina de Paulo Afonso IV com destacamento dos pisos do gerador, da <i>Air Housing</i> e da turbina.	47
Figura 2.4 – Imagem do piso do gerador da PA IV.....	47
Figura 2.5 – Imagem do piso da <i>Air Housing</i> da PA IV.	48
Figura 2.6 – Imagem do piso da turbina da PA IV.....	48
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do sistema de medições de intensidade sonora B&K 3360.	52
Figura 3.2 – Superfície de medição para determinação da potência sonora de uma fonte.	53
Figura 3.3 – Medição de intensidade sonora por pontos discretos.....	54
Figura 3.4 – Medição de intensidade sonora em um caminho de varredura.	55
Figura 3.5 – Aproximação do gradiente de pressão sem precisão em altas frequências.	58
Tabela 4.1 – Equipamentos de medição de Nível de Pressão Sonora.	63
Figura 4.1 – Arranjo esquemático dos equipamentos de medição de Nível de Pressão Sonora.....	64
Figura 4.2 – Piso do Gerador da PA I: croqui com pontos de medição.	65
Figura 4.3 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA I.	66
Figura 4.4 – Piso da Turbina PA I: croqui com pontos de medição.....	66
Figura 4.5 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA I.....	66

Figura 4.6 – Piso do Gerador da PA II: croqui com pontos de medição.	67
Figura 4.7 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA II.	67
Figura 4.8 – Piso da Turbina PA II: croqui com pontos de medição.	68
Figura 4.9 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA II.	68
Figura 4.10 – Piso do Gerador da PA III: croqui com pontos de medição.	68
Figura 4.11 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA III.	69
Figura 4.12 – Piso da Turbina PA III: croqui com pontos de medição.	69
Figura 4.13 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA III.	69
Figura 4.14 – Piso do Gerador da PA IV: croqui com pontos de medição.	70
Figura 4.15 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA IV.	70
Figura 4.16 – Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: croqui com pontos de medição.	70
Figura 4.17 – Mapa acústico do Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV.	71
Figura 4.18 – Piso da Turbina PA IV: croqui com pontos de medição.	71
Figura 4.19 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA IV.	71
Figura 4.20 – Dutos de refrigeração da <i>Air Housing</i> da 04G6.	71
Tabela 4.2 – Equipamentos de medição de nível de potência sonora das principais fontes de ruído dos ambientes pilotos.	73
Figura 4.21 – Dados de NPS em um ponto dentro do poço da turbina da PA IV exibido no <i>software Labshop-view</i> , evidenciando níveis elevados em baixa frequência.	74
Figura 4.22 – Topo do gerador da unidade 04G1.	75
Figura 4.23 – Porta da <i>Air Housing</i> da unidade geradora 04G1.	76
Figura 4.24 – Corredor de acesso ao poço da turbina da unidade geradora 04G1.	77
Figura 4.25 – Abertura oposta ao corredor de acesso ao poço da turbina da unidade geradora 04G1.	77
Figura 4.26 – Abertura do exaustor próximo à unidade geradora 04G2.	77
Figura 4.27 – Bombas do tanque de purificação de óleo dos mancais da unidade geradora 04G6.	78
Figura 5.1 – Representação do algoritmo de traçado de raios, onde S = fonte sonora, C = receptor ou microfone esférico, s = reflexão especular e d = reflexão difusa.	83
Fonte: Kuttruff, 2000.	83
Figura 5.2 – Reflexão difusa e especular (adaptado de Tenenbaum, 2004).	83
Figura 5.3 – Traçado de um raio acústico da fonte até a detecção pelo receptor.	84
Fonte: Souza, 1997.	84

Figura 5.4 – Representação do método da fonte imagem: fontes imagem de primeira e segunda ordem (adaptado de Elorza, 2005).	87
Figura 5.5 – Divisão do procedimento de cálculo no Odeon.	89
Figura 5.6 – Exemplo de procedimento de cálculo do Odeon em uma sala retangular com uma fonte e um receptor: raios criando fontes imagens para as reflexões iniciais e as fontes secundárias para as reflexões finais. Fonte: Odeon, 2008.....	91
Figura 5.7 – Histograma para o receptor R do procedimento de cálculo da Fig. 5.6. Fonte: Odeon, 2008.	91
Figura 6.1 – Imagens do ambiente real e do modelo geométrico, aproximadamente de uma mesma posição de visualização.	96
Figura 6.2 – Modelo geométrico do Piso do Gerador da PA IV.	97
Figura 6.3 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo preliminar (■).	98
Figura 6.4 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo validado (■).	100
Figura 6.5 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: dados do modelo experimental, do modelo preliminar e do modelo validado.	102
Figura 6.6 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado.	102
Figura 6.7 – Vista, a partir do piso do Gerador, da área do <i>Hall</i> de montagem do piso da <i>Air Housing</i>	103
Figura 6.8 – Área do duto do barramento no ambiente real e no modelo geométrico preliminar.	104
Figura 6.9 – Modelo geométrico do Piso do Gerador da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfone em azul.	105
Figura 6.10 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo preliminar (■).	106
Figura 6.11 – Portas de acesso ao interior da <i>Air Housing</i> da unidade geradora 04G2, construídas diametralmente opostas.	107
Figura 6.12 – Exaustores próximos à unidade geradora 04G2.....	108
Figura 6.13 – NWS da porta da <i>Air Housing</i> 04G1 fechada e exaustor próximo à unidade geradora 04G2.....	108
Figura 6.14 – Área de saída do barramento da <i>Air Housing</i> da unidade geradora 04G1: ambiente adverso para medições de nível de potência sonora.	109

Figura 6.15 – Fonte sonora plana (área clara do lado esquerdo) definida no Odeon, representando a área de saída do barramento da <i>Air Housing</i> , e fontes planas referentes aos exaustores (áreas claras no lado direito).	110
Figura 6.16 – Configuração do modelo validado do Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfone, em azul.	110
Figura 6.17 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo validado (■). 112	112
Figura 6.18 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: resultados das posições de microfones 1 a 37.	113
Figura 6.19 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: resultados das posições de microfones 38 a 75.	114
Figura 6.20 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: resultados das posições de microfones 76 a 111.	114
Figura 6.21 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: resultados das posições de microfones 112 a 148.	115
Figura 6.22 – Modelo geométrico e ambiente real do Piso da Turbina da PA IV, vistos, aproximadamente, de uma mesma posição.	116
Figura 6.23 – Modelo preliminar do Piso da Turbina da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfone, em azul.	117
Figura 6.24 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo preliminar (■).	118
Figura 6.25 – Área dos dutos de transporte de óleo dos mancais: área de saída de energia sonora com nível intenso.	120
Figura 6.26 – Modelo validado do Piso da Turbina da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfone, em azul.	120
Figura 6.27 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo validado (■).	121
Figura 6.28 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 1 a 37.	122

Figura 6.29 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 38 a 74.	123
Figura 6.30 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 75 a 111.	123
Figura 6.31 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 112 a 153.	124
Figura 6.32 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com revestimento de material acústico para medida de controle de ruído por absorção sonora nas superfícies internas do ambiente.	127
Figura 6.33 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de tratamento acústico em praticamente todas as superfícies internas da sala (■).	128
Figura 6.34 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com revestimento de material acústico para medida de controle de ruído por absorção sonora nas superfícies internas dentro do diâmetro das tampas dos geradores do ambiente.	129
Figura 6.35 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de tratamento acústico em parte das superfícies internas da sala (■).	130
Figura 6.36 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com enclausuramento parcial com revestimento de material acústico na superfície interna.	131
Figura 6.37 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de enclausuramento parcial com material absorvedor de som nas superfícies internas (■).	133
Figura 6.38 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com enclausuramento parcial com revestimento de material acústico na superfície interna e material absorvedor parcialmente aplicado às paredes laterais e teto.	134
Figura 6.39 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com	

aplicação conjunta de enclausuramento parcial com material absorvedor de som nas superfícies internas e em partes das paredes laterais e teto (■).....	135
Figura 6.40 – Modelo do Piso da <i>Air Housing</i> com revestimento de material acústico nas paredes e teto.....	136
Figura 6.41 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de material absorvedor de som nas superfícies paredes e teto (■).	137
Figura 6.42 – Níveis de potência sonora da porta da <i>Air Housing</i> atualmente utilizada, na condição fechada e aberta, nível de potência sonora estimado com a aplicação da porta acústica comercial e perda de transmissão da porta comercial, em função da frequência.	138
Figura 6.43 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de portas acústicas (■).	140
Figura 6.44 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com manutenção da área do barramento (■).	142
Figura 6.45 – Exemplo de atenuador acústico com lamelas de material de absorção acústica.	143
Figura 6.46 – Nível de potência sonora do exaustor, atenuação do silenciador e novo nível de potência sonora do exaustor atenuado, em função da frequência.....	144
Figura 6.47 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com exaustores atenuados (■).	145
Figura 6.48 – Níveis de potência sonora das fontes associadas à porta da <i>Air Housing</i> (quando fechada) e ao exaustor, em função da frequência.....	146
Figura 6.49 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução 5 (■).....	148
Figura 6.50 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução 6 (■).....	150
Figura 6.51 – Modelo do Piso da Turbina com revestimento de material acústico nas paredes e teto.	152

Figura 6.52 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução de absorção sonora nas principais superfícies (■).....	153
Figura 6.53 – Modelo do Piso da Turbina da PA IV, com porta acústica na saída do corredor de cada uma das seis salas das turbinas, além do revestimento interno dos poços das turbinas com material de absorção sonora de alta performance.	154
Figura 6.54 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução de porta acústica no poço da turbina, revestido internamente com material de absorção sonora (■).	155
Figura 6.55 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução de vedação acústica da saída da tubulação para purificação de óleo do mancal (■).	157
Figura 6.56 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com combinação das soluções 2 e 3 (■).....	159
Figura B.1.1 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV no ODEON, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones, em azul.....	188
Figura B.2.1 – Modelo do Piso da Air Housing da PA IV no ODEON, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones, em azul.....	193
Figura B.3.1 – Modelo do Piso da Turbina da PA IV no ODEON, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones, em azul.....	198

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Limites de tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes.	31
Tabela 5.1 – Nível de Potência Sonora em dB, por banda de frequência de oitava, das principais fontes da usina PA IV.	78
Tabela 6.1 – Coeficientes de absorção sonora dos materiais atribuídos aos modelos numéricos.	94
Tabela 6.2 – Diferença entre os níveis sonoros medidos e simulados para o modelo validado do Piso do Gerador da PA IV.	101
Tabela 6.3 – Coeficientes de absorção sonora dos materiais atribuídos aos modelos numéricos.	126
Tabela 7.1 – Soluções e valores de níveis sonoros médios alcançados para o piso do Gerador da PA IV.	162
Tabela 7.2 – Soluções e valores de níveis sonoros médios alcançados para o piso da <i>Air Housing</i> da PA IV.	162
Tabela 7.3 – Soluções e valores de níveis sonoros médios alcançados para o piso da Turbina da PA IV.	163

NOMENCLATURA

BEM	<i>Boundary Element Method</i> (Método de Elementos de Contorno)
C_{50}	Clareza
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CBM	<i>Conical Beam Method</i> (Método dos Raios Cônicos)
D	Perda por inserção
d	Distância entre microfones
EDT	Tempo de Decaimento Inicial
EHC	<i>Environmental Health Criteria</i>
ESR	<i>Early Scattering Rays</i> (Raios Iniciais de Espalhamento)
FDTD	Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método de Elementos Finitos)
\vec{I}	Vetor intensidade sonora
I_r	Vetor intensidade sonora na direção r
$Im\{G_{AB}\}$	Parte imaginária do espectro cruzado
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISM	<i>Image Source Method</i> (Método da Fonte Imagem)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L_{Aeq}	Nível de pressão sonora equivalente
L_p	Nível de pressão sonora
L_{p1}	Nível de pressão sonora medido antes da aplicação da superfície
L_{p2}	Nível de pressão sonora medido no mesmo local de L_{p1} com aplicação da barreira acústica
NI	Nível de Intensidade
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
NPS	Nível de Pressão Sonora
NR	Norma Regulamentadora
NWS	Nível de Potência Sonora
p	Pressão sonora
\bar{p}	Pressão sonora instantânea
p_{ref}	Pressão de referência, $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$
p_{rms}	Valor médio quadrático da pressão sonora

p_1	Pressão sonora instantânea medida na posição 1 da sonda
p_2	Pressão sonora instantânea medida na posição 2 da sonda
PAIR	Perda auditiva induzida por ruído
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PT	Perda de transmissão
RaSTI	Índice Rápido de Transmissão da Fala
RTM	<i>Ray Tracing Method</i> (Método de Traçado de Raios)
S	Área da superfície de medição
STI	Índice de Transmissão da Fala
T	Período de medição
TBM	<i>Triangular Beam Method</i> (Método de raios Triangulares)
TO	Ordem de Transição
\bar{u}	Média temporal do vetor velocidade de partícula instantânea
u_r	Velocidade de partícula instantânea na direção r
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
W_s	Potência sonora média líquida
α	Coefficiente de absorção
β	Energia sonora refletida
γ	Energia sonora incidente
Δr	Distância entre microfones
ρ_0	Densidade do ar
τ	Energia sonora transmitida
ω	Frequência angular

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	24
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	24
1.2 JUSTIFICATIVA	31
1.3 OBJETIVOS	32
1.3.1 Objetivo Geral	32
1.3.2 Objetivos Específicos.....	32
1.4 METODOLOGIA.....	32
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	34
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	35
2.2 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMBIENTES INDUSTRIAIS ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	36
2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	41
2.3.1 Nível de Pressão Sonora (NPS).....	41
2.3.2 Coeficiente de Absorção Sonora.....	43
2.3.3 Perda de Transmissão Sonora (PT) e Perda por Inserção (D).....	43
2.3.4 Noções Essenciais de uma Central Hidrelétrica	44
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	48
CAPÍTULO 3 – INTENSIMETRIA SONORA	49
3.1 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA POR TÉCNICA DE INTENSIMETRIA SONORA	49
3.1.1 Princípios de Medições de Intensidade Sonora.....	50
3.1.1.1 Intensidade Sonora	50
3.1.1.2 Potência Sonora	53
3.1.1.3 Medições em Pontos Discretos.....	54
3.1.1.4 Medições por Varredura	55
3.1.1.5 Erros de Medição.....	56
<i>3.1.1.5.1 Erro por Aproximação de Diferenças Finitas.....</i>	<i>57</i>
<i>3.1.1.5.2 Erro de Desencontro de Fase.....</i>	<i>58</i>

3.1.1.5.3 Erro devido à absorção sonora da fonte	60
3.1.1.5.4 Erro devido ao fluxo de ar.....	60
3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	61
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	62
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA	62
4.1.1 Mapas Acústicos	64
4.1.1.1 Mapas Acústicos da Usina PA I	65
4.1.1.2 Mapas Acústicos da Usina PA II.....	66
4.1.1.3 Mapas Acústicos da Usina de Paulo Afonso III.....	68
4.1.1.4 Mapas Acústicos da Usina de Paulo Afonso IV	69
4.2 DEFINIÇÃO DOS AMBIENTES PILOTOS	71
4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA	72
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	78
CAPÍTULO 5 – MODELAGEM ACÚSTICA E ACÚSTICA GEOMÉTRICA.....	80
5.1 MODELAGEM ACÚSTICA.....	80
5.1.1 Método de Traçado de Raios (<i>Ray Tracing Method</i>)	82
5.1.2 Método da Fonte Imagem (<i>Image Source Method</i>).....	85
5.1.3 Método Híbrido	87
5.2 MÉTODO HÍBRIDO ESPECIAL DO ODEON	88
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	92
CAPÍTULO 6 – MODELAGEM ACÚSTICA DE AMBIENTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E PROPOSTAS VIRTUAIS DE CONTROLE DE RUÍDO.....	93
6.1 MODELAGEM ACÚSTICA DE AMBIENTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	93
6.1.1 Modelagem Acústica do Piso do Gerador da PA IV	95
6.1.1.1 Modelo Preliminar.....	95
6.1.1.2 Modelo Validado	99
6.1.2 Modelagem Acústica do Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV	103
6.1.2.1 Modelo Preliminar.....	103
6.1.2.2 Modelo Validado	109
6.1.3 Modelagem Acústica do Piso da Turbina da PA IV.....	115

6.1.3.1 Modelo Preliminar	115
6.1.3.2 Modelo Validado	119
6.2 MEDIDAS DE CONTROLE DE RUÍDO VIRTUAIS NA USINA DE PAULO AFONSO IV	124
6.2.1 Soluções Numéricas de Controle de Ruído para o Piso do Gerador da PA IV	126
6.2.1.1 Solução 1: absorção sonora completa nas paredes e teto do ambiente.....	126
6.2.1.2 Solução 2: absorção sonora parcial nas paredes e teto do ambiente	129
6.2.1.3 Solução 3: enclausuramento parcial compacto revestido internamente com material absorvente.....	131
6.2.1.4 Solução 4: absorção sonora parcial e enclausuramento parcial compacto revestido internamente com material absorvedor de som	134
6.2.2 Soluções Numéricas de Controle de Ruído para o Piso da <i>Air Housing</i> da PA IV	136
6.2.2.1 Solução 1: absorção sonora nas principais superfícies do ambiente	136
6.2.2.2 Solução 2: portas acústicas nas <i>Air Housings</i>	138
6.2.2.3 Solução 3: vedação da saída do barramento.....	141
6.2.2.5 Solução 5: portas acústicas nas <i>Air Housings</i> e vedação da saída do barramento.....	147
6.2.2.6 Solução 6: portas acústicas nas <i>Air Housings</i> , vedação da saída do barramentos e atenuadores acústicos	149
6.2.3 Soluções Numéricas de Controle de Ruído para o Piso da Turbina da PA IV	151
6.2.1.1 Solução 1: absorção sonora nas principais superfícies do ambiente	151
6.2.1.2 Solução 2: porta acústica com absorção na saída do poço da turbina	154
6.2.1.3 Solução 3: vedação da saída da tubulação de óleo do mancal.....	156
6.2.1.4 Solução 4: porta acústica na sala da turbina, absorção no poço da turbina e vedação da abertura traseira da sala da turbina	158
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	160
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	161
7.1 CONCLUSÕES	161
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	164

APÊNDICES	173
APÊNDICE A – ROTINA EM MATLAB PARA DESENVOLVIMENTO DE MAPA ACÚSTICO	173
A.1. Arquivo “Mapa_acustico_PA_I_Piso_Gerador.m”	173
A.2. Arquivo “Mapa_acustico_PA_I_Piso_Turbina.m”	174
A.3. Arquivo “Mapa_acustico_PA_II_Piso_Gerador.m”	175
A.4. Arquivo “Mapa_acustico_PA_II_Piso_Turbina.m”	175
A.5. Arquivo “Mapa_acustico_PA_III_Piso_Gerador.m”	177
A.6. Arquivo “Mapa_acustico_PA_III_Piso_Turbina.m”	178
A.7. Arquivo “Mapa_acustico_PA_IV_Piso_Gerador.m”	179
A.8. Arquivo “Mapa_acustico_PA_IV_Piso_Air_Housing.m”	180
A.9. Arquivo “Mapa_acustico_PA_IV_Piso_Turbina.m”	182
APÊNDICE B – VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA EXPERIMENTAIS E VALIDADOS (NUMÉRICOS)	186
B.1. NPS (dBA) Piso do Gerador da PA IV	186
B.2. NPS (dBA) Piso da Air Housing da PA IV	189
B.3. NPS (dBA) Piso da Turbina da PA IV	194
APÊNDICE C – VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA VALIDADOS E RESULTADOS DAS SOLUÇÕES VIRTUAIS DE CONTROLE DE RUÍDO	199
C.1. Piso do Gerador da PA IV	199
C.2. Piso da Air Housing da PA IV	201
C.3. Piso da Turbina da PA IV	208

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Gerenciado pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), o Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso é um conjunto de usinas localizado na cidade de Paulo Afonso-BA, formado pelas usinas Paulo Afonso I, II, III, IV (PA I, II, III e IV) e Apolônio Sales (Moxotó), que produzem 4.279,6 MW de energia elétrica. Sua construção se deu no principal rio da região Nordeste do Brasil, o Rio São Francisco, com área de drenagem de 605.171 km², bacia hidrográfica de 630.000 km² e extensão de 3.200 km, desde a nascente na Serra da Canastra-MG, até sua foz na divisa entre Piaçabuçu-AL e Brejo Grande-SE (CHESF, 2009).



Figura 1.1 – Represamento das usinas de Paulo Afonso I, II e III.
Fonte: www.chesf.gov.br.

A contemplação da previsão de construção de novas usinas subterrâneas, aproveitando o mesmo represamento (ver Fig. 1.1), no planejamento e projeto executivo das estruturas da PA I, representou uma expressiva economia na construção das usinas PA II e III. Este represamento é constituído de uma barragem do tipo gravidade (em que o equilíbrio da construção sob a força exercida pela água se dá em virtude de seu peso próprio) em concreto armado, com altura máxima de 20 m e comprimento total da crista de 4.707 m. A barragem possui um vertedouro do tipo *Krieger*, com descarga livre, quatro vertedouros de superfície, com comportas vagão, um descarregador de fundo,

dois drenos de areia e tomadas d'água. As casas de forças das usinas são subterrâneas, escavadas em rocha sólida com profundidade aproximada de 80 m.

A usina PA I é constituída de 3 unidades geradoras (ver Fig. 1.2) acionadas por turbinas hidrelétricas Francis, com 60 MW de potência unitária, totalizando 180 MW. Operam a uma velocidade nominal de 200 rpm, com velocidade de disparo de 380 rpm e vazão de $84 \text{ m}^3/\text{s}$. Os rotores possuem diâmetro menor de 2,94 m e diâmetro maior de 3,37 m. Cada gerador tem corrente nominal de 2.560 A, tensão entre fases de 13.800 V, fator de potência de 0,98 e 36 pólos.



Figura 1.2 – Topo do gerador das unidades geradoras (01G1, 01G2 e 01G3) da usina PA I.

Para a nomenclatura das unidades geradoras, visando uma organização de fácil entendimento, adota-se um código com o primeiro valor numérico referente à usina e o último valor alfanumérico referente à unidade geradora, ficando, por exemplo, a primeira unidade da usina PA I denominada como 01G1 e assim sucessivamente.

A usina PA II é constituída por 6 unidades geradoras (ver Fig. 1.3) acionadas por turbinas Francis, sendo 2 unidades com potências unitárias de 70 MW, 1 unidade com potência unitária de 75 MW e 3 unidades com potência unitária de 76 MW, totalizando 443 MW. As turbinas operam à velocidade nominal de 200 rpm, com velocidade de disparo de 390 rpm e vazão de $125 \text{ m}^3/\text{s}$. Os rotores possuem diâmetro menor de 3,0 m e diâmetro maior de 3,905 m.



Figura 1.3 – Topo do gerador das unidades geradoras (02G1, 02G2, 02G3, 02G4, 02G5 e 02G6) da usina PA II.

A PA III é constituída por 4 unidades geradoras (ver Fig. 1.4) acionadas por turbinas Francis com potência unitária de 198,55 MW, totalizando 794,2 MW. As turbinas operam à velocidade nominal de 138,46 rpm, com velocidade de disparo de 272 rpm e vazão de 266 m³/s. Os rotores possuem diâmetro menor de 4,34 m e diâmetro maior de 5,7 m.



Figura 1.4 – Topo do gerador das unidades geradoras (03G1, 03G2, 03G3 e 03G4) da usina PA III.

Diferentemente das usinas PA I, II e III, a usina Paulo Afonso IV (ver Fig. 1.5) está instalada em outro reservatório, também localizado em Paulo Afonso-BA. Esse faz represamento da água proveniente do reservatório da usina Moxotó, através de um canal de derivação e é constituído por barragem e dique de seção mista terra-enrocamento com comprimento total de 7.430 m de crista, altura máxima de 35 m e estrutura de

concreto que compreende um vertedouro com oito comportas. E assim como nas usinas PA I, II e III, sua casa de máquinas também é subterrânea escavada em rocha sólida.



Figura 1.5 – Reservatório da usina Paulo Afonso IV.
Fonte: semiraadlervainsencher.blogspot.com.

Na casa de máquinas da usina PA IV estão instaladas 6 unidades geradoras (ver Fig. 1.6) com turbinas hidráulicas Francis com potência unitária de 410,4 MW, totalizando 2.462,4 MW. Essas turbinas hidráulicas possuem queda nominal de 112,5 m e operam à velocidade nominal de 120 rpm, com velocidade de disparo de 220 rpm e vazão de $385 \text{ m}^3/\text{s}$. Seus rotores possuem diâmetro menor de 5,75 m e diâmetro maior de 6,55 m.



Figura 1.6 – Topo do gerador das unidades geradoras (04G1, 04G2, 04G3, 04G4, 04G5 e 04G6) da usina PA IV.

O Complexo de Paulo Afonso abriga unidades geradoras e sistemas de transporte da água represada, como comentado acima, os quais são de grande porte, envolvendo fenômenos físicos com altos níveis de energia, como por exemplo, a energia potencial nos dutos de admissão, energia cinética nas pás das turbinas e elétrica no rotor do gerador. Tais sistemas e máquinas exigem processos, máquinas e sistemas auxiliares, cujo funcionamento conjunto proporciona aos ambientes das usinas elevados níveis de ruído.

Exposições a níveis elevados de ruído propiciam aos trabalhadores problemas sérios de saúde como estresse físico e psicológico (Bies e Hansen, 1996; EHC 12, 1980), aceleração da pulsação, aumento da pressão sanguínea, estreitamento dos vasos sanguíneos (Gerges, 2000; Van Kanp, 1986), perda auditiva temporária, perda auditiva permanente (Bistafa, 2006; Gerges, 2000) e outras reações psicofisiológicas e possíveis reações patológicas (EHC 12, 1980).

O mais discutido dentre os efeitos causados pela exposição do ruído ao trabalhador é a perda auditiva (Didoné, 2004), a qual acontece quando o trabalhador permanece exposto de forma repetida durante longos períodos de tempo a níveis de ruído elevados, onde a energia sonora na sua orelha produz uma fadiga e/ou destruição das células ciliadas (as quais são células especializadas em transformar a energia vibratória do som em impulsos elétricos que são transmitidos ao cérebro) implicando na perda da capacidade auditiva de forma irreversível. Esta lesão se produz de forma lenta, progressiva e insidiosa, ao longo dos anos. Mas, exposições a ruídos de impacto e outros ruídos muito intensos, mesmo de curta duração, podem produzir, também, danos à audição do trabalhador instantaneamente.

Uma pessoa com perda de audição tem alterações importantes, as quais se apresentam na forma de “incapacidade auditiva” e “desvantagem”. A incapacidade auditiva diz respeito à percepção da fala em ambientes ruidosos. A desvantagem se relaciona com as consequências da perda de audição que não são auditivas e que são influenciadas por fatores psicológicos e ambientais, como estresse, ansiedade, isolamento e baixa autoestima, que dificultam as relações do indivíduo na família, no trabalho e na sociedade. Tanto a incapacidade auditiva quanto a desvantagem prejudicam o desempenho das atividades de vida diária do indivíduo com perda de audição, interferindo na sua qualidade de vida.

No ambiente industrial, o ruído é um fator que pode contribuir ainda para provocar acidentes (Fernández *et al.*, 2008; EHC 12, 1980), mascarando a fala e os alarmes sonoros. Assim, a conversação entre os trabalhadores em situações que exigem a necessidade de comunicação oral é dificultada, podendo uma interpretação incorreta de ordens ou instruções proporcionar situações de riscos que, às vezes, terminam em acidentes com lesões ou até mesmo fatalidades. Por outro lado, sinais, avisos, instruções e alarmes acústicos emitidos por máquinas e sistemas de comunicação, por exemplo, devem ter níveis sonoros intensos, para chamar a atenção do trabalhador e evitar alguma situação de risco para este último ou comprometimentos de equipamentos, sendo mais uma fonte sonora no ambiente.

O ruído também impacta economicamente e financeiramente a vida das pessoas (Bistafa, 2006) e dos países, principalmente daqueles em desenvolvimento, como o Brasil, que diminuem seus produtos internos brutos em bilhões de dólares com a contribuição anual de fatores como indenizações trabalhistas, redução da produtividade no trabalho e os tratamentos médicos correlatos a doenças ocupacionais decorrentes do ruído (Mello Junior, 1998).

Mello Junior (1998) também comenta que no Brasil, no que se refere à exposição ocupacional e ambiental ao ruído industrial, existe uma legislação, em parte, rigorosamente fundamentada sob o ponto de vista científico e técnico, principalmente nas metodologias das ações a serem despendidas pelos órgãos governamentais, os quais são encarregados da fiscalização, e empresários, os quais são encarregados da realização do monitoramento ambiental do agente físico ruído. No entanto, a única patologia causada pelo ruído reconhecida pela legislação brasileira é a perda auditiva induzida por ruído (PAIR).

O Comitê Nacional de Ruído e Conservação Auditiva (1999) define a PAIR como uma diminuição gradual da acuidade auditiva, decorrente da exposição continuada a elevados níveis de pressão sonora. Didoné (2004) comenta que, conforme a NR-7 (1994), complementada pela portaria nº 19 do Ministério do Trabalho (1998), a PAIR é do tipo sensorineural quando os elementos sensoriais da cóclea (células ciliadas) estão lesados e incapacitados de estimular o nervo auditivo, decorrendo da exposição ocupacional sistemática, e acomete inicialmente uma ou mais frequências da faixa de 3.000 a 6.000 Hz. De Azevedo (2004) ressalta que *Perda Auditiva induzida por Níveis de Pressão Sonora Elevados*, citada e definida na portaria nº 19, é a denominação

correta, ao invés de *Perda Auditiva Induzida pelo Ruído*, tradução de *Noise Induced Hearing Loss*, a qual é a terminologia consagrada mundialmente. Isto se deve ao fato de que o que representa risco à audição é o nível de pressão sonora elevado e não o ruído em si, que é conceituado como um som indesejado, geralmente utilizado com conotação negativa (Bastos, 2007).

Segundo o Ministério da Saúde (2006) a PAIR é o agravo mais frequente à saúde do trabalhador, estando presente em diversos ramos de atividades.

A NIOSH (1996) comenta que um bem sucedido programa de prevenção da perda de audição beneficia a companhia e o seu empregado afetado. Os empregados ficam livres das deteriorações da audição incapacitada e evidentemente indica que ele tem menos fadiga e em geral melhora a saúde. E a companhia se beneficia com a redução dos gastos médicos e custos das compensações trabalhistas, além dos melhores rendimentos dos trabalhadores.

A NIOSH (1998) recomenda que os programas de prevenção de perda da audição devam ser implementados em locais onde os trabalhadores encontram-se expostos a ruídos iguais ou maiores que 85 dBA.

No Brasil, estes programas de prevenção são, em parte, exigidos pelas Normas Regulamentadoras (NRs). Tais normas são de observância obrigatória pelas empresas privadas e públicas e pelos órgãos públicos da administração direta e indireta, bem como pelos órgãos dos Poderes Legislativos e Jurídicos, que possuem empregados regidos pela Consolidação das Leis Trabalhistas, como ratificado no item 1.1 da NR-1 (2009).

Atualmente, existem 33 NRs em vigor e, destas, as NR-7, 9, 10, 12, 15 e 17 abordam o ruído industrial, destacando-se a NR-15, que define como atividades e operações insalubres, aquelas desenvolvidas acima dos limites de tolerância previstos nos anexos 1, 2, 3, 5, 11 e 12, as mencionadas nos anexos 5, 6, 13 e 14 e as comprovadas através de laudo de inspeção do local de trabalho, constantes dos anexos 7, 8, 9 e 19. Além disso, também define os graus de insalubridade de tais atividades, classificando-os em mínimo, médio e máximo. O anexo 1 da NR-15 refere-se ao limite de tolerância para ruído contínuo e intermitente e demonstra a tabela de níveis de ruído e o correspondente período de exposição diária permissível (ver Tab. 1.1).

Tabela 1.1 – Limites de tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes.

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

Fonte: NR-15

1.2 JUSTIFICATIVA

A CHESF, no Complexo de Paulo Afonso, preocupando-se com a saúde dos seus colaboradores e a sua constante adequação à legislação trabalhista brasileira, em relação ao agente ruído, proporcionou o desenvolvimento de um projeto de P&D em parceria com a UFPA, UFPE e UFSC, intitulado “Desenvolvimento de Metodologia para Controle de Ruído em Ambientes de Produção de Energia Elétrica”.

Este projeto teve como um dos frutos o desenvolvimento do presente trabalho, o qual se justifica pela necessidade de estudos de propostas de controle de ruído em ambientes de geração de energia elétrica, através de ferramentas computacionais baseadas na Acústica Geométrica, aproveitando suas facilidades, flexibilidade e alta precisão dos resultados, evitando intervenções desnecessárias nos ambientes reais, os quais são de produção constante.

Através dessa ferramenta, buscaram-se adequar os ambientes de trabalho investigados à NR-15, sendo propostas soluções virtuais de controle de ruído visando a

contribuir significativamente para a área de ergonomia da CHESF, sob o ponto de vista do conforto acústico, ao minimizar o risco dos funcionários com potencial de desenvolvimento de perda auditiva induzida por ruído, gerando condições de prevenções de futuros casos e não agravamento dos casos atuais.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver modelos numéricos dos ambientes de produção de energia elétrica de uma usina hidrelétrica da CHESF, Regional Paulo Afonso-BA, para estudar soluções virtuais de medidas de controle de ruído, tendo em vista a futura adequação destes ambientes às normas vigentes na área de acústica industrial.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Realizar um mapeamento do ruído em ambientes pilotos da usina PA IV;
- Caracterizar as principais fontes de ruído, como tipo de fonte sonora, localização, aspectos de frequência, particularidades do ruído gerado, etc.;
- Desenvolver modelos numéricos dos ambientes pilotos definidos, utilizando métodos de acústica geométrica, e validá-los a partir de comparações com resultados experimentais;
- Propor estratégias de controle de ruído baseadas nos modelos numéricos desenvolvidos.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho se divide em uma etapa de medições experimentais, onde foram obtidos valores de níveis de potência sonora e níveis de pressão sonora referentes aos ambientes pilotos, além de uma etapa de simulações, onde

foram validados os modelos numéricos por comparação com os resultados experimentais do ambiente piloto e, posteriormente, investigadas as propostas virtuais de controle de ruído para os ambientes em estudo.

Na fase experimental, primeiramente foram realizadas medições de nível de pressão sonora em vários ambientes de produção de energia elétrica das usinas de Paulo Afonso para o mapeamento do ruído. Esboços aproximados dos ambientes foram obtidos, baseados em plantas fornecidas pela CHESF, mostrando as posições relativas das principais máquinas, processos e itens de interesse, aos quais foram adicionados os níveis de pressão sonora medidos em escala dBA. Estes níveis foram medidos em um número conveniente de pontos ao longo das áreas em investigação, produzindo um mapa de ruído que demonstra as principais zonas com potencial de dano à audição.

Baseando-se nos mapas acústicos, as principais fontes de ruídos foram selecionadas e, posteriormente, caracterizadas e quantificadas através da determinação dos níveis de potência sonora por técnica de intensimetria acústica.

Dentro da etapa de simulações, foram criados modelos numéricos dos ambientes pilotos, através do *software* comercial Odeon, o qual se fundamenta em um método híbrido especial de acústica geométrica. Os modelos foram aprimorados a partir da investigação dos parâmetros que podem influenciar a qualidade das soluções numéricas, tais como o nível de detalhamento da geometria dos modelos, características de fontes sonoras que melhor aproximem as fontes de ruído reais e as condições de contorno em aberturas no piso, escadas e portas de acesso dos ambientes.

Após o aprimoramento dos modelos, os resultados numéricos de nível de pressão sonora foram comparados aos valores experimentais para a validação dos mesmos. Então, com os modelos validados, foram realizadas simulações numéricas de controle de ruído, através de modificações introduzidas nos modelos computacionais, tendo em vista a adequação dos níveis de pressão sonora àqueles previstos em normas de acústica.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

O Capítulo 2 mostra uma visão geral de vários trabalhos de acústica de raios aplicada em ambientes industriais e a fundamentação teórica básica em acústica para melhor entendimento do trabalho.

O Capítulo 3 trata da fundamentação teórica da técnica de intensimetria sonora, suas aplicações e limitações.

O Capítulo 4 aborda as medições experimentais dos níveis de pressão sonora e do nível de potência sonora nos ambientes das usinas PA I, II, III e IV.

O Capítulo 5 descreve os fundamentos da acústica de raios comentando seus principais algoritmos.

O Capítulo 6 trata das simulações numéricas dos ambientes adotados como pilotos, as soluções propostas e seus resultados.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do estudo desenvolvido, bem como apresenta sugestões para desenvolvimento de ações para futuros trabalhos relacionados ao tema desta dissertação.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De forma resumida, a acústica de salas diz respeito às investigações, através de medições experimentais, e ou determinações, através de métodos analíticos ou numéricos, das propriedades acústicas de ambientes fechados.

Souza (1997) comenta que, de certo ângulo, a acústica de salas pode ser dividida no estudo do estado transiente e estacionário do som.

O estudo do estado transiente do som, já não mais se limita ao tempo de reverberação e apresenta-se como fundamental para o projeto e avaliação de auditórios, igrejas, salas de concertos, teatros e outros ambientes, onde o que interessa é que o som seja audível, inteligível, agradável, livre de perturbações, não haja ecos, ondas estacionárias ou outras distorções, e o tempo de reverberação deva ser apropriado para o objetivo e balanceado através das frequências audíveis. O fato de não se limitar ao tempo de reverberação ocorre porque, atualmente, com o avanço da psicoacústica, tornou-se possível avaliar a qualidade acústica de uma sala, com base em parâmetros numéricos como, por exemplo, Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Índice Rápido de Transmissão da Fala (RaSTI), apesar de não haver acordo total sobre os parâmetros que são verdadeiramente importantes (Guedes, 2007).

Já o estudo estacionário do som é caracterizado pelo nível de pressão sonora e determina se o ambiente, que pode ser um galpão de fábrica, um escritório ou mesmo um teatro, possui uma quantidade de energia acústica compatível com as atividades ali desenvolvidas.

A seguir, são comentados alguns dos trabalhos de estudo do estado estacionário do som em ambientes industriais, desenvolvidos através de métodos numéricos pela acústica geométrica, a qual é aplicada através de seus principais algoritmos, a saber, método da fonte imagem, método de traçado de raios e métodos híbridos.

2.2 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMBIENTES INDUSTRIAIS ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Hodgson (1989), para avaliar a precisão do modelo de traçado de raios de um galpão industrial, fez comparações entre medições experimentais e predições, obtidas através do modelo, do nível de pressão sonora com 9 fontes sonoras em operação. Fez também comparações das predições com a teoria de Sabine/Eyring para avaliar a precisão deste último neste galpão, reforçando ainda mais a inaplicabilidade desta teoria em ambientes industriais. O galpão foi modelado sendo respeitada sua geometria, a distribuição dos equipamentos, as posições e as potências sonoras das fontes e o coeficiente de absorção do ar.

Para a validação do modelo, os valores de coeficiente de absorção das superfícies e a densidade dos equipamentos, escolhidos com base em pesquisas anteriores, foram variados até ser encontrada uma melhor comparação das curvas de propagação sonora medidas e preditas. Os níveis de potência sonora das fontes foram determinados usando a técnica de intensidade sonora por varredura e em cada medição apenas a fonte em teste estava em operação. Para o modelo com melhor comparação das curvas de propagação foram estudadas três medidas de controle de ruído. Basicamente, estas medidas utilizavam aplicações de painéis com materiais absorvedores no teto (*baffles*), barreiras acústicas e enclausuramentos parciais com alturas relevantes e material absorvedor em um dos seus lados.

Suas principais conclusões são que o modelo de traçado de raios prediz os níveis de ruído por todo o galpão industrial, tanto próximo de fontes e obstáculos quanto longe, com boa precisão em relação a medições experimentais, apesar de ter limitações em baixas frequências, onde neste caso a precisão foi menor, provavelmente devido aos efeitos dos modos acústicos, e nas regiões de sombra acústica por não levar em conta os efeitos da difração. Além disso, demonstra a utilidade e flexibilidade do modelo no estudo de medidas de controle de ruído eficazes.

Ondet e Barbry (1989) descrevem o Rayscat, que é um modelo computacional para previsão dos níveis de ruído em salas vazias e salas equipadas. Este modelo também é baseado na técnica de traçado de raios e leva em conta a geometria real da sala e regiões com diferentes equipamentos como mobiliários, máquinas, estantes, etc. Resultados experimentais demonstrando a influência da distribuição dos equipamentos nos níveis de ruído são exibidos e foram utilizados para validação do modelo Rayscat.

Suas conclusões são que as comparações entre os resultados experimentais e os previstos através do modelo Rayscat são extremamente satisfatórias.

Hodgson (1990), com objetivo de contribuir para a avaliação da precisão e aplicabilidade dos modelos de predições da propagação sonora em salas equipadas, como fábricas, salas de aulas e escritórios, compara os resultados da propagação sonora preditos pelos modelos de método de imagem de Jovicic, Lindqvist, Hodgson, Kurze, e Lemire e Nicolas, pela fórmula empírica de Friberg e pelo modelo de traçado de raios de Ondet e Barbry, com medições experimentais em um modelo de escala de 1:50 de uma fábrica e em um armazém, sendo, nos dois casos, variada a densidade de equipamentos que foram distribuídos isotropicamente e com geometria de um paralelepípedo regular. É alertado que as comparações foram feitas com apenas duas configurações experimentais, representando este estudo apenas uma avaliação parcial ou preliminar destes modelos de predições.

Suas principais conclusões são que os modelos de Friberg e de Lemire e Nicolas são fundamentalmente incorretos; o modelo de Jovicic e Kurze são de aplicabilidade limitada, pois ignoram as reflexões das paredes verticais; os modelos de Hodgson e Lindqvist aparentemente são precisos em certos casos e o modelo de Ondet e Barbry, encontrado como o de maior precisão em todos os casos estudados, apresentou maior aplicabilidade e flexibilidade, por aceitar qualquer geometria de sala, distribuição da absorção das superfícies e distribuição dos equipamentos pela sala.

Pleek e Geest (1995) descrevem como o programa de modelagem baseado em traçado de raios (Raynoise), em combinação com frequentes campanhas de medições experimentais, levam a aplicações bem sucedidas num estudo de caso prático que objetiva avaliar os benefícios das várias opções de controle de ruído. Eles comentam que as pesquisas no campo da acústica geométrica emergiram em algoritmos híbridos, como a combinação RTM (Método de Traçado de Raios)/MISM (Método da Fonte Imagem Especular), Método de Raios Cônicos (CBM) e Método de Raios Triangulares (TBM). Comentam, também, que predições confiáveis são alcançadas com dados de entrada (coeficiente de absorção das superfícies e o nível de potência sonora) determinados com suficiente precisão. Neste caso, os coeficientes de absorção dos vários materiais foram obtidos de fabricantes e da literatura. Os coeficientes utilizados em predições preliminares foram regulados até uma boa concordância de tempo de reverberação predito e medido, sendo os coeficientes encontrados na melhor concordância reutilizados nas simulações seguintes. O nível de potência sonora das

fontes foi determinado através da técnica de intensimetria, seguindo determinações da norma ISO DP 9614-2, com todas as fontes em operação, e para validar esses dados foram comparados os mapas acústicos de nível de pressão sonora das predições com as medições.

O estudo de caso foi em uma linha de produção, abrigada em um longo e estreito corredor, de uma companhia de gravura em aço que, através das medições de nível de pressão sonora, demonstrou ter níveis iguais e acima de 85 dBA, chegando a níveis de 95 dBA em frente ao painel de controle de banho de revestimento de Al/Zn. Para o controle de ruído foram adotadas duas técnicas: tratamento acústico nas paredes da sala e enclausuramentos sonoro das fontes.

Suas principais conclusões foram de que os programas computacionais de predição baseados na acústica geométrica, como o Raynoise, produzem informações valiosas em forma de mapas de cores, forçando o acústico a se comprometer em procurar medidas de controle de ruído com maiores detalhes. Além disso, para aumentar a confiabilidade das simulações por computador das várias opções de controle de ruído, os dados de entrada devem ser conhecidos com a maior precisão possível, e a determinação *in situ* dos níveis de potência sonora pela técnica de intensimetria e ajuste dos coeficientes de absorção baseados no tempo de reverberação experimental podem ajudar a fornecer estes dados eficientemente.

Rindel (2000) comenta que, depois de décadas de desenvolvimento, os modelos computacionais de acústica de salas amadureceram para métodos híbridos, combinando as melhores características dos modelos da fonte imagem e dos modelos de traçado de raios, levando a significativas reduções de tempos de cálculo. Para ele, atualmente os modelos computacionais de acústica de salas têm grandes vantagens em comparação com modelos em escala reduzida, se tornando ferramentas confiáveis e eficientes para consultorias acústicas, além de seus resultados de simulação poderem não só ser “vistos”, como também “ouvidos” com a nova técnica de auralização.

Neste artigo, o autor descreve o método híbrido implementado no *software* comercial Odeon, que leva em conta a reflexão difusa dos raios sonoros, além de descrever algumas ferramentas do Odeon, como a visualização dos caminhos das reflexões e respostas em malhas de microfones (*grids*). Comenta também a técnica de auralização, a qual torna possível ouvir o som de uma sala por técnicas de simulação, usando a resposta impulsiva para um modelo de sala. Conclui que a técnica computacional para simular o som em salas tem melhorado bastante nos últimos anos.

Além disso, comenta que o espalhamento do som pelas paredes parece ser muito importante em técnicas de simulações de acústica de salas, o que vem criando a necessidade de mais informações sobre as propriedades de espalhamento dos materiais e das estruturas.

Svensson (2008) comenta que a chamada técnica híbrida, utilizando o método de traçado de raios e o método da fonte imagem, foi um importante trabalho apresentado por Vorländer (1989). Zhang (2005), em sua dissertação, comenta que, devido à precisão do método da fonte imagem e à velocidade do método de traçado de raios, os algoritmos híbridos foram desenvolvidos. Trabalhos como o de Campo, Rissone e Toderi (2000), Howarth e Lam (2000), Xiangyang, Ke-na e Jincai (2002), Funkhouser *et al.* (2004), Tenenbaum e Camilo (2004) e Jeong, Ih e Rindel (2008), entre outros, comentam suas investigações com algoritmos híbridos e aplicações de coeficiente de espalhamento.

Sorainen e Kokkola (2000) estudaram a aplicação do programa Odeon no controle de ruído em uma carpintaria, com aplicação de painéis acústicos de lã mineral e painéis acústicos de lã mineral com chapa perfurada, instalados em lugares otimizados no teto e nas paredes da carpintaria, e enclausuramento de uma das suas três máquinas plainadoras encontradas na carpintaria.

O principal objetivo foi uma redução do nível de ruído com aplicações de custos razoáveis. Os níveis de potência sonora das três máquinas plainadoras foram determinados através de técnica de intensimetria de acordo com as recomendações da ISO 9614-1. A validação do modelo foi estudada através da diferença do nível de pressão sonora entre os dados medidos e calculados em 19 posições ao longo da sala antes das aplicações de medidas de controle de ruído e após a aplicação. Seus resultados foram que antes das aplicações de controle de ruído a média do nível de pressão sonora calculado pelo Odeon foi 1 dBA abaixo das médias dos níveis medidos. Isso aconteceu, segundo o autor, devido ao fato do nível de potência sonora das plainadoras variar durante o processo de plainamento das madeiras e as fontes serem modeladas como fontes pontuais onidirecionais, sendo perdidas as características de diretividade de cada fonte. Além disso, as medições foram concluídas em vários meses podendo o nível de potência sonora ser diferente antes e depois das aplicações de controle de ruído devido à afiação das lâminas e à umidade da madeira.

Após as aplicações de controle de ruído, os níveis de pressão sonora preditos ficaram acima dos níveis medidos devido às áreas dos painéis acústicos, que são

menores, quando comparadas com o total de área da planta, gerarem menor efeito no tempo de reverberação. Outra conclusão é que devido à carpintaria ser longa, baixa e labiríntica, a acústica de salas clássica não é adequada para calcular o nível de pressão sonora.

Souza (1997) estudou o comportamento acústico de uma sala retangular com móveis e duas fontes sonoras, em estudo de caso, através de três modelos, em que um se baseou na teoria de Campo Difuso, outro no Método da Fonte Imagem e outro no Método Híbrido de Raios Acústicos. Seu objetivo era estudar estes métodos para utilizá-los na solução de problemas reais existentes em escritórios, fábricas e outros ambientes tipicamente ruidosos. É enfatizada nesta pesquisa a importância da calibração experimental dos modelos criados como forma de ajuste dos dados de entrada.

Christensen e Foged (1998) apresentam uma extensão dos métodos de modelagem de acústica de salas, calculando um modelo computacional de um ambiente industrial com grandes máquinas, para avaliar a validação dos princípios de cálculo usados em grandes fontes sonoras no Odeon 3.0 *Industrial* e Odeon 3.0 *Combined*. Neste caso, é modelado um corredor de turbina de uma planta de geração de energia na Dinamarca, com duas turbinas instaladas e em operação. Este foi um bom estudo de caso escolhido devido em um projeto de controle de ruído inicial ter-se mensurado o ruído radiado pelas duas turbinas através da técnica de intensimetria acústica. Foram comparados resultados dos cálculos com fontes pontuais adicionadas nas principais partes das turbinas com as fontes planas. Os melhores resultados obtidos foram para a modelagem das turbinas (fonte sonora) como fontes planas.

Rindel e Christensen (2007), usando o modelo computacional de acústica de salas, através do programa de acústica de salas Odeon 8.3, expõem as possibilidades de controle de ruído, por meio de ferramentas deste *software* no mesmo estudo de caso de Christensen e Foged (1998). Comentam que, apesar de fontes sonoras poderem ser suficientemente modeladas com fontes pontuais, como é usual em auditórios, isto não é suficiente para grandes e complicadas fontes de ruído normalmente encontradas em ambientes industriais. Assim, cada turbina é modelada com 17 fontes planas e 2 fontes pontuais. Suas conclusões são de que as técnicas de modelagem computacional de acústica de salas foram desenvolvidas para tornar muitas ferramentas eficientes no projeto e planejamento de baixo ruído e boas condições acústicas de ambientes de trabalho, desde problemas de ruído em grandes salas industriais à inteligibilidade da fala em escritórios.

2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.3.1 Nível de Pressão Sonora (NPS)

A pressão sonora é a variação da pressão total em relação à pressão atmosférica, sendo usada em medições fundamentais da amplitude sonora devido à potência e à intensidade sonoras não serem medidas diretamente pelos instrumentos de medição (Cheremisinoff, 1996). A faixa de pressão sonora que pode ser ouvida pelo homem é muito extensa, como exemplo, se a pressão sonora for superior a 20 μPa e ocorrer entre 20 Hz e 20 kHz poderá sensibilizar o sistema auditivo humano normal médio. E se for próximo de 60 Pa pode proporcionar danos, até mesmo irreversíveis, à audição. Assim, devido a esse grande espectro de variação de pressão e ao fato do sistema auditivo não responder de forma linear ao longo das frequências audíveis, a escala conveniente para expressar a resposta subjetiva da audição humana é a logarítmica.

A escala bel (com unidade B) é uma escala logarítmica, tal como descrito acima, dada pelo logaritmo da razão entre duas quantidades, sendo uma a de referência. Para evitar uma escala muito comprimida, entretanto, um fator de 10 foi introduzido nesta escala, originando o decibel (com unidade dB), que é submúltiplo da escala bel, tal que 1 B equivale a 10 dB.

Portanto, o nível de pressão sonora, *NPS*, dado em dB, é determinado da seguinte forma:

$$NPS = 10 \log \left(\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right), \quad (2.1)$$

tal que a pressão sonora p_{rms} é o valor médio quadrático da variação de pressão acústica, p , medido em pascals, e $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$, a pressão de referência normalizada internacionalmente.

O nível de pressão sonora é a medida física preferencial para caracterizar a sensação subjetiva da intensidade dos sons. A Fig. 2.1 relaciona a intensidade subjetiva da pressão sonora, gerada por algumas fontes de ruídos, com o nível de pressão sonora.

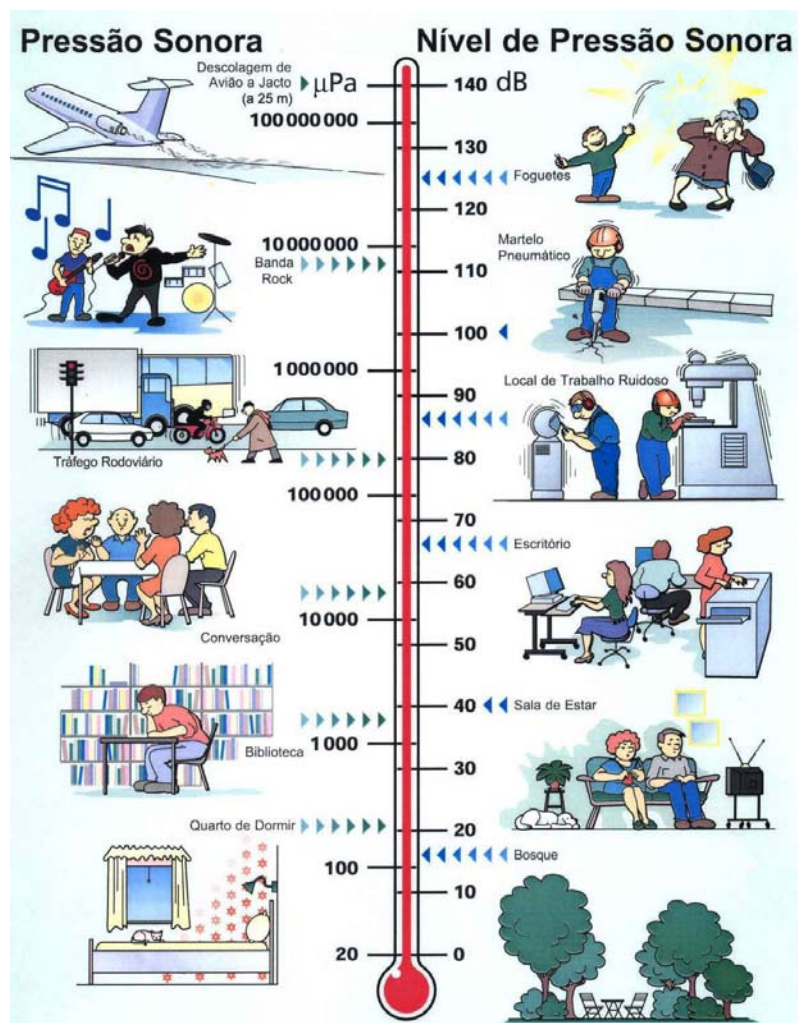


Figura 2.1 – Relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora produzido por algumas fontes de ruído.

Fonte: Brüel & Kjaer.

A medição do nível de pressão sonora em um único instante não é suficiente para a avaliação de um ambiente, sendo necessária a medição do nível de pressão sonora equivalente NPS_{eq} , que representa o nível estacionário equivalente em dB, que tem o mesmo potencial de lesão auditiva que o nível variável no intervalo de tempo considerado. O NPS_{eq} é o nível sonoro médio integrado durante uma faixa de tempo específica T e é obtido da seguinte forma:

$$NPS_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\left(\frac{NPS(t)}{10}\right)} dt \right], \quad (2.2)$$

tal que $NPS(t)$ é o nível de pressão sonora no instante t , e T representa o período de medição.

Quando o nível de pressão sonora está com ponderação A, o nível equivalente é representado por NPS_{Aeq} , sendo expresso em dBA.

Essa ponderação é um filtro de compensação que é utilizado nos sistemas de medição para modelar o comportamento do ouvido humano que não é igualmente sensível em toda a faixa de frequência audível. Além do filtro de compensação A, existem os filtros B, C e D. No entanto, somente o filtro A é utilizado em larga escala, principalmente nas normas nacionais, por fornecer melhor correlação em testes subjetivos.

2.3.2 Coeficiente de Absorção Sonora

A absorção sonora é a propriedade dos materiais de não permitir que o som seja refletido por uma superfície. O coeficiente de absorção sonora α representa o grau de absorção do som de um material qualquer e é definido como a relação entre a energia absorvida pelo material e a energia incidente sobre ele, tendo seus valores variantes com a frequência, além de relação direta com as propriedades físicas do material.

Para as modelagens computacionais, o coeficiente de absorção sonora é um dos principais dados de entrada e alguns dos *softwares* comerciais como Raynoise, Catt-Acoustic, Ramsete e Odeon fornecem listas com tais valores, normalmente em bandas de frequência de oitava, de materiais comuns e materiais comerciais que são destinados a tratamento acústico e controle de ruído.

2.3.3 Perda de Transmissão Sonora (PT) e Perda por Inserção (D)

O som, ao incidir sobre uma superfície, tem parte de sua energia sonora refletida e outra parte absorvida. A energia absorvida pode ser desmembrada em uma parcela dissipada na própria superfície e outra transmitida.

O coeficiente de transmissão sonora τ é o parâmetro que caracteriza a capacidade de uma parede transmitir som. No entanto, o parâmetro que normalmente é

utilizado para caracterizar o isolamento sonoro de uma parede é a Perda de Transmissão sonora PT .

A PT é definida como a relação logarítmica entre a energia transmitida e a incidente, e matematicamente é dada como:

$$PT = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right). \quad (2.3)$$

Altos valores de PT indicam uma baixa transmissão de energia acústica através da superfície, resultando em um alto isolamento.

A PT depende apenas das características intrínsecas dos materiais. Já a Perda por Inserção D , além de depender do material constituinte da barreira sonora, depende também de fatores como local da medição dos níveis de pressão sonora, volume do enclausuramento, orifícios existentes, absorção acústica, entre outros, se tornando um parâmetro de um dispositivo específico. Matematicamente a perda por inserção D é dada por:

$$D = NPS_1 - NPS_2, \quad (2.4)$$

tal que, NPS_1 é o nível de pressão sonora medido antes da aplicação da barreira acústica e NPS_2 é o nível de pressão sonora medido no mesmo local de medição de NPS_1 com a aplicação da barreira acústica.

2.3.4 Noções Essenciais de uma Central Hidrelétrica

Uma central hidrelétrica é um grande conjunto de máquinas, equipamentos e edificações que, funcionando em conjunto e de maneira integrada, destinam-se a garantir o funcionamento dos seus principais componentes, os grupos hidrogeradores. Para isso, basicamente são essenciais os seguintes componentes:

- Barragem;
- Conduitos de adução de água;
- Casa de máquinas; e
- Conduitos de restituição de água.

A barragem é uma estrutura transversal ao leito do rio, com o objetivo de interromper seu curso normal e permitir a formação do reservatório. Este reservatório permite a formação da energia potencial hidráulica, a captação da água em volumes adequados e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem. Como parte da estrutura da barragem, os descarregadores de vazão excedente ou vertedouros, servem como reguladores do nível do reservatório, permitindo que a água excedente seja restituída ao leito do rio. Assim, destinam-se a evitar que a barragem transborde e alagamentos indevidos das terras vizinhas aconteçam.

Os condutos de adução destinam-se a conduzir a água da barragem até as turbinas e podem apresentar-se sob a forma de canais abertos, tubulações, túneis ou galerias. A casa de máquinas é o prédio que abriga as turbinas, os geradores e o restante dos equipamentos necessários à operação da central. As turbinas têm o mesmo princípio de operação, mas não são exatamente iguais e o tipo de rotor escolhido dá origem a diversos desenhos de máquinas (Magnoli, 2005). Dos equipamentos usuais na casa de máquinas, alguns estão sempre presentes, tais como os equipamentos elétricos de controle, as válvulas de controle, seus servo-mecanismos associados e a ponte rolante, destinada ao transporte das máquinas. Após a utilização da água para geração de energia elétrica, ela é restituída ao rio ou ao reservatório de descarga, através de uma estrutura denominada conduto de restituição. Na Fig. 2.2 são apresentados, de forma sucinta, os componentes mais comuns de uma hidrelétrica.

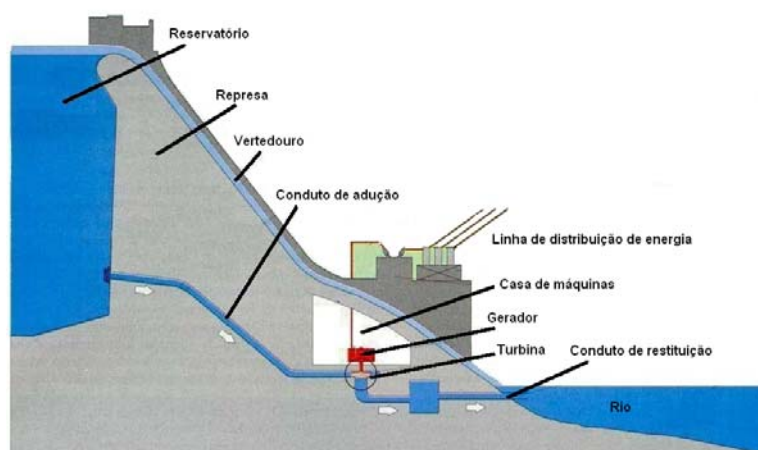


Figura 2.2 – Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica.

Na hidrelétrica, o processo de transformação da energia hidráulica em energia elétrica inicia-se com a captação da água no reservatório. Essa água represada é canalizada pelo conduto de adução até a entrada da turbina na casa de máquinas. A

pressão da coluna d'água é transformada em energia cinética pelo escoamento através do conduto. A ação do fluxo da água interagindo com as pás curvas interligadas ao eixo da turbina provoca o torque que proporciona o movimento giratório da turbina.

O gerador é também interligado ao eixo e, portanto, tem movimento giratório. Esse gerador possui um eletroímã e um conjunto de bobinas que forma a armadura; com o movimento giratório é produzido um movimento rotacional relativo entre o eletroímã e a armadura; o campo magnético do eletroímã tem uma variação senoidal de seu fluxo com o tempo na armadura e, conseqüentemente, uma corrente alternada é induzida nela, entre seus extremos.

Frisa-se que cada projeto de instalação de Central Hidrelétrica é particular, com seu local de instalação tendo suas próprias características pluviiais, fluviais e topográficas. Várias soluções podem ser encontradas para uma maior eficiência, podendo-se omitir ou criar muitos dos elementos descritos anteriormente.

Para este trabalho, o componente mais importante de uma Hidrelétrica é a casa de máquinas, por nela haver os pisos por onde o ruído intenso, proveniente principalmente do conjunto turbina-gerador e de seu sistema de refrigeração, se propaga proporcionando condições acústicas desfavoráveis.

A Fig. 2.3 exibe uma imagem com o corte transversal da casa de máquinas da usina PA IV. Nesta imagem são destacados nas cores vermelha, azul e ciano, respectivamente, os pisos do Gerador, da *Air Housing* e da Turbina da usina.

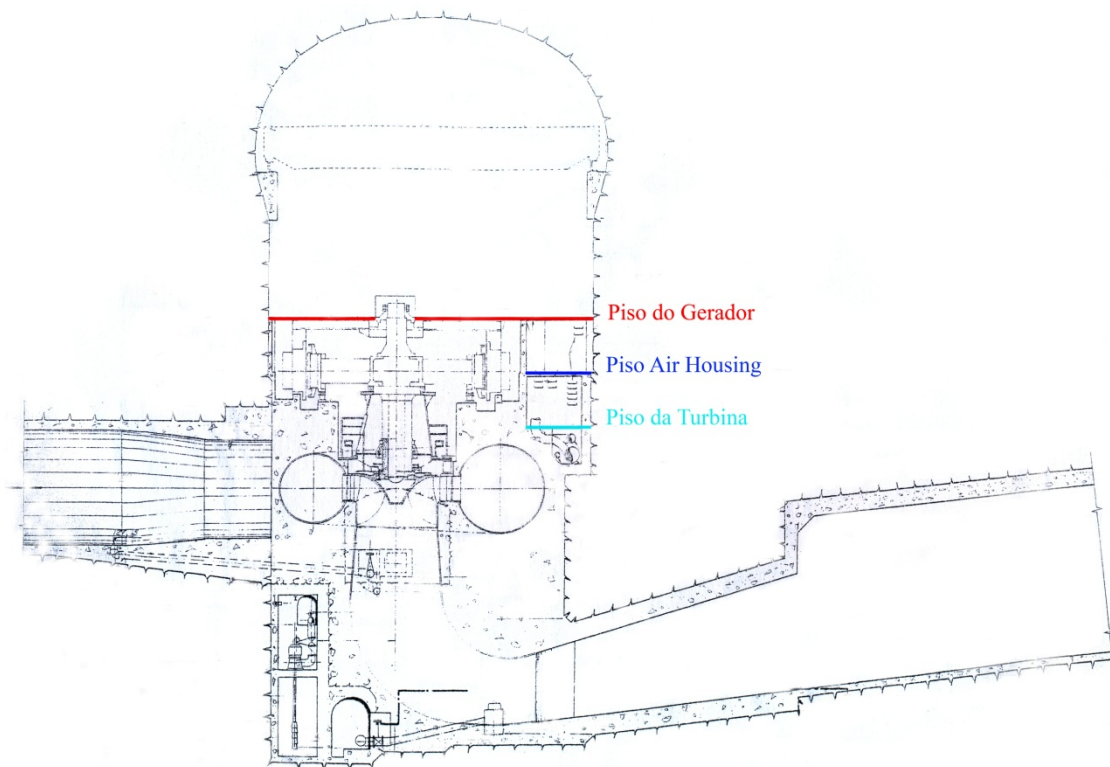


Figura 2.3 – Corte transversal da Usina de Paulo Afonso IV com destaque dos pisos do gerador, da *Air Housing* e da turbina.
Fonte: CHESF.

Para melhor entendimento e visualização de cada piso, é exibida na Fig. 2.4 a imagem interna do piso do gerador da PA IV, na Fig. 2.5 a imagem interna do piso da *Air Housing* da PA IV (sendo este o ambiente mais complexo em relação à geometria, dentre os ambientes investigados) e a Fig. 2.6 exibe a imagem interna do piso da turbina da PA IV.



Figura 2.4 – Imagem do piso do gerador da PA IV.



Figura 2.5 – Imagem do piso da *Air Housing* da PA IV.



Figura 2.6 – Imagem do piso da turbina da PA IV.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram descritos alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura, baseados nos princípios da acústica geométrica/estatística com aplicações em ambientes industriais. Tais pesquisas demonstraram a aplicabilidade de programas computacionais e comprovam a boa precisão em comparação com resultados experimentais, desde que os principais dados de entrada sejam levantados com suficiente precisão. Além disso, foi apresentada uma fundamentação teórica em acústica para melhor entendimento do presente trabalho.

No próximo capítulo é abordada a fundamentação que proporciona a determinação de potência sonora através da técnica de intensimetria.

CAPÍTULO 3 – INTENSIMETRIA SONORA

3.1 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA POR TÉCNICA DE INTENSIMETRIA SONORA

O nível de potência sonora é uma característica intrínseca da fonte, não sendo influenciado por características acústicas de ambientes abertos ou fechados (Bistafa, 2006; Brito, 2006; Gerges, 2000). A partir de seus dados é possível calcular o nível de pressão sonora em qualquer ambiente de tamanho, forma e coeficiente de absorção das superfícies, conhecidos, proporcionando melhores condições de predição e controle da propagação do ruído no ambiente sob estudo.

Para comparações entre equipamentos de diferentes fornecedores e obediência às legislações e regulamentações, o nível de potência sonora é a grandeza mais indicada. Adicionalmente, para simulações confiáveis do comportamento acústico de salas em ambiente computacional, através da acústica geométrica, o nível de potência sonora, assim como o coeficiente de absorção, deve ser conhecido com precisão suficiente (Pleek e De Geest, 1995).

O nível de potência sonora de uma fonte pode ser determinado *in situ* por medições de nível de pressão sonora (NPS) ou de nível de intensidade acústica (NI), através da técnica de intensimetria.

Os processos de obtenção do nível de potência sonora por meio de medições de NPS utilizados atualmente são dispendiosos e demorados (Brito, 2006) e, muitas vezes, exigem requisitos que não são atendidos em ambientes industriais, especialmente quanto à interferência de outras fontes de ruído além da ensaiada (Souza, 2003).

A série de normas ISO 3740 descreve vários métodos para determinar o nível de potência sonora de máquinas e equipamentos. Em particular, a norma ISO 3746 é indicada para a determinação do nível de potência sonora de fontes sonoras em campo. Basicamente, esta norma aborda o método que consiste na medição da pressão sonora em diversos pontos distribuídos em uma superfície hipotética que envolve totalmente a fonte sonora e, destes pontos, é obtido um valor médio da pressão sonora com a fonte desligada (ruído ambiente) e com somente a fonte em estudo ligada; posteriormente é calculado o nível de potência sonora com incremento de fatores de correção quanto ao ruído de fundo e à absorção sonora do ambiente.

Por outro lado, uma das principais vantagens da técnica de intensimetria é a determinação da potência sonora em campo, mesmo com interferência de outras fontes de ruído estacionário, se tornando conveniente em ambientes industriais pelo fato dos equipamentos não precisarem serem desligados ou postos fora de operação, continuando a sua produção normalmente, além do tempo e custo de medição ser menor em relação ao método de determinação do nível de potência sonora por medições de NPS.

3.1.1 Princípios de Medições de Intensidade Sonora

A teoria de medição de intensidade proposto por Olson (1932), devido à utilização das técnicas convencionais em que se baseavam os instrumentos de medição daquela época, não pôde ser implementada nos medidores de intensidade do período por haver problemas que envolviam ajustes e calibração. O advento dos analisadores de tempo real, que utilizam técnicas de filtros digitais para o processamento de sinais, foi o principal avanço para medições de intensidade acústica precisas, possibilitando na década de 1980 a oferta de medidores de intensidade comerciais. Logo depois, na década de 1990, foi lançada a primeira norma internacional para medições da intensidade sonora e os instrumentos associados.

Atualmente, os sistemas de medição de intensidade sonora produzidos comercialmente são baseados no princípio de dois microfones (Jacobsen, 2006), os quais são separados por uma distância preestabelecida e enviam os sinais obtidos para um analisador de frequência, como proposto por Olson (1932).

3.1.1.1 Intensidade Sonora

Por definição, o vetor intensidade sonora ou vetor fluxo de energia \vec{I} é uma quantidade que caracteriza o fluxo de energia acústica em uma dada posição (Gerges, 2000).

O vetor intensidade sonora é igual à média temporal do produto da pressão sonora instantânea e da correspondente velocidade de partícula instantânea (Gade, 1982), sendo somente válida se o fluxo de ar for desprezível. Tem-se então:

$$\vec{I} = \overline{p\vec{u}}, \quad (3.1)$$

tal que, p é a pressão sonora instantânea em um ponto, \vec{u} é a velocidade de partícula instantânea no mesmo ponto e a barra superior significa média temporal.

A magnitude da intensidade sonora na direção r é expressa como:

$$I_r = \overline{pu_r}, \quad (3.2)$$

onde u_r é a velocidade de partícula instantânea na direção r .

O valor instantâneo da pressão p nos sistemas de medição de intensidade sonora baseados no princípio de dois microfones é a média das pressões sonoras medidas nos dois microfones, enquanto que o gradiente de pressão ao longo da direção r é obtido através de aproximação de diferenças finitas de seu valor escalar, conforme a equação:

$$\frac{\partial p}{\partial r} \cong \frac{\Delta p}{\Delta r} \cong \frac{p_2 - p_1}{d}, \quad (3.3)$$

sendo p_1 e p_2 as pressões sonoras instantâneas medidas nos dois microfones posicionados entre si a uma distância $\Delta r = d$.

A aproximação de diferenças finitas que resultou na Eq. (3.3) só é válida quando a distância entre os microfones, d , é pequena em relação ao comprimento de onda do som gerado pela fonte em estudo.

Através da equação de *momentum* de escoamento de um fluido não viscoso, na direção r , obtém-se a velocidade de partícula do fluido, integrando o gradiente de pressão em um período de tempo T :

$$u_r = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^T \frac{\partial p}{\partial r} dt, \quad (3.4)$$

onde ρ_0 é a densidade do ar.

Aplicando a Eq. (3.3) na Eq. (3.4), tem-se a aproximação da velocidade de partícula, determinada, na prática, pelas sondas de intensimetria baseadas no princípio de dois microfones:

$$u_r \cong -\frac{1}{d\rho_0} \int_0^T (p_2 - p_1) dt. \quad (3.5)$$

Assim, como na Eq. (3.3), a pressão p pode ser determinada por aproximação, através da média aritmética entre os valores obtidos em dois pontos do espaço, tal que:

$$p \cong \frac{(p_1 + p_2)}{2}. \quad (3.6)$$

Substituindo os valores aproximados da velocidade de partícula da Eq. (3.5) e da pressão sonora da Eq. (3.6) na Eq. (3.2), é obtido o valor aproximado da intensidade sonora na direção r :

$$I_r = -\frac{1}{2d\rho_0} \overline{(p_1 + p_2) \int_0^T (p_2 - p_1) dt}. \quad (3.7)$$

A Fig. 3.1 mostra um diagrama em blocos de um analisador de sinais com filtros digitais que implementa a Eq. (3.7).

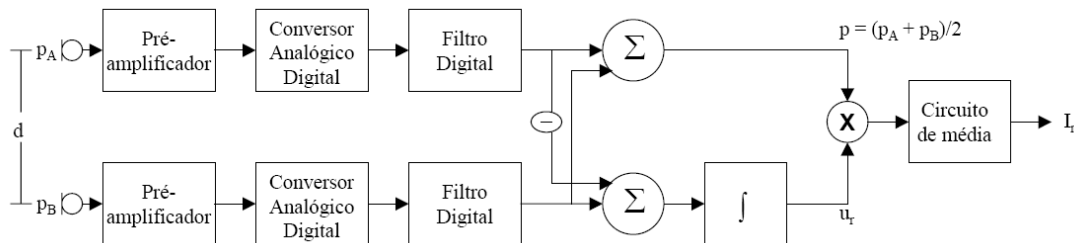


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do sistema de medições de intensidade sonora B&K 3360.
Fonte: Gade, 1982.

No domínio da frequência, com a utilização de analisadores FFT, estima-se a intensidade I na frequência angular ω , utilizando-se a parte imaginária do espectro cruzado dos sinais obtidos nos dois microfones:

$$I = -\frac{1}{\rho_0 \omega d} \text{Im} \{G_{AB}\}, \quad (3.8)$$

onde $\text{Im} \{G_{AB}\}$ é a parte imaginária do espectro cruzado.

No domínio da frequência, a obtenção de intensidade sonora em campo, chamado por Gade (1982) de método indireto (Eq. 3.8), não apresenta vantagens evidentes em relação ao uso de filtros digitais (Eq. 3.7), consumindo mais tempo para a medição e o processamento dos dados.

3.1.1.2 Potência Sonora

A determinação da potência sonora é obtida através da integração da intensidade sonora normal à superfície que envolve totalmente a fonte sonora em estudo. Assim, a potência sonora média líquida, W_s , gerada pela fonte dentro da superfície S é a integral de superfície da intensidade I_r na direção normal a essa superfície (Fahy, 1995):

$$W_s = \int_S I_r dS. \quad (3.9)$$

A Eq. (3.9) fornece a potência sonora (de todas as fontes dentro de uma superfície fechada) radiada para fora da superfície de integração, como pode ser visto na Fig. 3.2. Tal superfície é considerada como a superfície de medição.

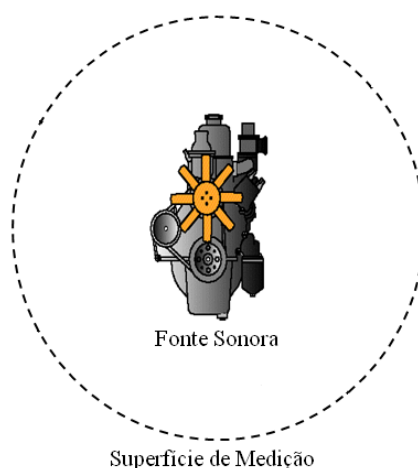


Figura 3.2 – Superfície de medição para determinação da potência sonora de uma fonte.

É fisicamente impossível implementar a Eq. (3.9) na prática e, por isso, utiliza-se o valor médio da área de medição que é baseada em dados discretos e contínuos que produzem variáveis estatísticas como médias, variâncias e desvios padrões (Fahy,

1995). Daí resulta o fato das seguintes técnicas serem correntemente utilizadas para a amostragem da intensidade sonora: o método dos pontos discretos, ISO 9614-1 (1993), o método por varredura, ISO 9614-2 (1995), e o método de precisão por varredura, ISO 9614-3 (2002).

3.1.1.3 Medições em Pontos Discretos

O procedimento de medições em pontos discretos é o mais antigo utilizado para realizar a amostragem do campo de intensidade acústica (Souza, 1997). Nele, a sonda de intensimetria é posicionada nos pontos centrais de áreas predeterminadas para aquisição da intensidade sonora, como pode ser visto na Fig. 3.3.

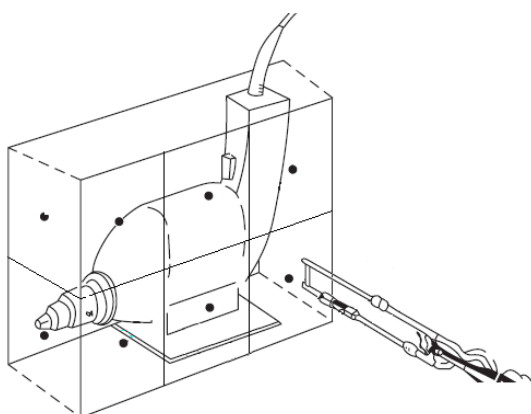


Figura 3.3 – Medição de intensidade sonora por pontos discretos.
Fonte: Crocker e Arenas, 2003.

A norma ISO 9614-1 descreve os procedimentos de medições em pontos discretos, apresentando os critérios para que os resultados possam ser considerados com incerteza de grau 1 (precisão), grau 2 (engenharia) ou grau 3 (avaliação).

Neste caso, como a potência sonora de uma superfície é determinada através de medições discretas, a Eq. (3.9) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_i = I_{ni}S_i, \quad (3.10)$$

onde P_i é a potência acústica parcial para o ponto i , I_{ni} é o módulo da componente normal da intensidade sonora na posição i sobre a superfície de medição e S_i é a área do segmento i .

O nível de potência sonora, L_W ou NWS, em cada banda de oitava é dado por:

$$L_W = 10 \log \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_0}, \quad (3.11)$$

onde P_0 é a potência sonora de referência ($P_0 = 10^{-12}W$) e N é o número total de posições e segmentos de medidas.

3.1.1.4 Medições por Varredura

No método da varredura, a sonda de medição é movimentada por um caminho predeterminado pela superfície de medição, sendo implementada uma média temporal e espacial. Devem ser realizadas duas varreduras ortogonais em cada superfície, com velocidade variando entre 0,1 e 0,5 m/s, no tempo mínimo de 20 s.

As normas ISO 9614-2 e ISO 9614-3 apresentam metodologias para a determinação da potência sonora por meio de medições de intensidade sonora por varredura. A norma ISO 9614-2 apresenta os critérios para medições com incerteza de grau de engenharia e de avaliação, enquanto que a norma ISO 9614-3 apresenta os critérios para resultados com incerteza de grau de precisão. A Fig. 3.4 mostra uma medição de intensidade sonora por varredura.

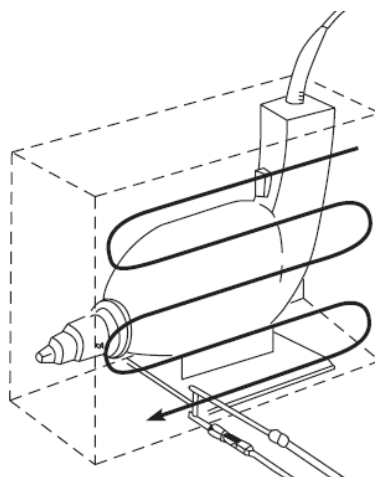


Figura 3.4 – Medição de intensidade sonora em um caminho de varredura.
Fonte: Crocker e Arenas, 2003.

A Eq. (3.10) também é aplicada em medições por varredura, no entanto, a média não é somente dos pontos de medição e sim temporal, de modo que:

$$P_i = \langle I_{ni} \rangle S_i, \quad (3.12)$$

onde $\langle I_{ni} \rangle$ é a média temporal e espacial dos dois caminhos de medição da intensidade sonora normal, medida no elemento i da superfície de medição, dada como: $\langle I_{ni} \rangle = [\langle I_{ni}(1) \rangle + \langle I_{ni}(2) \rangle]/2$, tal que $\langle I_{ni}(1) \rangle$ é a média temporal e espacial da intensidade sonora normal do primeiro caminho de medição e $\langle I_{ni}(2) \rangle$ é a média temporal e espacial da intensidade sonora normal do segundo caminho de medição.

O nível de potência sonora, L_W ou NWS, em cada banda de oitava é dado por:

$$L_W = 10 \log \left| \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_0} \right| \text{ dB}, \quad (3.13)$$

onde N é o número total de elementos de medição.

3.1.1.5 Erros de Medição

Crocker e Arenas (2003) comentam que existem muitas fontes de erros na medição da intensidade sonora e uma parte considerável da literatura associada ao tema tem se preocupado com a identificação destes erros. Algumas destas fontes de erros são fundamentais e outras estão associadas com várias deficiências técnicas (Jacobsen, 2006).

Como pode ser notado das equações apresentadas nas seções anteriores, a intensidade sonora não é diretamente medida, mas sim estimada a partir de medições de pressão sonora, causando um erro fundamental. Por outro lado, o erro causado pelas deficiências técnicas pode ocorrer por imperfeições dos microfones da sonda, na função de conversão dos sinais coletados, erros de calibração, variação da sensibilidade dos transdutores na calibração devido às condições ambientes, ruídos produzidos por interferências não acústicas e erros associados pela integração média no tempo.

Jacobsen (1997) comenta que os erros de medições de potência sonora pela técnica de intensimetria podem ser divididos em dois tipos: erros sistemáticos e erros aleatórios. Erros sistemáticos estão associados com as aproximações feitas nas relações assumidas entre as grandezas medidas e a intensidade e são ocasionados diretamente pela metodologia. Já os erros aleatórios estão associados aos equipamentos utilizados para implementar o método (Brito, 2006). Segundo Fahy (1997), o erro total na técnica de intensimetria é a soma dos erros sistemáticos e aleatórios, e Hübner (1987) considera que ambos devam ser levados em conta na análise de erros, ao se determinar a potência sonora pela técnica da intensimetria.

A seguir, serão discutidos alguns dos principais erros de medição de potência sonora pela técnica de intensimetria.

3.1.1.5.1 Erro por Aproximação de Diferenças Finitas

O uso da técnica de dois microfones impõe limitações na faixa de frequência útil dos sistemas de medição, ao considerar que o gradiente de pressão sonora é aproximado por diferença finita da pressão em dois pontos discretos, como na Eq. (3.3). Esta é uma limitação fundamental da técnica e impõe um limite de frequência superior, que é inversamente proporcional à distância entre os microfones.

Os dois microfones aproximam o gradiente da curva (de pressão) para uma linha reta entre os dois pontos. Se a pressão sonora mudar rapidamente com a distância, a estimativa será imprecisa. Isto acontece quando o comprimento de onda medido torna-se menor que a distância Δr entre os dois microfones, tal como ilustrado na Fig. 3.5.

Para precisões dentro de 1 dB o comprimento de onda medido deve ser maior que seis vezes a distância do espaçador de microfones (Bruel & Kjaer, 1997). Assim, considerando os espaçadores fornecidos com uma sonda de intensimetria, as medições ficam limitadas até as seguintes frequências:

- 50 mm – até 1,25 kHz;
- 12 mm – até 5 kHz;
- 6 mm – até 10 kHz.

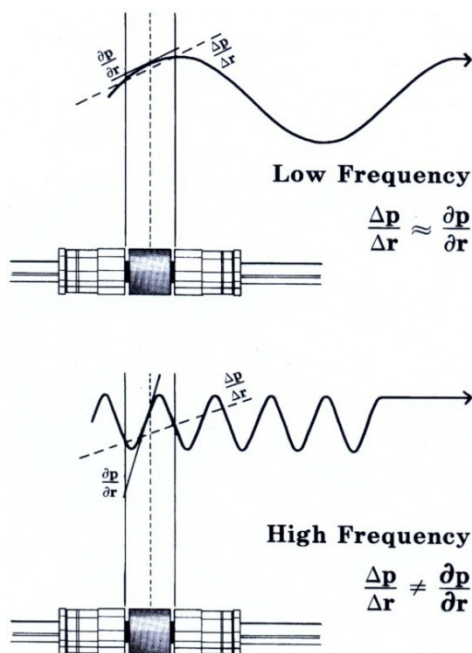


Figura 3.5 – Aproximação do gradiente de pressão sem precisão em altas frequências.
Fonte: Bruel & Kjaer, 1997.

3.1.1.5.2 Erro de Desencontro de Fase

Jacobsen (2006) comenta que o desencontro de fase entre os dois canais de medição são as mais sérias fontes de erro em medições de intensidade sonora, mesmo com os melhores equipamentos disponíveis atualmente.

Crocker e Arenas (2003) chamam de desencontro de fase o tempo de atraso entre os dois canais de todos os sistemas de análise que introduz uma pequena mudança de fase, e dizem que para uma boa combinação de sonda e analisador o máximo erro pode ser de $\pm 0,3^\circ$. Além disso, comentam que o desencontro de fase é um erro sistemático.

Segundo Fahy (1995), o efeito da resposta do desencontro de fase sobre a precisão de qualquer medição depende das magnitudes relativas do desencontro de fase do sistema de medição e da exata diferença da pressão sonora nos pontos de sensibilidade dos transdutores. Esta última depende da natureza do campo sonoro, do local e da orientação da sonda no campo.

A diferença entre o nível de pressão sonora e o nível de intensidade sonora da componente acústica é conhecida como Índice de Pressão-Intensidade, denominada δ_{PI} , que serve para quantificar o desencontro de fase do sistema:

$$\delta_{PI} = (NPS - L_I), \quad (3.14)$$

onde NPS é o nível de pressão sonora e L_I é o nível de intensidade sonora.

O índice de Pressão-Intensidade Residual, δ_{PI0} , é uma medida do desencontro de fase do sistema, também determinado como a diferença entre o nível de pressão sonora e de intensidade, porém, em um campo sonoro especialmente controlado, com pressão uniforme, onde a intensidade deveria ser, idealmente, nula.

O valor de $\delta_{PI0} - \delta_{PI}$ é denominado de Índice de Erro de Fase, L_ϕ , onde o erro aumenta quando o índice diminui.

Nos canais do microfone, além do desencontro de fase pode ocorrer também o desencontro de sensibilidade entre os microfones. Em associação, estes provocam um erro resultante que depende das características do campo sonoro sob investigação (Fahy, 1995). O erro normalizado devido ao desencontro de fase, $e_\phi(I)$, é dado por:

$$e_\phi(I) = \left(\left| 10^{\left(\frac{L_\phi}{10}\right)} \pm 1 \right| \right)^{-1}. \quad (3.15)$$

Denomina-se Capacidade Dinâmica, L_D , a diferença entre L_ϕ da instrumentação e o $L_{\phi \min}$ aceitável para o caso estudado. A L_D pode ser determinada por:

$$L_D = \delta_{PI0} - K, \quad (3.16)$$

onde as incertezas do erro aleatório ligado ao processo de medição são limitadas pela seleção do Fator de Erro de Fase, K , de acordo com a precisão desejada. A norma ISO 9614-1 (1993) especifica o valor de K de acordo com várias classes de precisão: classe 1 (precisão) e classe 2 (engenharia) com $K = 10 \text{ dB}$, e classe 3 (controle) com $K = 7 \text{ dB}$. Para a norma ISO 9614-2 (1995), $K = 10 \text{ dB}$ para a classe 2 e 7 dB para classe 3. A ISO 9614-3 (2002) permite apenas $K = 10 \text{ dB}$ para classe 1.

Para verificar a capacidade da instrumentação devido ao erro de desencontro de fase, toda a série ISO 9614 estabelece como critério a seguinte condição:

$$L_D \geq \delta_{PI} \quad (3.17)$$

Fahy (1995) afirma que uma diferença mínima de 7 dB garante um erro devido à diferença de fase de ± 1 dB e uma diferença mínima de 10 dB garante um erro de $\pm 0,5$ dB.

3.1.1.5.3 Erro devido à absorção sonora da fonte

Na intensimetria, toda a energia sonora gerada fora do volume de medição, que envolve a fonte em análise, é captada pela sonda com sinal negativo quando entra no volume de medição, e com sinal positivo quando sai do volume de medição, tendo uma resultante de energia sonora igual a zero. Por isso, a técnica da intensimetria pode ser utilizada, mesmo quando na presença de outras fontes sonoras. Mas se a fonte em análise possuir capacidade de absorção sonora significativa, pode acontecer de entrar mais energia do que sair do volume de medição. Desta forma, a potência sonora será subestimada.

A norma ISO 9614-2 determina o $F_{+/-}$ como índice de campo para a verificação do efeito da variação do fluxo de vetores de intensidade sonora na presença de ruído de fundo. Este índice pode ser obtido através de:

$$F_{+/-} = 10 \log \left[\frac{\sum |P_i|}{\sum P_i} \right], \quad (3.18)$$

onde P_i é a potência acústica parcial para o ponto i e $|P_i|$ é o módulo de P_i .

O limite máximo para este índice é de 3 dB. Na norma ISO 9614-1 (1993), o índice $F_{+/-}$ equivale a: $(F_2 - F_3)$, onde F_2 é índice de Pressão-Intensidade e F_3 é indicador de potência parcial negativa.

3.1.1.5.4 Erro devido ao fluxo de ar

A rigor, a técnica de dois microfones é inválida na presença de fluxo de ar, mesmo que pequeno, devido ser baseada na equação de *momentum* do fluido com fluxo zero (Fahy, 1995). Em casos práticos, sempre haverá instabilidade no fluido, desde turbulências externas até as causadas pela movimentação da sonda (Brito, 2006). A

norma ISO 9614–1 (1993) estabelece o limite máximo de velocidade do fluxo de ar em 2 m/s, a ISO 9614–2 (1995) em 4 m/s e a ISO 9614–3 (2002) em 1 m/s.

O protetor de vento apresenta uma resistência ao fluxo acústico, que é causado pela variação da pressão sonora, e ao fluxo de intensidade, que é causado pela movimentação do ar, alterando seu valor real. No entanto, na prática esse erro só é significativo em baixas frequências. Apesar disso, a série de normas ISO 9614 recomendam sempre o uso de protetores de vento que atendam aos requisitos da IEC 61043 (1993).

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo apresentou uma poderosa técnica de determinação de potência sonora *in situ*, a qual se chama técnica de intensimetria sonora, que, apesar de ter uma tecnologia de custo elevado, possibilita a obtenção de resultados com maior praticidade e precisão em relação à técnica de determinação de potência sonora por medições de NPS. No entanto, é necessário ter conhecimento de suas fontes de erros, a fim de minimizá-los.

O capítulo seguinte apresenta os resultados experimentais deste trabalho, utilizados na validação dos modelos desenvolvidos e como dados de entrada destes.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

A principal importância das medições de nível de pressão sonora é o levantamento dos níveis de ruído nos ambientes de geração de energia elétrica, foco de estudo deste trabalho. Além disso, essas informações são essenciais para definições das fontes de ruído e validação dos modelos numéricos.

Portanto, dentro do escopo do projeto de pesquisa como um todo, medições de nível de pressão sonora foram realizadas nos seguintes ambientes:

- Usina PA I:
 - Piso do Gerador; e
 - Piso da Turbina.
- Usina PA II:
 - Piso do Gerador; e
 - Piso da Turbina.
- Usina PA III:
 - Piso do Gerador; e
 - Piso da Turbina.
- Usina PA IV:
 - Piso do Gerador;
 - Piso da *Air Housing*; e
 - Piso da Turbina.

Todas as medições seguiram as recomendações da NBR 10151 e foram utilizados os equipamentos exibidos na Tab. 4.1:

Tabela 4.1 – Equipamentos de medição de Nível de Pressão Sonora.

<p>Analizador de sinais de quatro canais Brüel & Kjaer, tipo 3560C – <i>Pulse</i>.</p> 
<p>Microfone de campo difuso, Brüel & Kjaer, tipo 4942.</p> 
<p>Calibrador para microfone, Brüel & Kjaer, tipo 4231.</p> 
<p><i>Laptop</i> Toshiba, tipo P25 – <i>Satellite</i> com <i>software Labshop-view</i> para controle do <i>Pulse</i> e manipulação dos resultados.</p> 

O analisador de sinais Tipo 3560C (*Pulse*) é um sistema de aquisição de dados portátil com um módulo de controle que opera as comunicações com o computador, e um módulo de entrada e saída de dados que controla as entradas das medições e fornece o sinal digitalizado para o módulo de controle.

O *Pulse*, através do seu módulo de controle, opera as comunicações com o computador através de uma conexão de cabo de rede; no computador (*Laptop*) é instalado o *software Labshop-view* que, além de controlar o *Pulse*, proporciona ao usuário várias ferramentas para configurações dos parâmetros para medições acústicas ou de vibração, visualização e manipulação dos dados adquiridos. No *Pulse*, também é conectado o microfone que, neste caso, é de campo difuso devido ao fato dos ambientes onde foram realizadas as medições serem fechados e constituídos por superfícies com baixos coeficientes de absorção sonora, além de neles estarem instalados muitos equipamentos. O microfone de campo difuso também é conhecido como microfone de incidência aleatória, por ser designado a apresentar uma resposta plana em frequência

aos sinais captados de todas as direções. Este microfone foi acoplado a um tripé na altura constante de 1,5 m. O arranjo esquemático pode ser visualizado na Fig. 4.1.

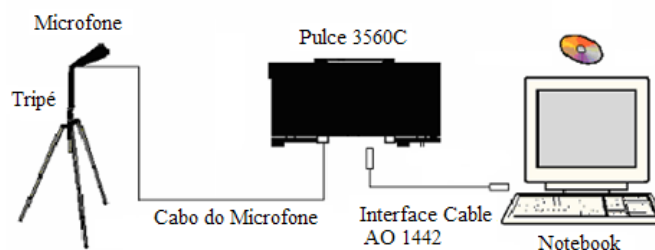


Figura 4.1 – Arranjo esquemático dos equipamentos de medição de Nível de Pressão Sonora.

O que deu agilidade às medições, além do tempo de cada medição de apenas 10 s, pelo fato do ruído ser de caráter estacionário, foi o fato do cabo que interliga o microfone ao *Pulse* ter aproximadamente 80 m de comprimento. Isso facilitou o processo de medições, possibilitando a locomoção do microfone ao longo de uma maior área de medições permanecendo o *Pulse* e o *Laptop* em um local fixo, diminuindo o tempo de locomoção do conjunto de equipamentos de medição.

Seguindo todas as recomendações da norma indicada acima, todo o sistema foi verificado e, eventualmente, ajustado através do calibrador de microfone com um sinal de 114 dB na frequência de 1 kHz, imediatamente antes e após cada conjunto de medições nos ambiente investigados.

Os dados de NPS obtidos nestas medições foram utilizados para confecção dos mapas acústicos para levantamento topográfico detalhado do ruído de cada ambiente, permitindo a análise para definição das principais fontes sonoras de cada ambiente.

4.1.1 Mapas Acústicos

Os mapas acústicos são construídos através de uma rotina que implementa interpolações triangulares, baseadas em interpolações lineares (Matlab, 2007), encontrada na *toolbox* da ferramenta computacional Matlab. Esta rotina tem como entrada os valores de NPS de cada ponto de medição e suas coordenadas em relação a uma origem fixa. Posteriormente, define-se uma malha de pontos retangular, com distribuição uniforme, que tem como limite as coordenadas dos pontos de medição. Os valores são interpolados ao longo da malha, a partir dos resultados de NPS para cada

ponto de medição. O inconveniente desta metodologia é não permitir no mapa descontinuidades como paredes, colunas, equipamentos, e outros objetos e características do ambiente sob análise.

Nas figuras das usinas de Paulo Afonso, exibidas abaixo, primeiramente é exposto um croqui dos ambientes em investigação, destacando as localizações aproximadas dos pontos de medição e as posições relativas dos principais elementos de interesse, tais como máquinas e processos ruidosos. Posteriormente, é sobreposto o mapa acústico em dBA. O Apêndice A exhibe as rotinas para os mapas acusticos da PA IV.

4.1.1.1 Mapas Acústicos da Usina PA I

No momento das medições de NPS da usina PA I suas três turbinas estavam em operação o que pode ser evidenciado na Fig. 4.5 a qual se refere ao mapa acústico do Piso da Turbina e mostra uma variação de NPS de 85,5 a 100 dBA. A Figura 4.3 mostra o mapa acústico do Piso do Gerador, com uma variação de NPS de 81,4 a 85,9 dBA. A Fig. 4.2 mostra alguns detalhes das turbinas e os pontos de medição no Piso do Gerador e a Fig. 4.4 mostra os detalhes das salas das turbinas e os pontos de medições do Piso da Turbina. Nota-se que os níveis encontrados no Piso da Turbina nas proximidades das unidades geradoras 01G1 e 01G2 foram bastante similares, enquanto níveis um pouco mais elevados foram encontrados próximos à 01G3. Diferentemente, no Piso do Gerador níveis mais intensos foram concentrados na 01G1 e de forma menos pronunciada na 01G3.

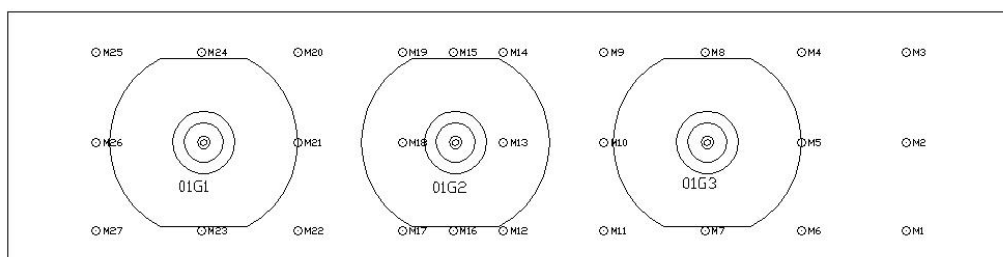


Figura 4.2 – Piso do Gerador da PA I: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA I: Piso do Gerador (Mínimo: 81.4; Máximo: 85.9)

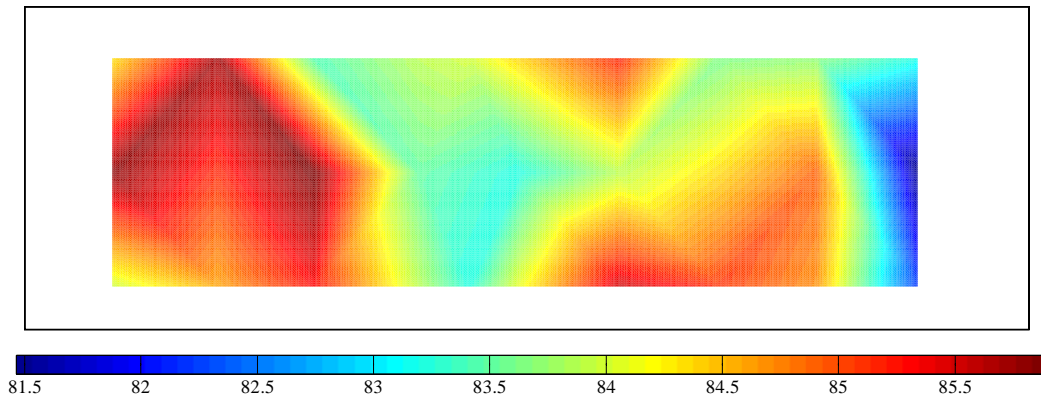


Figura 4.3 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA I.

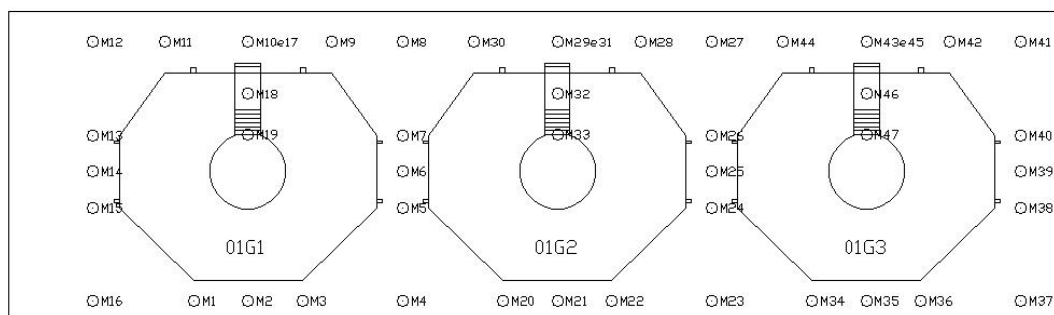


Figura 4.4 – Piso da Turbina PA I: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA I: Piso da Turbina (Mínimo: 85.5; Máximo: 100)

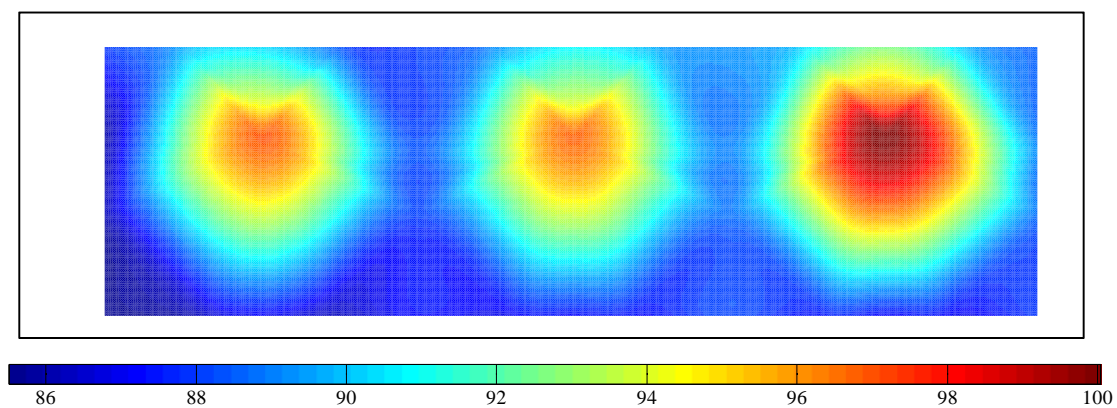


Figura 4.5 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA I.

4.1.1.2 Mapas Acústicos da Usina PA II

Na usina PA II, no momento das medições, as unidades geradoras 02G1 e 02G2 estavam fora de operação, o que pode ser notado nas Figuras 4.7 e 4.9, onde o NPS

próximo a estas máquinas permanece com valores bem abaixo dos máximos valores encontrados.

Na Fig. 4.6 é exibida a posição das unidades geradoras e os pontos de medição no Piso do Gerador, e a Fig. 4.7 exibe o correspondente mapa acústico com uma variação de NPS de 82,5 a 86,8 dBA. A Fig. 4.8 mostra os detalhes das salas das turbinas e os pontos de medição do Piso da Turbina onde ocorreu uma variação de NPS de 78 a 95,2 dBA como pode ser visto na Fig. 4.9, na qual observa-se que na região próxima à 02G6 se concentram os máximos níveis de pressão sonora. Isso se explica pelo fato de, no momento das medições, a porta de acesso ao Poço da Turbina da unidade 02G6 estar aberta, elevando os níveis de pressão sonora desta região.

No Piso do Gerador (ver Fig. 4.7), como acontece no Piso da Turbina (ver Fig. 4.9), é notável o decaimento de NPS ao longo de todo o ambiente, mas destaca-se também a influência do campo reverberante deste ambiente no NPS mínimo de 82,5 dBA, não muito distante do máximo NPS observado: 86,8 dBA, enquanto que no Piso da Turbina, onde o máximo NPS foi 95,2 dBA, o mínimo foi de 78 dBA, indicando um ambiente menos reverberante, comparativamente.

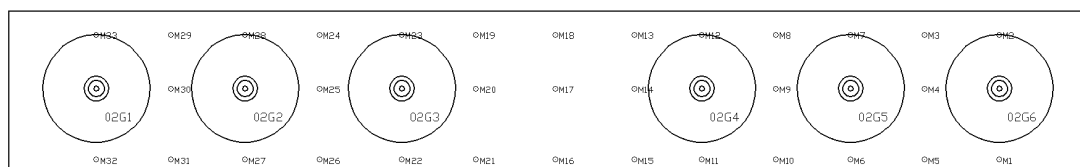


Figura 4.6 – Piso do Gerador da PA II: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA II: Piso do Gerador (Mínimo: 82.5; Máximo: 86.8)

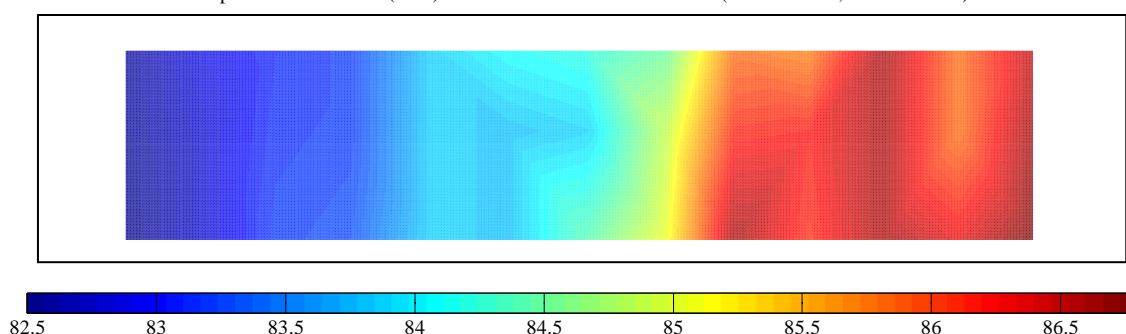


Figura 4.7 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA II.

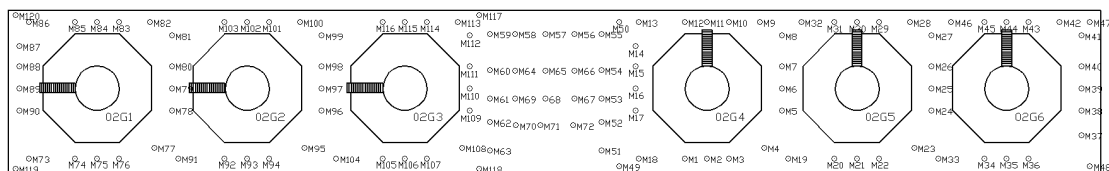


Figura 4.8 – Piso da Turbina PA II: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA II: Piso da Turbina (Mínimo: 78; Máximo: 95.2)

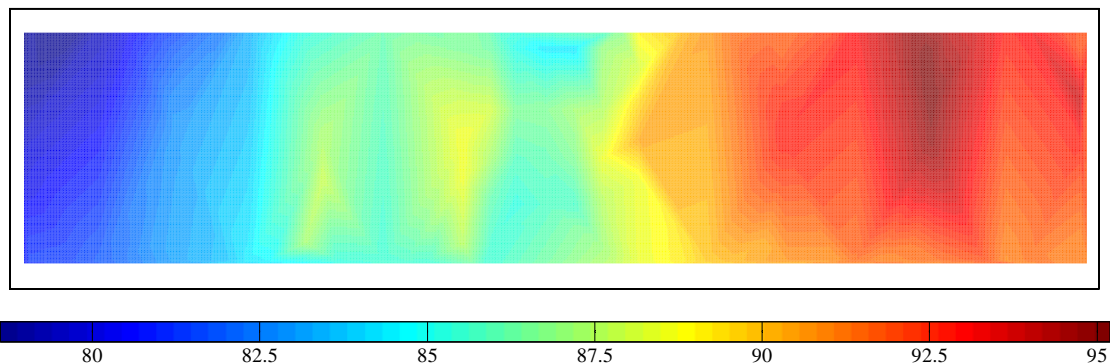


Figura 4.9 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA II.

4.1.1.3 Mapas Acústicos da Usina de Paulo Afonso III

No momento das medições na Usina PA III apenas as unidades centrais, no caso 03G2 e 03G3 (ver Fig. 4.10), estavam em operação como pode ser constatado nas Fig. 4.11 e 4.13, onde os níveis sonoros são bem maiores na região central dos ambientes.

Para o Piso do Gerador, o valor observado nas proximidades das máquinas em operação foi de até 87,4 dBA e níveis mínimos de até 82,7 dBA, em pontos distantes das máquinas em operações, como pode ser visto na Fig. 4.11.

Para o caso do piso da Turbina (ver Fig. 4.13), o valor observado nas proximidades das máquinas em operação foi de até 102 dBA, enquanto que níveis tão pequenos quanto 77,2 dBA foram observados em posições distantes das máquinas em funcionamentos.

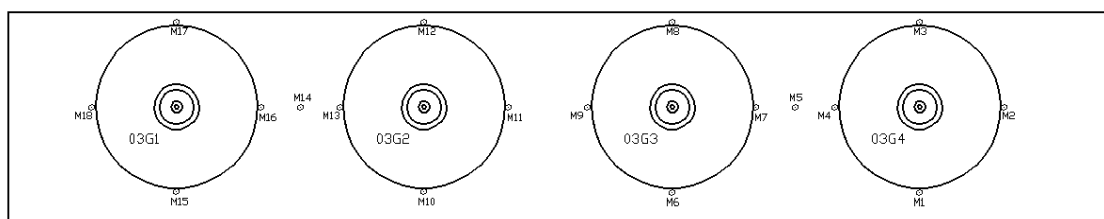


Figura 4.10 – Piso do Gerador da PA III: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA III: Piso do Gerador (Mínimo: 82.7; Máximo: 87.4)

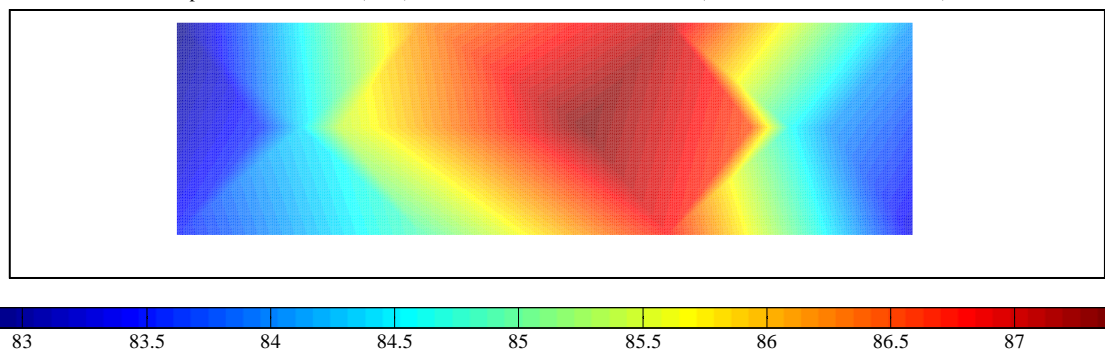


Figura 4.11 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA III.

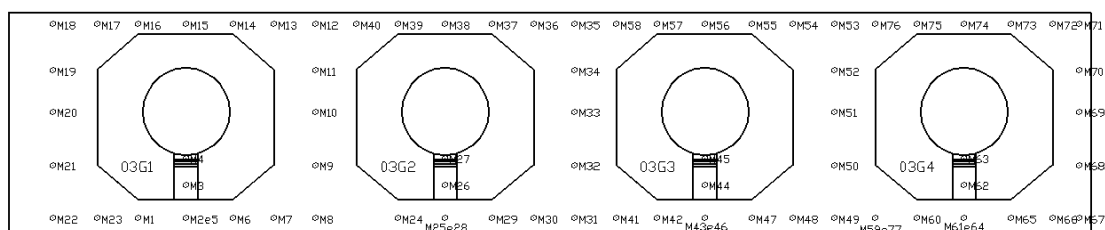


Figura 4.12 – Piso da Turbina PA III: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA III: Piso da Turbina (Mínimo: 77.2; Máximo: 102)

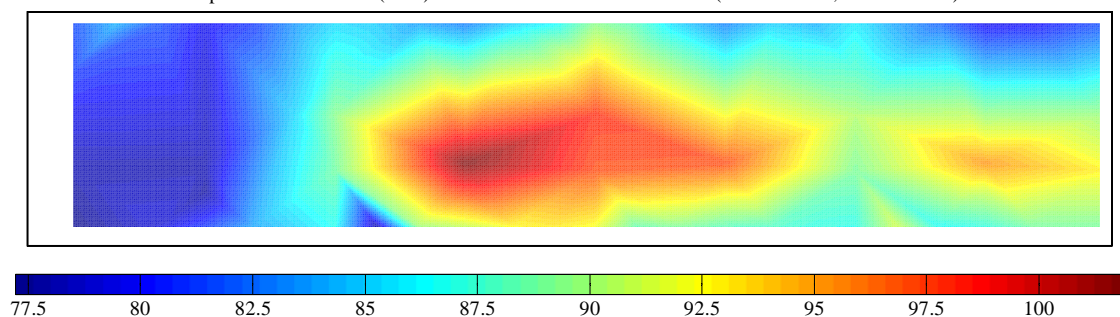


Figura 4.13 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA III.

4.1.1.4 Mapas Acústicos da Usina de Paulo Afonso IV

Similar ao caso da Usina PA I, a PA IV, no momento das medições, estava com todas as unidades geradoras em operação, o que é evidenciado na Fig. 4.19.

O Piso do Gerador é mostrado na Fig. 4.14, onde se destacam as unidades geradoras e as posições dos microfones, e na Fig. 4.15, onde é exibido o mapa acústico de uma parte deste piso. Este mapa mostra uma variação de NPS de 87 a 89,1 dBA, a qual é uma variação muito pequena e que se deve também à forte característica de campo reverberante do ambiente, a maior constatada dentre todos aqueles investigados nas Usinas do Complexo de Paulo Afonso. Como essa variação é pequena e foi

verificada também próxima às unidades 04G3 e 04G6 em algumas medições de NPS, optou-se pela realização de medições apenas nos pontos exibidos na Fig. 4.14.

Devido às grandes dimensões desta usina, comparando-se com as anteriormente descritas, foram necessários aproximadamente 185 pontos de medições para o Piso da *Air Housing* (ver Fig. 4.16) e 159 pontos de medições para o Piso da Turbina (ver Fig.4.18).

No mapa acústico do Piso da *Air Housing*, exibido na Fig. 4.17, observa-se que o NPS apresentou uma variação de 85,8 a 93,6 dBA, e as regiões de maior ruído foram próximas às portas das *Air Housing* e, principalmente, próximo aos dutos de refrigeração das *Air Housing* (ver Fig. 4.20).

O mapa acústico do Piso da Turbina é exibido na Fig. 4.19 e nele é evidente que o maior nível de pressão sonora se encontra nas regiões próximas às saídas do poço das turbinas, com níveis de 83,9 a 99,6 dBA.

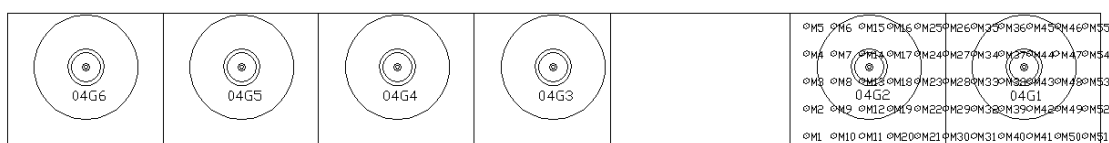


Figura 4.14 – Piso do Gerador da PA IV: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA IV: Piso do Gerador (Mínimo: 87; Máximo: 89.1)

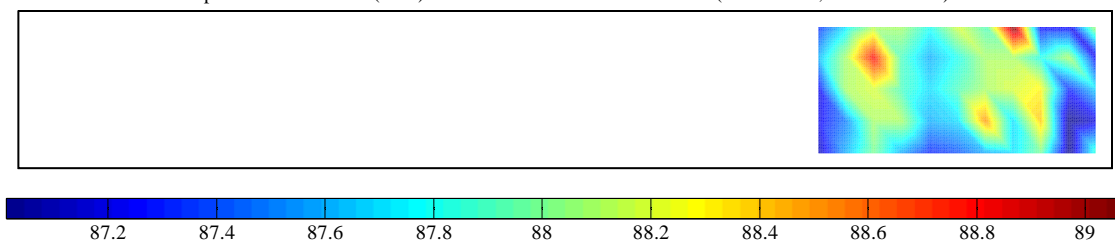


Figura 4.15 – Mapa acústico do Piso do Gerador da PA IV.

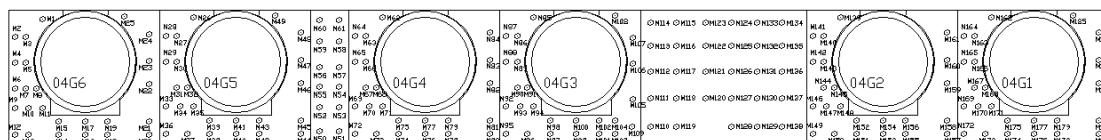


Figura 4.16 – Piso da *Air Housing* da PA IV: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS(dBA) Global da PA IV: Piso da Air Housing (Mínimo: 85.8; Máximo: 93.6)

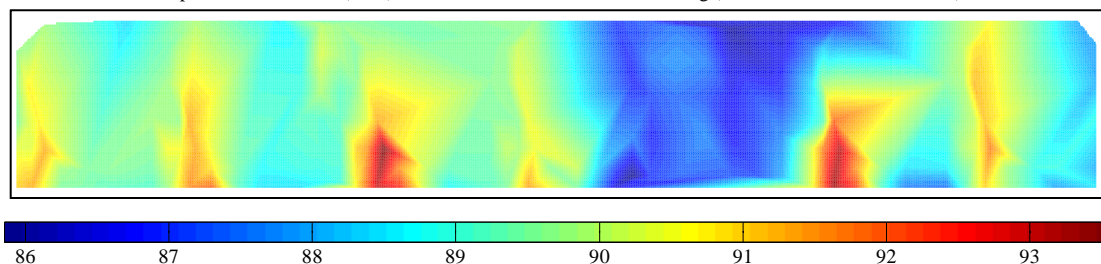


Figura 4.17 – Mapa acústico do Piso da *Air Housing* da PA IV.



Figura 4.18 – Piso da Turbina PA IV: croqui com pontos de medição.

Mapa Acústico de NPS(dB(A)) Global da PA IV: Piso da Turbina (Mínimo: 83.9; Máximo: 99.6)

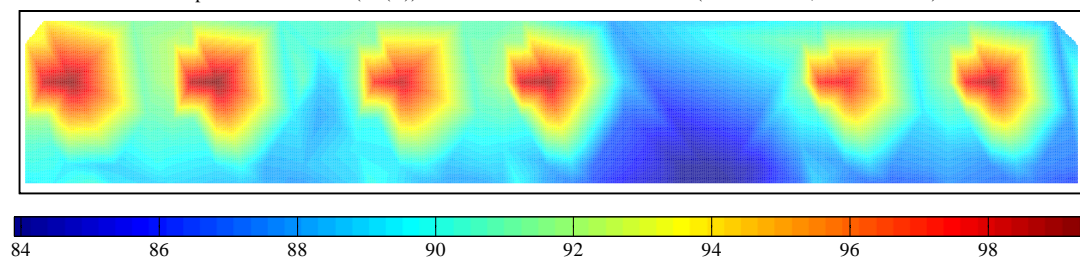


Figura 4.19 – Mapa acústico do Piso da Turbina da PA IV.



Figura 4.20 – Dutos de refrigeração da *Air Housing* da 04G6.

4.2 DEFINIÇÃO DOS AMBIENTES PILOTOS

O objetivo inicial do projeto de P&D, do qual este trabalho é fruto, era testar possíveis soluções acústicas para os problemas de ruído observados nos principais ambientes das usinas investigadas da Regional de Paulo Afonso em um único Ambiente Piloto, o qual seria estudado em detalhes, possibilitando chegar-se a conclusões de

caráter geral que seriam estudadas, verificando a viabilidade de serem expandidas aos outros ambientes.

Este Ambiente Piloto seria definido tomando-se por base a exposição de um maior número de grupos homogêneos de risco a níveis de ruídos mais intensos. No entanto, com base em visitas às usinas do complexo de Paulo Afonso e em documentações fornecidas pela equipe de Segurança e Saúde Ocupacional da Regional de Paulo Afonso, foi observado que existem grupos homogêneos de risco com número maior de funcionários expostos a níveis moderados de ruídos, enquanto outros grupos com menor número de funcionários encontram-se expostos a um nível mais elevado de ruído. Além disso, observou-se uma característica de permanente mobilidade dos funcionários entre os diferentes ambientes das usinas. Diante desta dificuldade, optou-se por trabalhar com vários ambientes pilotos, possibilitando a investigação de ambientes com características bastante distintas, como é o caso do piso do gerador e do piso da turbina das hidrelétricas, além de atender a um número bem maior de funcionários sob risco.



Assim, para o presente trabalho foram adotados os ambientes da usina PA IV (a qual é a usina de maior porte dentre as investigadas, com maior potencial de produção de resultados de caráter geral) como ambientes pilotos, os quais são:

- **Piso do Gerador;**
- **Piso da *Air Housing*;** e
- **Piso da Turbina.**

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA

As medições de potência sonora das principais fontes sonoras dos ambientes pilotos, definidas com base em análises dos mapas acústicos, foram realizadas através da técnica de intensimetria e seguiram as recomendações da norma ISO 9614-1 (1993) e ISO 9614-2 (1996). Os equipamentos utilizados nestas medições estão exibidos na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 – Equipamentos de medição de nível de potência sonora das principais fontes de ruído dos ambientes pilotos.

<p>Analizador de sinais de quatro canais Brüel & Kjaer, tipo 3560C – <i>Pulse</i>.</p> 
<p>Medidor de nível de pressão sonora Brüel & Kjaer, tipo 2238 – <i>Mediator</i>.</p> 
<p>Sonda de Intensidade Sonora Brüel & Kjaer, tipo 3595.</p> 
<p>Calibrador da Sonda de Intensidade Sonora Brüel & Kjaer, tipo 4297.</p> 

As principais fontes de cada ambiente da usina PA IV, definidas para as medições com ajuda dos mapas acústicos, são as seguintes:

- Piso do Gerador:
 - Topo do gerador da unidade 04G1.
- Piso da *Air Housing*:

- Porta da *Air Housing* da unidade 04G1; e
- Exaustor próximo à unidade 04G2.
- Piso da Turbina:
 - Entrada do corredor do poço da turbina da unidade 04G6;
 - Abertura oposta ao corredor do poço da turbina da 04G6; e
 - Bombas do tanque de purificação de óleo dos mancais da 04G6.

Basicamente, as medições de potência sonora foram realizadas através da técnica de varredura, seguindo as recomendações da ISO 9614-2 (1996), e em alguns casos, através da técnica de pontos discretos, seguindo as recomendações da ISO 9614-1 (1993), somente para efeito de comparação de resultados.

Como pode ser visto na Fig. 4.21, o ruído de maior intensidade, dentro do poço da turbina da 04G6 da PA IV, ocorre em baixas frequências, apresentando um perfil que é repetido nos outros pisos da PA IV.

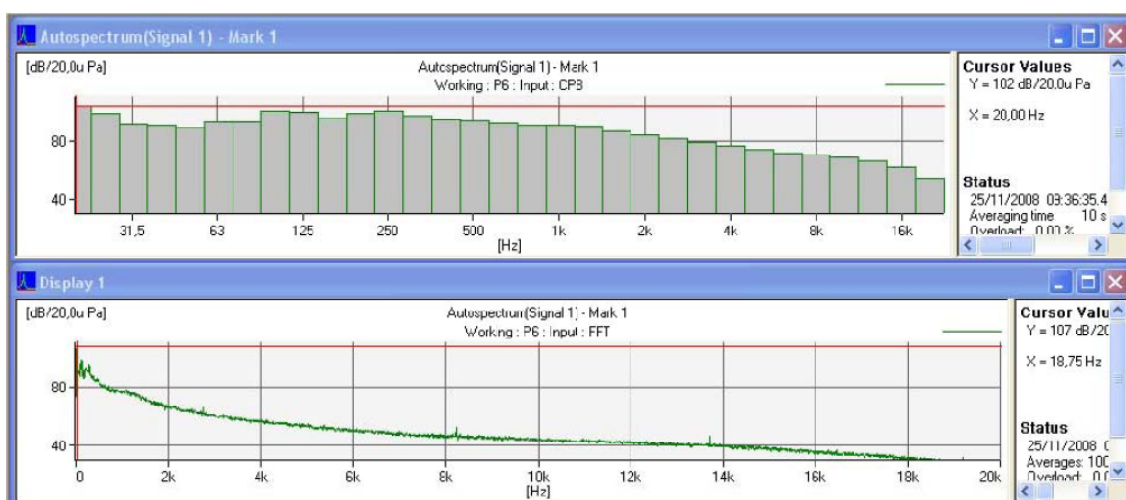


Figura 4.21 – Dados de NPS em um ponto dentro do poço da turbina da PA IV exibido no *software Labshop-view*, evidenciando níveis elevados em baixa frequência.

Como, de certa forma, espera-se melhorar a qualidade dos resultados dos ensaios com o aumento do espaçamento entre os microfones da sonda de intensidade, o que diminui o erro de desencontro de fase e, conseqüentemente, amplia a capacidade dinâmica, L_d , do sistema de medição, e tendo o ruído dos ambientes pilotos o perfil comentado acima, utilizou-se o espaçamento de 50 mm. Por outro lado, como esse espaçamento se limita às bandas de baixa frequência, provocando concomitantemente o aumento do erro de aproximação de diferenças finitas, prejudicando os resultados nas

bandas de alta frequência, repetiram-se as medições utilizando o espaçamento de 12 mm. Isso foi utilizado tentando preservar os resultados de nível de potência sonora das bandas de baixa e de alta frequência.

Resumidamente, para as medições do topo do gerador da unidade 04G1 (ver Fig. 4.22) foram imaginadas cinco superfícies de medições envolvendo o topo do gerador, sendo cada superfície lateral com dimensões de $4,47 \times 1,17 \text{ m}^2$ e a superfície superior com dimensões de $4,47 \times 4,47 \text{ m}^2$.



Figura 4.22 – Topo do gerador da unidade 04G1.

A medição inicial para o topo do gerador foi na superfície intitulada como *Frente Gerador G1*. Nessa medição, alguns critérios do procedimento de medição pela ISO 9614-2 (1996) ficaram fora dos limites aceitos pela norma, como o critério 1, que diz que o índice de capacidade dinâmica, L_d , deve ser maior que o índice de pressão-intensidade, δ_{PI} , o que não foi verificado em algumas bandas de frequência, e o critério 3, que diz que o módulo da diferença dos níveis de potência sonora parcial das duas medições deve ser menor ou igual a s (tabelado na norma e dependente do grau de precisão escolhido e da frequência) para verificação da repetibilidade das medições, o que também não foi observado em algumas bandas de frequência.

Cientes das recomendações da norma para melhoria dos resultados, como aproximação da superfície de medição sobre a fonte de ensaio para amenizar a influência de fontes externas e da forte componente reverberante do campo sonoro local, foi realizada novamente a medição com a superfície de medição mais próxima da fonte sonora. No entanto, novamente o critério de repetibilidade não foi atingido. Diante da constatação nas medições de nível de pressão sonora que o nível tem pouca variação, no caso aproximadamente 2 dBA (ver Fig. 4.15), e diante desta dificuldade de adequação da medição desta superfície ao critério de repetibilidade evidenciando uma forte influência da reverberação do ambiente, esta última medição foi aceita para entrada de dados nas simulações numéricas, sendo o valor de potência sonora obtido para esta superfície replicado para as outras quatro faces de medição que envolviam a fonte em teste, devido à não adequação dos resultados segundo a norma.

Para as medições na porta da *Air Housing* da unidade 04G1 (ver Fig. 4.23) foi definida uma superfície de medição de dimensões $1,03 \times 2,04 \text{ m}^2$, aproximadamente a 5 cm da superfície da porta. Foram realizadas medições por varredura com a porta fechada e com a porta aberta. Foram realizadas também medições através de pontos discretos.



Figura 4.23 – Porta da *Air Housing* da unidade geradora 04G1.

Para as medições no corredor de acesso ao poço da turbina da 04G6 (ver Fig. 4.24) foi definida uma superfície de medição de dimensões $2,00 \times 2,00 \text{ m}^2$. Para a abertura oposta ao acesso ao poço da turbina da 04G6 (ver Fig. 4.25) foi definida uma superfície de medição de dimensões $1,37 \times 0,63 \text{ m}^2$. Para o exaustor (ver Fig. 4.26) próximo à unidade 04G2 foi definida uma superfície de medição de dimensões $1,10 \times 0,90 \text{ m}^2$ e para as bombas do tanque de purificação de óleo dos mancais da 04G6 foram definidas duas superfícies de medição, uma à frente das bombas (ver Fig. 4.27) com dimensões de $1,60 \times 0,80 \text{ m}^2$ e outra ao lado com dimensões de $1,30 \times 0,80 \text{ m}^2$. Todas essas medições foram realizadas com o método de varredura. Os principais resultados de nível de potência sonora de interesse para este trabalho são mostrados na Tab. 5.1.



Figura 4.24 – Corredor de acesso ao poço da turbina da unidade geradora 04G1.



Figura 4.25 – Abertura oposta ao corredor de acesso ao poço da turbina da unidade geradora 04G1.



Figura 4.26 – Abertura do exaustor próximo à unidade geradora 04G2.



Figura 4.27 – Bombas do tanque de purificação de óleo dos mancais da unidade geradora 04G6.

Tabela 5.1 – Nível de Potência Sonora em dB, por banda de frequência de oitava, das principais fontes da usina PA IV.

Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frente Gerador G1	94,8	103,4	97,2	82,3	79,7	71,2	57	46,3
Porta da <i>Air Housing</i> 04G1	106,5	106,2	101,8	93,5	91,0	87,7	75,4	56,1
Poço da Turbina 04G6	99,2	99,1	100,0	95,5	92,5	87,1	78,8	66
Abertura para dutos de óleo	86,9	88,1	86,1	82,4	78,4	72,4	64,4	53,8
Exaustor da 04G2	87,0	79,2	81,4	76,7	71,2	65,3	58,4	45,7
Bomba do tanque de óleo da 04G6 (Frente)	82,5	81,1	81,9	78,0	73,7	71,1	65,5	59,5
Bomba do tanque de óleo da 04G6 (Lateral)	82,7	75,7	81,8	77,6	73,6	71,1	65,7	58,3

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo apresentou a metodologia das medições de NPS e os mapas gerados para os ambientes das usinas PA I, PA II, PA III e PA IV, onde se pode observar certo padrão no ruído gerado. Desta forma, pode-se dizer que, para o piso do gerador, as principais fontes de ruído são os topos dos geradores, enquanto para o piso da turbina se destacam as portas do poço da turbina e aberturas para saída de óleo dos mancais. No caso do piso da *Air Housing*, destacam-se as frestas das portas por onde vaza energia acústica. Na PA IV, as paredes das *Air Housings* são de concreto de considerável espessura. Portanto, as principais fontes de ruído percebidas, além das

frestas das portas, foram as tubulações de saída dos barramentos que apresentam uma vedação já ineficiente, e os sistemas de exaustão do ambiente.

A escolha de uma única hidrelétrica, com maiores dimensões, proporciona a pesquisa de um maior leque de propostas de soluções de controle de ruído em seus ambientes pilotos e proporciona um potencial maior quanto as suas aplicações em usinas diferentes.

Com a definição dos ambientes pilotos foram identificadas e caracterizadas as principais fontes sonoras, através da determinação de nível de potência sonora pela técnica de intensimetria sonora discutida no capítulo 3.

No próximo capítulo é comentada a acústica de raios, seus principais algoritmos e o método híbrido especial implementado no Odeon, ferramenta computacional utilizada neste trabalho.

CAPÍTULO 5 – MODELAGEM ACÚSTICA E ACÚSTICA GEOMÉTRICA

5.1 MODELAGEM ACÚSTICA

Os fenômenos físicos envolvidos na propagação de ondas sonoras em ambientes enclausurados são, ao mesmo tempo, numerosos e complexos (Smith, 2004). Devido ao grande número de parâmetros que devem ser levados em conta para uma descrição de uma situação real, apenas aproximações podem ser possíveis (Ondet & Barbry, 1989).

Do ponto de vista computacional, existem três diferentes abordagens: modelos estatísticos; acústica ondulatória e método geométrico (Savioja, 1999).

Os modelos estatísticos têm como os mais populares modelos de Sabine e Eyring, oferecendo uma estimativa em banda de oitava do nível de pressão sonora (ver Eq. 5.1) e do tempo de reverberação (ver Eq. 5.2), considerando o ambiente como campo difuso. Assim, apenas o tamanho da sala e a absorção sonora das paredes (sem levar em conta a distribuição desta absorção) são considerados. Souza (1997) comenta que a teoria de campo difuso, como é chamada, é usada para prever o campo sonoro em todos os tipos de salas, sendo esquecido que a teoria é baseada em suposições que limitam a sua aplicação e, por isso, pode levar a previsões afastadas da realidade. Como exemplo, tal teoria não pode ser aplicada a salas altamente absorvedoras, ou em áreas de fábricas ou escritórios onde raramente é observado um campo difuso, pelo fato de uma dimensão ser muito menor que as outras duas e a distribuição da absorção ser heterogênea.

$$NPS(r) = NWS + 10 \log \left[\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha_m)}{A} \right] \quad (5.1)$$

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (5.2)$$

com a absorção A , de acordo com Sabine (ver Eq. 5.3) ou Eyring (ver Eq. 5.4), dada por:

$$A_{Sabine} = 4mV + \alpha_m S \quad (5.3)$$

$$A_{Eyring} = 4mV - S \ln(1 - \alpha_m) \quad (5.4)$$

$$\alpha_m = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S} \quad (5.5)$$

onde NWS é o nível de potência sonora em dB, r é a distância da fonte em m, S é a área das superfícies da sala em m^2 , V é o volume da sala em m^3 , α_m é o coeficiente médio de absorção das superfícies da sala, m é o expoente de absorção do ar em m^{-1} e i é o número da superfície da sala.

Os métodos baseados na acústica ondulatória, por sua vez, não permitem a exata resolução da equação da onda, mas tentam aproximar numericamente a sua obtenção. São eles: FEM (método de elementos finitos), BEM (método de elementos de contorno) e FDTD (método de diferenças finitas no domínio do tempo). Basicamente, esses métodos dividem o espaço da sala em pequenos elementos conectados por nós, que interagem uns com os outros de acordo com os fenômenos ondulatórios. O tamanho destes elementos tem que ser muito menor do que o tamanho do comprimento de onda (pelo menos seis elementos por comprimento de onda) para cada frequência particular, o que é um problema para altas frequências e/ou modelos grandes, limitando o uso prático desta metodologia a baixas frequências e pequenos espaços (Rindel, 2000).

No FEM, utilizado principalmente em análises de campos acústicos de interiores, o espaço completo é representado por elementos, onde cada um interage com os elementos diretamente adjacentes a ele, criando matrizes que são grandes, mas esparsamente preenchidas. Por outro lado, o BEM pode ser usado para calcular o interior, o exterior, ou os dois campos simultaneamente. No BEM apenas as fronteiras são discretizadas, mas todos os nós permanecem interligados, formando uma matriz densa de coeficientes. O princípio fundamental da técnica de FDTD, por outro lado, é que as derivadas da equação de onda são substituídas pelas diferenças finitas correspondentes. Estes métodos são adequados para recintos pequenos e para frequências baixas, devido ao seu tempo de processamento extremamente longo.

Smith (2004) comenta que, com a introdução de modernos computadores, as simulações digitais da propagação sonora em recintos fechados tornaram-se práticas. Kuttruff (2000) comenta que as primeiras simulações em acústica de salas se devem a Krokstad *et al.* (1968), que avaliaram uma variedade de parâmetros da resposta impulsiva de uma sala de concerto, utilizando o método de traçado de raios.

A abordagem do método geométrico descreve o som como um pequeno segmento de uma onda esférica divergente que se origina de um ponto e se propaga em uma direção especificada. Esta descrição tem conduzido a métodos mais práticos para a acústica de salas (acústica arquitetônica), como o método da fonte imagem e o método de traçado de raios, os quais envolvem uma simplificação com base em uma solução especial para a equação de onda que é válida quando o comprimento de onda do som é pequeno comparado às dimensões das superfícies refletoras e grande em relação às irregularidades das superfícies e curvaturas.

O método geométrico, ou acústica geométrica, não leva em conta a difração dos raios, mas assume que estes se propagam em linha reta, e não leva em conta também a interferência ondulatória, o que significa que, quando várias componentes do campo sonoro são sobrepostas, suas relações de fase não são consideradas. Esta simplificação é válida quando os componentes são incoerentes com relação ao outro, o que normalmente é verdade quando os componentes têm espectro de frequência amplo (Kuttruff, 2000). Mesmo com esta limitação, a acústica geométrica fornece informações importantes e úteis sobre as características sonoras de uma sala (Smith, 2004).

Souza (1997) comenta que a acústica geométrica apresenta-se como a teoria mais utilizada para a simulação por computadores em acústica de salas e os métodos da fonte imagem e de traçado de raios servem de base para a criação de algoritmos e programas de computadores.

5.1.1 Método de Traçado de Raios (*Ray Tracing Method*)

No método de traçado de raios, ilustrado na Fig. 5.1, o som é radiado desde uma fonte sonora em forma de raios ou partículas sonoras. Se a fonte sonora tiver característica onidirecional, as direções dos raios lançados são criadas a partir de uma distribuição aleatória homogênea, no entanto, características de diretividade podem ser contabilizadas e a fonte lança os raios segundo estas características. Cada raio tem uma energia inicial igual à energia total da fonte dividida pelo número dos raios emitidos, sendo portador de parte da potência emitida pela fonte, seguindo uma trajetória retilínea com a velocidade do som. Cada vez que colide em uma superfície, que pode ser parede, piso, teto ou obstáculo, o raio é refletido de forma especular ou difusa. Na reflexão especular, o raio incidente e o raio refletido estão no mesmo plano e o ângulo de

incidência é idêntico ao ângulo de reflexão (Lei de Snell). Na reflexão difusa, o raio refletido distribui sua energia para diversas direções (ver Fig. 5.2), dependendo do coeficiente de espalhamento da superfície.

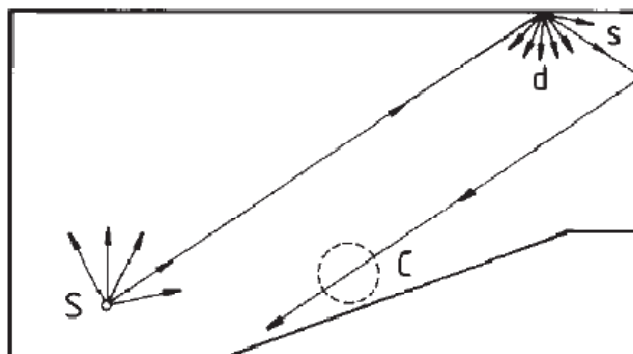


Figura 5.1 – Representação do algoritmo de traçado de raios, onde S = fonte sonora, C = receptor ou microfone esférico, s = reflexão especular e d = reflexão difusa.

Fonte: Kuttruff, 2000.

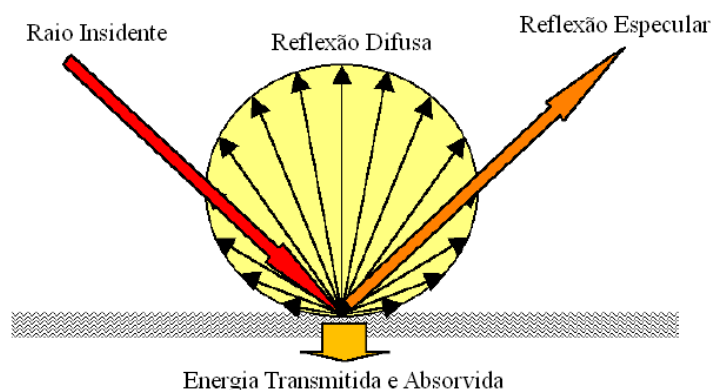


Figura 5.2 – Reflexão difusa e especular (adaptado de Tenenbaum, 2004).

Durante o tempo de propagação, o nível de energia de cada raio diminui tanto nas reflexões, devido às propriedades de absorção das superfícies, quanto progressivamente com a absorção do ar, sendo interrompida sua propagação quando certo limite mínimo de energia é alcançado. A seleção deste limite depende do parâmetro procurado. Em casos de cálculo do Tempo de Reverberação ou histogramas detalhados, o decaimento será de 60 dB; já para cálculos de apenas NPS o decaimento pode ser de 20 a 30 dB. O processo global deve ser repetido para cada faixa de frequência, devido às propriedades de absorção do ar e das superfícies dependerem deste parâmetro (Elorza, 2005).

Por meio de certos receptores, microfones virtuais que tipicamente são modelados como objetos volumétricos (esfera ou cubo), mas que também podem ser

planos, os raios são detectados em uma ou outra região da sala (ver Fig. 5.3). Teoricamente, o receptor pode ser de qualquer forma, mas, na prática, a esfera em muitos casos é a melhor escolha, pois proporciona uma sensibilidade de padrão onidirecional e é fácil de implementar (Savioja, *et al.*, 1999). Toda a informação que transmitem pode ser considerada em uma análise posterior: tempo de impacto, direção de incidência, fração de potência da fonte emissora, etc. Após o traçado de todos os raios e processamento dos dados da simulação, pode-se reconstruir a resposta impulsiva percebida no receptor especificado. As perdas devido à lei de divergência (lei do inverso do quadrado da distância percorrida pela energia sonora) são levadas em conta pela área constante do receptor, que possui um ângulo sólido diminuindo proporcionalmente a $\frac{1}{r^2}$ com o aumento da distância da fonte (Embrevts, 2000).

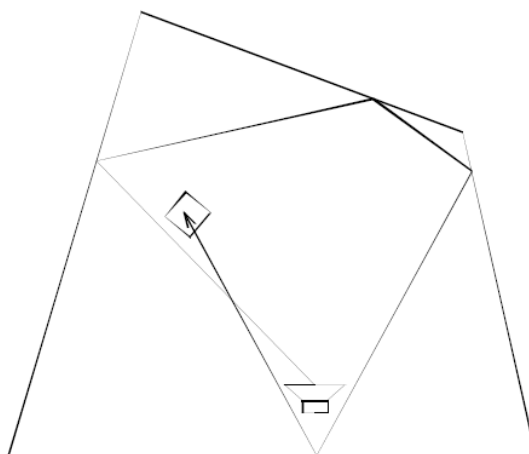


Figura 5.3 – Traçado de um raio acústico da fonte até a detecção pelo receptor.
Fonte: Souza, 1997.

A principal limitação deste método parece ser a inexatidão em representar uma resposta impulsiva “verdadeira”. A emissão de um número limitado de raios não garante que todos os possíveis percursos de raios entre fonte e receptor sejam encontrados. Rindel (1995 e 2000) afirma que há um risco de que algumas reflexões captadas pelo receptor serão falsos caminhos de reflexão, enquanto outros caminhos de reflexão verdadeiros não serão incluídos. Desta forma, a precisão dos resultados sofre das limitações dessas características de natureza estatística.

Algumas vantagens desse método, em relação ao método da fonte imagem é incluir superfícies curvas e inclusão de espalhamento em seu algoritmo, além de ser bastante rápido e fácil de calcular.

5.1.2 Método da Fonte Imagem (Image Source Method)

O método da fonte imagem é baseado na ideia de que um raio sonoro que é refletido por uma superfície plana pode ser pensado como proveniente de uma fonte que é a imagem especular da fonte sonora original, considerando a superfície plana como um espelho, ou seja, fontes imagens virtuais são usadas para permitir o traçado dos raios que identificam os caminhos de reflexão sonora de um receptor para a fonte. Este processo é simples e pode ser visualizado na Fig. 5.4, onde os subscritos são F : fonte sonora, p : piso, pa : parede do fundo, R : receptor, $t1$: teto 1 e $t2$: teto 2.

A fonte sonora, F , é espelhada para o outro lado de cada superfície, criando então fontes virtuais. Por exemplo, através dos tetos $t1$ e $t2$ são criadas as fontes F'_{t1} e F'_{t2} , e através do piso p é criada a fonte F'_p . O caminho refletido é então substituído pelo caminho virtual que vai da fonte até o receptor R . Então é feito o teste de visibilidade, em casos onde a sala não é retangular, para verificar se o caminho existe realmente. Este teste é dividido em duas partes. A primeira parte verifica se o ponto de reflexão ou ponto de colisão do caminho virtual com a superfície está dentro da superfície usada para o espelhamento ou não, para indicar se um caminho é encontrado ou não. Isso verifica se há um caminho não concluído da fonte ao receptor para formar o caminho de reflexão real e verificar se ele não cruza todas as superfícies da sala. Por exemplo, na Fig. 5.4 pode-se observar que a fonte virtual F'_{t1} não pode “ver” diretamente o receptor, enquanto que F'_{t2} pode.

A segunda parte do teste verifica a visibilidade, procurando a existência de obstáculos que possam obstruir os caminhos. Isso é feito através da reconstrução do caminho de propagação do receptor até a fonte sonora, através de todas as superfícies que contribuem nas reflexões. Desta forma, seria descoberto que a fonte virtual F'_p não pode contribuir para a resposta impulsiva obtida em R . As múltiplas reflexões são encontradas da mesma forma, sendo copiadas as imagens virtuais através de outras superfícies, ou seja, com o espelhamento da fonte virtual F'_{t2} através da parede do fundo pa é encontrada a fonte virtual F'_{t2-pa} . Em seguida, são rastreados os caminhos anteriores para formar o caminho “fonte sonora-teto 2-parede do fundo-receptor”.

Este método assume que o som se propaga como um raio, embora também considere a atenuação devido à divergência esférica. Por outro lado, não considera os efeitos ondulatórios como difração e interferência.

A contribuição energética de cada fonte imagem é computada levando-se em conta a distância percorrida e as atenuações ocorridas em cada reflexão. Sua principal vantagem é a boa resolução temporal obtida, o que é um fato importante, principalmente, quando se pretende realizar a convolução da resposta impulsiva com um sinal gravado, com certa frequência de amostragem, em processos de *auralização* (Fujimoto, 2004).

Sua principal limitação é a necessidade de realizar o teste de visibilidade para modelos de salas não retangulares, o que pode demandar longos tempos de processamento computacional, principalmente em salas com geometrias muito irregulares, em salas com muitos objetos no interior e quando o número de reflexões de cada raio é elevado.

Outra importante vantagem do método da fonte imagem é realmente encontrar todos os caminhos de reflexão, proporcionando a formação da resposta impulsiva, pela adição das contribuições de todas as fontes imagens encontradas, precisa; no entanto, as necessidades computacionais são tais que apenas um conjunto de reflexões iniciais pode ser encontrado na prática. O máximo de reflexões possíveis depende da geometria da sala e da capacidade computacional disponível (Savioja, 1999).

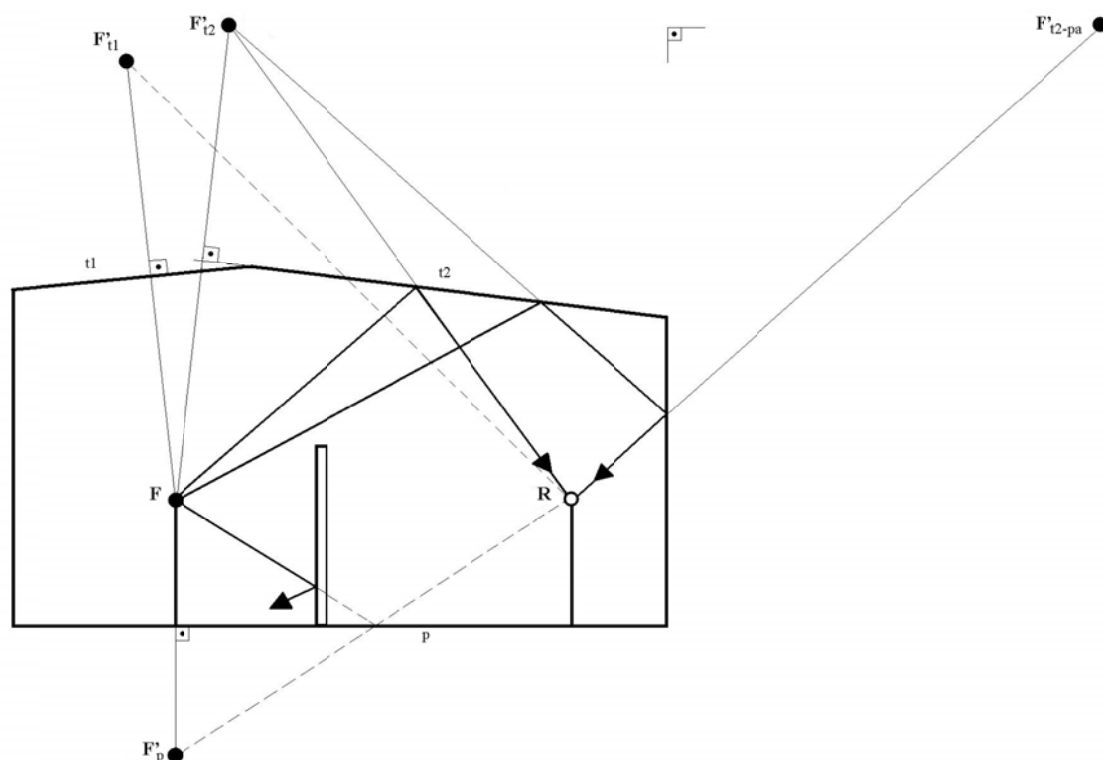


Figura 5.4 – Representação do método da fonte imagem: fontes imagem de primeira e segunda ordem (adaptado de Elorza, 2005).

5.1.3 Método Híbrido

Devido às desvantagens dos métodos clássicos da acústica de raios (traçado de raios e fonte imagem) os algoritmos híbridos foram criados combinando as melhores características de ambos os métodos (Voländer, 1989). Esses algoritmos são baseados em um sistema onde as primeiras reflexões são calculadas a partir das fontes imagem, e as reflexões finais são tratadas pelo traçado de raios.

A idéia da combinação dos métodos é ter uma maneira eficiente de encontrar fontes imagens com alta probabilidade de validade, traçando os raios da fonte e observando as superfícies nas quais o raio incidiu. Cada caminho encontrado desta forma está associado a determinadas sequências de fontes imagens válidas, que são identificadas pelo retrocesso do caminho de um raio sonoro. Posteriormente, testa-se para determinar se ela contribui em relação à posição do receptor escolhido. Com as imagens válidas encontradas, a resposta impulsiva do ambiente pode ser formada pela adição das contribuições de todas as fontes imagens válidas e usando os coeficientes de

reflexão da energia das superfícies da sala envolvidas. Este é o método que está sendo usado no presente trabalho, através do *software* Odeon.

5.2 MÉTODO HÍBRIDO ESPECIAL DO ODEON

Este método é comentado sucintamente neste trabalho, devido o *software* Odeon *Ver. 10* ser utilizado para a caracterização acústica e teste de propostas de medidas de controle de ruído nos ambientes pilotos.

Este *software* foi desenvolvido pela Universidade Técnica da Dinamarca e é distribuído pela empresa Brüel & Kjaer. Ele proporciona ao usuário ferramentas práticas que permitem um menor tempo de pré-processamento, como aplicação de absorção sonora e fator de espalhamento nas superfícies, valores de transmissibilidade, caracterização das fontes sonoras, definição dos microfones e estimativas de Tempo de Reverberação, através de equações de *Sabine*, *Eyring* e *Arau-Puchades*. Além disso, permite a investigação dos parâmetros acústicos como EDT (*Early Decay Time*), *NPS* (Nível de Pressão Sonora), *NPS(A)*, *STI* (*Speech Transmission Index*) e o Tempo de Reverberação. Possui ainda ferramentas para medidas de controle de ruído como análise da influência de cada fonte sonora caracterizada no ambiente, facilitando a identificação da fonte ruidosa em cada microfone, curva de decaimento sonoro e mapas acústicos.

O *software* Odeon faz uso do método híbrido, combinando o método da fonte imagem com o método de traçado de raios (Christensen e Rindel, 2005). Rindel (1997) comenta que o rápido aumento da densidade das reflexões com o tempo e a diminuição da necessidade de precisão em termos de níveis, tempo de chegada e direção das reflexões finais são boas razões para escolher métodos diferentes que o método da fonte imagem para gerarem uma cauda de reverberação nos histogramas. Esta tarefa é foco de muito esforço e várias abordagens foram sugeridas, geralmente com base nas propriedades estatísticas da geometria e absorção da sala, no entanto, apenas o método de “fonte secundária” utilizada no Odeon provou ser eficiente.

A resposta pontual de uma fonte pontual pode ser calculada através de dois passos: nas reflexões abaixo ou igual à ordem de transição (TO), onde é usada uma combinação do método da fonte imagem (ISM – *Image Soucer Method*) e raios iniciais de espalhamento (ESR – *Early Scattering Rays*); e acima da TO, onde o cálculo é feito

pelo método de traçado de raios (RTM – *Ray Tracing Method*) que inclui espalhamento (ver Fig. 5.5).

A TO otimizada, onde o modelo faz uma transição do método inicial para o final, depende da geometria da sala e normalmente os valores são 1, 2 ou 3, sendo em muitos casos o valor 0 preferível, onde somente o RTM é usado.

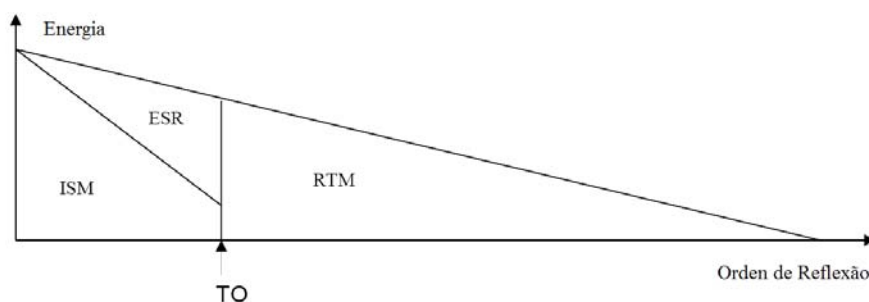


Figura 5.5 – Divisão do procedimento de cálculo no Odeon.

No ESR, cada vez que Odeon detecta uma fonte imagem, uma fonte plana é simulada emitindo um número de raios iniciais com espalhamento vezes o coeficiente de espalhamento da superfície da fonte imagem. Esses raios são traçados a partir do fim da reflexão atual até a ordem de transição. Em cada ponto de reflexão dos raios iniciais com espalhamento, incluindo o ponto de partida, uma fonte secundária de espalhamento é criada, e então o Odeon verifica cada fonte secundária para determinar se ela é visível ao receptor. A atenuação da fonte secundária é calculada levando-se em conta o fator de diretividade da fonte primária na direção relativa da radiação, o coeficiente de reflexão da parede envolvida na geração da imagem, a absorção do ar devido ao comprimento do caminho de reflexão e o fator de diretividade da fonte secundária.

No RTM, o espalhamento é incluído com base em um vetor de espalhamento. Neste método, a direção da reflexão do raio é calculada pela adição do vetor especular, de acordo com a lei de Snell, ponderado pelo fator $(1 - s)$ para um vetor de espalhamento que deve ser ponderado pelo fator s , que é o coeficiente de espalhamento. Se s for igual a 0, o raio é refletido especularmente, se for igual a 1 o raio é refletido em direção aleatória.

De forma resumida, o procedimento do Odeon para uma fonte pontual ocorre como na Fig. 5.6, onde as reflexões geradas por uma fonte pontual S em certo receptor R são ilustradas, levando-se em conta somente dois raios vizinhos até a sexta reflexão. O cálculo é carregado com uma TO de 2 e em todas as superfícies é atribuído o

coeficiente de espalhamento igual a 1. Desta forma, o raio detectará uma fonte imagem de segunda ordem S_{12} e, acima desta ordem, detectará fontes secundárias.

A duas primeiras reflexões são especulares e ambos os raios encontram as fontes S_1 e S_{12} . Estas fontes imagens dão origem a uma reflexão em cada resposta, pois são visíveis a partir do ponto receptor R . Apesar de mais de um raio detectar as fontes imagem, os raios somente contribuem na detecção de uma fonte imagem. Isto é obtido no Odeon a partir da construção de uma árvore de fontes imagem, preservando seu caminho. Cada fonte imagem existe de forma única, sendo uma das principais vantagens do modelo de fonte imagem.

Acima da ordem 2, cada raio gera fontes secundárias independentes, situadas nos pontos de reflexão nas superfícies da sala, como é o caso das fontes a, b, c, d, e, f, g e h . O tempo de chegada para contribuição de uma determinada fonte secundária é proporcional ao comprimento do caminho do raio acústico da fonte S para a fonte secundária, mais a distância da fonte secundária ao receptor.

Um completo histograma contém contribuições das energias iniciais e finais, sendo gerado e usado para derivar o Tempo de Decaimento Inicial e o Tempo de Reverberação. Os outros parâmetros acústicos são calculados com base na energia coletada no tempo e intervalos angulares. A Fig. 5.7 mostra o histograma do receptor R gerado pelo exemplo comentado acima, indicando as contribuições a partir da fonte pontual, das fontes imagens e das oito fontes secundárias.

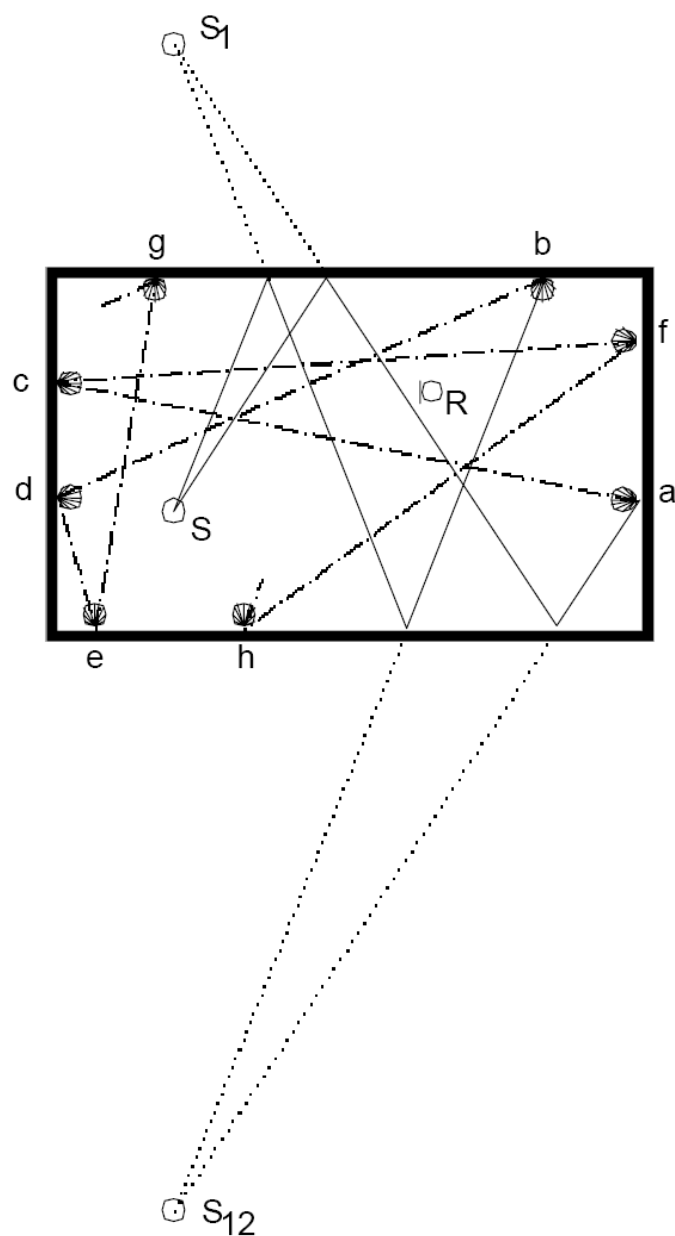


Figura 5.6 – Exemplo de procedimento de cálculo do Odeon em uma sala retangular com uma fonte e um receptor: raios criando fontes imagens para as reflexões iniciais e as fontes secundárias para as reflexões finais. Fonte: Odeon, 2008.

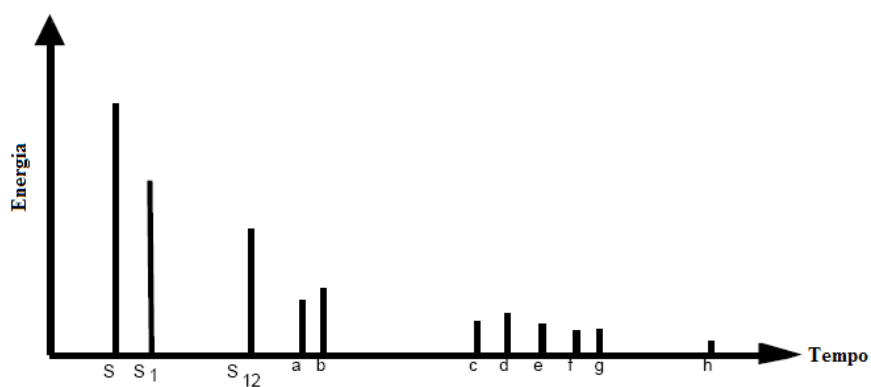


Figura 5.7 – Histograma para o receptor R do procedimento de cálculo da Fig. 5.6. Fonte: Odeon, 2008.

Para as fontes dos tipos linha e superfície plana, um número de fontes secundárias são postas aleatoriamente na superfície da fonte, cada uma emitindo um raio e irradiando uma possível contribuição para o receptor. Os raios emitidos destes tipos de fonte geram uma fonte secundária independente cada vez que são refletidos. Comparado com o princípio de cálculo aplicado para a fonte pontual, pode-se dizer que somente as contribuições das energias finais são coletadas para estes tipos de fontes, ou melhor, estes cálculos são baseados em um tipo de traçado de raios.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Na propagação de ondas sonoras em ambiente fechado ocorrem numerosos e complexos fenômenos físicos, exigindo serem levados em conta vários parâmetros para os quais apenas aproximações são até agora possíveis.

Tais aproximações são alcançadas por várias ferramentas comentadas sucintamente no presente capítulo. No entanto, a acústica de raios demonstra ter menor erro nas determinações das propriedades acústicas, em relação a medições experimentais, além de maior flexibilidade.

Foi dada maior atenção neste capítulo para esta ferramenta e sua implementação no *software* Odeon, por este ser utilizado nas simulações numéricas para estudo das propostas de controle de ruído nos ambientes pilotos definidos anteriormente.

O próximo capítulo aborda tais simulações numéricas.

CAPÍTULO 6 – MODELAGEM ACÚSTICA DE AMBIENTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E PROPOSTAS VIRTUAIS DE CONTROLE DE RUÍDO

6.1 MODELAGEM ACÚSTICA DE AMBIENTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

De uma forma geral, a modelagem acústica dos ambientes de geração de energia elétrica no Odeon consistiu em:

- Construção dos modelos geométricos com as dimensões principais do ambiente real respeitadas;
- Importação do modelo geométrico pelo Odeon;
- Caracterização das principais fontes sonoras (localização, tipo de fonte e nível de potência sonora) e caracterização dos receptores (localização, que deve ser aproximadamente nos mesmos locais das medições experimentais);
- Aplicação dos coeficientes de absorção e espalhamento nas superfícies do modelo geométrico; e
- Configuração dos parâmetros dos algoritmos de cálculo do Odeon.

Posteriormente ao desenvolvimento destes passos, foi realizada a validação do modelo numérico, tomando-se por base as medições no ambiente real.

Esse procedimento de validação consistiu no aprimoramento e ajuste dos modelos, até que uma variação máxima de ± 2 dBA entre valores numéricos e experimentais de nível de pressão sonora fosse observada ao longo de todas as posições de medição. Tal procedimento pode ser resumido pela Eq. (6.1):

$$|NPS_{Exp}^i - NPS_{Num}^i| \leq 2, \quad (6.1)$$

onde, NPS_{Exp} é o nível de pressão sonora experimental em dBA, NPS_{Num} o nível de pressão sonora numérico em dBA e i o ponto de medição.

Para se conseguir a validação dos modelos numéricos, nas modelagens foram alterados o modelo geométrico, o coeficiente de absorção sonora e espalhamento das principais superfícies, a definição das fontes sonoras e seus níveis de potência sonora, além do correto posicionamento dos microfones virtuais.

É comum que em geometrias grandes e complexas, como o piso da *Air Housing* da PA IV, os modelos numéricos, em regiões localizadas, apresentem divergências acima da média do modelo de uma forma global. Isso ocorre devido a vários fatores, como a necessidade de simplificações dos modelos geométricos, por ser assumido que as fontes sonoras do mesmo tipo são iguais, atribuindo-se o mesmo nível de potência sonora, pela imprecisão dos dados de propriedades de coeficiente de absorção e espalhamento das superfícies e equipamentos, parâmetros de cálculos inapropriados e pelas aproximações feitas nos algoritmos de cálculo dos *softwares* de simulação.

Assim, uma vez que os modelos aqui desenvolvidos envolvem uma distribuição densa de pontos de medição, considera-se plenamente aceitável que alguns resultados numéricos tendam a divergir dos valores experimentais, violando a condição imposta pela Eq. (6.1).

De posse dos modelos validados, passam a ser investigadas medidas virtuais de controle de ruído que possam vir a ser implementadas nos ambientes reais num futuro próximo.

Em todos os modelos, os coeficientes de absorção sonora utilizados estão listados na Tab. 6.1. Além disso, os modelos geométricos foram todos desenvolvidos em ambiente CAD, no formato *dxg*, o qual é diretamente importado pelo software Odeon.

Tabela 6.1 – Coeficientes de absorção sonora dos materiais atribuídos aos modelos numéricos.

Frequência Hz		63'	125	250	500	1000	2000	4000	8000'
Paredes de Rocha e Teto	Nº. 100 *	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,07
Paredes de Concreto	Nº. 3016 #	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
Topo e Tampa do Gerador	Nº. 805 *	0,4	0,3	0,25	0,2	0,1	0,1	0,15	0,15
Portas	Nº. 603 *	0,14	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	0,1
Piso	Nº. 3015 #	0,01	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,02	0,02

* Número dos materiais na lista de materiais do Odeon *Ver.* 10.

Número dos materiais adicionados à lista de materiais do Odeon, obtidos em Gerges (2000).

* Bandas de Frequência com coeficientes de absorção sonora não fornecidos e, portanto, adotados com valores iguais àqueles das bandas adjacentes.

O Odeon sugere os valores, considerados seguros, para os parâmetros de cálculo, como método de espalhamento (*Lambert*, espalhamento total ou nenhum), número de raios, máxima ordem de reflexões, ordem de transição, entre outras, ajudando na escolha de uma configuração segundo o grau de precisão desejável. Por exemplo, são

disponibilizados três tipos de configuração: *Survey* onde são definidos poucos raios e os resultados são utilizados para avaliações rápidas, mas pouco precisas, *Engenharia*, onde é utilizado um valor de raios com bom custo benefício entre o tempo de computação e resultados confiáveis, e *Precisão* com números de raios consideráveis, gerando resultados com maior precisão, porém, em longos tempos de processamento.

Tais configurações podem ser usadas na maioria das salas, no entanto, em casos especiais, como salas muito complexas com volumes acoplados, ou onde a distribuição de absorção sonora é extremamente desigual, o número de raios deve ser aumentado (Odeon Ver. 10, 2009).

Buscando um equilíbrio entre precisão e custo computacional, todas as simulações aqui desenvolvidas foram configuradas com a precisão *Engenharia*, uma vez que as geometrias envolvidas, apesar de serem complexas, não apresentavam uma distribuição de absorção sonora muito heterogênea. Além disso, o principal parâmetro investigado neste trabalho é o nível de pressão sonora global de cada ponto de medição, o qual é um valor estacionário, e que não necessita de um rigor apurado quanto ao tempo de reverberação ou o tempo de decaimento inicial, investigados em bandas de frequência, os quais são valores transientes e que com poucas variações podem modificar a resposta da sala de forma perceptível.

Considerou-se também para todas as simulações a temperatura ambiente de 28 °C e 50% de umidade relativa do ar.

Pela impossibilidade de medição do nível de ruído de fundo, o qual é o nível de ruído do ambiente quando todas as fontes sonoras estão desligadas, não foi fornecido aos modelos tal parâmetro.

6.1.1 Modelagem Acústica do Piso do Gerador da PA IV

6.1.1.1 Modelo Preliminar

Em relação aos ambientes modelados neste trabalho, o ambiente do Piso do Gerador da PA IV é o mais simples, possuindo poucos detalhes nas suas geometrias, poucos equipamentos e um grande volume.

Desta forma, o modelo geométrico do Piso do Gerador da PA IV leva em conta os painéis de controle existentes no local, o topo do gerador e o teto em arco do

ambiente real. Por outro lado, não são levadas em conta as pontes rolantes, localizadas na parte superior das duas extremidades da sala, as torres de circulação de ar, localizadas no lado esquerdo próximas ao piso, as escadas para o Piso da *Air Housing* (piso inferior) e muitas aberturas como portas e escadas, as quais foram consideradas fechadas, recebendo as mesmas propriedades de absorção sonora do material mais próximo. A Fig. 6.1 exibe uma comparação visual do ambiente real com o modelo geométrico inicialmente desenvolvido.



Figura 6.1 – Imagens do ambiente real e do modelo geométrico, aproximadamente de uma mesma posição de visualização.

Na Fig. 6.2 são mostradas as configurações das fontes sonoras (planos em vermelho), envolvendo o topo do gerador das unidades e 55 receptores (pontos em azul), aproximadamente nas mesmas posições dos microfones de medição. Atenta-se para o fato de que as superfícies das fontes sonoras foram definidas no Odeon com

irradiação sonora em quatro planos verticais (parte frontal, parte traseira, parte lateral direita e parte lateral esquerda) e um plano horizontal (topo), tendo-se a preservação de um pequeno grau de diretividade, e que os receptores foram distribuídos próximos das 04G1 e 04G2, a fim de aproximarem as posições das medições reais.

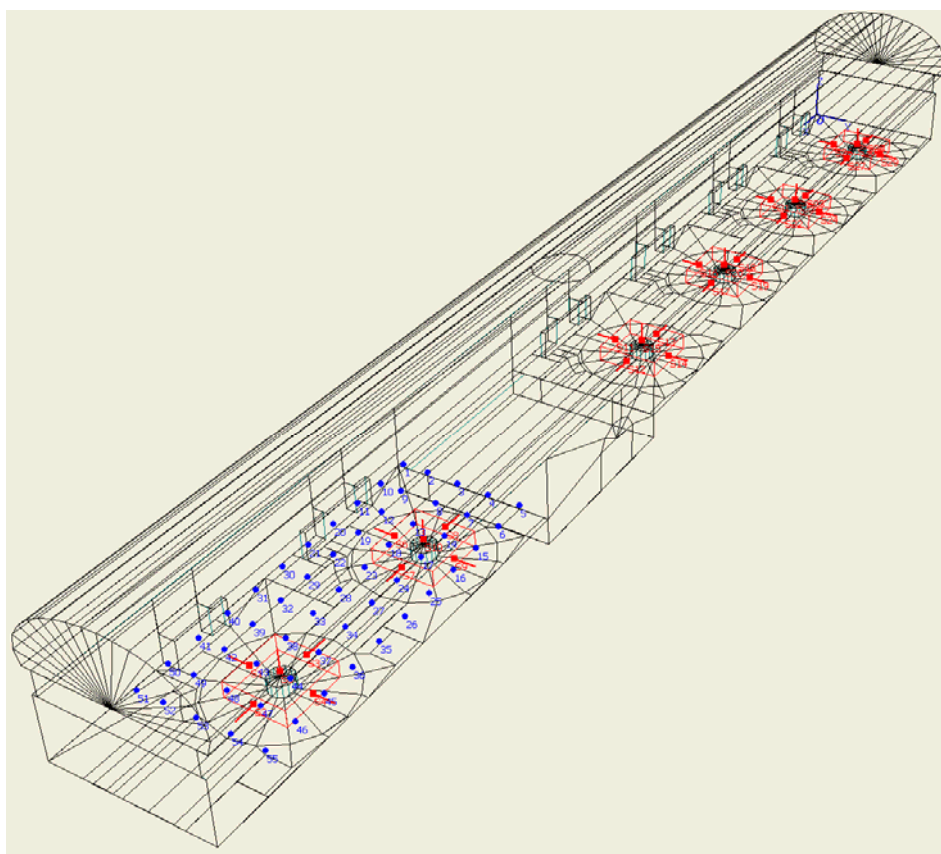


Figura 6.2 – Modelo geométrico do Piso do Gerador da PA IV.

A comparação entre a medição e simulação para o ambiente do Piso do Gerador da PA IV é apresentada na Fig. 6.3, onde é possível notar que esse modelo preliminar mostrou-se capaz de representar com regular precisão o campo sonoro do ambiente real, pois a máxima diferença encontrada entre os dados experimentais e numéricos, através da Eq. (6.1), não ultrapassaram 4 dBA, e a maioria apresentou uma diferença de $\pm 2,5$ dBA, o que é considerado um resultado até aceitável.

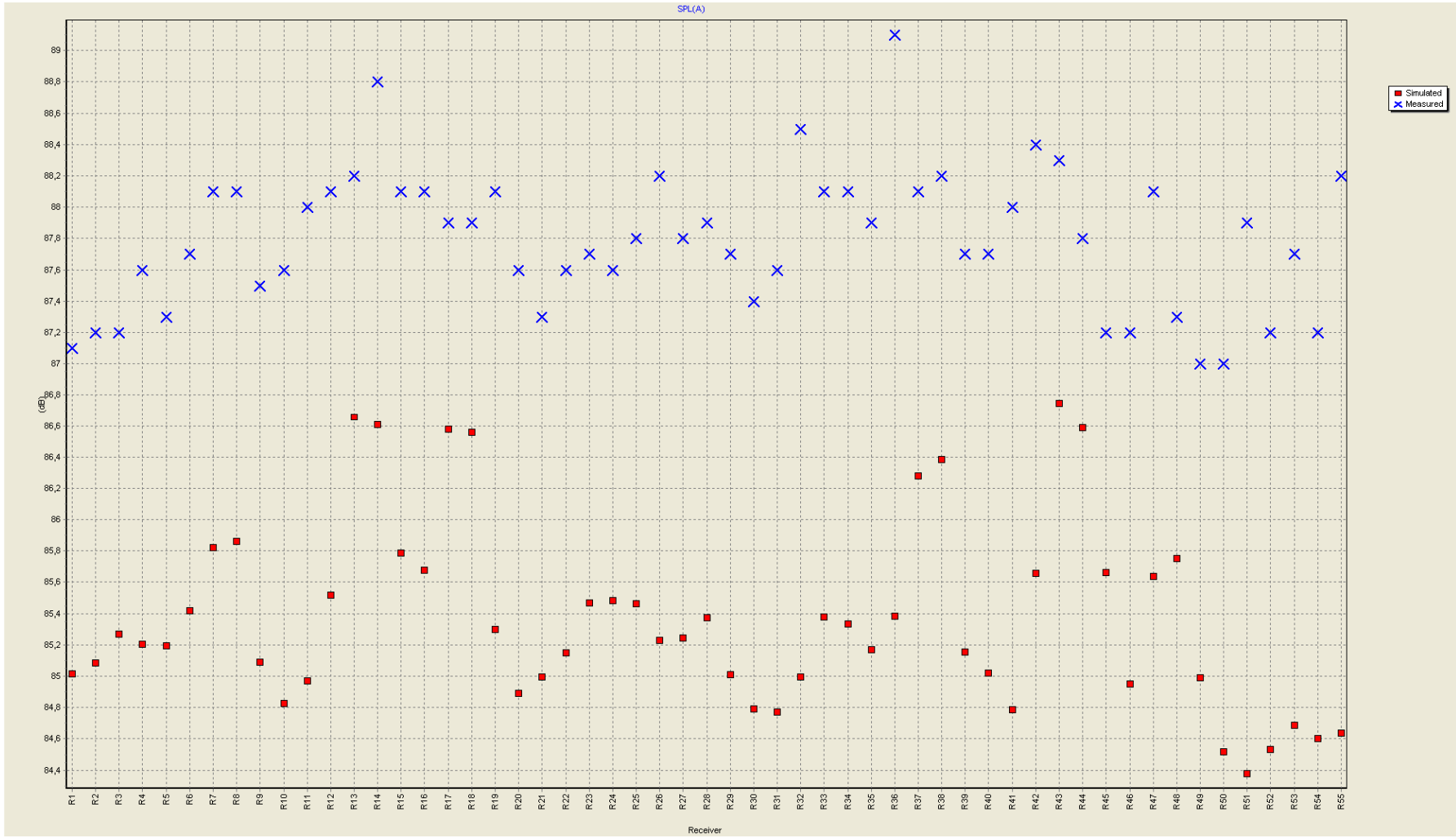


Figura 6.3 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo preliminar (■).

6.1.1.2 Modelo Validado

O modelo validado do Piso do Gerador da PA IV foi alcançado mantendo-se as características do modelo preliminar e acrescentando-se 2,5 dB ao nível de potência sonora, em todas as bandas de frequência, das fontes sonoras.

Os resultados deste modelo são apresentados na Fig. 6.4.

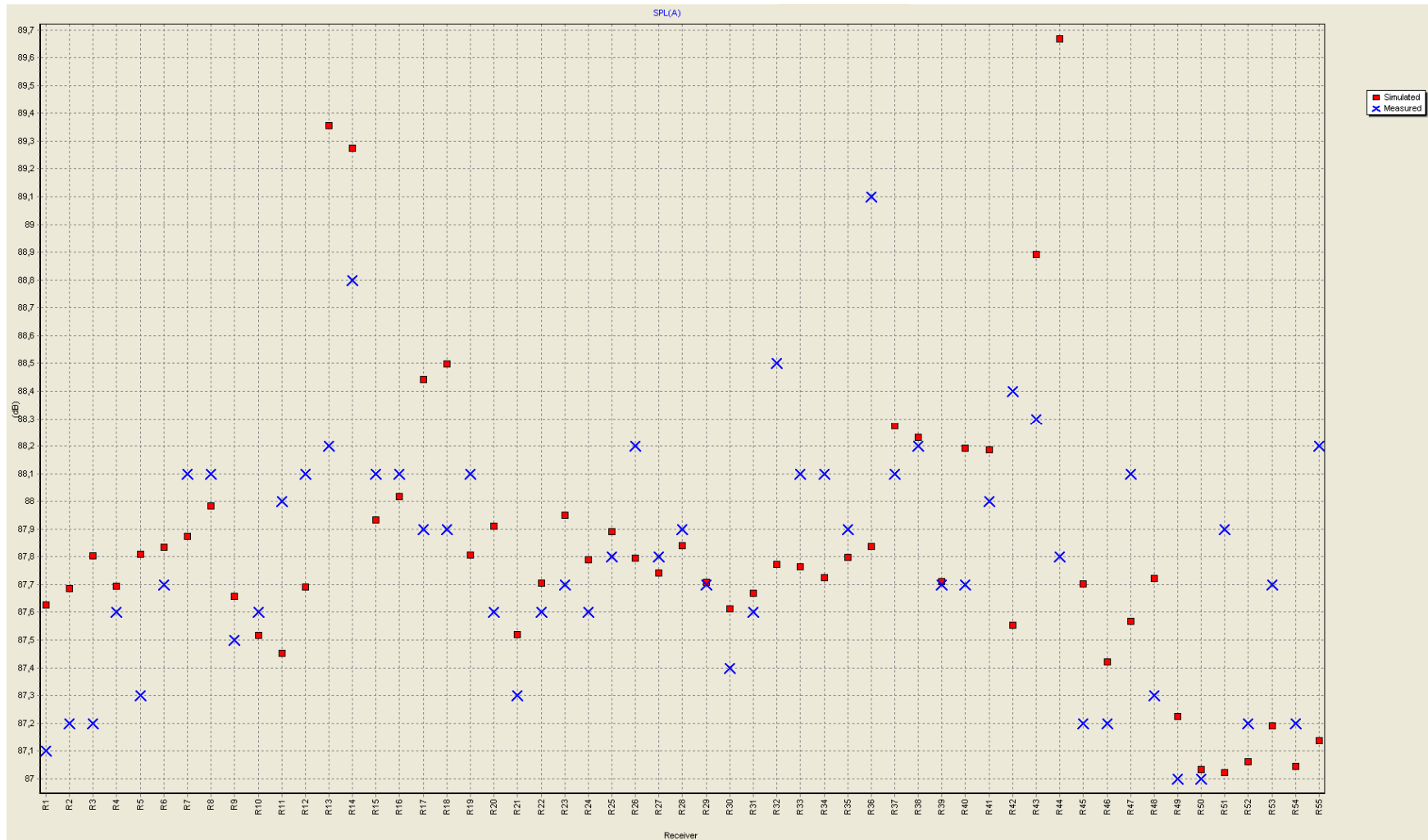


Figura 6.4 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo validado (■).

A Tab. 6.2 apresenta os valores de NPS de cada ponto de medição experimental e numérico, o valor da diferença e as médias aritméticas dos dados experimentais, dos dados numéricos e das diferenças entre ambos.

Tabela 6.2 – Diferença entre os níveis sonoros medidos e simulados para o modelo validado do Piso do Gerador da PA IV.

Measured versus simulated: SPL(A) (dB)			
Receiver	Measured	Simulated	Difference
1	87,1	87,6	-0,5
2	87,2	87,7	-0,5
3	87,2	87,8	-0,6
4	87,6	87,7	-0,1
5	87,3	87,8	-0,5
6	87,7	87,8	-0,1
7	88,1	87,9	0,2
8	88,1	88,0	0,1
9	87,5	87,7	-0,2
10	87,6	87,5	0,1
11	88,0	87,5	0,5
12	88,1	87,7	0,4
13	88,2	89,4	-1,2
14	88,8	89,3	-0,5
15	88,1	87,9	0,2
16	88,1	88,0	0,1
17	87,9	88,4	-0,5
18	87,9	88,5	-0,6
19	88,1	87,8	0,3
20	87,6	87,9	-0,3
21	87,3	87,5	-0,2
22	87,6	87,7	-0,1
23	87,7	87,9	-0,2
24	87,6	87,8	-0,2
25	87,8	87,9	-0,1
26	88,2	87,8	0,4
27	87,8	87,7	0,1
28	87,9	87,8	0,1
29	87,7	87,7	0,0
30	87,4	87,6	-0,2
31	87,6	87,7	-0,1
32	88,5	87,8	0,7
33	88,1	87,8	0,3
34	88,1	87,7	0,4
35	87,9	87,8	0,1
36	89,1	87,8	1,3
37	88,1	88,3	-0,2
38	88,2	88,2	0,0
39	87,7	87,7	0,0
40	87,7	88,2	-0,5
41	88,0	88,2	-0,2
42	88,4	87,6	0,8
43	88,3	88,9	-0,6
44	87,8	89,7	-1,9
45	87,2	87,7	-0,5
46	87,2	87,4	-0,2
47	88,1	87,6	0,5
48	87,3	87,7	-0,4
49	87,0	87,2	-0,2
50	87,0	87,0	0,0
51	87,9	87,0	0,9
52	87,2	87,1	0,1
53	87,7	87,2	0,5
54	87,2	87,0	0,2
55	88,2	87,1	1,1
Average	87,8	87,8	0,0

A Fig. 6.5 apresenta os níveis sonoros do Piso do Gerador da PA IV em função das posições de medições do modelo experimental, preliminar e validado. Neste Gráfico e na Tab. 6.1 é possível verificar a evolução do procedimento de validação para este ambiente, onde a máxima diferença foi de -1,9 dBA no microfone 44 para o modelo validado.

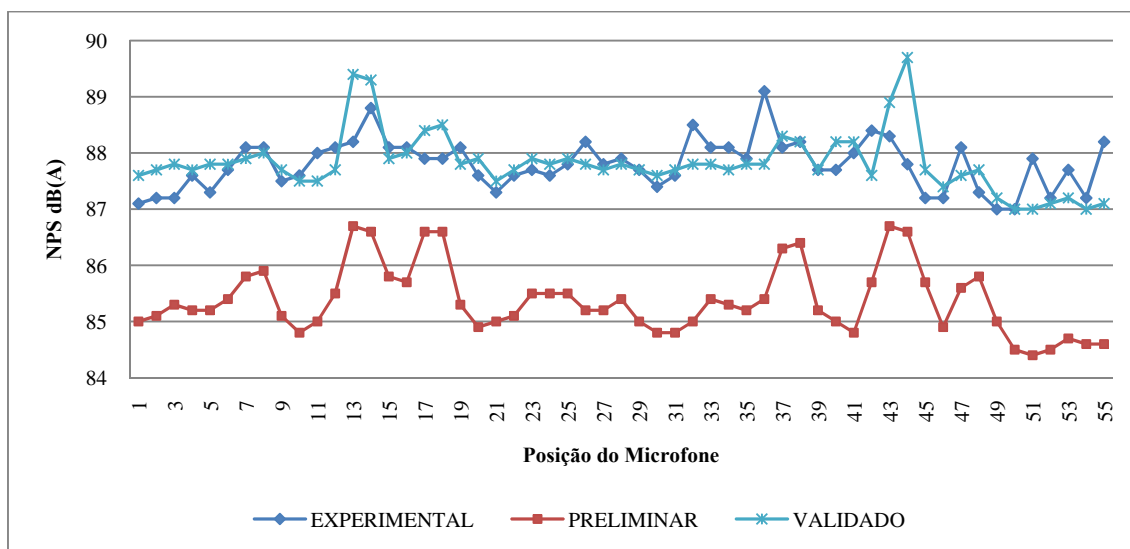


Figura 6.5 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: dados do modelo experimental, do modelo preliminar e do modelo validado.

A Fig. 6.6 exhibe os valores da diferença do experimental com o preliminar e do experimental com o validado, onde é claramente notado que a maioria dos pontos do modelo preliminar ficam acima de 2 dBA e alguns acima de 3 dBA, por outro lado, o modelo validado, na maioria dos pontos fica dentro de ± 1 dBA.

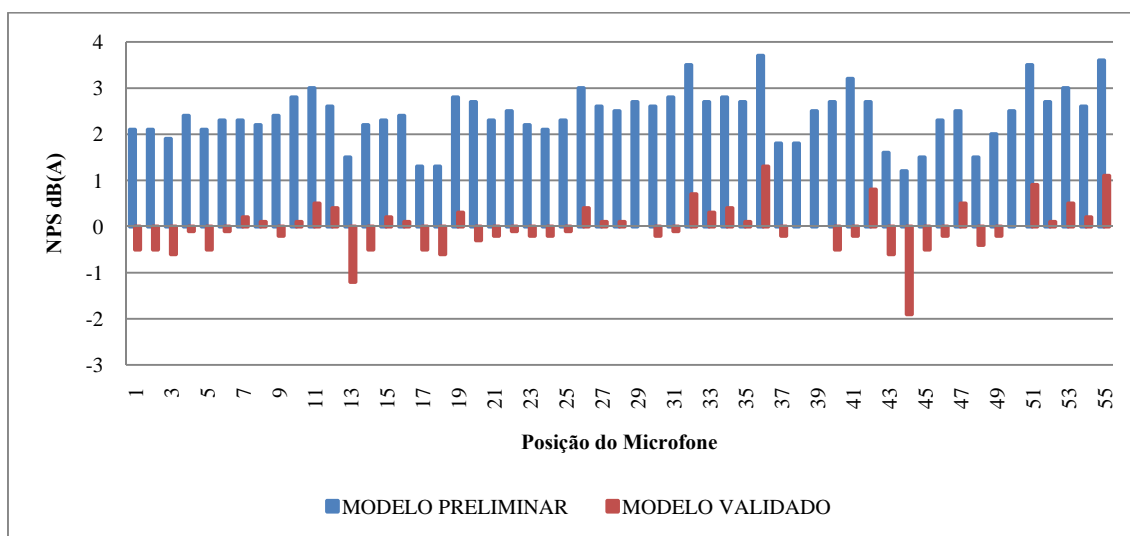


Figura 6.6 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado.

6.1.2 Modelagem Acústica do Piso da *Air Housing* da PA IV

6.1.2.1 Modelo Preliminar

Na PA IV o piso da *Air Housing*, assim como o piso da Turbina, é bastante complexo, tanto em relação as suas formas geométricas (ambientes longos, de pouca altura e labirínticos), quanto aos equipamentos em seus interiores.

Pela carência de informações das dimensões dos pilares e das vigas da estrutura de sustentação, de alguns painéis de controle e dos dutos dos barramentos e, principalmente, pela necessidade de simplificação, o modelo geométrico do piso da *Air Housing* da PA IV, não levou em conta tais estruturas. Por outro lado, no modelo geométrico foram consideradas as principais características do modelo real, como as dimensões de comprimento, largura e altura, painéis de controle e cubículos de medição/proteção/controlado. Frisa-se que não foi considerada nenhuma abertura para este ambiente também.

Uma das grandes dificuldades nesta modelagem foram as considerações para a área do *hall* de montagem, a qual fica no nível do piso da *Air Housing*, no entanto, não tem a parte do piso do Gerador, tendo contribuição das fontes sonoras destes dois pisos, como pode ser visto na Fig. 6.7.



Figura 6.7 – Vista, a partir do piso do Gerador, da área do *Hall* de montagem do piso da *Air Housing*.

Assim, como no caso do piso do Gerador, o modelo geométrico do piso da *Air Housing* também levou em conta a área do *hall* de montagem, no entanto, o teto nesta região foi considerado totalmente fechado como apresentado na Fig. 6.9.

Como esta área recebe forte influência das fontes situadas em dois pisos da PA IV (piso do Gerador e Piso da *Air Housing*), os dados de medição de NPS desta área não foram utilizados para validação dos modelos.

Na Fig. 6.8 são emparelhadas as imagens do ambiente real e do modelo geométrico preliminar, de um ponto de vista aproximadamente igual.

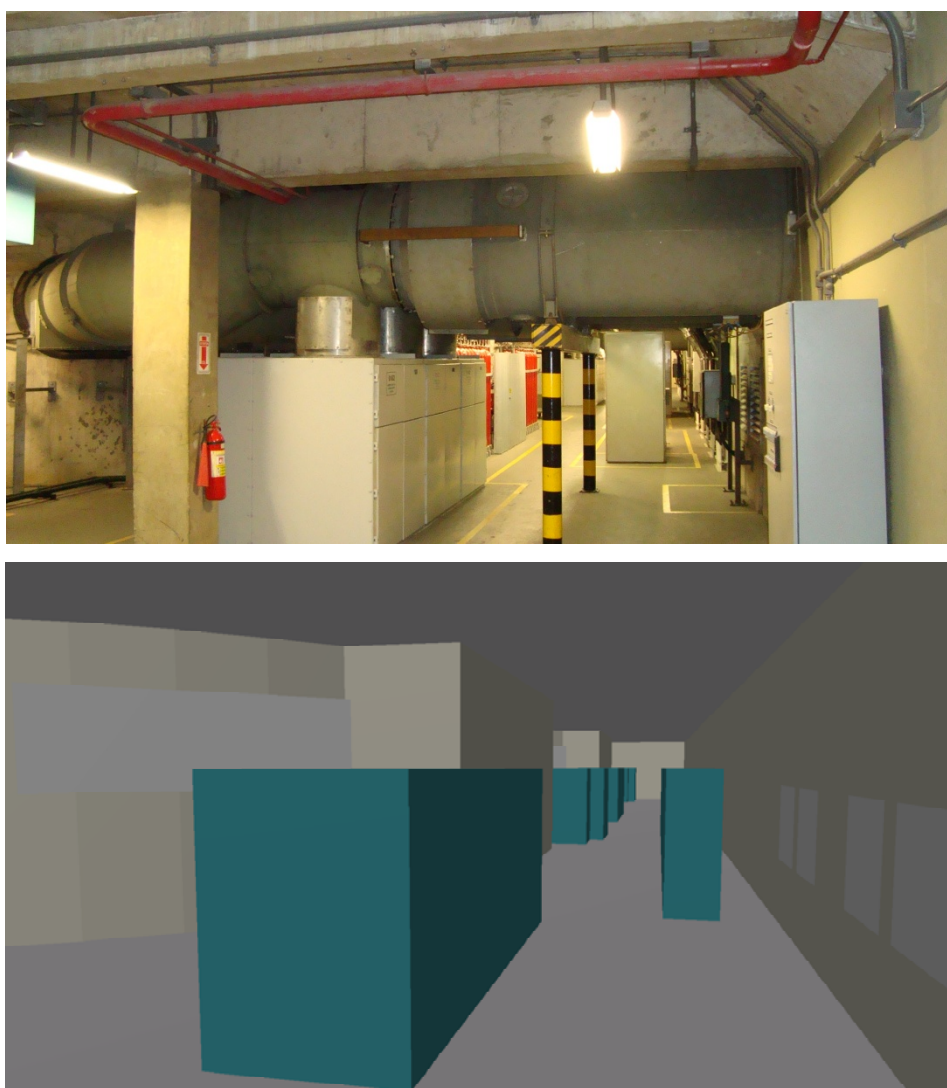


Figura 6.8 – Área do duto do barramento no ambiente real e no modelo geométrico preliminar.

Neste modelo foram consideradas como principais fontes apenas uma porta de acesso de cada *Air Housing* e foram definidos, aproximadamente nas mesmas posições das medições de NPS, 157 microfones, como visualizado na Fig. 6.9.

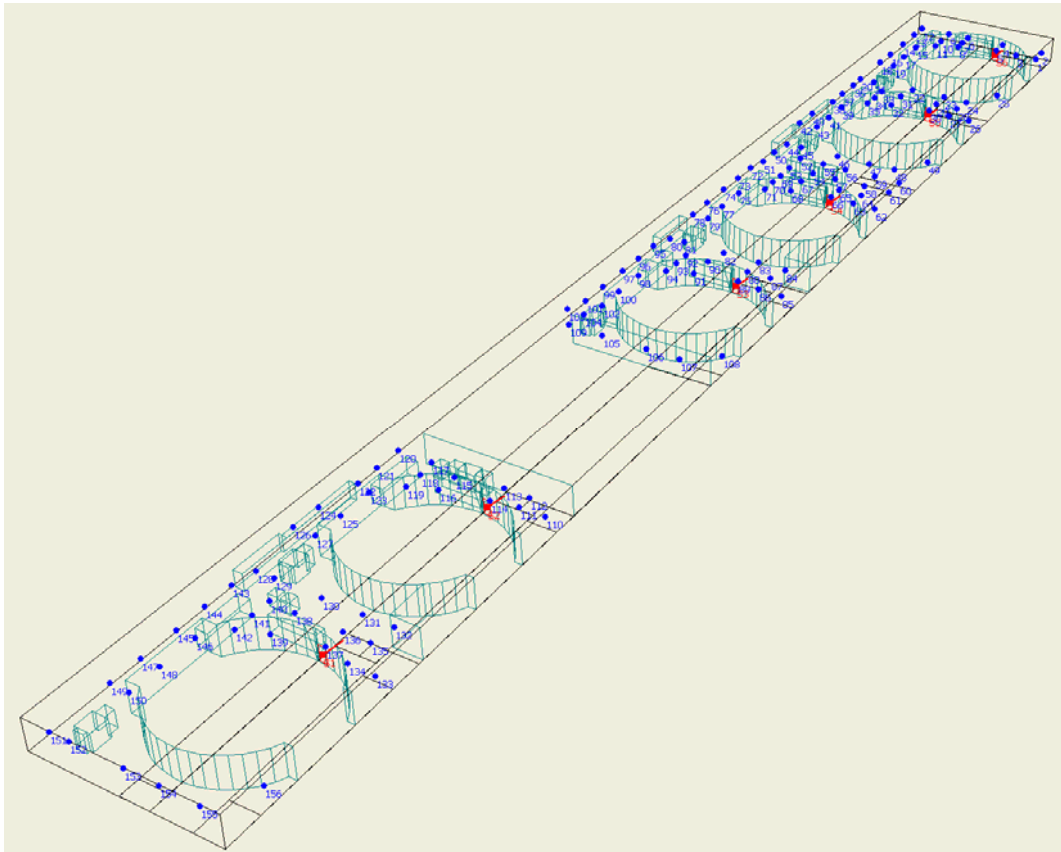


Figura 6.9 – Modelo geométrico do Piso do Gerador da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones em azul.

A Fig. 6.10 apresenta a comparação entre os resultados de NPS medidos e obtidos através do modelo preliminar. Nesta figura, é possível notar tendências contrárias dos valores medidos e simulados, o que ocorre devido a não terem sido levadas em conta outras fontes sonoras que também são bastante influentes neste campo acústico.

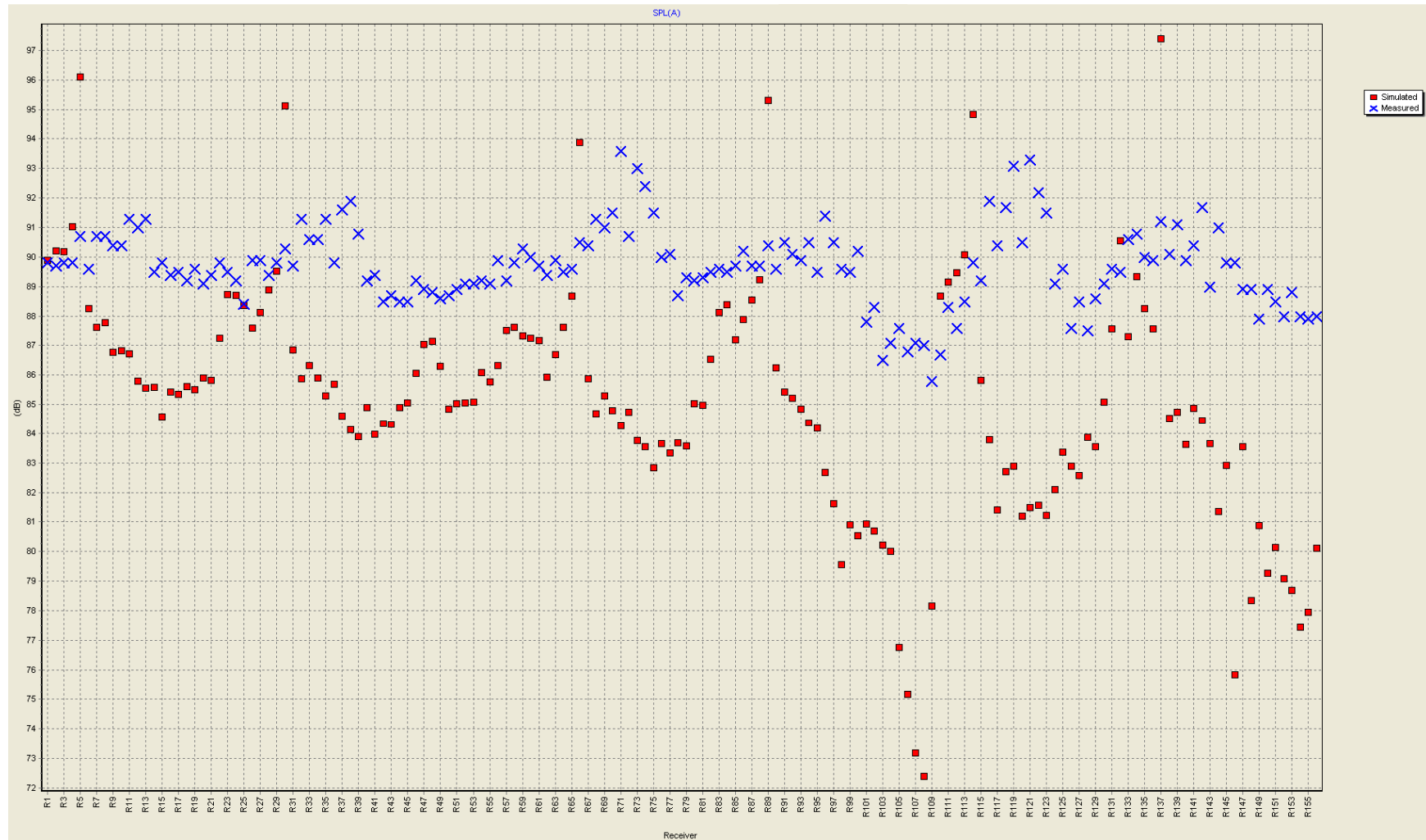


Figura 6.10 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo preliminar (■).

Por exemplo, foi notado através de visitas de reconhecimento pela equipe do projeto de pesquisa, que, por medidas de segurança, as *Air Housings* possuem duas portas diametralmente opostas (ver Fig. 6.11) sendo que no modelo preliminar foi atribuída apenas uma em cada *Air Housing*. Ocorre também que a região por onde saem os barramentos das *Air Housings* (ver Fig. 6.8) existe uma vedação ineficiente, permitindo a passagem do ar e, conseqüentemente, de energia sonora com níveis intensos do interior para o exterior da *Air Housing*, como pode ser constatado nos dados experimentais da Fig. 6.10 (posições de microfones R13, R38, R71, R96, R121 e R142).

Além disso, os exaustores (ver Fig. 6.12) também contribuem com elevados níveis de ruído. Quanto aos altos níveis sonoros obtidos nos microfones R5, R30, R66, R89, R114 e R137 do modelo numérico, recomenda-se a não consideração dos mesmos na etapa de análise dos resultados, uma vez que se encontram em frente às portas definidas no modelo numérico como as principais fontes sonoras do modelo, por não tenderem a representar a realidade, pelo fato da fonte plana definida para a porta no modelo, lançando raios acústicos em todas as direções de pontos discretizados ao longo de sua área, não ter a diretividade da porta da *Air Housing* real, a qual tem maior parte da energia sonora emitida pelas bordas.

A Fig. 6.13 apresenta os níveis de potência sonora da porta fechada da *Air Housing* da unidade 04G1 e de um dos exaustores da unidade 04G2, onde pode ser observado que, em médias e altas frequências, o nível de potência sonora do exaustor é bastante intenso, com valores próximos aos da porta, contribuindo para o campo sonoro do ambiente.



Figura 6.11 – Portas de acesso ao interior da *Air Housing* da unidade geradora 04G2, construídas diametralmente opostas.



Figura 6.12 – Exaustores próximos à unidade geradora 04G2.

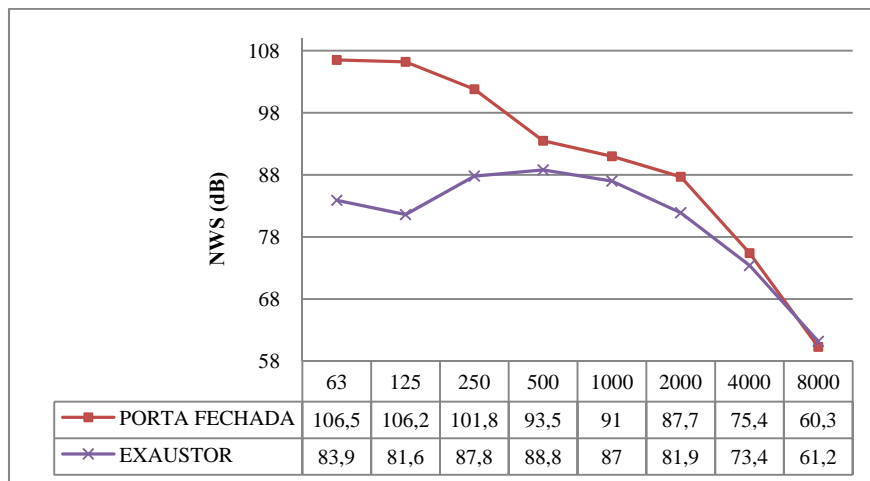


Figura 6.13 – NWS da porta da *Air Housing* 04G1 fechada e exaustor próximo à unidade geradora 04G2.

6.1.2.2 Modelo Validado

No modelo validado referente ao Piso da *Air Housing*, manteve-se o modelo geométrico na versão preliminar, sendo adicionada em cada *Air Housings* a segunda porta, as fontes nas áreas do barramento e as fontes dos exaustores. Além disso, foram retirados os microfones em frente às portas das *Air Housings*, os quais divergiam em relação às outras posições de microfones, provavelmente por estarem captando energia com altas amplitudes de uma fonte sonora com directividade diferente da fonte sonora real.

Na área do barramento, não foi possível a medição de nível de potência sonora, devido ser esta uma região com geometria complexa, com os dutos saindo de uma parede com curvatura (ver Fig. 6.14) e possuir no interior dos dutos os barramentos que transportam elevados níveis de corrente e tensão elétrica, a saber, corrente nominal de 14.626 A e tensão entre fases de 18.000 V, proporcionando condições adversas às medições e riscos de acidentes ao equipamento e, principalmente, aos responsáveis pelas medições, já que é necessário o manuseio do equipamento próximo à fonte, para a determinação da potência sonora.



Figura 6.14 – Área de saída do barramento da *Air Housing* da unidade geradora 04G1: ambiente adverso para medições de nível de potência sonora.

Diante destas dificuldades, foram atribuídas ao modelo fontes planas, aproximadamente com a mesma área equivalente dos dutos do barramento (ver Fig.

6.15) e neles atribuído o nível de potência sonora da porta da *Air Housing*, na condição fechada.

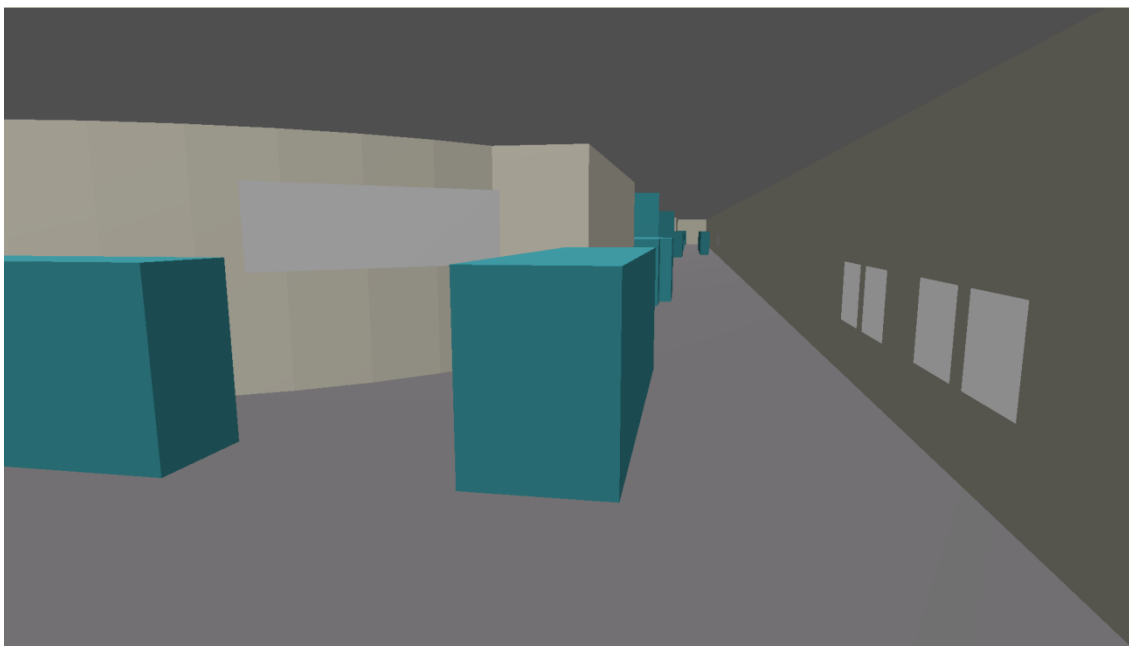


Figura 6.15 – Fonte sonora plana (área clara do lado esquerdo) definida no Odeon, representando a área de saída do barramento da *Air Housing*, e fontes planas referentes aos exaustores (áreas claras no lado direito).

As fontes dos exaustores foram também implementadas no modelo como fontes planas (ver Fig. 6.15), adicionadas na parede do ambiente do piso da *Air Housing* do modelo numérico, aproximadamente nas mesmas posições dos exaustores do ambiente real. Além disso, do nível de potência sonora de todas as portas e das áreas do barramento da 04G1, 04G3, 04G4 e 04G6 foi subtraído o valor de 1,5 dB, a fim de melhor ajustar o modelo. No caso da 04G2, foi necessário um incremento de 3 dB, e para a 04G4 um incremento de 2,5 dB no NWS.

O modelo validado do Piso da *Air Housing* da PA IV pode ser visualizado na Fig. 6.16, onde é apresentada a configuração das fontes e dos microfones.

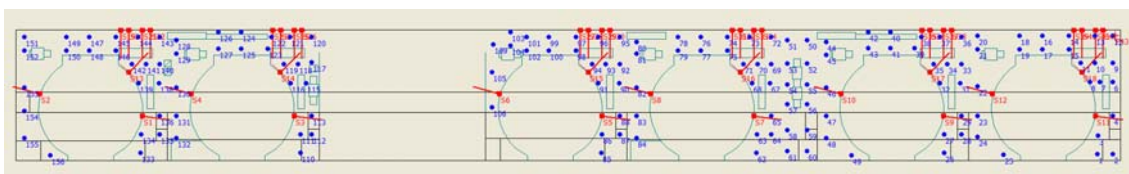


Figura 6.16 – Configuração do modelo validado do Piso da *Air Housing* da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones, em azul.

Além dessas mudanças, devido à grande variedade de obstáculos e irregularidades observadas neste ambiente, utilizou-se um coeficiente de espalhamento de 0,3 em todas as paredes, correspondendo no Odeon a um maior grau de difusão sonora para os raios que incidem nestas superfícies.

A Fig. 6.17 apresenta a nova comparação entre os resultados experimentais e numéricos, a partir da utilização do modelo validado.

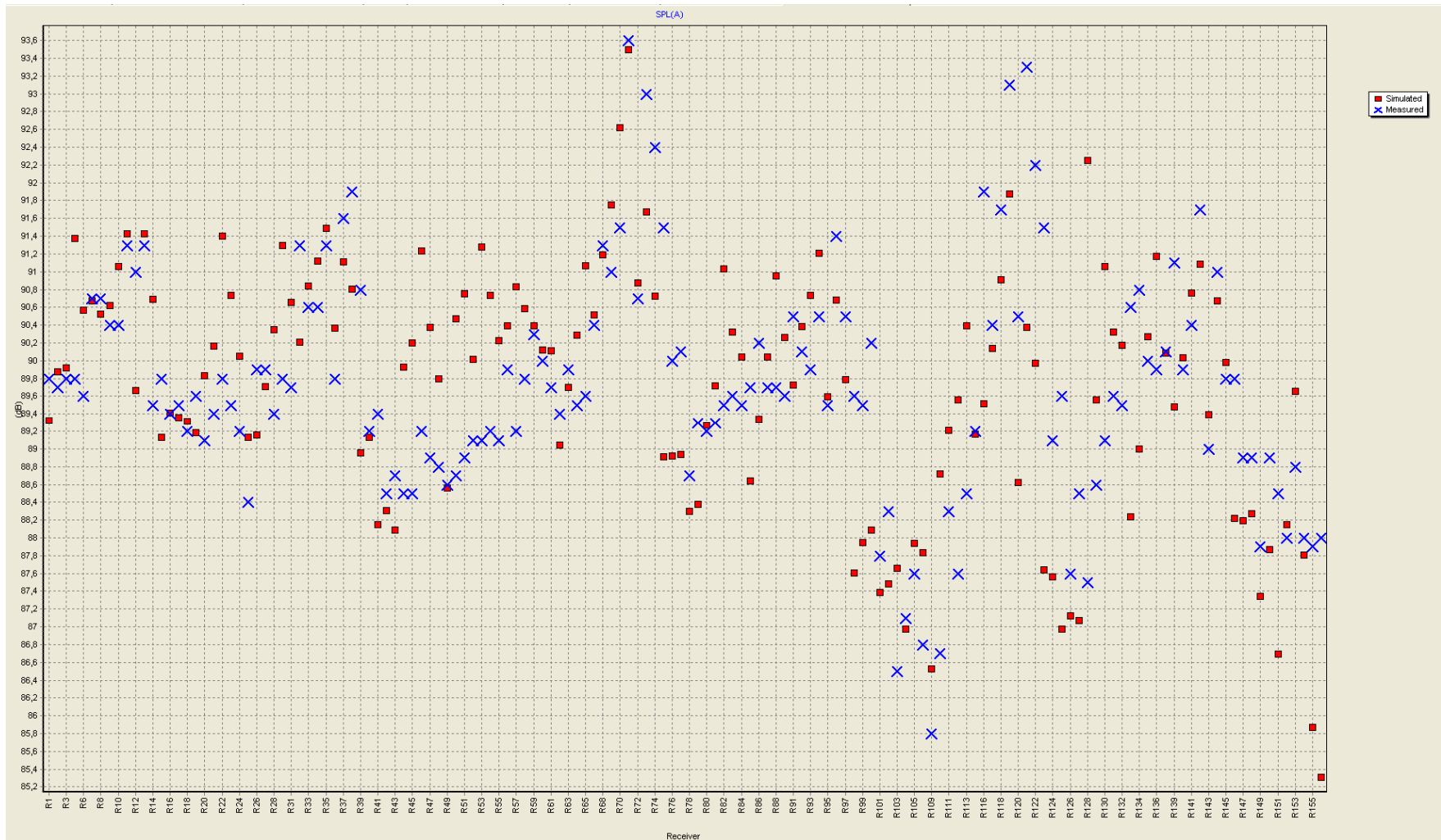


Figura 6.17 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo validado (■).

Uma comparação entre as Figuras 6.10 e 6.17 permite observar a evolução do modelo validado em relação ao modelo preliminar do Piso da *Air Housing*, mesmo com tantas dificuldades impostas, proporcionando para a grande maioria dos pontos de medição uma concordância dentro de ± 2 dBA.

Nas Figuras 6.18 a 6.21 são apresentados os resultados das diferenças entre os níveis sonoros, com os resultados experimentais como referência, evidenciando o avanço obtido para a maioria dos pontos de microfone considerados no modelo validado.

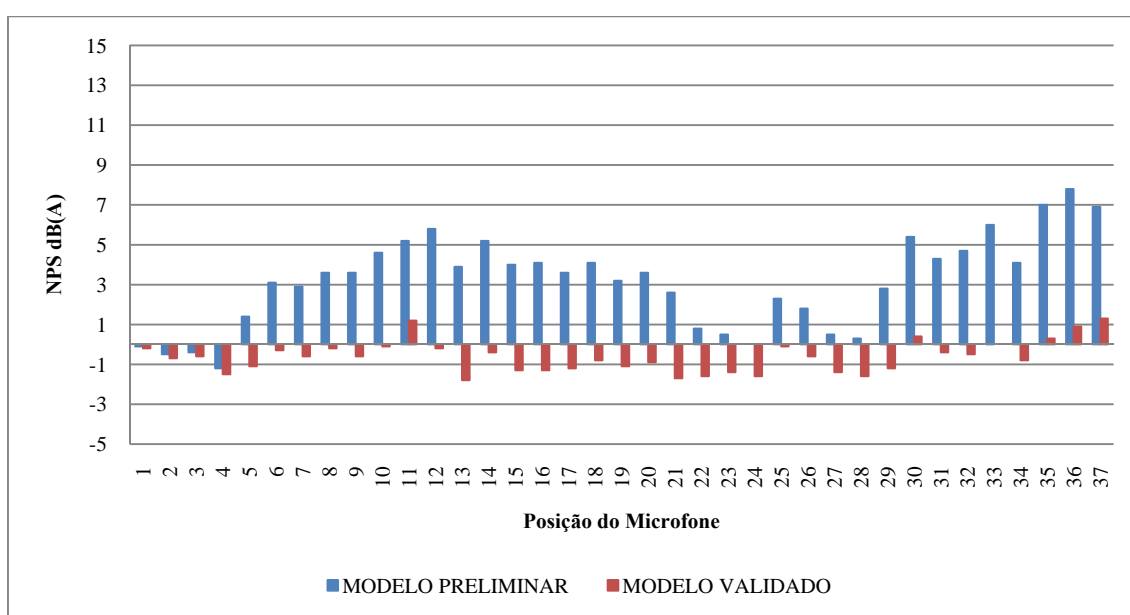


Figura 6.18 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da *Air Housing* da PA IV: resultados das posições de microfones 1 a 37.

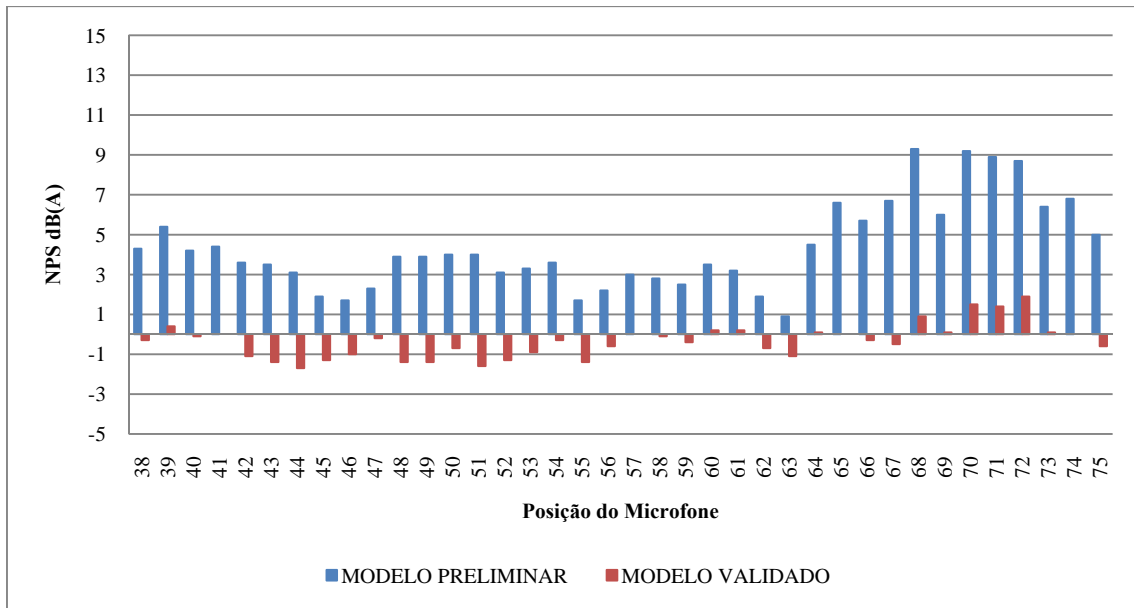


Figura 6.19 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da *Air Housing* da PA IV: resultados das posições de microfones 38 a 75.

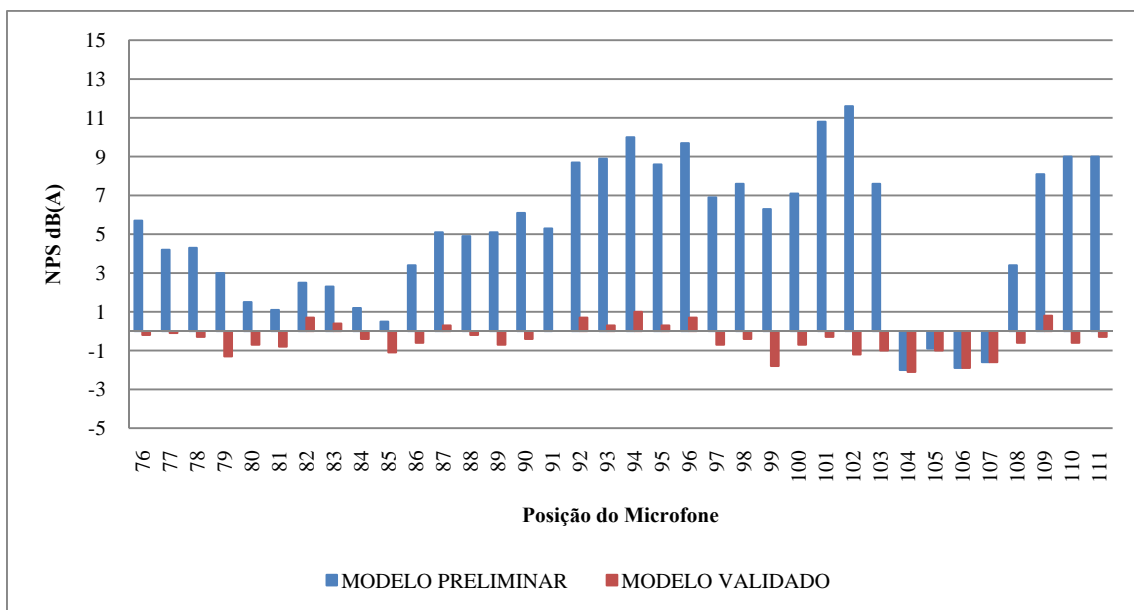


Figura 6.20 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da *Air Housing* da PA IV: resultados das posições de microfones 76 a 111.

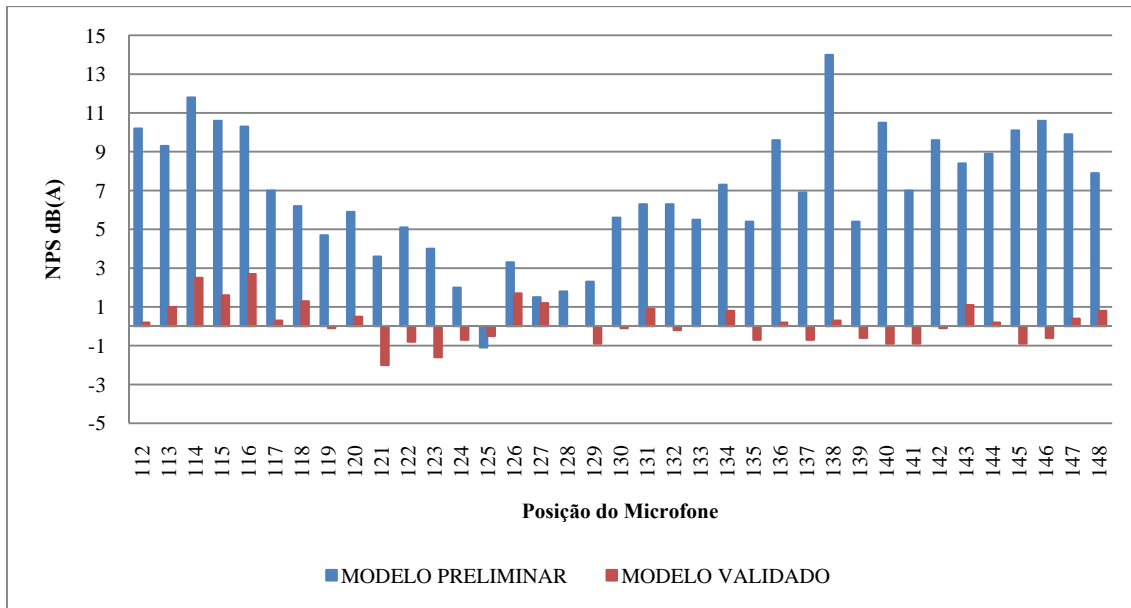


Figura 6.21 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da *Air Housing* da PA IV: resultados das posições de microfones 112 a 148.

6.1.3 Modelagem Acústica do Piso da Turbina da PA IV

6.1.3.1 Modelo Preliminar

O modelo geométrico do piso da Turbina leva em conta as superfícies curvas das paredes dos poços das Turbinas, tanques de óleo dos mancais, entrada para o poço da turbina, galeria dos dutos de resfriamento e filtros gerais de resfriamento; por outro lado, não se leva em conta o corredor de entrada do poço da turbina, a galeria de cabos, a grade da vala dos dutos de resfriamento, os dutos de resfriamento na vala, e as vigas e pilares de sustentação da estrutura. A Fig. 6.22 apresenta uma comparação do modelo geométrico com o ambiente real.

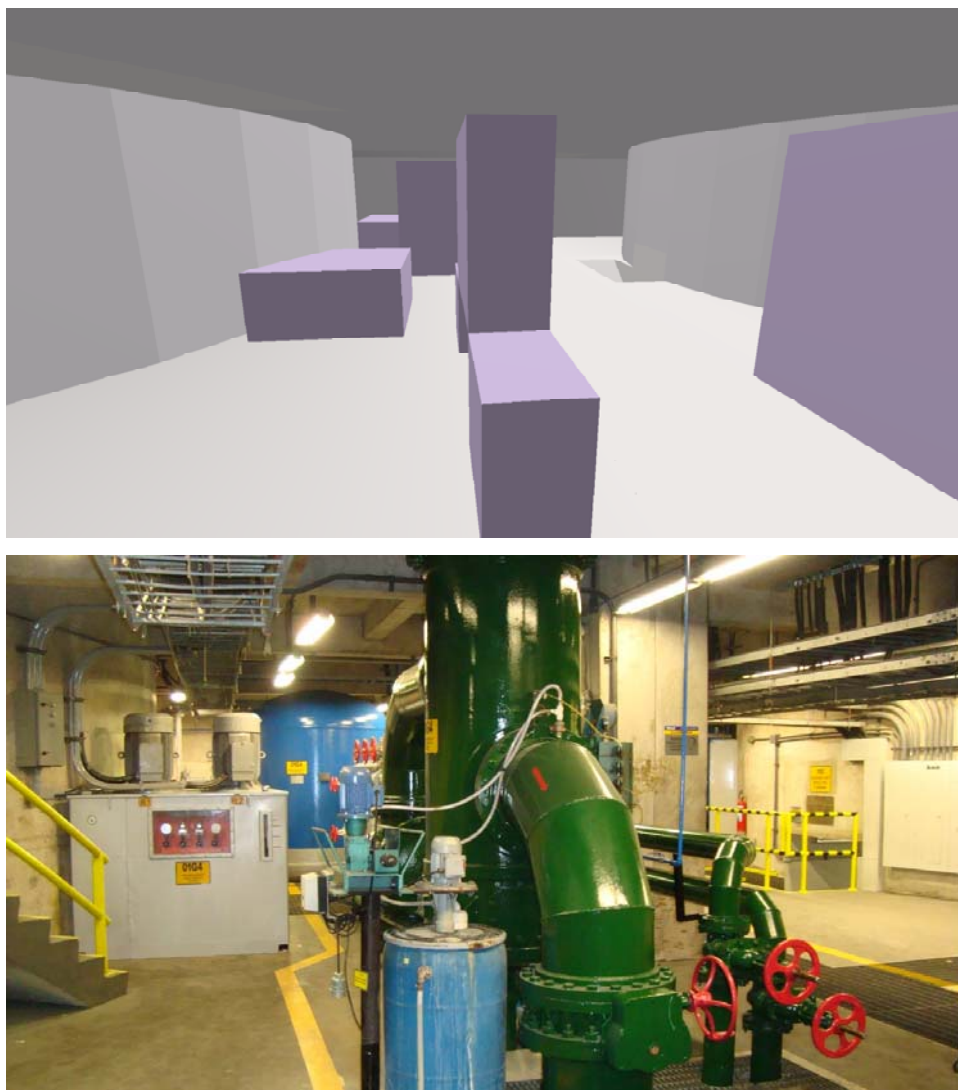


Figura 6.22 – Modelo geométrico e ambiente real do Piso da Turbina da PA IV, vistos, aproximadamente, de uma mesma posição.

Após ser importado para o *software* Odeon, o modelo geométrico recebeu as propriedades de absorção sonora das superfícies, as fontes planas referentes às portas nas entradas dos corredores dos poços das turbinas e foram definidos 152 microfones virtuais, aproximadamente nas mesmas posições de medição. Tal modelo preliminar pode ser visualizado na Fig. 6.23.

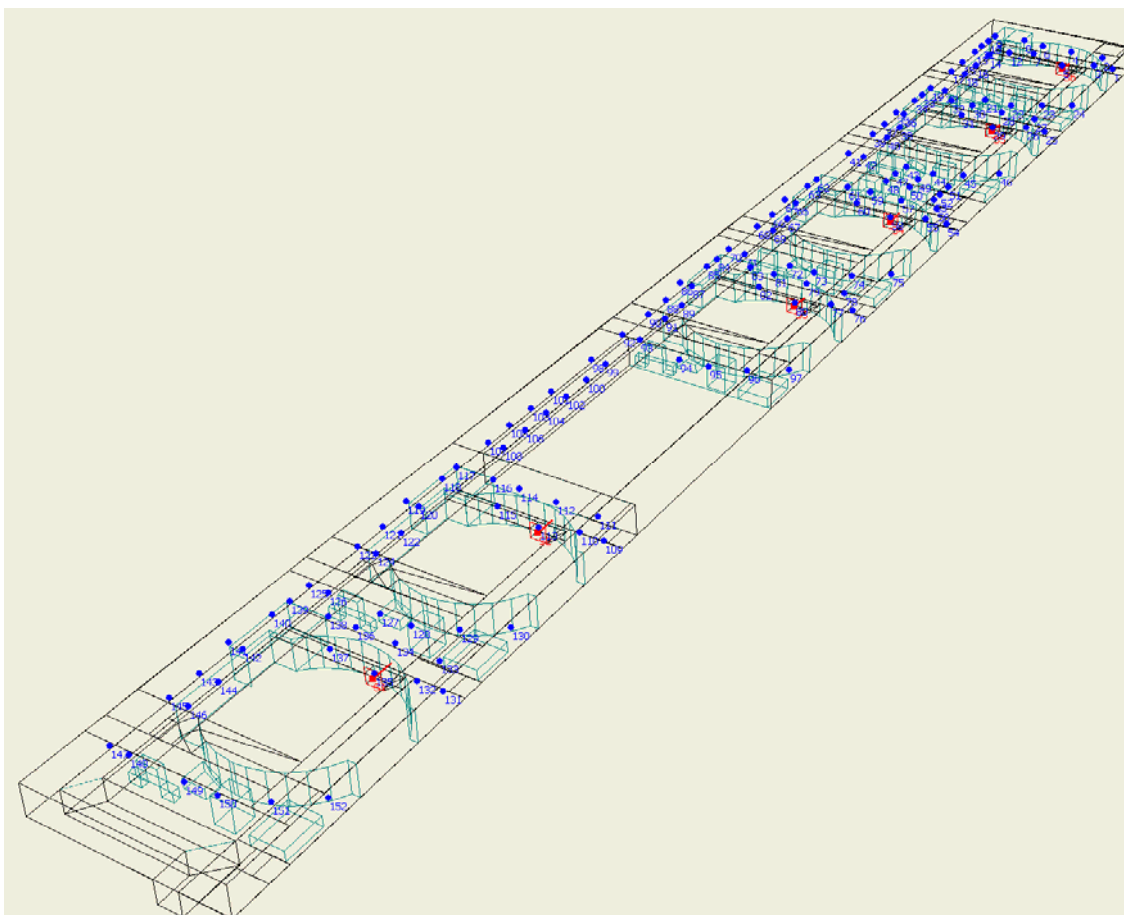


Figura 6.23 – Modelo preliminar do Piso da Turbina da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfone, em azul.

Os resultados de níveis sonoros obtidos neste modelo preliminar, em relação aos dados experimentais, atribuindo-se apenas as fontes sonoras nas portas de acesso aos poços das turbinas, mostraram-se robustos, ao serem capazes de reproduzir a tendência global dos resultados experimentais, como pode ser observado na Fig. 6.24. No entanto, os níveis sonoros neste modelo estão abaixo dos níveis medidos, evidenciando a necessidade de ajustes.

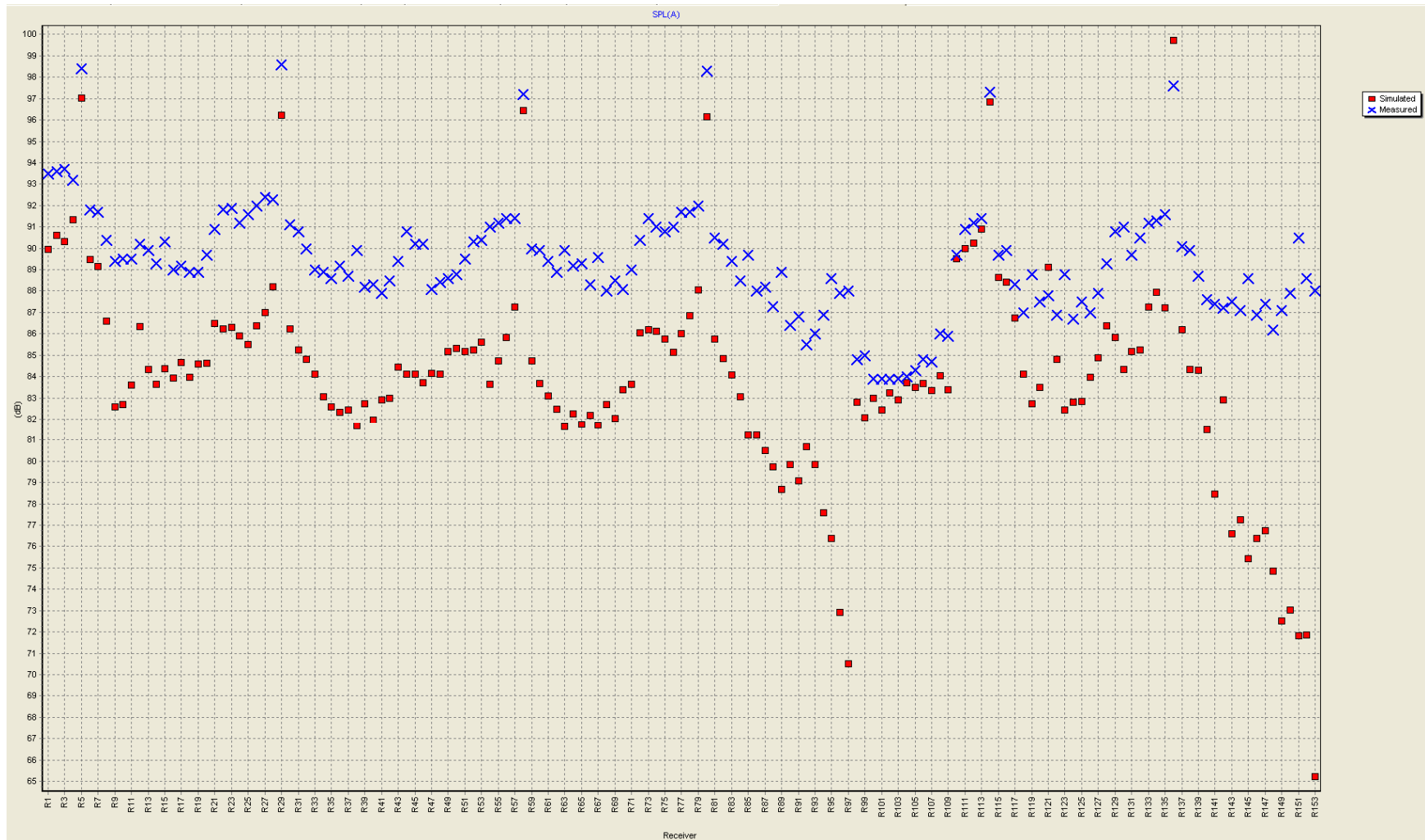


Figura 6.24 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo preliminar (■).

Na Fig. 6.24 pode-se observar que os níveis de pressão sonora simulados subestimaram os valores experimentais na grande maioria das posições de microfones, com exceção do microfone 136 em frente à porta do poço da turbina da unidade 04G1. Isso acontece devido a serem consideradas nesta simulação apenas as portas do poço das turbinas como principais fontes sonoras. No entanto, existem contribuições de outras fontes, como a abertura no poço das turbinas e máquinas auxiliares. Mas, já para esse modelo preliminar, nos pontos de 99 até 117, pontos próximos à porta do poço da turbina 04G2, a comparação entre os resultados apresentou um bom grau de concordância.

6.1.3.2 Modelo Validado

Na versão validada do modelo desenvolvido para o Piso da Turbina da PA IV, buscou-se melhorar os modelos iniciais, a partir da introdução de mais uma fonte sonora. Portanto, em todas as unidades, na área de saída dos dutos de óleo lubrificante dos mancais das turbinas (ver Fig. 6.25), a qual é uma abertura oposta à porta do poço da turbina, adicionou-se uma fonte plana com o nível de potência sonora da porta do poço da turbina. Adicionalmente, reduziu-se o valor de coeficiente de absorção sonora dos painéis de controle no entorno das salas das turbinas, introduziu-se um pequeno acréscimo de 1 dB nos níveis de potência sonora das fontes sonoras correspondentes às portas do poço da turbina de todas unidades e aplicou-se um coeficiente de absorção sonora de 30% nas superfícies do entorno das posições dos microfones 98 a 109, visando adequar os valores de nível de pressão sonora nestas posições.

Além disso, foi notado que, localmente, os motores dos tanques de óleo são fontes que se destacam no nível de energia sonora do ambiente e, diante disso, a fonte sonora dos motores dos tanques de óleo dos mancais foram definidos como fonte planas com nível de potência sonora apresentado na Tab. 5.2.

A Fig. 6.26 apresenta a configuração das fontes (em vermelho) e dos microfones (em azul) definidos no modelo validado do piso da Turbina da PA IV.

Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6.27.



Figura 6.25 – Área dos dutos de transporte de óleo dos mancais: área de saída de energia sonora com nível intenso.

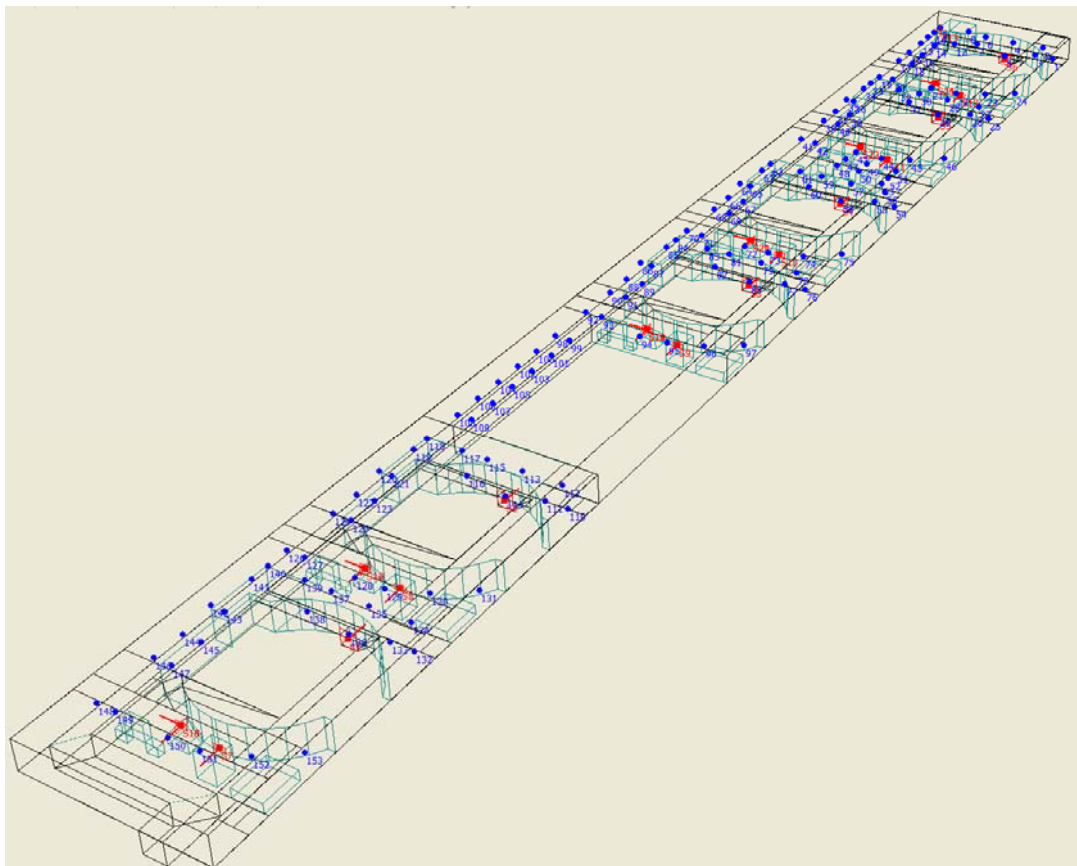


Figura 6.26 – Modelo validado do Piso da Turbina da PA IV, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfone, em azul.

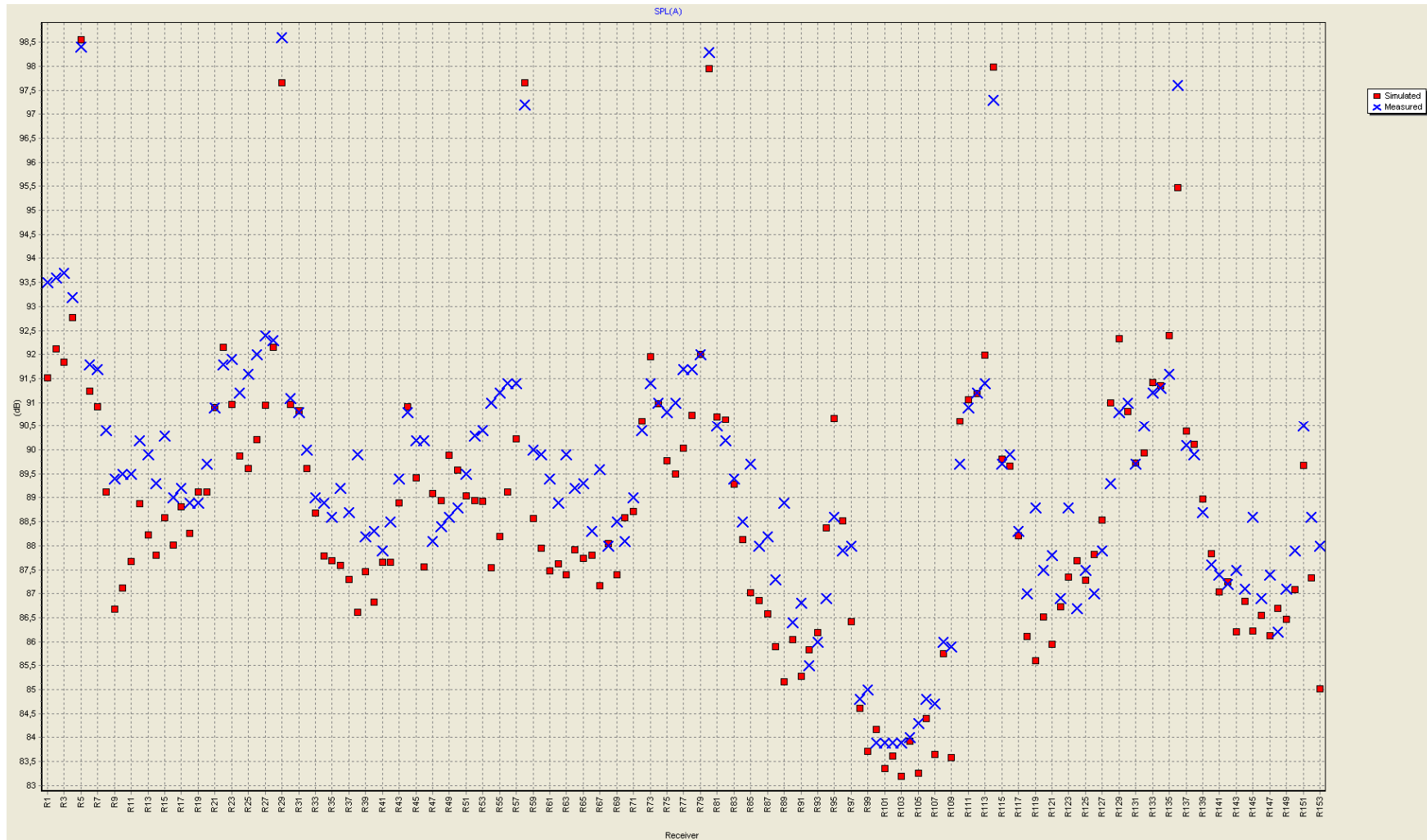


Figura 6.27 – NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: dados experimentais (X) e resultados numéricos do modelo validado (■).

Na Fig. 6.27, observa-se que uma boa concordância de resultados pode ser obtida entre medição e simulação, a partir da versão validada do modelo. As Figuras 6.28 até 6.31 quantificam os avanços alcançados a partir do desenvolvimento do modelo para o Piso da Turbina da PA IV, representando os resultados obtidos, na forma de diferenças entre níveis sonoros, tomando os resultados experimentais como parâmetro de referência, possibilitando visualizar a clara melhoria alcançada a partir do modelo numérico preliminar até o validado.

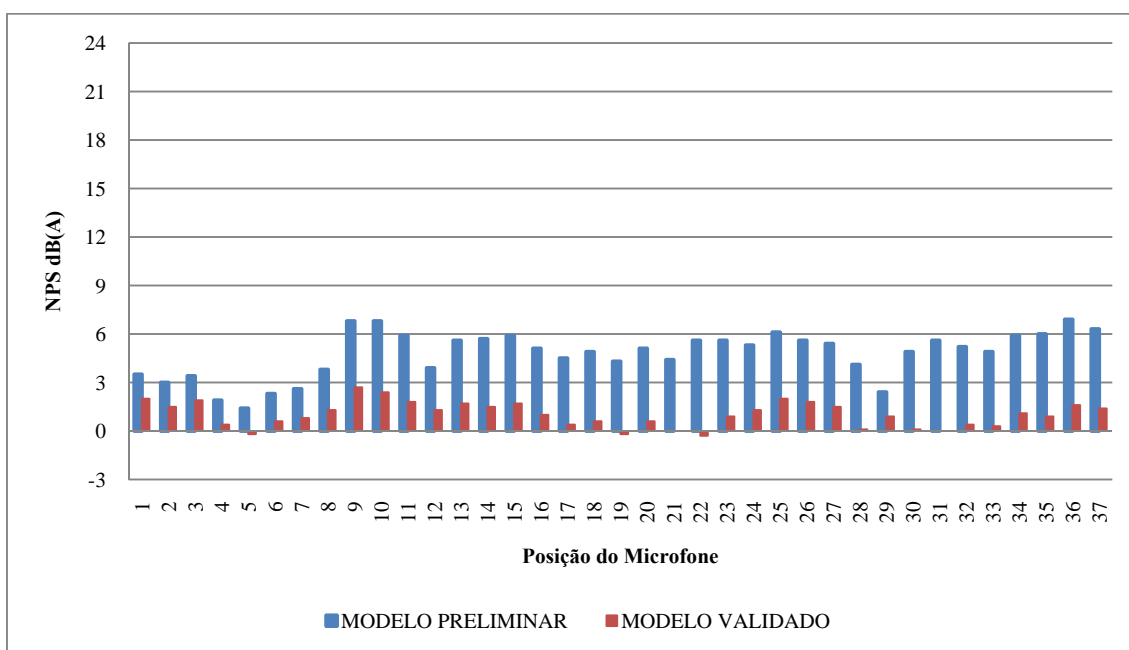


Figura 6.28 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 1 a 37.

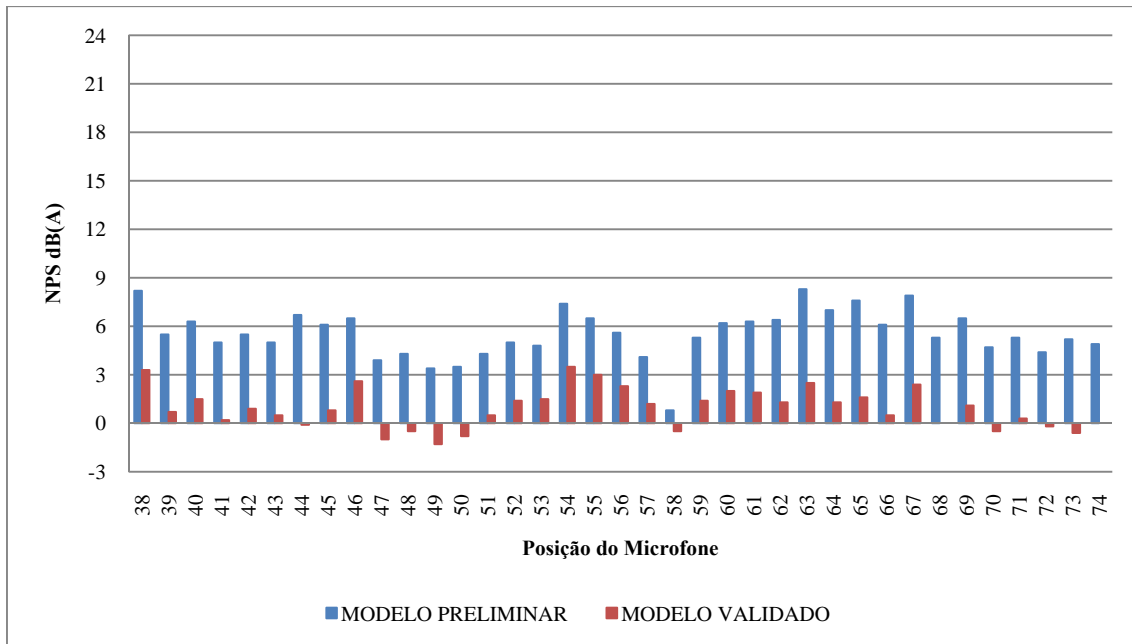


Figura 6.29 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 38 a 74.

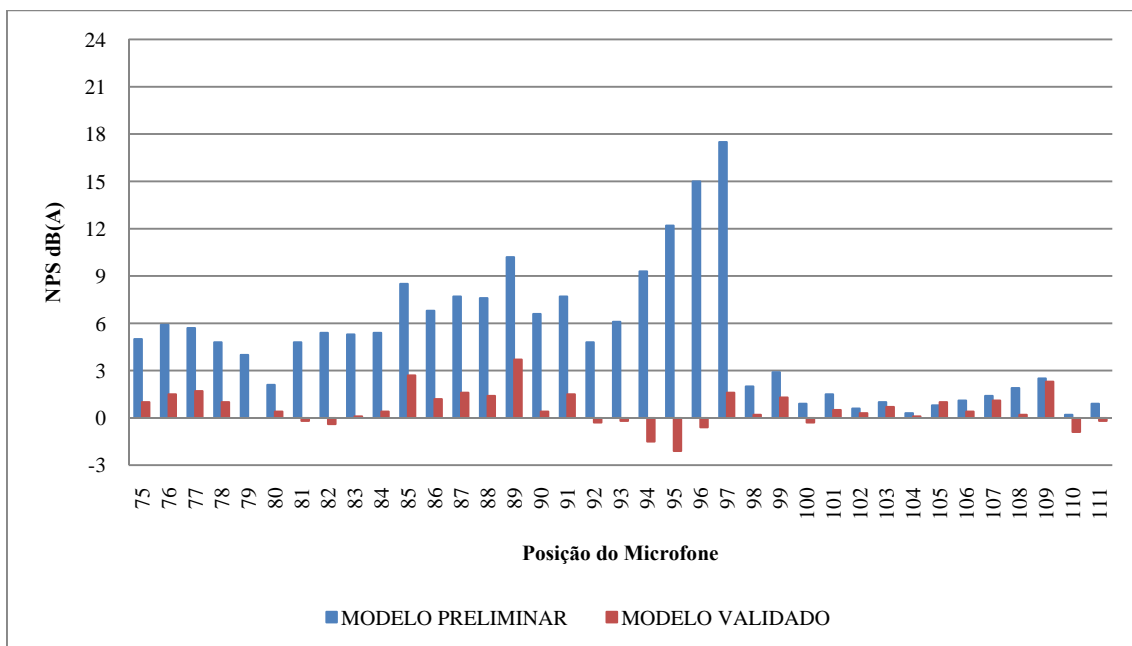


Figura 6.30 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 75 a 111.

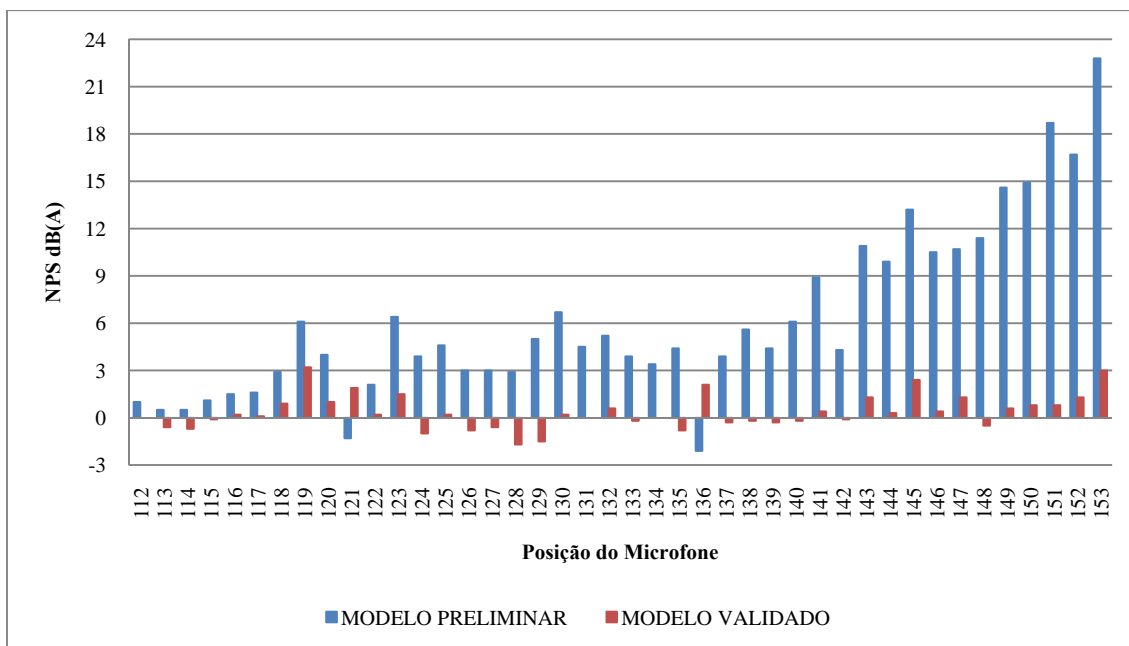


Figura 6.31 – Diferença de nível sonoro dos modelos preliminar e validado, desenvolvidos para o Piso da Turbina da PA IV: resultados das posições de microfones 112 a 153.

6.2 MEDIDAS DE CONTROLE DE RUÍDO VIRTUAIS NA USINA DE PAULO AFONSO IV

Controle de ruído é uma atividade direcionada para a modificação de um campo acústico, de tal forma a se adequar este último aos objetivos preestabelecidos para o ambiente considerado, não implicando necessariamente na redução ou limitação do som (E. & F. N. Spon, 2004). No entanto, existem também medidas de controle de ruído que necessariamente não modificam o campo acústico.

Deve-se, através de medidas tomadas com base nos conhecimentos de acústica e do processo industrial, tentar-se alcançar um objetivo definido, que muitas vezes não tem a finalidade de redução de ruído e sim a prevenção da audição das pessoas expostas.

Por exemplo, seja pelo alto custo envolvido ou pela impossibilidade técnica de serem feitas modificações em uma máquina que irradia elevados níveis de ruído, pode-se optar pela contratação de pessoas já com deficiência auditiva para cumprir as funções de uma pessoa saudável neste ambiente.

De uma forma geral, o controle de ruído pode ser executado tomando-se as seguintes medidas:

- Controle de Ruído na Fonte;

- Controle de Ruído na Trajetória; e
- Controle de Ruído no Receptor.

A fonte de qualquer excitação sonora é normalmente identificada como o ponto de origem do ruído e, portanto, qualquer redução da potência sonora desta fonte é percebida por todas as pessoas expostas. Por isso, como regra prática, a primeira prioridade nas medidas de conservação da audição é o controle de ruído na fonte. Se tal medida for impraticável, parte-se para o controle de ruído na trajetória do som, mas isso raramente tem tanto rendimento quanto o tratamento na fonte, e em determinadas circunstâncias pode proporcionar mais dificuldades; por exemplo, uma barreira entre uma fonte e um receptor pode controlar eficazmente a transmissão primária, mas o som refletido pode causar o reforço do campo sonoro em algum outro ponto.

O receptor é identificado como o ocupante do local, que é mais gravemente afetado por qualquer ruído. Quando todas as medidas de controle de ruído falham, deve-se considerar a proteção individual. No entanto, frisa-se que se recorre ao controle individual somente em casos extremos e nunca como primeira ou única medida de controle de ruído.

As principais soluções de controle de ruído na fonte, na trajetória e no receptor estão listadas abaixo:

- Soluções na fonte:
 - Especificação dos níveis máximos permitidos para equipamentos e processos industriais ainda na fase de compra;
 - Predição dos níveis de pressão sonora, a partir dos níveis de potência sonora das fontes a serem instaladas em plantas novas e na expansão das plantas antigas;
 - Substituição das máquinas, equipamentos e processos industriais usando sistemas mais silenciosos;
 - Modificação, na fonte, que envolve: redução das forças dinâmicas, balanceamento dinâmico, isolamento e controle de vibração, uso de amortecimento, modificação da distribuição das massas e rigidezes para evitar ressonâncias, redução da velocidade de fluidos e turbulência e redução de áreas de superfícies vibrantes.
- Soluções na trajetória:
 - Enclausuramento;

- Barreiras acústicas;
- Absorção e/ou isolamento acústico;
- Silenciadores;
- Isolamento de vibração e choque.
- Soluções no Receptor:
 - Uso de cabine de proteção;
 - Uso de protetores auditivos, até que ações sejam tomadas para redução do ruído;
 - Uso de indivíduos surdos nas áreas com elevado nível de ruído;
 - Redução da jornada de trabalho nos ambientes ruidosos, com deslocamento do pessoal para outros ambientes com serviços mais silenciosos, diminuindo assim a dose de ruído de cada trabalhador.

6.2.1 Soluções Numéricas de Controle de Ruído para o Piso do Gerador da PA IV

6.2.1.1 Solução 1: absorção sonora completa nas paredes e teto do ambiente

A primeira solução investigada para o piso do Gerador da PA IV considerou a aplicação de painéis de absorção sonora de lã de rocha com 100 mm de espessura e 32 kg/m² de densidade superficial, o qual possui coeficiente de absorção com bom desempenho em baixas frequências, como mostrado na Tab. 6.3. A escolha de tal material baseia-se também em características de material não higroscópico e incombustível, o que favorece sua durabilidade e, sobretudo, a segurança do trabalho.

Tabela 6.3 – Coeficientes de absorção sonora dos materiais atribuídos aos modelos numéricos.

Frequência Hz	63*	125	250	500	1000	2000	4000	8000*
Paredes e Teto	Nº. 3018 #	0,35	0,85	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00

Número do material adicionado a lista de materiais do software Odeon Ver. 10. Material: Painel de Lã de Rocha Thermax PLS-32 de 100 mm, obtido em <www.rockfibras.com>, acessado em 20 de abril de 2008.

*Bandas de Frequência com coeficientes de absorção não fornecidos e, portanto, adotados com valor igual aos das bandas adjacentes.

A propriedade de absorção sonora dos painéis de lã de rocha foi aplicada em todas as paredes e no teto em arco do modelo validado do Piso do Gerador da PA IV, com exceção ao portão de entrada, como pode ser visto na Fig. 6.32.

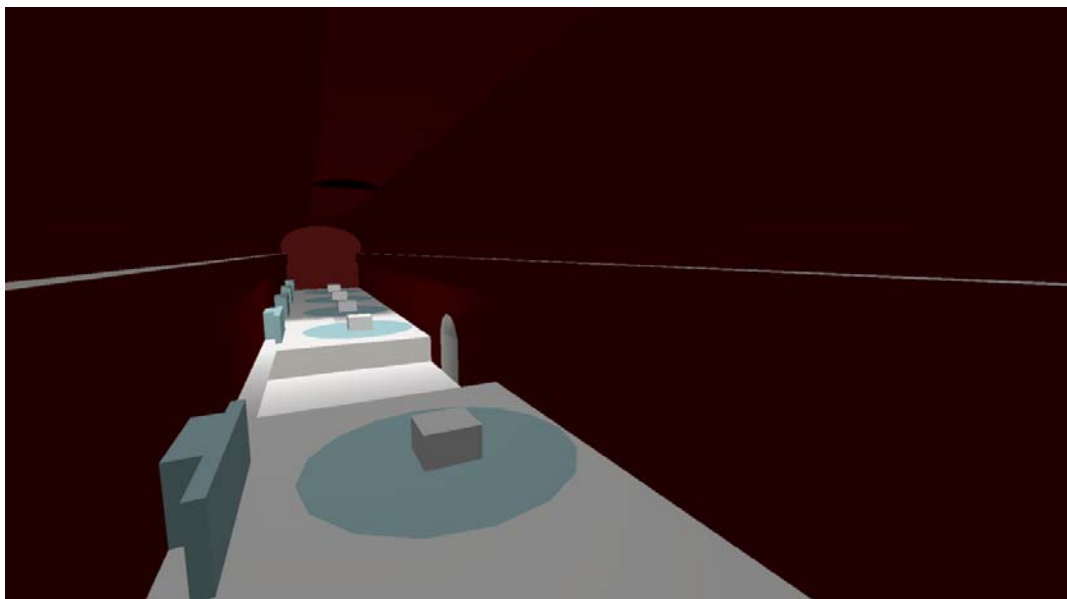


Figura 6.32 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com revestimento de material acústico para medida de controle de ruído por absorção sonora nas superfícies internas do ambiente.

Os resultados da aplicação desta medida de controle de ruído são apresentados na Fig. 6.33, a qual indica que o valor médio de NPS do ambiente reduziu de 88 dBA para 79 dBA, possibilitando uma diferença média de 9 dBA.

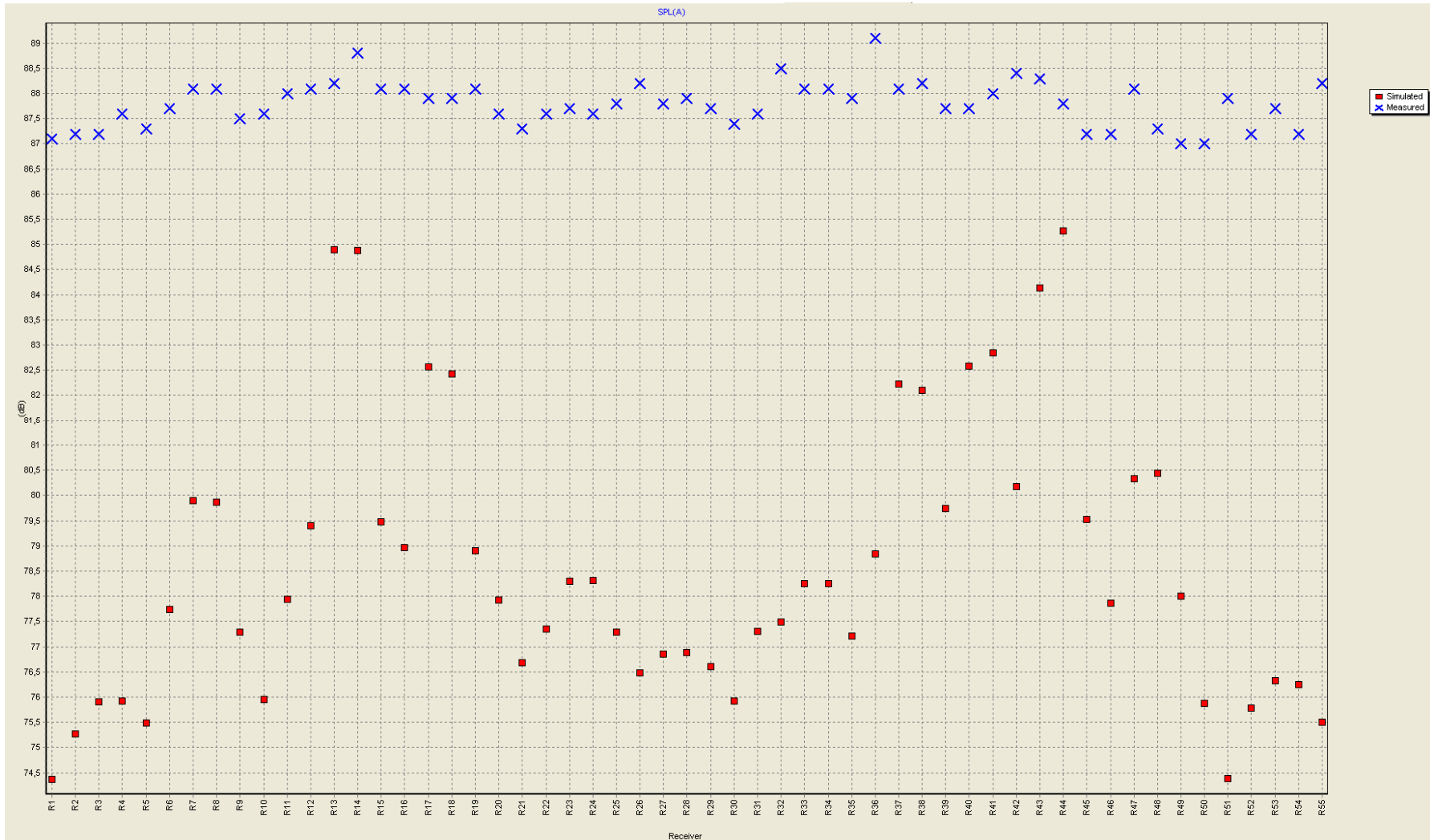


Figura 6.33 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de tratamento acústico em praticamente todas as superfícies internas da sala (■).

6.2.1.2 Solução 2: absorção sonora parcial nas paredes e teto do ambiente

A segunda solução investigada para o Piso do Gerador da PA IV é uma otimização da primeira solução, em termos de custo-benefício, e consiste na aplicação de material absorvedor nas paredes e no teto dentro das dimensões do diâmetro das tampas dos geradores das unidades geradoras (ver Fig. 6.34), caracterizando uma aplicação parcial do material de absorção sonora nas superfícies do ambiente.

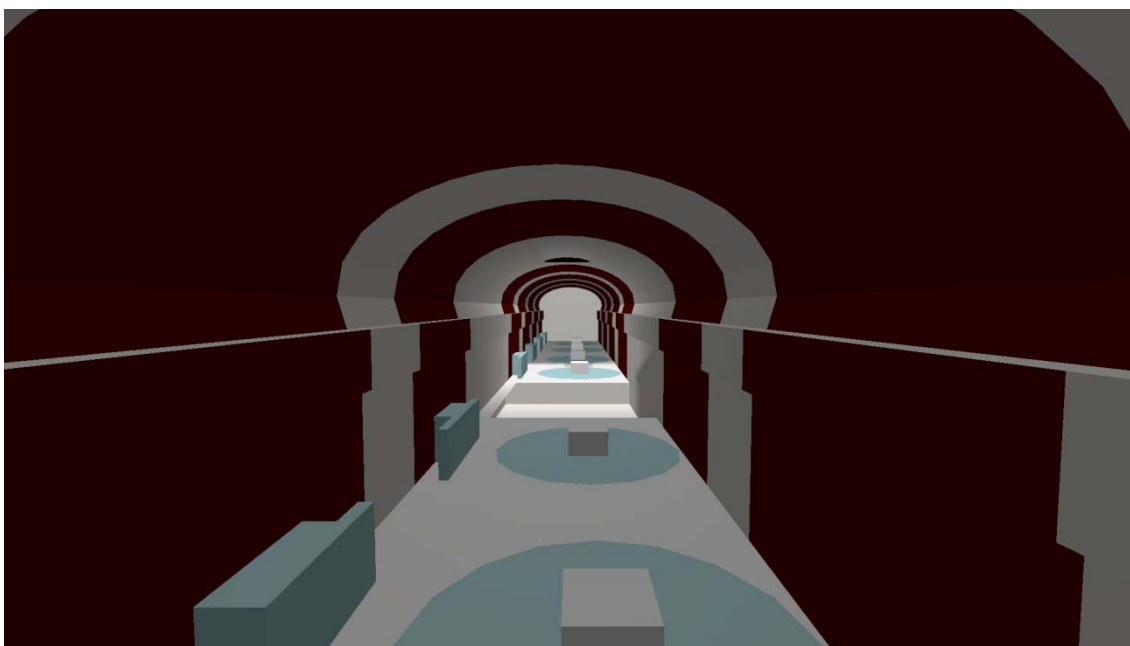


Figura 6.34 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com revestimento de material acústico para medida de controle de ruído por absorção sonora nas superfícies internas dentro do diâmetro das tampas dos geradores do ambiente.

Os resultados da aplicação da segunda solução de medida de controle de ruído são apresentados na Fig. 6.35, onde é indicado que o valor médio de NPS do ambiente foi reduzido de 88 para 80 dBA.

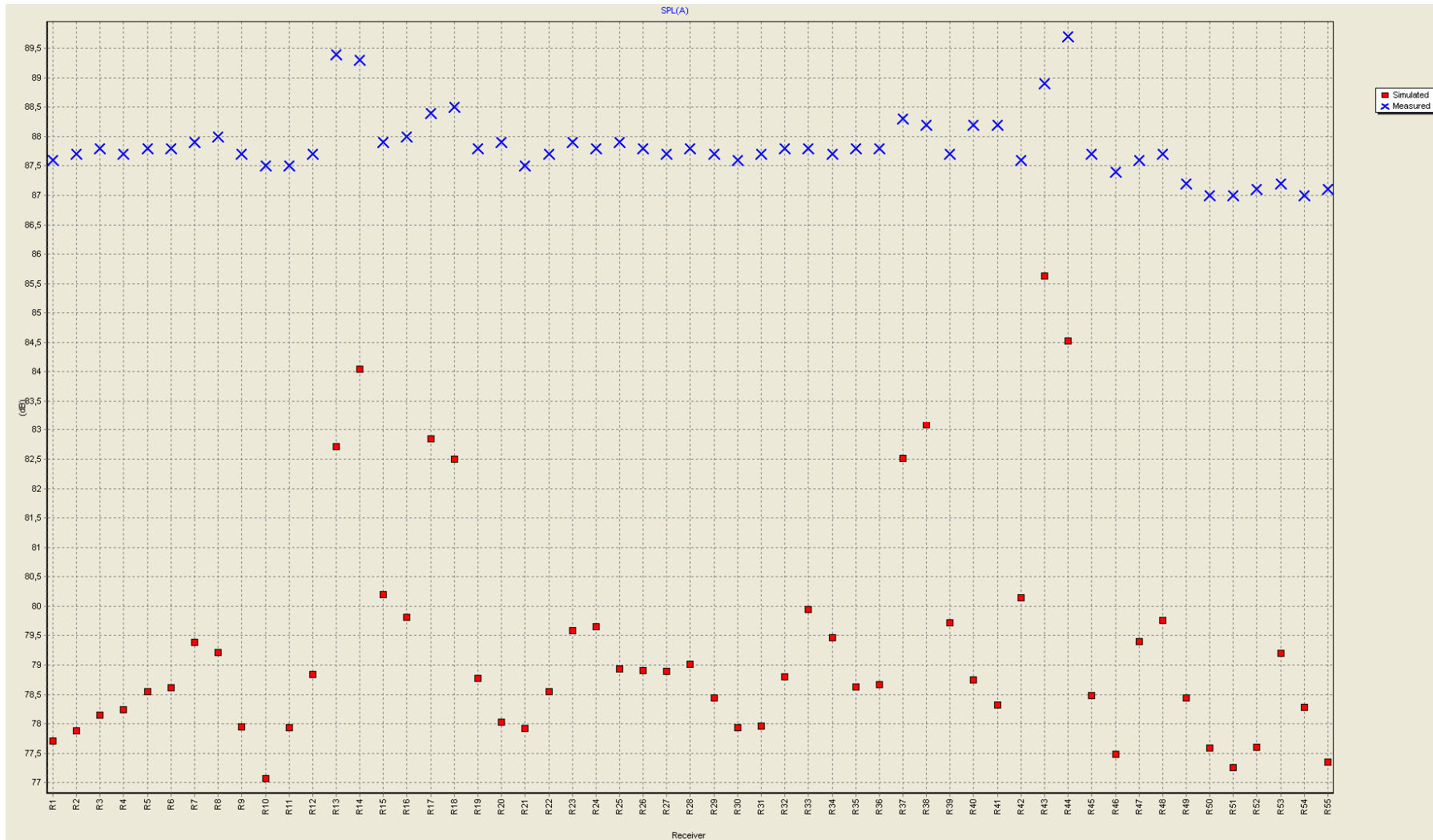


Figura 6.35 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de tratamento acústico em parte das superfícies internas da sala (■).

Diante de tais resultados, com uma redução aproximada de 42,3% de área para aplicação de material absorvedor e redução no nível de ruído praticamente igual nos dois casos, a segunda solução torna-se a mais adequada que a anterior, apresentando menor custo associado.

6.2.1.3 Solução 3: enclausuramento parcial compacto revestido internamente com material absorvente

A terceira solução aplicada ao Piso do Gerador da PA IV foi idealizada pela equipe do projeto do qual este trabalho faz parte (Melo, 2009), e consiste na utilização de enclausuramento parcial no entorno do topo dos geradores. O enclausuramento é parcial, devido à abertura na parte superior, a qual é necessária para troca de calor e saída de vapores de óleo provenientes do conjunto gerador. Adicionou-se também material absorvedor de som (Tab. 6.3) na face interna do enclausuramento parcial descrito. A Fig. 6.36 exhibe esta solução.

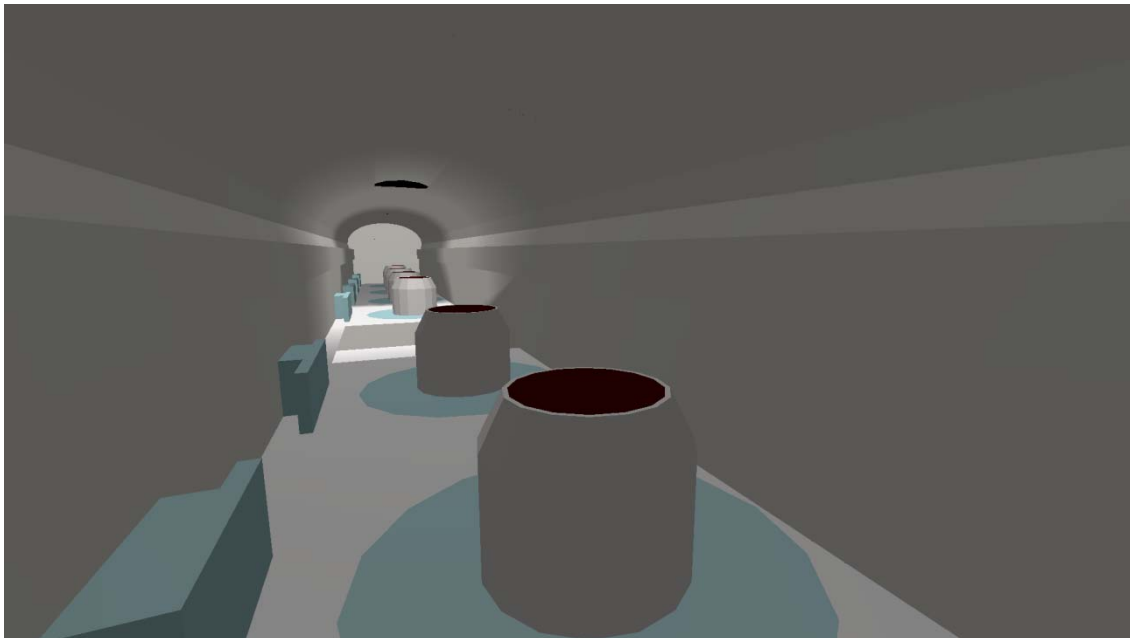


Figura 6.36 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com enclausuramento parcial com revestimento de material acústico na superfície interna.

Os resultados exibidos na Fig. 6.37 demonstram que a aplicação de tal solução tem um grande efeito na redução de NPS do ambiente, sendo observado que o NPS médio do ambiente sofreu uma redução de 14 dBA.

Tal redução se explica pela aplicação de uma solução de controle de ruído por material absorvedor de som mais próximo à fonte sonora, que contribui com a redução da energia sonora, antes da contaminação do ambiente pelo ruído produzido pelos geradores.

De forma mais localizada, observando os microfones 13, 14, 43 e 44, os quais ficaram dentro da clausura, pode-se constatar uma redução de 5 dBA, evidenciando que, a partir da aplicação de material absorvedor nas superfícies internas das clausuras, tem-se também uma redução de ruído no interior das mesmas.

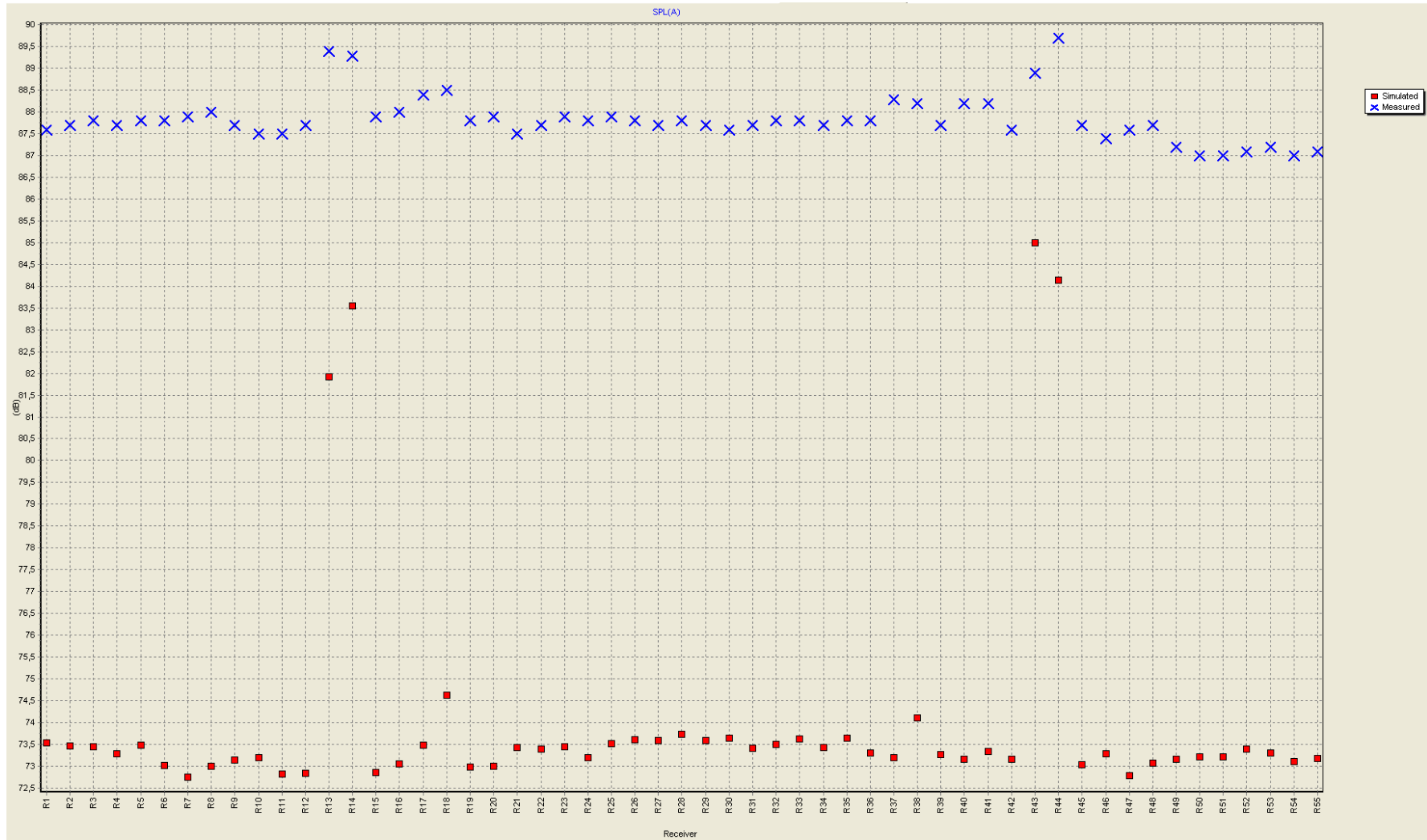


Figura 6.37 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de enclausuramento parcial com material absorvedor de som nas superfícies internas (■).

6.2.1.4 Solução 4: absorção sonora parcial e enclausuramento parcial compacto revestido internamente com material absorvedor de som

A quarta solução de controle de ruído para o Piso do Gerador da PA IV é a solução global, a qual se constitui na utilização conjunta das soluções 2 e 3, analisadas anteriormente de forma independente. Assim, nesta solução são aplicados o material de absorção sonora em partes das paredes e teto, juntamente com o enclausuramento parcial com material de absorção de som na parte interna, como pode ser visto na Fig. 6.38.



Figura 6.38 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV com enclausuramento parcial com revestimento de material acústico na superfície interna e material absorvedor parcialmente aplicado às paredes laterais e teto.

Os resultados obtidos para esta solução são exibidos na Fig. 6.39 e demonstram, em potencial, uma redução média de NPS de 88 para 62 dBA (uma diferença média de 26 dBA).

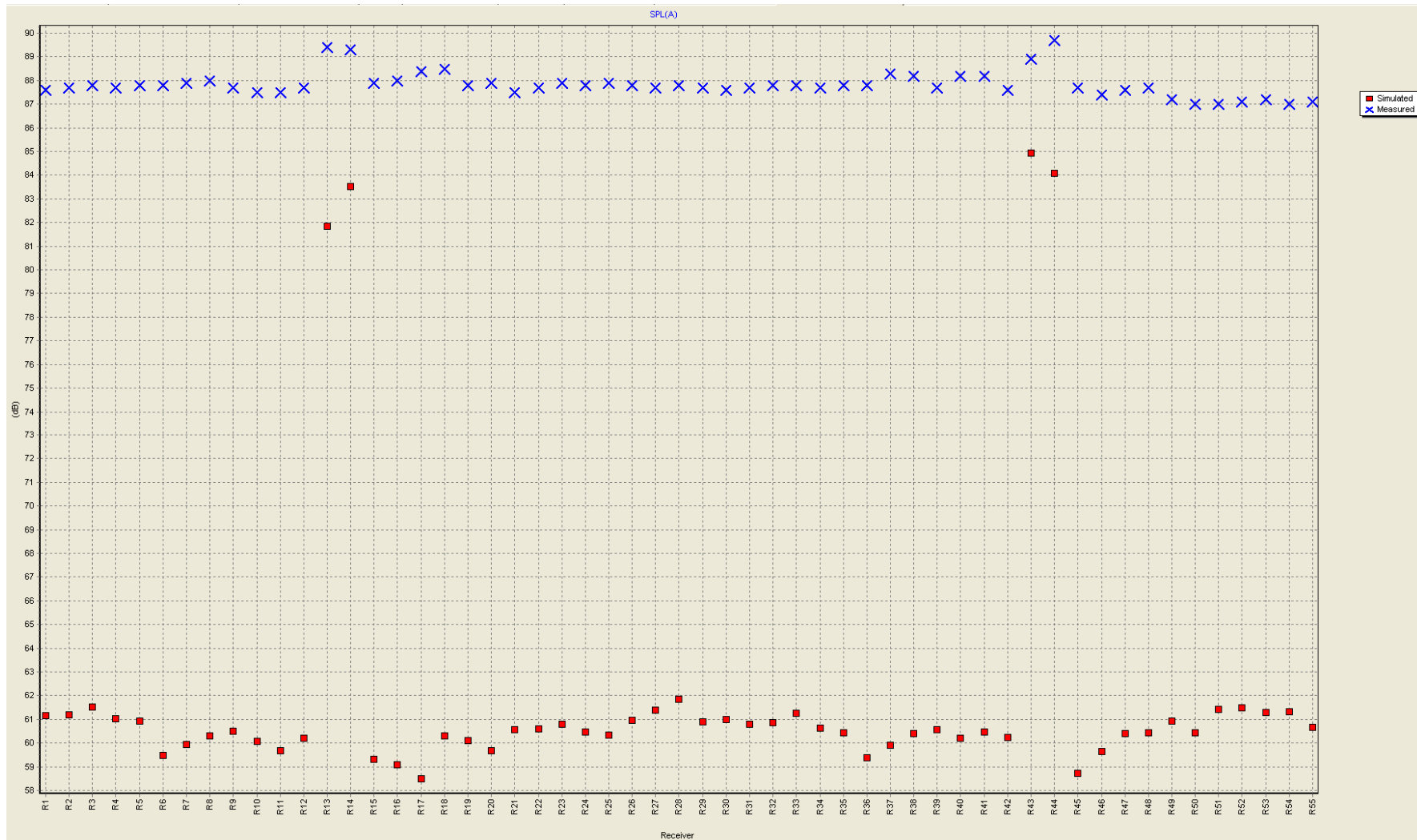


Figura 6.39 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso do Gerador da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação conjunta de enclausuramento parcial com material absorvedor de som nas superfícies internas e em partes das paredes laterais e teto (■).

6.2.2 Soluções Numéricas de Controle de Ruído para o Piso da *Air Housing* da PA IV

6.2.2.1 Solução 1: absorção sonora nas principais superfícies do ambiente

Para o Piso da *Air Housing* da PA IV, a primeira solução testada considera a utilização do mesmo material de absorção sonora, previsto para o Piso do Gerador, em todas as paredes e no teto, como pode ser visto na Fig. 6.40.

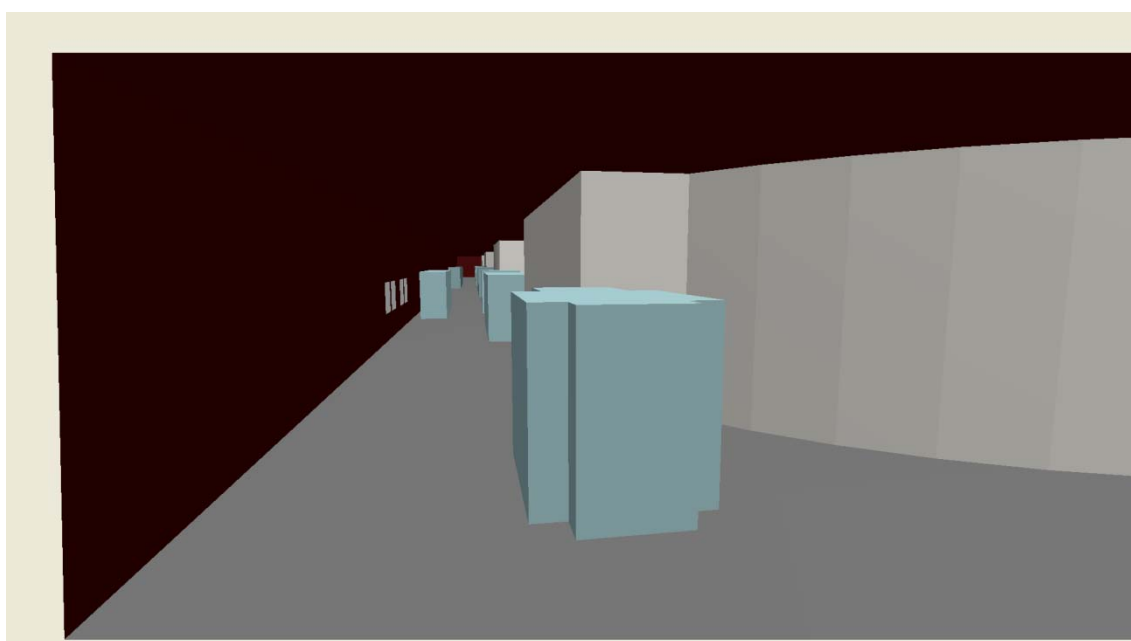


Figura 6.40 – Modelo do Piso da *Air Housing* com revestimento de material acústico nas paredes e teto.

A Fig. 6.41 apresenta os resultados para esta solução, onde é demonstrada uma redução do NPS médio de 90 para 80 dBA. Observa-se que a redução de NPS é maior para os receptores mais afastados das fontes sonoras (principalmente as portas das *Air Housings*).

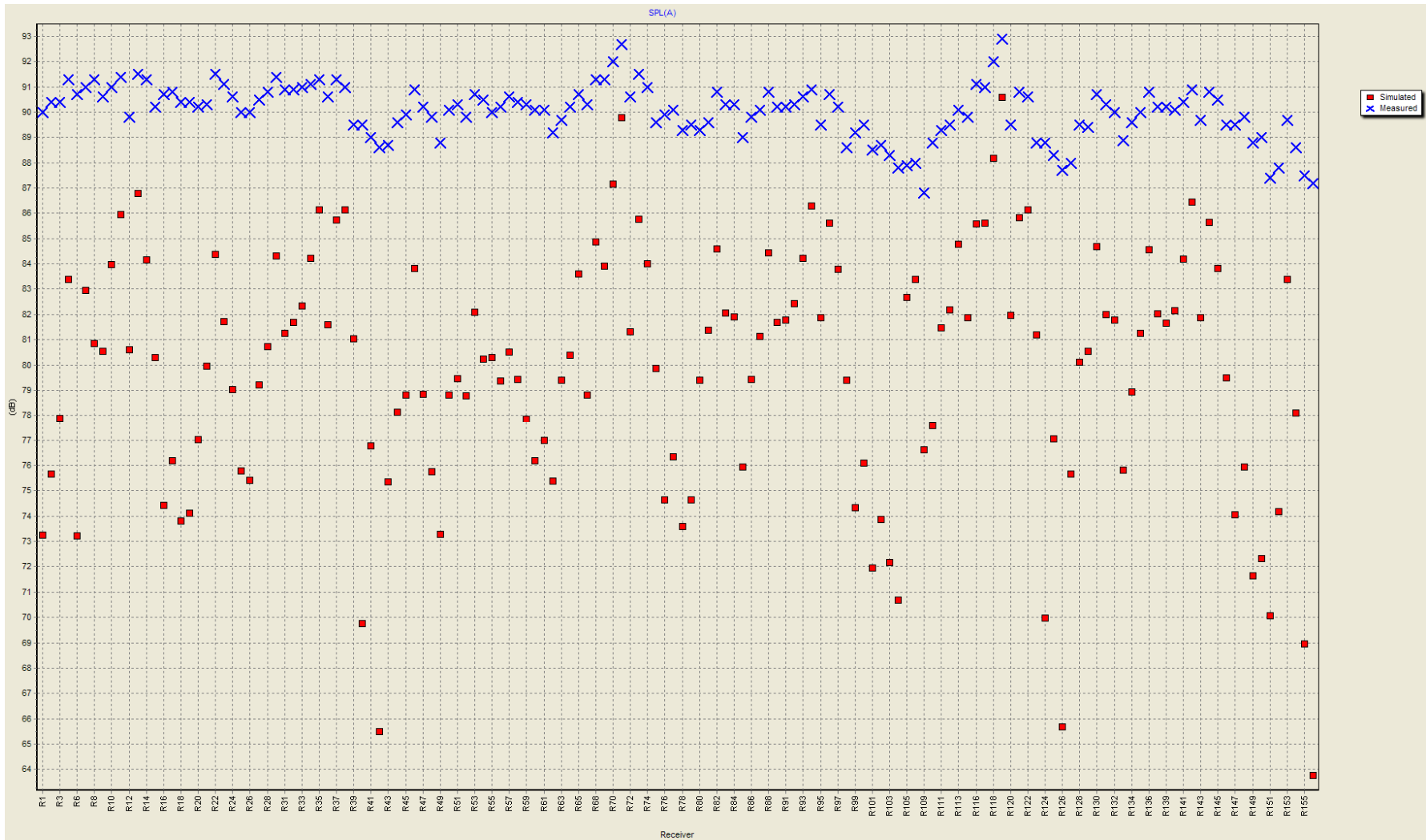


Figura 6.41 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de material absorvedor de som nas superfícies paredes e teto (■).

6.2.2.2 Solução 2: portas acústicas nas *Air Housings*

A segunda solução de controle de ruído testada para o Piso da *Air Housing* da PA IV consiste na utilização de portas acústicas em todas as *Air Housings*, em substituição às portas comuns, atualmente existentes.

A estimativa de redução do nível de potência sonora da fonte “porta das *Air Housings*”, após a substituição das portas comuns por portas acústicas foi realizada da seguinte forma: a partir do valor de nível de potência sonora medido no local na condição de porta aberta, subtraíram-se os valores de Perda de Transmissão de uma porta comercial, estabelecendo-se um novo nível de potência sonora aproximado para a fonte “porta das *Air Housings*”, após a aplicação de portas acústicas.

A porta acústica comercial considerada para o presente estudo consistiu num modelo com STC 50, a qual é uma porta metálica com elevado poder de isolamento acústico. Os dados de perda de transmissão, nível de potência sonora irradiado através da porta simples atualmente utilizada (nas condições aberta e fechada) e a estimativa do novo nível de potência sonora com aplicação da porta acústica são exibidos na Fig. 6.42.

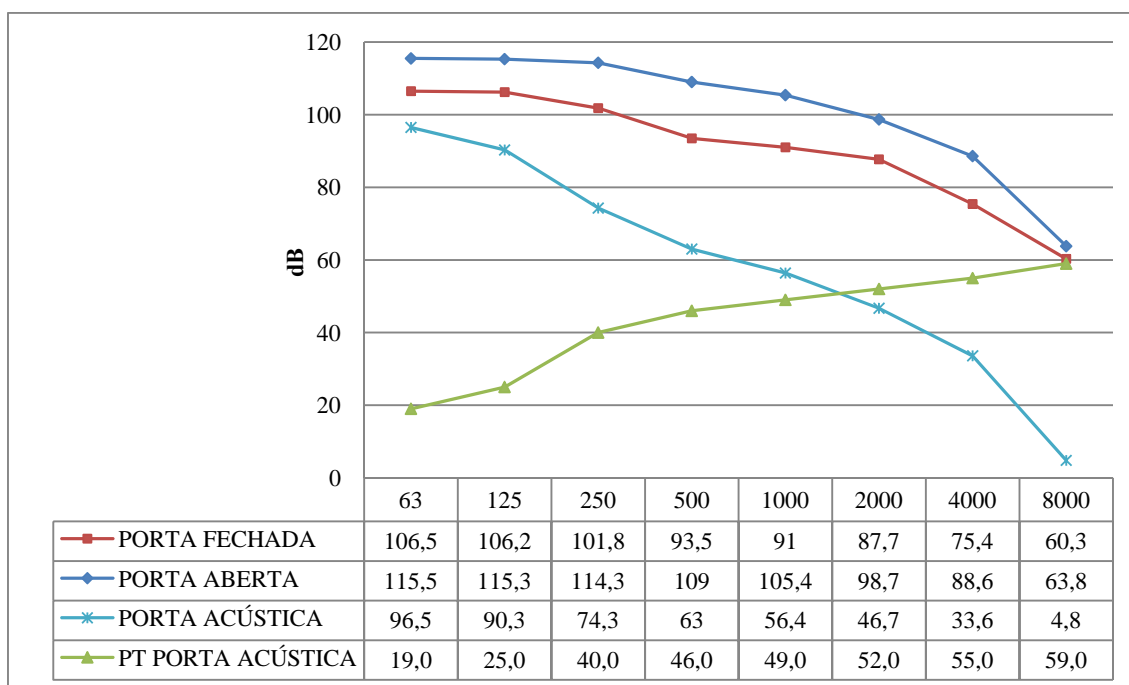


Figura 6.42 – Níveis de potência sonora da porta da *Air Housing* atualmente utilizada, na condição fechada e aberta, nível de potência sonora estimado com a aplicação da porta acústica comercial e perda de transmissão da porta comercial, em função da frequência.

A Fig. 6.43 apresenta os valores de NPS com a influência das portas acústicas aplicadas em todas as *Air Housings*, indicando que o NPS médio do Piso da *Air Housing* passou de 90 a 87 dBA.

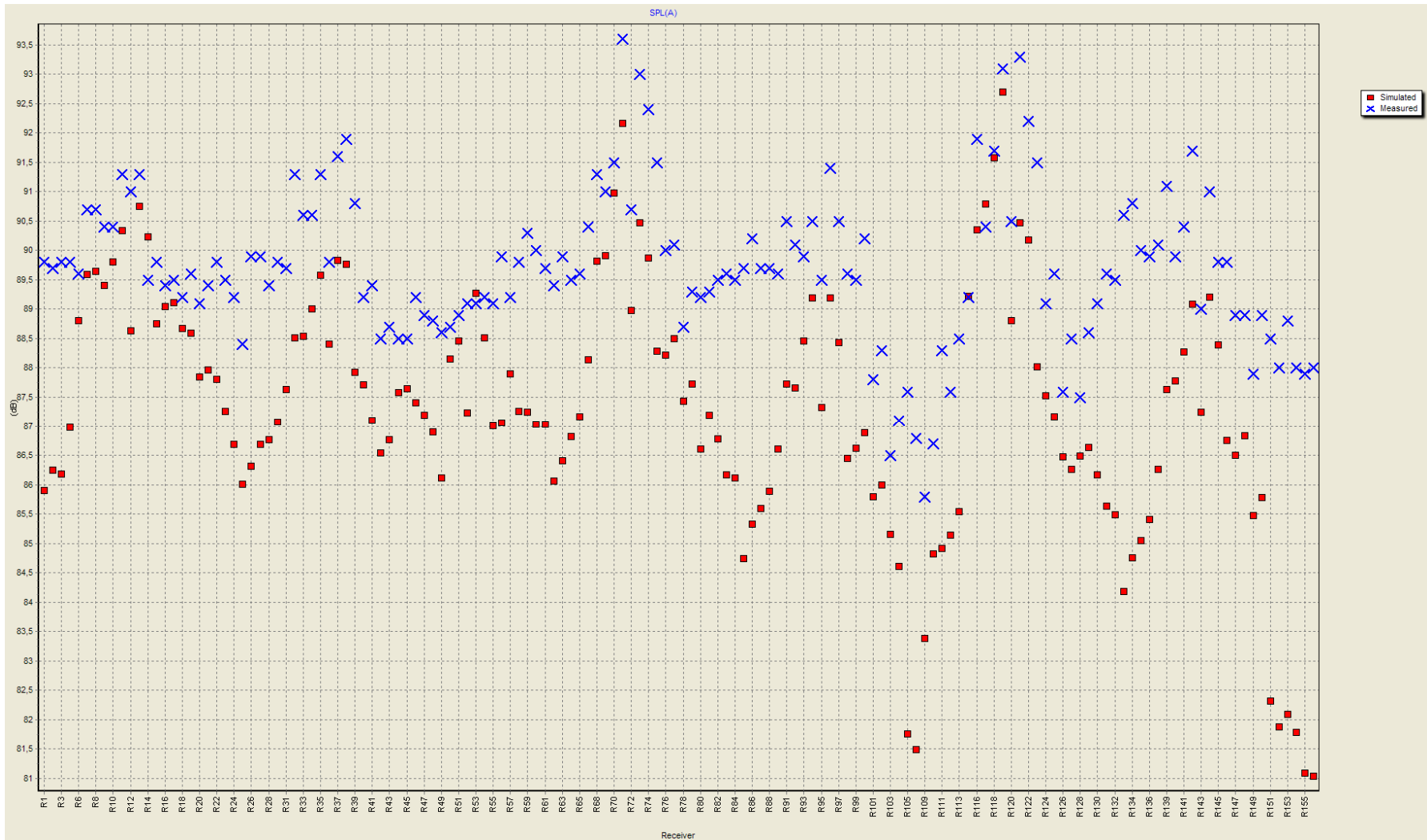


Figura 6.43 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com aplicação de portas acústicas (■).

6.2.2.3 Solução 3: vedação da saída do barramento

A terceira solução testada para o Piso da *Air Housing* constitui na vedação da saída dos barramentos de cada uma das seis *Air Housings* da PA IV.

Nas simulações, isso significa que, para o nível de potência sonora da área do barramento, onde foram inicialmente atribuídos os mesmos valores de potência sonora da fonte “porta das *Air Housings*”, passaram-se a considerar os mesmos valores do novo nível de potência sonora discutido na seção anterior, aplicados à área associada à saída dos barramentos, como forma de aproximar uma possível redução de emissão de energia para o ambiente sob análise, após a completa vedação das saídas dos barramentos. Ressalta-se que tal vedação é, por si só, de grande interesse para a equipe operacional da usina, uma vez que aumenta a eficiência da *Air Housing*.

Os resultados obtidos a partir da solução 3 são apresentados na Fig. 6.44.

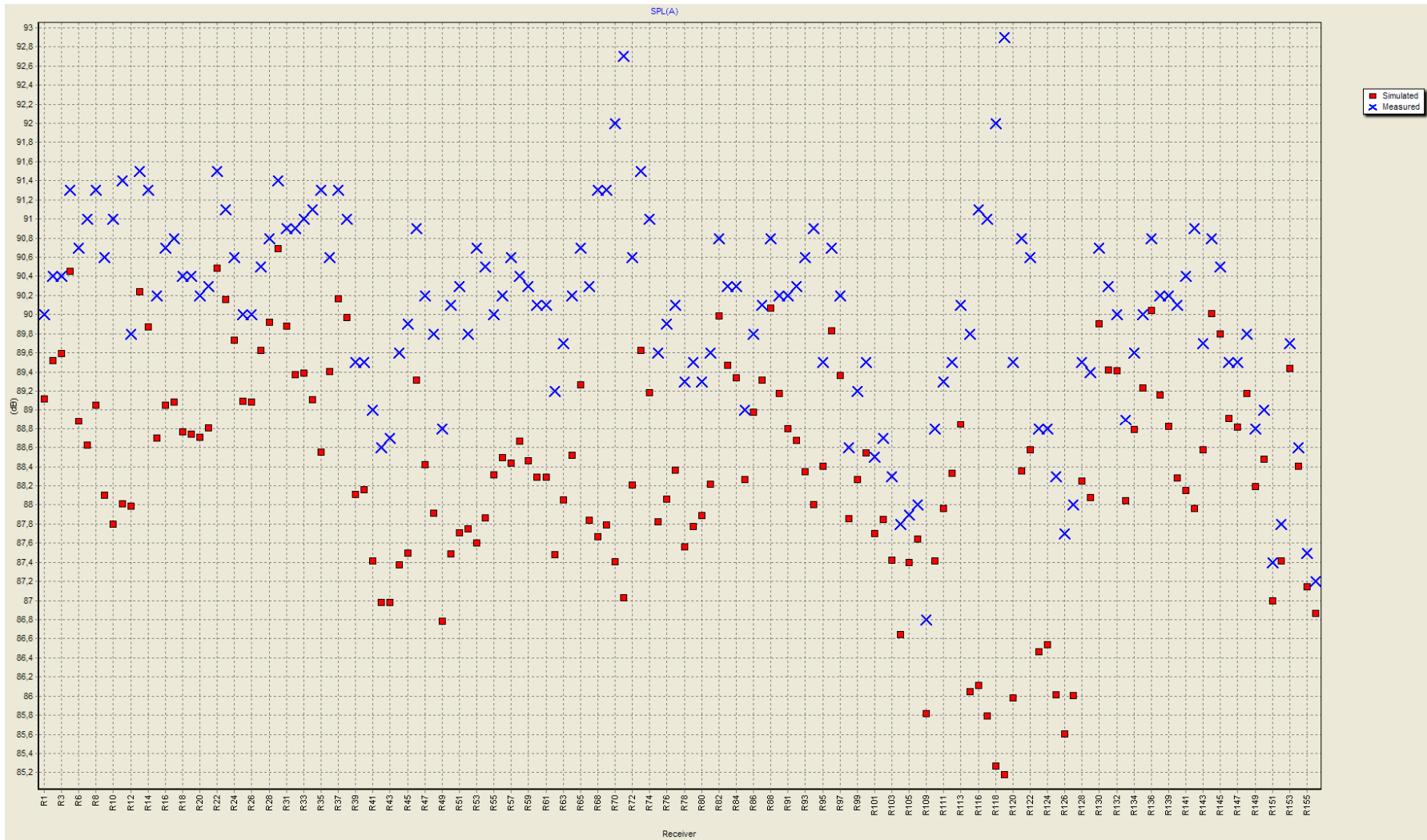


Figura 6.44 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com manutenção da área do barramento (■).

A Figura 6.44 indica uma potencial redução do NPS médio do Piso da *Air Housing* da PA IV de 90 para 88 dBA, após o uso de vedação acústica na saída dos barramentos das *Air Housings*.

6.2.2.4 Solução 4: exaustores com atenuadores acústicos

A quarta solução investigada para o piso da *Air Housing* da PA IV consistiu no emprego de atenuadores acústicos ou silenciadores resistivos, que são equipamentos utilizados para a redução de níveis sonoros de ventiladores, consistindo de um duto circular ou retangular revestido internamente com material de absorção acústica e, em muitos casos, com a presença de células divisórias paralelas (lamelas), revestidas do mesmo material, tal como ilustrado na Fig. 6.45. Frisa-se que para a aplicação destes atenuadores resistivos deve-se fazer o levantamento da perda de pressão para verificar se a perda de carga não diminua a eficiência do sistema.

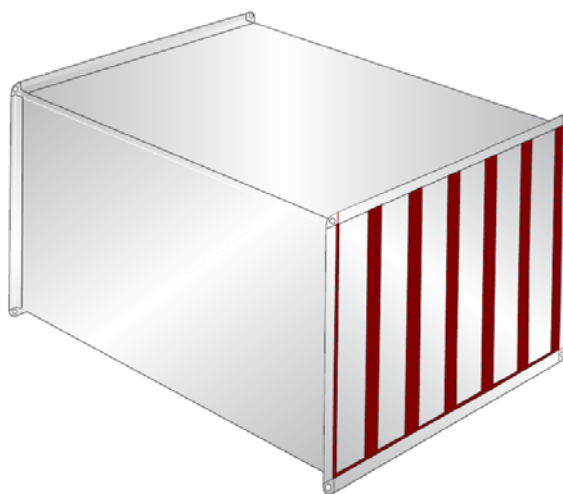


Figura 6.45 – Exemplo de atenuador acústico com lamelas de material de absorção acústica.

O atenuador considerado para o presente estudo foi o modelo AP 900 da empresa Absorsor, o qual apresenta características como construção da caixa externa em chapa de aço galvanizada, absorção sonora através de placas de lã mineral, área livre para passagem de ar dimensionada de acordo com o desempenho requerido, entre outras.

No modelo numérico, a fim de integrar esta solução, o nível de potência sonora definido no software Odeon foi o resultado da diferença entre o nível de potência sonora

experimental da área do exaustor e o valor de atenuação do silenciador. A Fig. 6.46 apresenta o nível de potência sonora do exaustor, os valores de atenuação do silenciador e o novo nível de potência sonora, após a aplicação do atenuador.

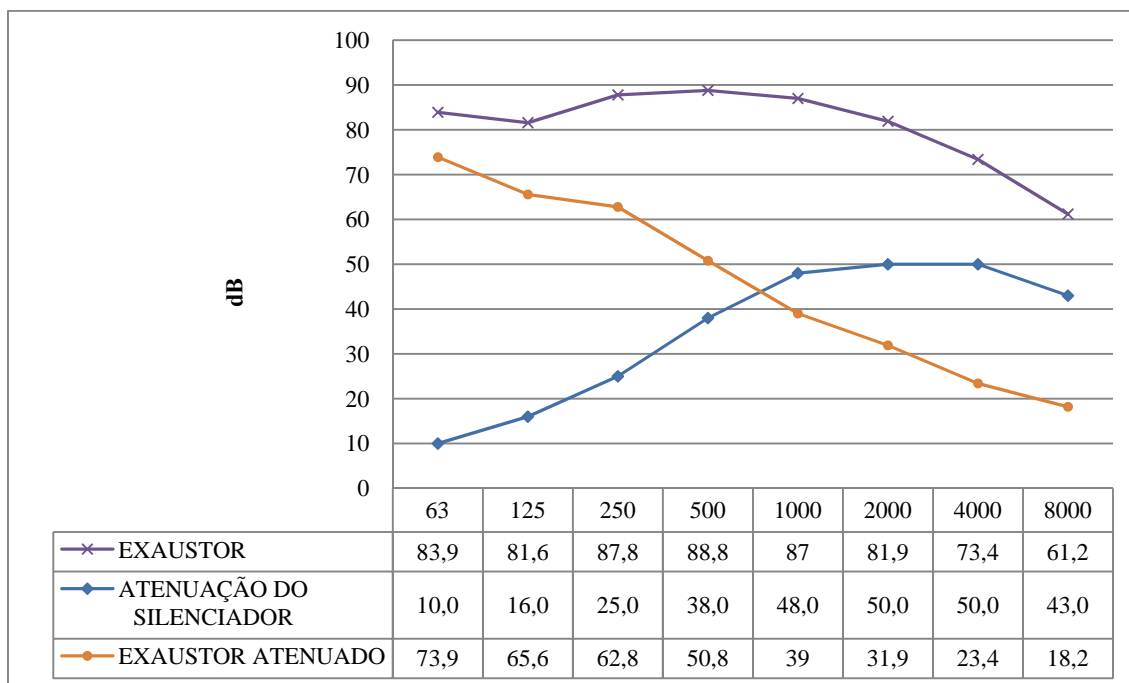


Figura 6.46 – Nível de potência sonora do exaustor, atenuação do silenciador e novo nível de potência sonora do exaustor atenuado, em função da frequência.

Os resultados obtidos a partir da solução de aplicação de atenuadores em todos os exaustores são apresentados na Fig. 6.47.

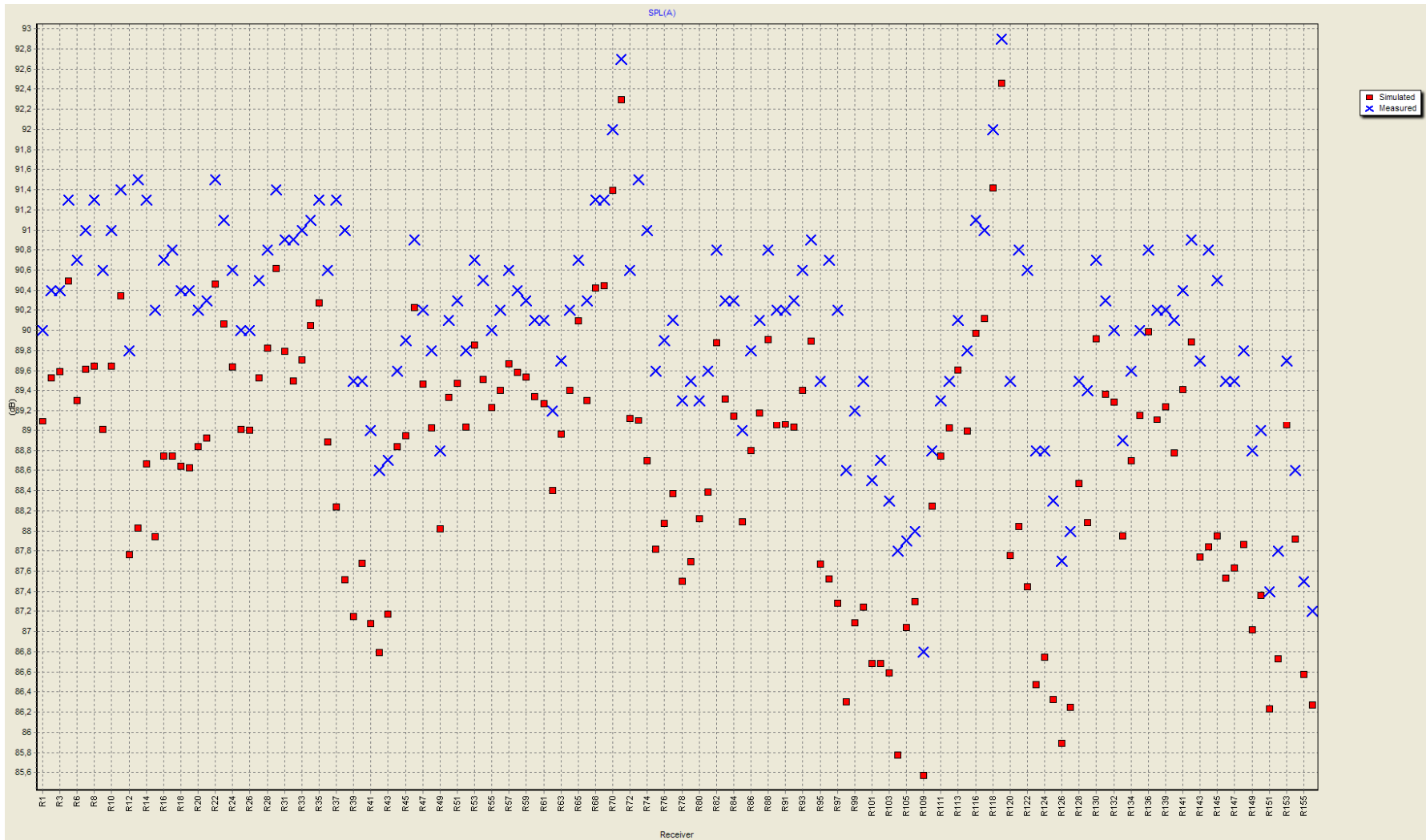


Figura 6.47 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com exaustores atenuados (■).

A Fig. 6.47 indica que o NPS médio do piso da *Air Housing* da PA IV foi reduzido em apenas 1 dBA, demonstrando que esta solução, de uma forma global, não proporciona praticamente nenhuma redução de ruído. Mesmo nas áreas próximas dos exaustores ocorrem atenuações de apenas 2 dBA em média.

A razão para a pequena redução de ruído proporcionada pela solução em tela se deve ao fato de que as fontes sonoras associadas aos exaustores sem atenuadores possuem menor potência sonora em relação às portas das *Air Housings* na condição fechada, como pode ser constatado na Fig. 6.48.

Como é sabido, medidas de controle de ruído aplicadas em fontes sonoras com menor contribuição para o nível de ruído global do ambiente, ou seja, em fontes com menor potência sonora, proporcionam pouca ou nenhuma redução no nível de ruído global do ambiente.

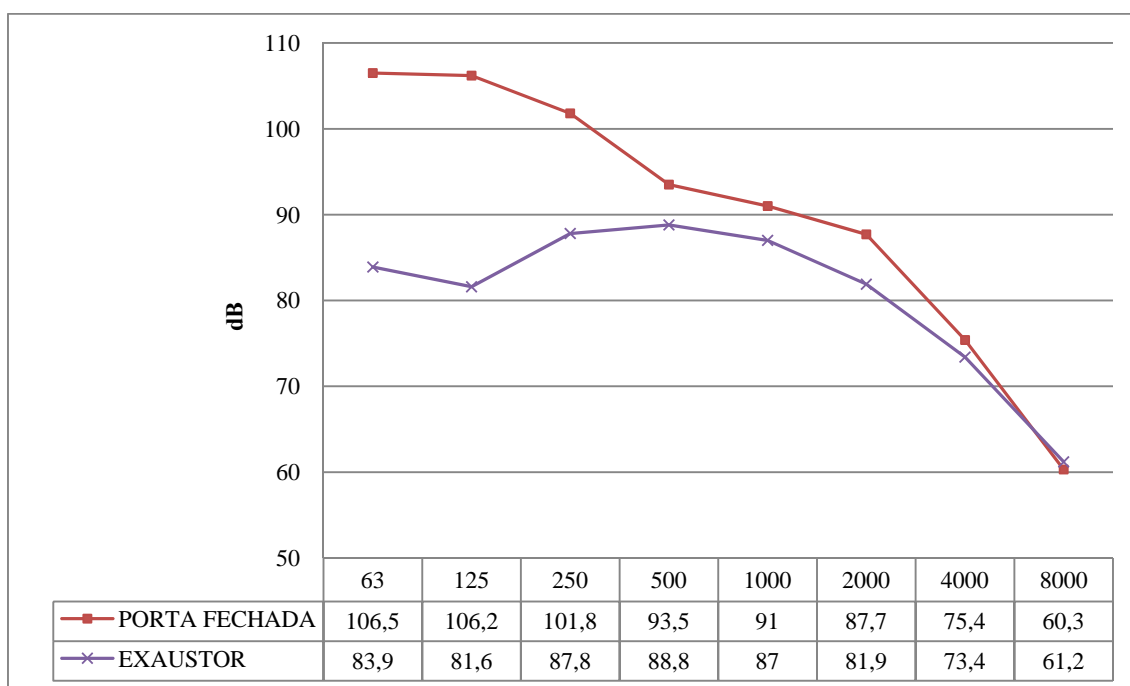


Figura 6.48 – Níveis de potência sonora das fontes associadas à porta da *Air Housing* (quando fechada) e ao exaustor, em função da frequência.

6.2.2.5 Solução 5: portas acústicas nas *Air Housings* e vedação da saída do barramento

A solução 5 testada no piso da *Air Housing* é uma utilização conjunta das soluções 2 e 3, consistindo na utilização de portas acústicas e vedação das saídas dos barramentos em todas as *Air Housings*.

Dessa forma, na Fig. 6.49 são apresentados os resultados a partir da aplicação da solução 5.

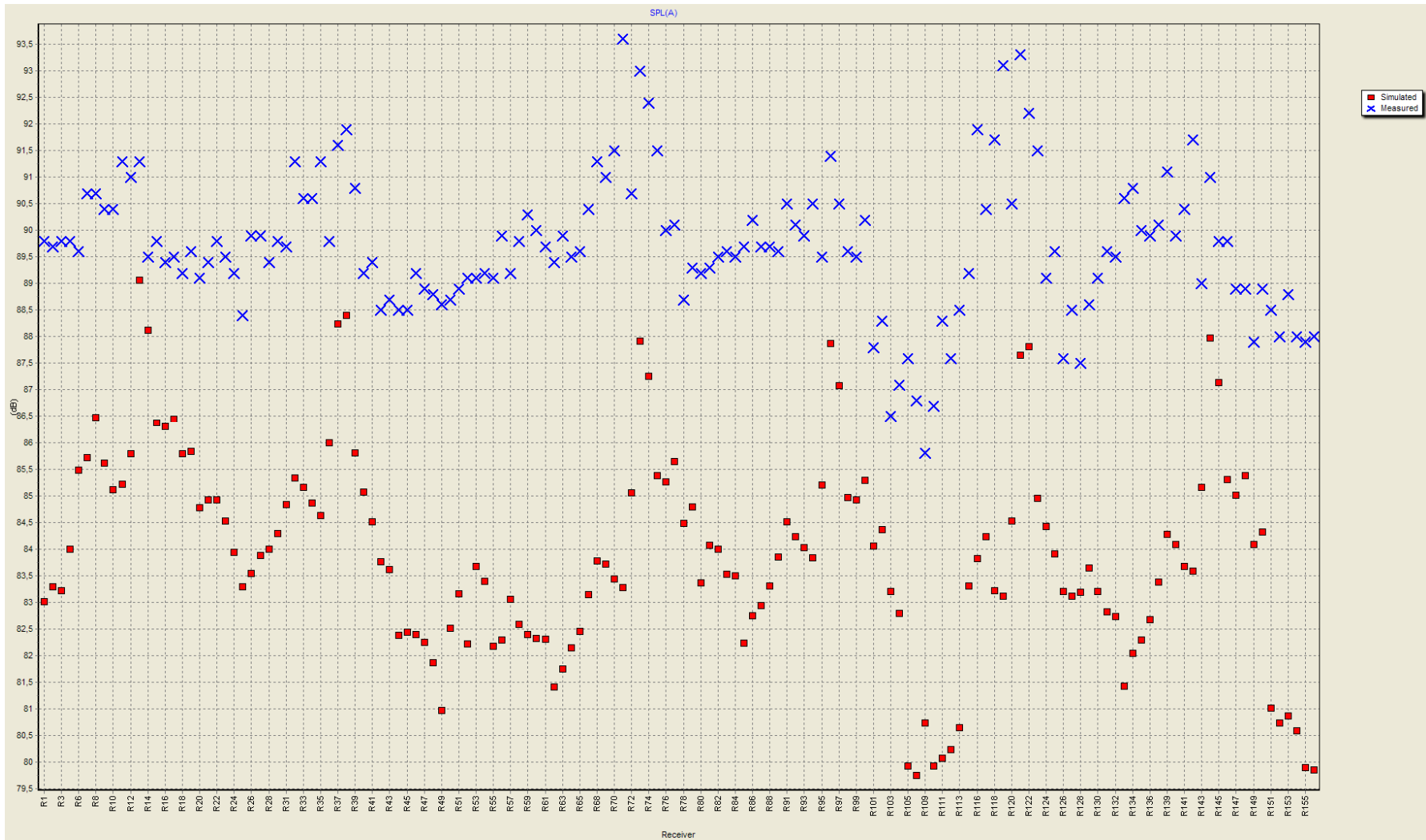


Figura 6.49 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução 5 (■).

A Fig. 6.49 indica que o NPS médio do piso da *Air Housing* da PA IV foi reduzido de 90 para 84 dBA.

6.2.2.6 Solução 6: portas acústicas nas *Air Housings*, vedação da saída do barramentos e atenuadores acústicos

A solução 6, que envolve as soluções 2, 3 e 4 de forma conjunta, proporciona um resultado de redução significativo no NPS do piso da *Air Housing* da PA IV, a partir da redução da energia sonora emitida pelas principais fontes do ambiente, como pode ser visto na Fig. 6.50.

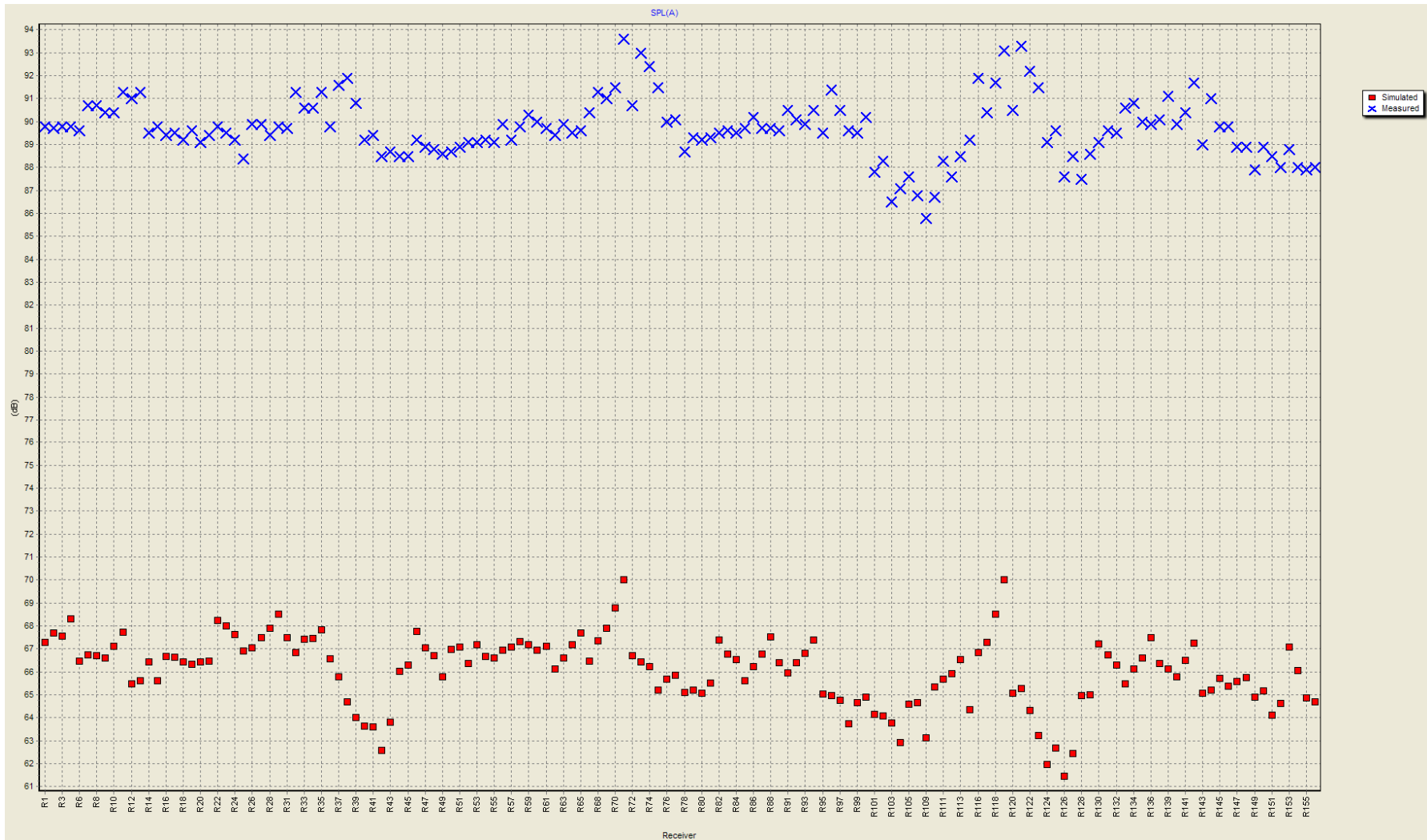


Figura 6.50 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da *Air Housing* da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução 6 (■).

É interessante observar que a solução 4, quando testada de forma isolada, não foi capaz de proporcionar uma redução de ruído significativa no ambiente. Entretanto, quando utilizada de forma conjunta com as outras soluções investigadas, passou a adquirir relevância, a partir da redução do nível de potência sonora das outras fontes. Assim, a Fig. 6.50 indica que o NPS médio do piso da *Air Housing* da PA IV passou de 90 a 66 dBA, após o uso de portas acústicas, vedação da saída dos barramentos em todas as *Air Housings* e atenuadores acústicos em todos os exaustores, o que representa uma redução média significativa de NPS para este ambiente.

Ressalta-se que a redução de ruído aqui alcançada também é fortemente dependente do nível de ruído de fundo do ambiente, de modo que a realização, na prática, das proposições aqui sugeridas acabarão por evidenciar novas fontes de ruído que, atualmente, encontram-se mascaradas por fontes mais ruidosas. Isto significa que, embora o nível de ruído possa ser significativamente reduzido, é provável que, para se alcançar de fato uma redução dessa magnitude, tal como apontada pela análise anterior, medidas de controle de ruído em outras fontes ainda desconhecidas venham a ser necessárias.

6.2.3 Soluções Numéricas de Controle de Ruído para o Piso da Turbina da PA IV

6.2.1.1 Solução 1: absorção sonora nas principais superfícies do ambiente

Assim como para os pisos anteriores, no piso da turbina a primeira solução testada considera a utilização de painéis de absorção sonora de lã de rocha com 100 mm de espessura e 32 kg/m^2 de densidade, tal como descrito anteriormente. A Fig. 6.51 apresenta uma vista interna do ambiente referente ao piso da Turbina da PA IV, com várias superfícies recobertas pelo material de absorção sonora descrito.

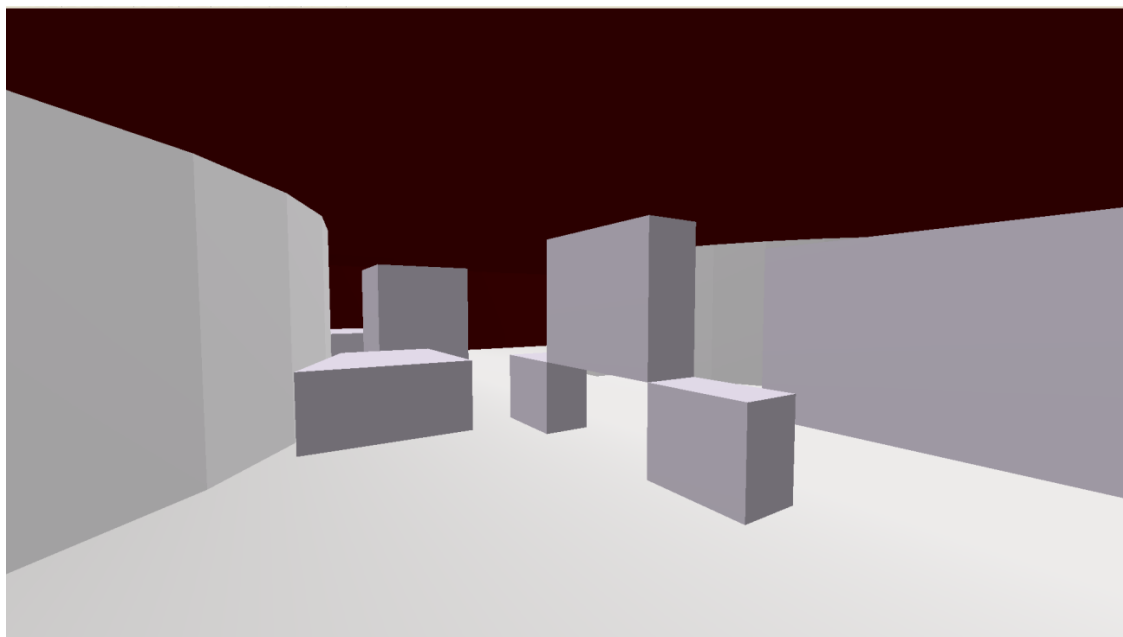


Figura 6.51 – Modelo do Piso da Turbina com revestimento de material acústico nas paredes e teto.

A Fig. 6.52 apresenta a influência da absorção sonora aplicada às principais superfícies no campo acústico do piso da Turbina da PA IV, onde se observa uma forte redução no NPS do ambiente, principalmente para aqueles pontos mais distantes das entradas das salas das turbinas, as quais se constituem nas principais fontes sonoras deste ambiente.

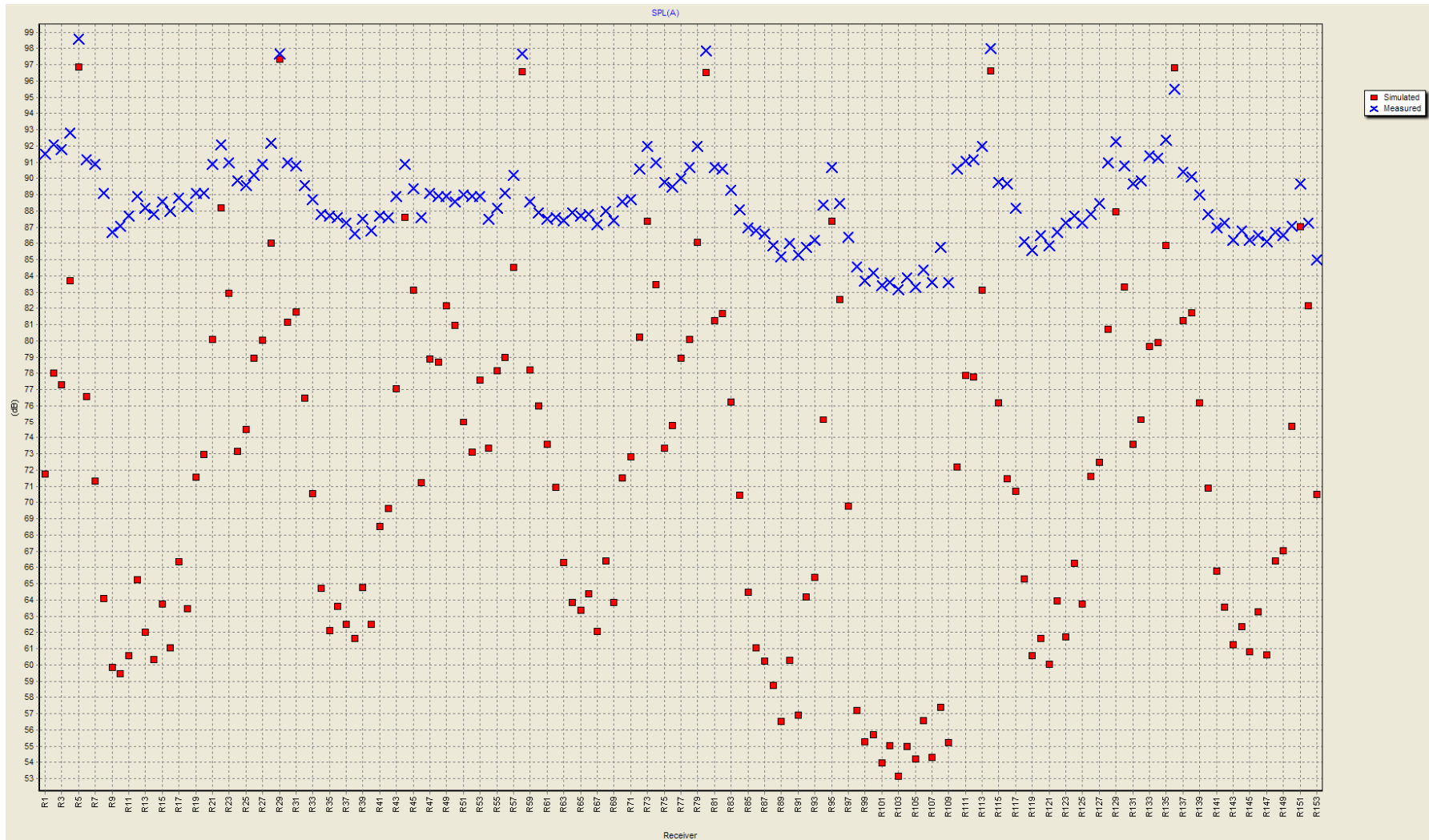


Figura 6.52 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução de absorção sonora nas principais superfícies (■).

Da Fig. 6.52 observa-se que, como o material de absorção acústica age apenas nos sons que incidem nas superfícies, então os pontos de microfone próximos às portas das salas das turbinas (R5, R29, R58, R80, R114 e R136) são indiferentes à solução aqui testada, uma vez que esta região é dominada pelo campo direto.

A Fig. 6.52 indica que o NPS médio do piso da Turbina, antes da aplicação da solução 1 era de 89 dBA, passando a 71 dBA, após o uso de absorção sonora de alta eficiência nas principais superfícies do ambiente, o que representa, em média, uma potencial redução de NPS da ordem de 18 dBA.

6.2.1.2 Solução 2: porta acústica com absorção na saída do poço da turbina

A segunda solução testada para o piso da Turbina da PA IV consistiu na utilização de uma porta acústica na saída dos poços das turbinas, aplicando ainda material de absorção sonora nas laterais destas saídas, tal como ilustrado na Fig. 6.53.

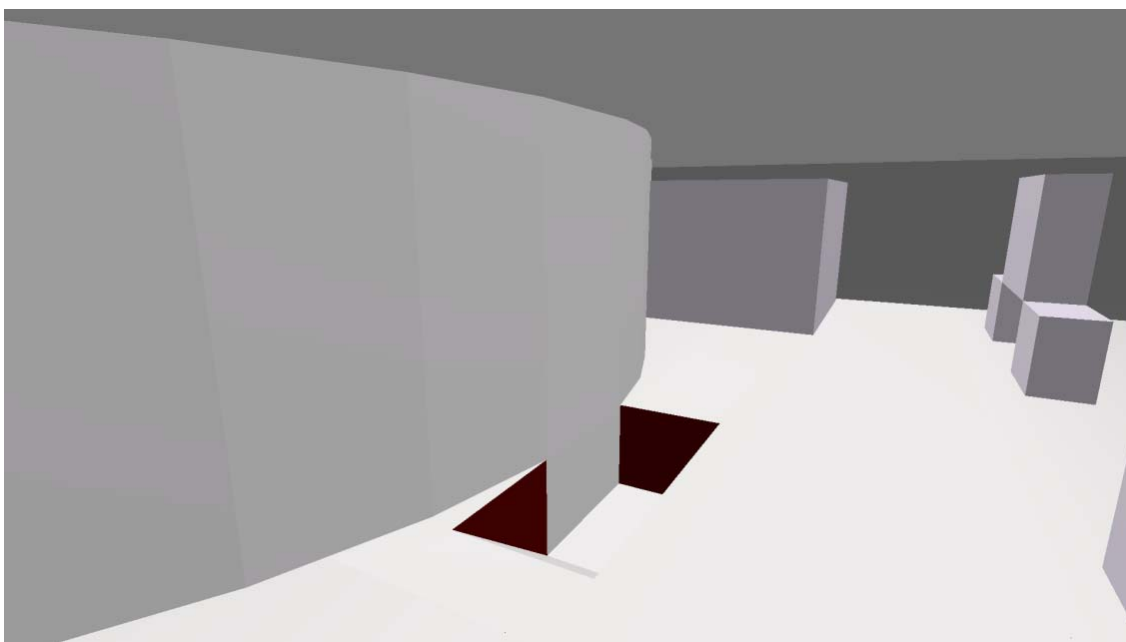


Figura 6.53 – Modelo do Piso da Turbina da PA IV, com porta acústica na saída do corredor de cada uma das seis salas das turbinas, além do revestimento interno dos poços das turbinas com material de absorção sonora de alta performance.

Os resultados obtidos a partir da solução 2 são apresentados na Fig. 6.54.

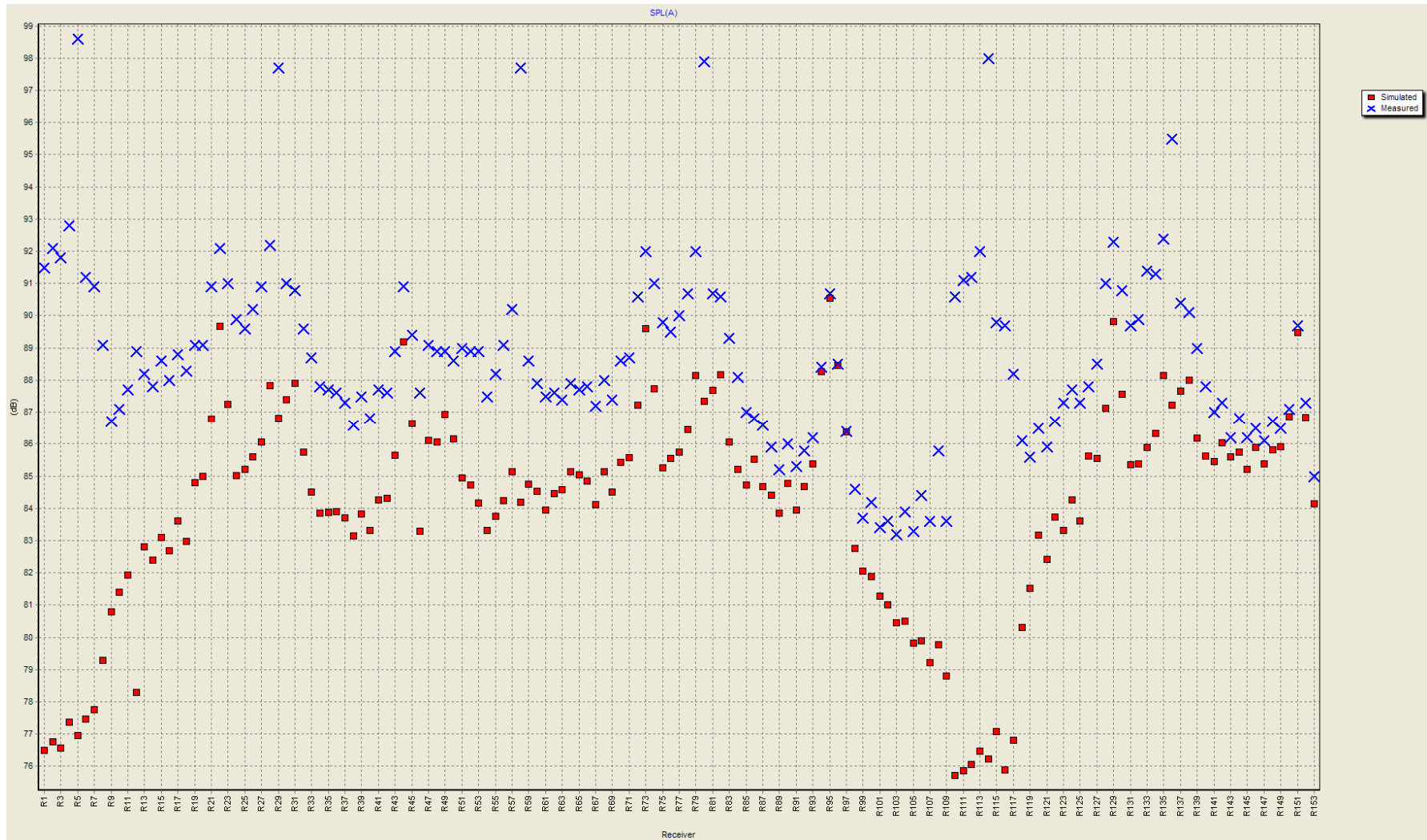


Figura 6.54 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução de porta acústica no poço da turbina, revestido internamente com material de absorção sonora (■).

A Fig. 6.54 indica que o NPS médio do piso da Turbina da PA IV, antes da solução 2, era de 89 dBA, passando a 84 dBA, após o uso de porta acústica no poço da turbina, revestido internamente com material absorvedor.

6.2.1.3 Solução 3: vedação da saída da tubulação de óleo do mancal

A terceira solução testada para o piso da Turbina da PA IV consistiu na vedação da saída da tubulação de óleo do mancal (para a purificação de óleo), considerando uma barreira com a mesma característica de isolamento sonora da porta acústica considerada na solução anterior. A referida abertura encontra-se nas salas das turbinas, em posições diametralmente opostas às entradas das salas, constituindo-se numa importante fonte de contaminação acústica do ambiente.

Os resultados obtidos a partir da solução 3 são apresentados na Fig. 6.55.

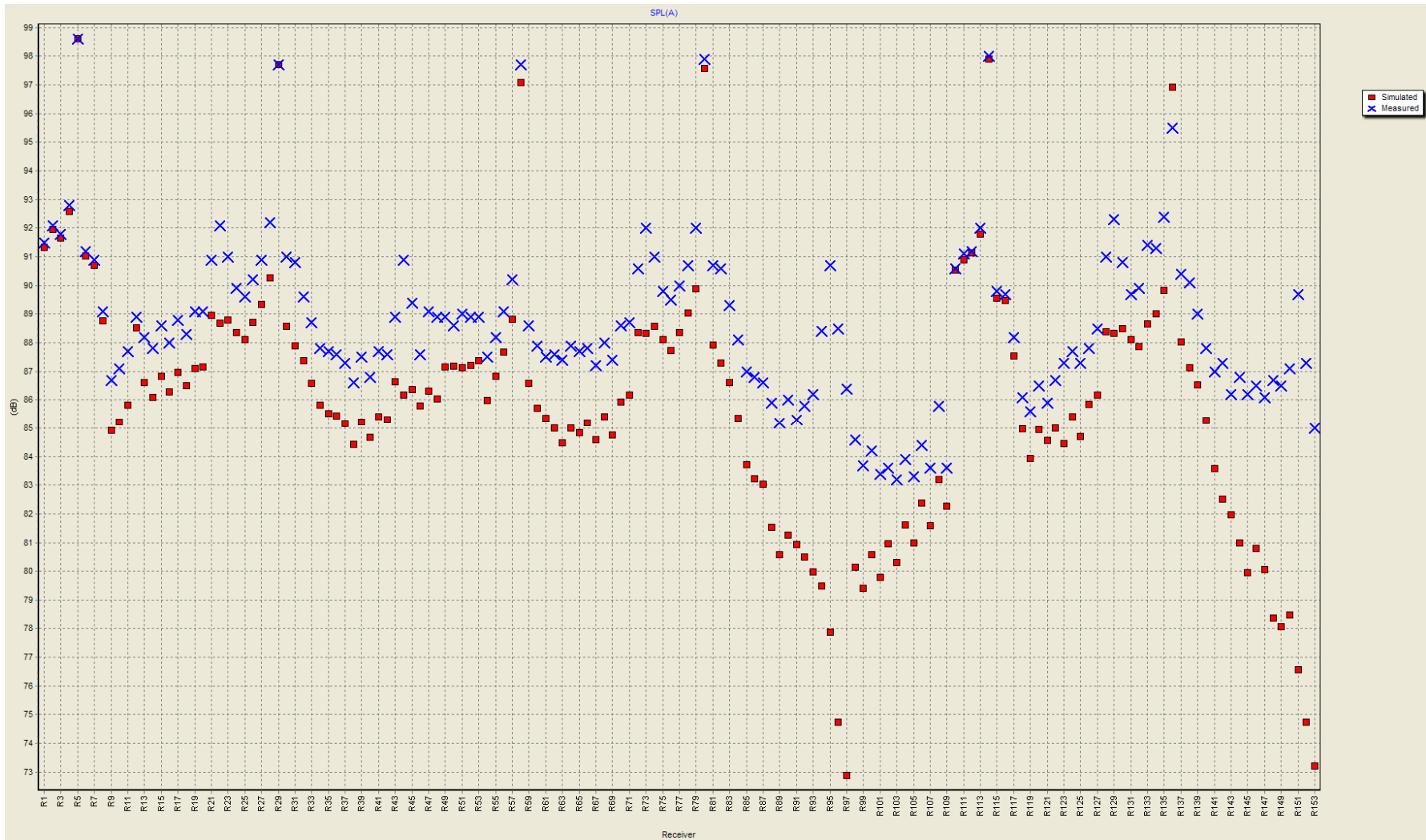


Figura 6.55 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com solução de vedação acústica da saída da tubulação para purificação de óleo do mancal (■).

A Figura 6.55 indica que o NPS médio do piso da Turbina da PA IV passou de 89 a 86 dBA, após o uso de vedação acústica da abertura traseira da sala da turbina.

6.2.1.4 Solução 4: porta acústica na sala da turbina, absorção no poço da turbina e vedação da abertura traseira da sala da turbina

A utilização conjunta das soluções 2 e 3 faz com que seja obtido um resultado de redução drástica no NPS do piso da Turbina, uma vez que praticamente são eliminadas as duas principais fontes acústicas do ambiente (ver Fig. 6.56).

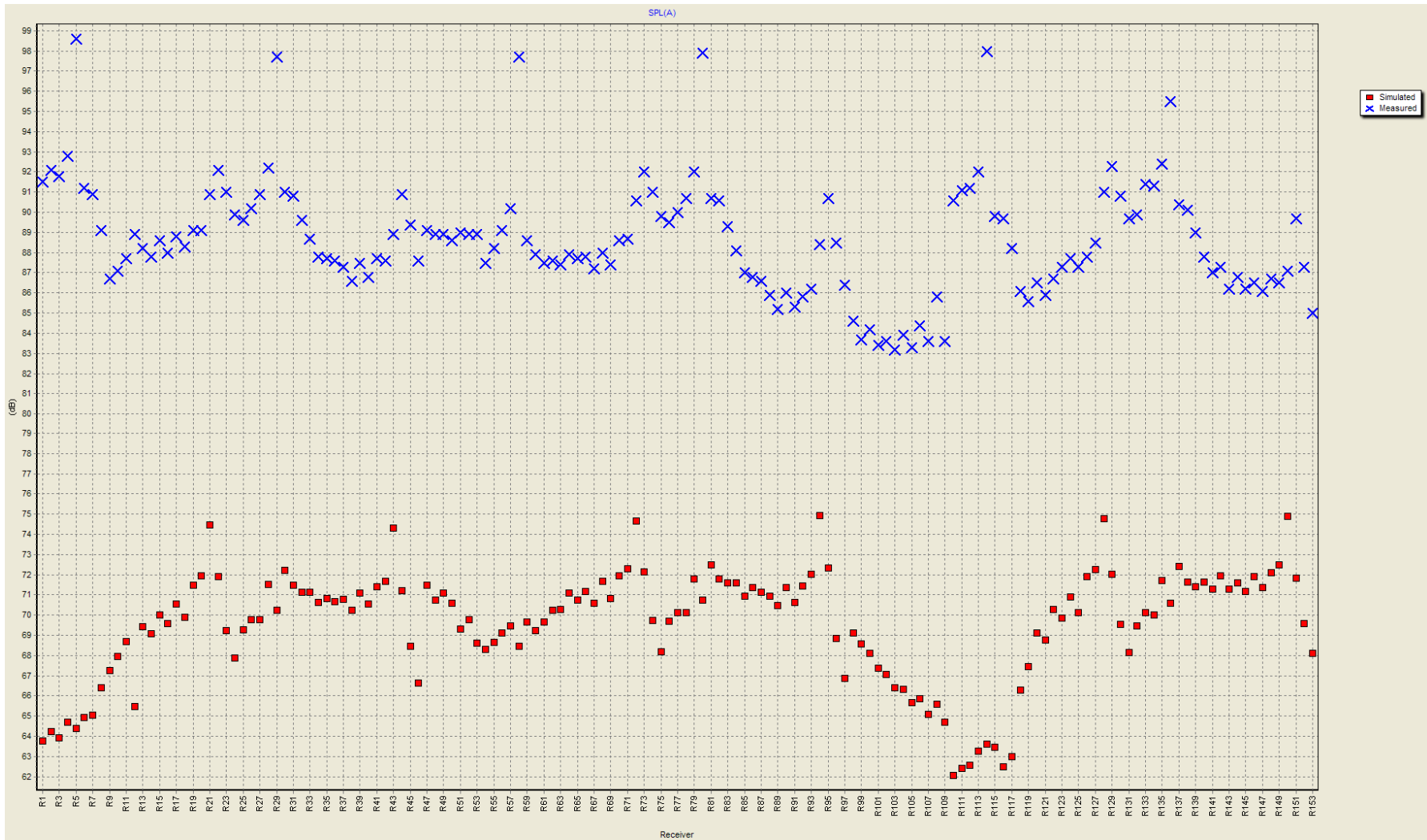


Figura 6.56 – Comparação de NPS (dBA) em função do ponto de medição para o Piso da Turbina da PA IV: modelo numérico validado (X) e modelo numérico validado com combinação das soluções 2 e 3 (■).

A Fig. 6.56 indica que o NPS médio do piso da Turbina da PA IV passou de 89 a 70 dBA, após o uso das soluções 2 e 3 de forma conjunta, o que representa, em potencial, uma significativa redução média de NPS da ordem de 19 dBA. Ressalta-se que, na prática, esta incrível redução não deve ser integralmente observada, caso sejam adotadas as medidas aqui propostas, devido às dificuldades de completa vedação da abertura traseira das salas das turbinas. Além disso, o nível mínimo de ruído a ser alcançado no ambiente é função do nível de ruído de fundo do mesmo, nível este que é desconhecido, uma vez que não é possível parar toda a usina para medi-lo. Entretanto, ainda assim uma redução significativa de NPS do ambiente é esperada, principalmente a partir da utilização conjunta da solução de absorção sonora (solução 1) com a solução 4 aqui discutida.

Alerta-se que em investigações *in situ* foi notado que os motores dos tanques de purificação de óleo são fontes sonoras que se destacam nas regiões próximas a elas. E, portanto, elas foram caracterizadas no ambiente como discutido em 6.1.3.2, o que impõe no ambiente um nível mínimo de ruído como se fosse um nível de ruído de fundo.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Aqui foi demonstrado o procedimento de validação de todos ambientes pilotos e posteriormente foram testadas diferentes medidas de controle de ruído que proporcionaram melhores resultados.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

Foi proposta neste trabalho uma metodologia para desenvolvimento de medidas de controle de ruído em um ambiente de geração de energia elétrica, mais especificamente, de uma hidrelétrica. Tal metodologia conseguiu resultados de medidas de controle de ruído que contribuem para reduzir o NPS médio dos ambientes pilotos para valores abaixo de 85 dBA, que é o valor limite estipulado pela NR-15, para uma jornada de trabalho de 8 h por dia.

De forma resumida, essa metodologia constitui-se numa abordagem numérico-experimental que consiste em:

- Medições experimentais de nível de pressão sonora;
- Desenvolvimento de mapas acústicos a partir das medições de nível de pressão sonora;
- Reconhecimento das fontes sonoras mais influentes através dos mapas acústicos;
- Caracterização das fontes reconhecidas, como tipo de fonte sonora, localização, aspectos de frequência, particularidades do ruído gerado e níveis de potência sonora;
- Desenvolvimento de modelos numéricos dos ambientes, utilizando *software* híbrido de raios acústicos e fontes imagem e validação a partir de comparações com resultados experimentais de nível de pressão sonora; e
- Propostas de medidas de controle de ruído baseadas nos modelos numéricos desenvolvidos.

Todo esse procedimento foi desenvolvido para investigar o campo acústico da casa de força da Usina Hidrelétrica Paulo Afonso IV, onde o Piso do Gerador, o Piso da *Air Housing* e o Piso da Turbina foram selecionados como ambientes pilotos. Tais ambientes foram escolhidos com base na análise dos locais da usina com maior número de colaboradores expostos ao ruído.

No piso do gerador, a principal fonte é o topo do gerador; no piso da turbina a principal fonte são as aberturas das salas das turbinas (porta do poço e abertura para saída de tubulações de óleo dos mancais); e no piso da *air housing* as principais fontes são as portas das *air housings* e as aberturas para saída de barramentos, além das aberturas para exaustão de ar.

A escolha da usina PA IV como alvo da pesquisa do presente trabalho se deu de forma estratégica, pois devido às características desta usina, incluindo seu porte e potência instalada, as soluções de controle de ruído aqui propostas poderão ser adaptadas e aplicadas em outras usinas.

De forma resumida, as Tabelas 7.1 a 7.3 apresentam as soluções definidas em cada ambiente da PA IV, os resultados globais do nível de ruído atual, os resultados globais de nível de ruído alcançados e a diferença global para cada solução.

Tabela 7.1 – Soluções e valores de níveis sonoros médios alcançados para o piso do Gerador da PA IV.

Solução	Nível Atual (dBA)	Nível Alcançado (dBA)	Diferença (dBA)
Absorção sonora completa nas paredes e teto do ambiente	88	79	9,0
Absorção sonora parcial nas paredes e teto do ambiente	88	81	7,0
Enclausuramento parcial compacto revestido internamente com material absorvedor	88	74	14
Absorção sonora parcial e enclausuramento parcial compacto revestido internamente com material absorvedor	88	62	26

Tabela 7.2 – Soluções e valores de níveis sonoros médios alcançados para o piso da *Air Housing* da PA IV.

Solução	Nível Atual (dBA)	Nível Alcançado (dBA)	Diferença (dBA)
Absorção sonora nas principais superfícies do ambiente	90	80	10
Portas acústicas nas <i>Air Housings</i>	90	87	3,0
Vedação da saída dos barramentos	90	88	2,0
Exaustor com atenuadores acústicos	90	89	1,0
Portas acústicas nas <i>Air Housings</i> e vedação da saída dos barramentos	90	84	6,0
Portas acústicas nas <i>Air Housings</i> , vedação da saída dos barramentos e atenuadores acústicos	90	66	24

Tabela 7.3 – Soluções e valores de níveis sonoros médios alcançados para o piso da Turbina da PA IV.

Solução	Nível Atual (dBA)	Nível Alcançado (dBA)	Diferença (dBA)
Absorção sonora nas principais superfícies do ambiente	89	71	18
Porta acústica com absorção na saída do poço da turbina	89	84	5,0
Vedação da saída da tubulação de óleo do mancal	89	86	3,0
Porta acústica na sala da turbina, absorção no poço da turbina e vedação da saída da tubulação de óleo do mancal	89	70	19

Para o piso do gerador da PA IV, o conjunto de soluções investigadas, quando utilizadas conjuntamente, permitiram estimar uma redução média do nível de ruído do ambiente de até 26 dBA (ver Tab. 7.1), reduzindo o nível médio de 88 para 62 dBA, passando a apresentar um valor máximo de 85 dBA para este ambiente. No entanto, frisa-se que tal valor (ver Fig. 6.39) ocorre em um dos quatro pontos de medições situados dentro da clausura proposta.

Para o estudo do piso da *Air Housing* da PA IV, as soluções investigadas, quando utilizadas de forma conjunta, permitiram estimar uma redução média do NPS do ambiente de até 24 dBA, baixando o nível médio de 90 para 66 dBA. Neste caso, o máximo NPS observado foi de 70 dBA (ver Fig. 6.47).

Finalmente, para o piso da Turbina da PA IV, evidenciou-se a possibilidade de uma redução média do nível de ruído de 19 dBA, diminuindo o nível médio de ruído de 89 para 70 dBA. O nível de ruído máximo passou a ser de 72 dBA (ver Fig. 6.56).

É importante salientar que, uma vez que forem reduzidos os níveis de ruído das principais fontes acústicas já identificadas nos ambientes outras fontes de energia acústica, atualmente negligenciáveis por se encontrarem mascaradas, poderão adquirir destaque, impedindo a completa redução de ruído aos níveis previstos. Em todo caso, os resultados obtidos com os estudos realizados apontam para o sucesso na realização do principal objetivo desta dissertação: estudar soluções virtuais de controle de ruído para redução do NPS global dos ambientes até um valor abaixo de 85 dBA, tornando-os acusticamente salubres, de acordo com as normas brasileiras em vigor.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros sugere-se:

- Estudar a implantação, na sua totalidade ou em parte, das soluções pesquisadas neste trabalho na prática, verificando a robustez da metodologia desenvolvida;
- Investigar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em outras usinas hidrelétricas, com mesmo porte ou não, descrevendo os ajustes que se façam necessários para adequação das soluções para outras usinas;
- Verificar a possibilidade de expansão e aprofundamento deste estudo, de modo a incluir, por exemplo, um estudo de adequação térmica dos ambientes pesquisados;
- Estudar o uso de outras técnicas e/ou *softwares* de simulação acústica, quando aplicados ao mesmo problema enfrentado neste trabalho, correlacionando os resultados alcançados;
- Pesquisar a contribuição das vibrações das diversas superfícies dos ambientes pilotos deste trabalho para o nível global de ruído destes, indicando a possibilidade de atenuação das vibrações já existentes, além da prevenção destas vibrações em projetos futuros de novas usinas hidrelétricas.

REFERÊNCIAS

BASTOS, Leopoldo Pacheco. **Controle de Ruído em Instalações de Grupos Geradores:** um estudo de caso. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém. 2007.

BIES, David A., HANSEN, Colin H. **Engineering noise control: theory and practice.** E. and F. N. Spon, London, 1996.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído. 1. ed. São Paulo:** Edgar Blücher, 2006.

BRITO, Luiz Antônio Perrone Ferreira de; BERTOLI, Stelamaris Rolla. **Intensimetria:** uma ferramenta útil na determinação do ruído gerado ao meio ambiente. *Revista de Biociências*, V. 11, n. 3-4, p. 146-154, 2005.

BRITO, Luiz Antônio Perrone Ferreira de. **Correções na Determinação do Nível de Potência Sonora Obtido Através da Técnica Intensimetria.** 2006. 181p, **Tese de Doutorado**, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.

BRUEL & KJAER. **Technical Documentation, Sound Intensity Software BZ7205.** User Manual, 1998.

CAMPO, Nicola; RISSONE, Paolo; TODERI, Marco. **Adaptive Pyramid Tracing:** a new technique for room acoustics. *Applied Acoustics*, **61**, p.199-221, 2000.

CARDOSO, Helder Fábio Santos. **Desenvolvimento de Enclausuramento Parcial Através de Métodos Numéricos para Controle de Ruído de Grupo Geradores em uma Usina Termoelétrica da Eletronorte.** Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém. 2008.

CHEREMISINOFF, Nicholas P. **Noise Control in Industry:** a practical guide. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. Estados Unidos da América, 1996.

CHRISTENSEN, Claus Lyng; RINDEL, Jens Holger. **Prediction Acoustics in Class Rooms**. *Internoise: Environmental Noise Control*, 2005.

CHRISTENSEN, Claus Lyng.; FOGED, Hans Torben. **A Room Acoustical Computer Model for Industrial Environments: the Model and Its Verification**. *Euro-noise 98*, München, Proceedings, p.671-676, 1998.

CHESF, 2009. **Descrição do Aproveitamento de Paulo Afonso**. Disponível em: <http://www.chesf.gov.br/portal/page/portal/chesf_portal/paginas/sistema_chesf/sistema_chesf_geracao/container_geracao?p_name=8A2EEABD3BFFD002E0430A803301D002>. Acesso em: 04 de dezembro de 2009.

COMITÊ NACIONAL DE RUÍDO E CONSERVAÇÃO AUDITIVA. **Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Relacionada ao Trabalho**. Boletim n° 1. São Paulo, 1999.

CROCKER, M. J.; ARENAS, J. P. **Fundamentals of the Direct Measurement of Sound Intensity and Practical Applications**. *Acoustical Physics*, v. 49, n. 2, p. 163-175, 2003.

AZEVEDO, Andréa Pires de Mello de. **Efeito de Produtos Químicos e Ruído na Gênese de Perda Auditiva Ocupacional, 2004**. 162 f. Dissertação de Mestrado, Centro de Estudos da Saúde do Trabalhador e Ecologia Humana, Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Ministério da Saúde, 2004.

DIDONÉ, Janete Aragones. **Perda Auditiva dos Motoristas de Ônibus por Exposição ao Ruído: medição, análise e propostas de prevenção, 2004**. 173 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção – Ergonomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004.

E. & F. N. Spon. **Noise Control in Industry**. Sound Research Laboratories Ltd, 3.ed. Taylor & Francis e-Library, 2004.

EHC 12. **Environmental Health Criteria 12: noise**. International Programme on Chemical Safety, 1980.

ELORZA, David Oliva. **Room Acoustics Modeling Using the Ray-Tracing Method: Implementation and Evaluation**. Licentiate Thesis, University of Turku, Department of Physics, 2005.

EMBRECHTS, J. J. **Broad Spectrum Diffusion Model for Room Acoustics Ray-Tracing Algorithm**. *J. Acoust. Soc. Am.* **107**(4), p.2068-2081, 2000.

FAHY, F. J. **Sound Intensity**. 2.ed. London: E&FN SPON, 1995.

FAHY, F. J. **International Standards for Determination of Sound Power Levels of Sources Using Sound Intensity Measurement: An Exposition**. *Applied Acoustics*, 50 (2), p. 97-109, 1997.

FERNADES, João Candido. **Avaliação da Perda de Audição Induzida por Ruído em Trabalhadores Expostos a Níveis Inferiores a 85 dBA**. Disponível em: <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/avaliacao-joao-fernandes.doc>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2009.

FERNÁNDEZ, Marcos D.; QUINTANA, Samuel; CHAVARRÍA, Noelia; BALLESTEROS, José A., **Noise Exposure of Workers of the Construction Sector**. *Applied Acoustics* **70**, p.753-760, 2009.

FUJIMOTO, Antonio Katsushi. **Estudo da Qualidade Acústica de Salas Residenciais para uso de Sistemas de Áudio e Vídeo**. 2004. 98f. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

FUNKHOUSER, Thomas et al. **A Beam Tracing Method for Interactive Architectural Acoustics**. *J. Acoust. Soc. Am.* 115 (2), p.739-756, 2004.

GADE, S. **Sound Intensity**. B&K Technical Review, n. 3, 1982.

GERGES, Samir Nagi Yousri. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: NR, 2000.

GUEDES, Reginaldo Cascaes. **Projeto e Construção de uma Câmara Reverberante em Escala Reduzida para a Caracterização Acústica de Materiais Absorvedores.** 2007. 130f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

HODGSON, Murray. **Case History: Factory Noise Prediction Using Ray Tracing – Experimental Validation and the Effectiveness of Noise Control Measures.** Noise Control Engineering Journal, v.33, n.3, p. 97–104, 1989.

HOWARTH, M. J.; LAM, Y. W. **An Assessment of the Accuracy of a Hybrid Room Acoustics Model with Surface Diffusion Facility.** Applied Acoustics, 60, p.237-251, 2000.

HÜBNER, G. **Sound Intensity Measurement Method: Errors in Determining the Sound Power Levels of Machines and Its Correlation with Sound Field Indicators.** Internoise: Proceedings, 1987.

INTERNATIONAL ELECTRICAL CONGRESS, IEC 61043. **Electroacoustics: Instruments for the Measurement of Sound Intensity – Measurements with Pairs of Pressure Sensing Microphones.** London, 1993.

ISO 9614-1. **Acoustics: Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – part 1: Measurement at discrete points,** 1993.

ISO 9614-2. **Acoustics: Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – part 2: Measurement by scanning,** 1996.

ISO/DIS 9614-3. **Acoustics: Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – part 3: Precision method for measurement by scanning,** 2000.

JACOBSEN, Finn. **Sound Intensity and Its Measurement and Applications.** Note No. 31262, Acoustic Technology, Orsted – DTU, Technical University of Denmark, Denmark, 2006. Disponível em: <http://Server.elektro.dtu.dk/ftp/fja/Sound_intensity.pdf>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2009.

JACOBSEN, Finn. **An Overview of the Sources of Error in Sound Power Determination Using the Intensity Technique**. Applied Acoustics, v.50, n. 2, p. 155-166, 1997.

JEONG, Cheol-Ho; IH, Jeong-Guon; RINDEL, Jens H. **An Approximate Treatment of Reflection Coefficient in the Phased Beam Tracing Method for the Simulation of Enclosed Sound Fields at Medium Frequencies**. Applied Acoustics, **69**, p. 601-613, 2008.

KROKSTAD, A.; STRØM, S.; SØRSDAL, S. **Calculating the Acoustical Room Response by the Use of a Ray Tracing Technique**. J. Sound Vib., 8, p.118-125, 1968.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room Acoustics**. 4. ed. London: Spon Press, 2000.

MAGNOLI, Marcelo Vinicius. **Cálculo das Velocidades Angulares Críticas da Linha de Eixo de Turbinas Hidráulicas com Ênfase no Comportamento Estrutural Dinâmico do Gerador**, 2005. 150f. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MELO, Gustavo da Silva Vieira de. **Desenvolvimento de Metodologia de Controle de Ruído em Ambientes de Produção de Energia Elétrica**. Relatório Técnico. Etapa 7 – Fase 2, Relatório Final, 2009.

MELLO JUNIOR, Paulo Roberto Moretzsohn de. **O Ruído Industrial e Sua Regulamentação Nacional e Internacional**. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 1998.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, SECRETARIA DE ATENÇÃO À SAÚDE, DEPARTAMENTO DE AÇÕES PROGRAMÁTICAS ESTRATÉGICAS, **Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR)**. Saúde do Trabalhador: Protocolos de Complexidade Diferenciada 5. Série A. Normas e Manuais Técnicos. Ed. do Ministério da Saúde. Brasília, 2006.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. Norma Regulamentadora de Segurança e Saúde do Trabalho, NR 7, **Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional**, 25 fevereiro 1997. Portaria 19 de 9 de abril 1998. Disponível em:

http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentaDORAS/nr_07_at.pdf. Acesso em: 04 de dezembro de 2009.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. Norma Regulamentadora de Segurança e Saúde do Trabalho, NR-15. **Atividades e Operações Insalubres**. Norma Regulamentadora, Ministério do Trabalho e Emprego.

ÑAUPA, Rolando M. P. **Monitoramento e Diagnóstico de Cavitação em Turbinas Hidráulicas Utilizando Técnicas de Vibração e Acústica**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1995.

NBR 10152. **Níveis de ruído para conforto acústico**, ABNT, 1989.

NIOSH [1998]. **Occupational Noise Exposure**. U. S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication n. 98-126.

NIOSH [1996]. **Preventing Occupational Hearing Loss: a practical guide**. U. S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication n. 96-110.

ODEON, Help. **ODEON 10.1 Combined**. Software, Universidade Técnica da Dinamarca, 2009.

ODEON, ROOM ACOUSTICS PROGRAM. **User Manual: Industrial, Auditorium and Combined Editions**. Version 9.1. 2008.

OLSON, H. F., **Field Type Acoustic Wattmeter**. Journal Audio Engineering Society, Vol. 22, 321-328 pp, 1932, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 2. ed. 294 p.

ONDET, A. M.; BARBRY, J. L. **Modeling of Sound Propagation in Fitted Workshops Using Ray Tracing**. J. Acoust. Soc. Am. **85** (2), p.787-796, 1989.

PLEECK, D; DE GEEST, E. **The Practical Application of a Ray Tracing Program in Industrial Noise Control**. Euro Noise, 1995.

PRODUCT DATA, **Sound Intensity Probe Kit – Type 3599**. Brüel & Kjaer.

RINDEL, Jens H., **Computer Simulation Techniques for Acoustical Design of Room**. Acoustics Australia, **23**, p.81-86, 1995.

RINDEL, Jens H., **The Use of Computer Modeling in Room Acoustics**. Journal of Vibroengineering, **3** (4), p.41-72, 2000.

RINDEL, Jens H.; CHRISTENSEN, Claus L., **ODEON, A Design Tool for Noise Control in Indoor Environments**. França; Lille: Noise at Work, 2007.

SAVIOJA, Lauri; HUOPANIEMI, Jyri; LOKKI, Tapio; VÄÄNÄNEN, Riitta. **Creating Interactive Virtual Acoustic Environments**. J. Audio Eng. Soc. **47** (9), 1999.

SAVIOJA, Lauri. **Modeling Techniques for Virtual Acoustics**. 69 p. Tese de Doutorado. Helsinki University of Technology, Espoo 1999.

SCHROEDER M.; ATAL B.; BIRD C. **Digital Computers in Room Acoustics**. Proc. 4th Inter. Cong. Acoust., Paper M21, Copenhagen, 1962.

SMITH, Heather M. **Center Geometric Acoustic Modeling of the LDS Conference**. 211 pp. Dissertação de Mestrado. Brigham Young University, 2004.

SORAINEN, E.; KOKKOLA, H. **Optimal noise control in a carpentry plant**. Applied Acoustics , v. 61, p. 37-43, 2000.

SOUZA, Mauricy Cesar Rodrigues de. **Previsão do Ruído em Salas por Raios Acústicos e Ensaios Experimentais**,1997. 114 p. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SOUZA, Mauricy Cesar Rodrigues de. **Determinação da Potência Sonora em Ambientes Industriais por Intensimetria Acústica**. 2003. 110 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SVENSSON, Peter. **The Early History of Ray Tracing in Room Acoustics**. Reprint from: Reflections on Sound, in honour of Professor Emeritus: Asbjørn Krokstad. Norwegian University of Science and Technology, 2008.

TENENBAUM, Roberto A.; CAMILO, Thiago S. **Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Teoria, Implantação Computacional e Validação Experimental**. In: SEMINÁRIO MÚSICA CIÊNCIA TECNOLOGIA: ACÚSTICA MUSICAL, 1., 2004, São Paulo. ANAIS... Rio de Janeiro, 2004, p. 26-40. Disponível em: http://gsd.ime.usp.br/acmus/publi/textos/02_tenenbaum.pdf. Acesso em: 04 de dezembro de 2009.

VAN KAMP, I. **Environmental Noise and Health: psychological aspects in the relation between noise and health: choice and measurements of concepts, in dutch**. Groningen: Center for Energy and Environmental Studies, 1986.

VORLÄNDER, M. **Simulation of the Transient and Steady-State Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-Tracing/Image-Source Algorithm**. J. Acoust. Soc. Am. **86**, p.172-178, 1989.

XIANGYANG, Zeng; KE-AN, Chen; JINCAI, Sun. **Development of a Hybrid Computer Model for Simulating the Complicated Virtual Sound Field in Enclosures**. Applied Acoustics, **63**, p.481-491, 2002.

ZHANG, Yan. **A Method Reverberation Time in Concert Hall Preliminary Design Stage**. 163 p. Tese de Doutorado. Georgia Institute of Technology, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ROTINA EM MATLAB PARA DESENVOLVIMENTO DE MAPA ACÚSTICO

A.1. Arquivo “Mapa_acustico_PA_I_Piso_Gerador.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMMAND WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIÁVEIS SALVAS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1)
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIA O RETÂNGULO QUE REPRESENTA A ÁREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SÃO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SÃO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 60 15],'LineWidth',1.5);
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICÕES.
x=[
53.50 47.25 35.50 5.25 17.25
53.50 41.50 29.50 23.50 11.50
53.50 41.50 29.50 23.50 11.50
47.25 35.50 26.50 17.25 5.25
47.25 35.50 26.52 17.25 5.25
];%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICÕES.
y=[
2.00 2.00 2.00 2.00 2.00
7.25 2.00 2.00 7.25 2.00
12.61 12.61 7.25 12.61 12.61
12.61 12.61 12.61 12.61 12.61
7.25 7.25 2.00 7.25 7.25
];%
%MATRIZ COM OS VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA.
z=[
82.10 84.70 85.50 84.00 85.30
81.40 85.10 84.10 83.50 84.60
83.20 83.60 83.20 83.90 85.70
83.70 85.20 84.00 83.40 84.30
84.90 83.90 83.20 85.90 85.80
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA I: Piso do Gerador (Mínimo: ', ...
num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid([5.25:0.1:53.4],[2:0.1:12.6]);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-0.5 61 -0.5 15.5])
grid off
axis off
hold off

```

toc

A.2. Arquivo “Mapa_acustico_PA_I_Piso_Turbina.m”

```
%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMMAND WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIÁVEIS SALVAS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIA O RETÂNGULO QUE REPRESENTA A ÁREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SÃO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SÃO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 51.25 15],'LineWidth',1.5);
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICOES.
x=[
9.00 19.13 15.68 4.08 11.63 29.25 34.13 22.58 41.63 49.13 41.63
11.63 19.13 11.63 4.08 11.63 34.13 34.13 26.63 44.25 49.13 37.58
14.25 19.13 7.52 4.08 24.00 34.13 30.68 26.63 49.13 49.13 41.63
19.13 19.13 4.08 4.08 26.63 34.13 26.63 39.00 49.13 45.68 41.63
];%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICOES.
y=[
1.00 5.50 13.50 9.00 10.99 1.00 9.00 13.50 1.00 7.25 13.50
1.00 7.25 13.50 7.20 9.04 1.00 13.50 10.99 1.00 9.00 13.50
1.00 9.00 13.50 5.50 1.00 5.50 13.50 9.04 1.00 13.50 10.99
1.00 13.50 13.50 1.00 1.00 7.25 13.50 1.00 5.50 13.50 9.04
];%
%MATRIZ COM OS VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA.
z=[
86.50 88.00 88.00 86.00 93.80 87.40 89.00 88.90 87.20 88.40 92.40
87.10 88.00 90.10 86.10 96.90 88.20 89.30 93.60 87.30 88.80 90.10
86.50 88.30 89.30 86.10 87.20 88.70 89.50 96.70 87.90 88.40 96.30
87.30 88.00 88.00 85.50 87.30 88.70 90.60 87.60 88.50 89.60 100.00
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA I: Piso da Turbina (Mínimo: ',...
num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid([4.1:0.1:49],[1:0.1:13.4]);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI,'cubic');
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-0.5 52 -0.5 15.5])
grid off
axis off
hold off
toc
```

A.3. Arquivo “Mapa_acustico_PA_II_Piso_Gerador.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMMAND WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIÁVEIS SALVAS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIA O RETÂNGULO QUE REPRESENTA A ÁREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SÃO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SÃO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 110.75 16.6],'LineWidth',1.5);
%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICOES.
x=[
101.25 93.65 86.05 78.45 64 55.9 47.8 40.2 31.8 24.2 16.6
101.25 93.65 78.45 70.85 64 55.9 47.8 40.2 31.8 16.6 9
93.65 86.05 78.45 70.85 64 55.9 47.8 31.8 24.2 16.6 9
];%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICOES.
y=[
1.5 8.75 14.25 1.5 14.25 1.5 14.25 1.5 8.75 14.25 1.5
14.25 1.5 14.25 1.5 8.75 8.75 8.75 14.25 1.5 14.25 1.5
14.25 1.5 8.75 14.25 1.5 14.25 1.5 14.25 1.5 8.75 14.25
];%
%MATRIZ COM OS VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA.
z=[
86.8 85.8 86.6 86.1 84.5 84.4 84.1 83.9 83.2 83.1 82.8
86.5 86.3 85.7 86.6 84.9 83.9 83.8 83.9 83.3 82.9 82.5
85.8 86.6 86.2 85.8 85.1 84.2 83.8 83.2 83.2 82.8 82.6
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA II: Piso do Gerador (Mínimo: ', ...
num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid([9:0.1:101.25],[1.5:0.1:14.25]);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-1 111.75 -1 17])
grid off
axis off
hold off
toc

```

A.4. Arquivo “Mapa_acustico_PA_II_Piso_Turbina.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMMAND WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIÁVEIS SALVAS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.

```

```

f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%cria o retangulo que representa a area interna do local em estudo. onde o
%elemento a11 e a12 sao origem (x,y) e a13 e a14 sao comprimento e altura
%respectivamente.
a=rectangle('Position',[0 0 110.75 16.6],'LineWidth',1.5);
%matriz com as coordenadas x dos pontos de medicoes.
x=[
68.60 86.05 108.85 48.84 16.60 26.45
70.85 88.30 106.63 48.84 14.38 24.20
73.10 91.88 103.63 48.84 11.25 21.95
76.68 93.65 101.25 51.39 9.00 33.27
78.45 93.65 99.00 54.48 6.75 37.95
78.45 93.65 95.64 57.39 2.07 40.20
78.45 93.65 109.71 57.39 1.13 42.45
78.45 91.88 109.71 54.48 1.13 46.03
76.68 88.30 61.94 51.39 1.13 46.03
73.10 86.05 61.94 51.39 1.13 46.03
70.85 83.80 60.18 54.48 17.27 46.03
68.60 80.44 60.18 57.39 21.95 46.03
63.92 94.32 60.18 2.07 24.20 45.58
63.92 99.00 60.18 6.75 26.45 42.45
63.92 101.25 60.18 9.00 30.03 40.20
63.92 103.63 57.39 11.25 31.80 37.95
63.92 108.85 54.48 14.83 31.80 47.76
63.92 108.85 51.39 16.60 31.80 47.76
79.12 108.85 48.84 16.60 31.80 0.74
83.80 108.85 48.84 16.60 29.58 0.74
];%
%matriz com as coordenadas y dos pontos de medicoes.
y=[
1.63 1.63 14.07 7.70 14.07 15.43
1.63 1.63 15.43 5.32 15.43 15.43
1.63 2.70 15.43 2.45 15.43 15.43
2.70 6.50 15.43 10.57 15.43 1.63
6.50 8.75 15.43 10.57 15.43 1.63
8.75 11.00 15.43 10.57 15.43 1.63
11.00 14.07 15.42 7.70 12.12 1.63
14.07 15.43 0.84 7.70 11.00 2.70
15.43 15.43 0.84 7.70 8.75 6.50
15.43 15.43 15.42 4.98 6.50 8.75
15.43 15.43 2.45 4.98 1.63 11.00
15.43 15.43 5.32 4.98 1.63 14.07
15.43 1.63 7.70 1.63 1.63 15.43
12.99 1.63 10.57 1.63 1.63 15.43
11.00 1.63 14.23 1.63 2.70 15.43
8.75 1.63 14.23 1.63 6.50 15.43
6.50 2.70 14.23 2.70 8.75 16.14
1.63 6.50 14.23 6.50 11.00 0.58
1.63 8.75 14.23 8.75 14.07 0.58
1.63 11.00 10.57 11.00 15.43 16.14
];%
%matriz com os valores de nivel de pressao sonora.
z=[
89.2 91.5 92.0 87.3 81.9 84.1
89.8 91.1 92.4 86.1 80.9 83.3
90.1 91.6 93.1 85.5 80.1 82.4
90.4 94.0 92.8 86.5 79.4 85.3
92.2 94.8 93.4 86.6 78.6 85.4
92.8 95.2 94.0 87.2 78.9 85.6
92.6 95.0 91.8 86.6 79.0 85.5
91.7 94.8 91.2 86.0 79.3 87.6
91.6 93.7 87.9 85.8 79.8 88.6
91.3 93.1 86.6 85.2 80.1 88.7
90.6 92.3 87.1 85.7 83.2 88.0
90.1 91.8 87.6 85.6 83.7 86.6
89.1 91.5 88.5 81.3 84.4 86.6
88.2 92.0 87.5 81.5 84.6 86.2
89.5 91.0 87.0 81.8 87.3 86.3
90.3 91.4 84.3 82.1 87.9 86.1
88.6 91.1 84.4 82.9 87.4 86.3
88.5 92.0 85.0 83.0 86.8 85.4
90.8 92.8 86.3 82.9 85.8 80.0
90.8 93.9 88.1 82.7 85.1 78.0

```

```

];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA II: Piso da Turbina (Mínimo: ', ...
      num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
      'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid([1.5:0.1:109.5],[1.5:0.1:15.25]);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-1 111.75 -1 17])
grid off
axis off
hold off
toc

```

A.5. Arquivo “Mapa_acustico_PA_III_Piso_Gerador.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMMAND WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIÁVEIS SALVAS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIA O RETANGULO QUE REPRESENTA A AREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SAO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SAO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 98.25 18.8],'LineWidth',1.5);
%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICOES.
x=[
81 73.5 66.5 37 29.5 22.5
88.5 70 59 44.5 26 15
81 59 51.5 37 15 7.5
];%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICOES.
y=[
3 10.5 10.5 3 10.5 10.5
10.5 10.5 18 10.5 10.5 18
18 3 10.5 18 3 10.5
];%
%MATRIZ COM OS VALORES DE NIVEL DE PRESSAO SONORA.
z=[
83.3 84.1 86.5 84.9 85.4 83.6
83.2 84.6 87.1 86.7 84.4 82.9
84.1 86.8 87.4 86.2 83.5 82.7
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA III: Piso do Gerador (Mínimo: ', ...
      num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
      'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid([15:0.1:81],[3:0.1:17.9]);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);

```

```

ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-1 99 -1 19])
grid off
axis off
hold off
toc

```

A.6. Arquivo “Mapa_acustico_PA_III_Piso_Turbina.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMAD WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIAVEIS SALVAS NA MEMORIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIA O RETANGULO QUE REPRESENTA A AREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SAO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SAO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 91.75 18.8],'LineWidth',1.5);
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICOES.
x=[
11.00 26.00 11.00 29.50 48.00 37.00 59.00 70.00 77.00 90.80
15.00 26.00 7.50 33.00 48.00 33.00 63.00 66.50 81.00 90.80
15.00 26.00 3.75 37.00 48.00 29.50 66.50 63.00 81.00 91.80
15.00 26.00 3.75 37.00 48.00 51.50 70.00 59.00 81.00 85.00
19.00 22.50 3.75 37.00 48.00 55.00 70.00 55.00 85.00 81.00
22.50 19.00 3.75 41.00 44.50 59.00 70.00 51.50 90.80 77.00
26.00 15.00 3.75 44.50 41.00 59.00 70.00 73.50 90.80 73.50
];%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICOES.
y=[
1.50 6.00 17.90 1.50 1.50 17.90 6.57 17.90 1.50 10.50
1.50 10.50 17.90 1.50 6.00 17.90 1.50 17.90 1.50 14.00
4.31 14.00 17.90 1.50 10.50 17.90 1.50 17.90 4.31 17.90
6.57 17.90 14.00 4.31 14.00 1.50 1.50 17.90 6.57 17.90
1.50 17.90 10.50 6.57 17.90 1.50 6.00 17.90 1.50 17.90
10.50 17.90 6.00 1.50 17.90 1.50 10.50 17.90 1.50 17.90
1.50 17.90 1.50 1.50 17.90 4.31 14.00 1.50 6.00 17.90
];%
%MATRIZ COM OS VALORES DE NIVEL DE PRESSAO SONORA.
z=[
79.2 88.7 81.7 78.1 92.3 82.7 97.2 85.8 86.5 89.8
81.0 89.4 84.4 89.9 97.2 83.8 87.8 84.2 87.1 85.9
77.8 87.3 81.4 91.0 98.0 84.9 87.0 85.0 91.2 81.8
78.2 85.4 81.1 97.7 94.0 88.4 86.8 82.9 95.2 79.7
83.9 83.5 79.7 102.0 89.3 89.2 89.0 85.1 88.9 79.5
85.3 81.0 78.1 92.6 86.0 88.1 90.4 87.8 88.9 82.1
86.6 79.7 77.2 93.0 85.0 93.0 87.7 91.2 92.8 83.8
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA III: Piso da Turbina (Mínimo: ', ...
num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid(3.85:0.1:90.8,1.5:0.1:17.9);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);

```

```

ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-1 93 -1 19])
grid off
axis off
hold off
toc

```

A.7. Arquivo “Mapa_acustico_PA_IV_Piso_Gerador.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMMAND WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIÁVEIS SALVAS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIA O RETÂNGULO QUE REPRESENTA A ÁREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SÃO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SÃO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 94.2 11.6],'LineWidth',1.5);
%
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICOES.
x=[
68.80 71.20 73.61 76.01 78.42 80.82 83.22 85.63 88.03 90.44 92.84
68.80 71.20 73.61 76.01 78.42 80.82 83.22 85.63 88.03 90.44 92.84
68.80 71.20 73.61 76.01 78.42 80.82 83.22 85.63 88.03 90.44 92.84
68.80 71.20 73.61 76.01 78.42 80.82 83.22 85.63 88.03 90.44 92.84
68.80 71.20 73.61 76.01 78.42 80.82 83.22 85.63 88.03 90.44 92.84
];
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICOES.
y=[
1.13 10.47 1.13 10.47 1.13 10.47 1.13 10.47 1.13 10.47 1.13
3.46 8.14 3.46 8.14 3.46 8.14 3.46 8.14 3.46 8.14 3.46
5.80 5.80 5.80 5.80 5.80 5.80 5.80 5.80 5.80 5.80 5.80
8.14 3.46 8.14 3.46 8.14 3.46 8.14 3.46 8.14 3.46 8.14
10.47 1.13 10.47 1.13 10.47 1.13 10.47 1.13 10.47 1.13 10.47
];
%MATRIZ COM OS VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA.
z=[
87.1 87.7 88.0 88.1 87.3 88.2 87.6 89.1 88.0 87.2 87.9
87.2 88.1 88.1 87.9 87.6 87.8 88.5 88.1 88.4 88.1 87.2
87.2 88.1 88.2 87.9 87.7 87.9 88.1 88.2 88.3 87.3 87.7
87.6 87.5 88.8 88.1 87.6 87.7 88.1 87.7 87.8 87.0 87.2
87.3 87.6 88.1 87.6 87.8 87.4 87.9 87.7 87.2 87.0 88.2
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS (dBA) Global da PA IV: Piso do Gerador (Mínimo: ', ...
num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid([68.9:0.1:92.84],[1.13:0.1:10.47]);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)

```



```

colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-1 95 -1 11.8])
grid off
axis off
hold off
toc

```

A.8. Arquivo “Mapa_acustico_PA_IV_Piso_Air_Housing.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMAD WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIÁVEIS SALVAS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIA UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIA O RETÂNGULO QUE REPRESENTA A ÁREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SÃO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SÃO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 97.5 11.6],'LineWidth',1.5);
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICOES.
x=[
3.00 17.85 34.61 56.95 71.32
0.56 17.85 36.96 56.95 73.23
1.53 20.20 36.96 56.95 75.21
0.56 20.20 38.96 59.22 75.21
1.53 22.19 38.96 59.22 77.56
0.56 22.19 42.66 59.22 77.56
1.53 25.90 42.66 59.22 79.56
2.44 25.90 42.66 59.22 79.56
0.56 25.90 42.66 61.80 83.26
1.79 25.90 42.66 61.80 83.26
3.02 25.90 46.56 61.80 83.26
0.56 23.64 45.10 61.80 83.26
1.79 27.57 44.12 64.12 83.26
4.45 29.31 44.12 64.12 87.18
4.45 27.57 45.10 64.12 85.72
6.80 29.31 45.10 64.12 84.74
6.80 29.31 46.01 64.12 84.74
8.79 27.57 44.12 66.39 85.72
8.79 27.57 45.35 66.39 85.72
12.50 29.31 46.58 66.39 86.63
12.50 29.31 44.12 66.39 84.74
12.50 27.57 46.03 66.39 85.97
12.50 27.57 48.01 68.62 87.20
12.50 29.31 48.01 68.62 84.74
10.24 33.16 50.36 68.62 86.65
16.40 31.70 50.36 68.62 88.63
14.93 30.72 52.36 68.62 88.63
13.96 30.72 52.36 73.76 90.98
13.96 31.70 53.79 72.30 90.98
14.93 31.70 53.79 71.32 92.98
14.93 32.61 55.38 71.32 92.98
15.84 30.72 55.38 72.30 96.68
13.96 31.70 55.38 72.30 96.68
15.19 33.18 53.80 73.21 96.68
16.42 30.72 55.32 71.32 96.68
13.96 32.62 56.95 72.30 96.68
15.87 34.61 56.95 73.78 94.92
];
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICOES.
y=[
10.80 0.63 1.81 6.17 0.63
9.16 1.81 0.63 8.39 0.63
9.16 0.63 1.81 10.46 0.63

```

```

6.90    1.81    0.63    10.46    1.81
6.90    0.63    1.81    8.39    0.63
4.62    1.81    0.63    6.17    1.81
4.62    0.63    1.81    3.80    0.63
4.62    1.81    5.09    1.29    1.81
2.94    5.09    7.19    3.80    0.63
2.94    7.19    9.56    6.17    1.81
2.94    9.56    10.90    8.39    5.09
0.53    11.12    9.26    10.46    7.19
0.53    0.89    9.26    10.46    9.56
0.53    0.89    7.00    8.39    10.90
1.71    2.96    7.00    6.17    9.26
0.53    2.96    4.72    3.80    9.26
1.71    4.83    4.72    1.29    7.00
0.53    4.83    3.04    1.29    7.00
1.71    6.56    3.04    3.80    4.72
0.53    6.56    3.04    6.17    4.72
1.71    8.84    0.63    8.39    3.04
4.99    8.84    0.63    10.46    3.04
7.09    10.70    0.63    10.46    3.04
9.46    10.70    1.81    8.39    0.63
11.02    10.90    0.63    6.17    0.63
10.90    9.26    1.81    3.80    0.63
9.26    9.26    0.63    1.29    1.81
9.26    7.00    1.81    10.90    0.63
7.00    7.00    0.63    9.26    1.81
7.00    4.72    1.81    9.26    0.63
4.72    4.72    3.72    7.00    1.81
4.72    3.04    7.19    7.00    0.63
3.04    3.04    9.56    4.72    1.81
3.04    3.04    11.12    4.72    5.09
3.04    0.63    1.29    3.04    7.19
0.63    0.63    1.29    3.04    9.56
0.63    0.63    3.80    3.04    11.12
];
%MATRIZ COM OS VALORES DE NIVEL DE PRESSAO SONORA.
z=[
89.8    91.9    91.5    87.1    90.5
89.7    90.8    90.0    87.6    93.3
89.8    89.2    90.1    87.3    92.2
89.8    89.4    88.7    87.5    91.5
90.7    88.5    89.3    87.8    89.1
89.6    88.7    89.2    87.4    89.6
90.3    88.5    89.3    87.3    87.6
90.7    88.9    89.5    87.3    88.5
90.4    89.2    89.6    87.7    87.5
90.4    88.9    89.5    87.2    88.6
91.3    88.8    89.7    87.6    89.1
91.0    88.6    90.2    87.1    89.6
91.3    88.7    89.7    86.0    89.5
89.5    88.9    89.7    86.5    90.6
89.8    89.1    90.4    86.7    90.8
89.4    89.1    89.6    86.7    90.0
89.5    89.2    90.5    87.2    89.9
89.2    89.1    90.1    87.1    91.2
89.6    89.9    89.9    87.1    90.1
89.1    89.2    90.5    87.1    91.1
89.4    89.8    89.5    86.4    89.9
89.8    90.3    91.4    86.5    90.4
89.5    90.0    90.5    86.4    91.7
89.2    89.7    89.6    86.7    89.0
88.4    89.4    89.5    87.0    91.0
89.9    89.9    90.2    87.7    89.8
89.9    89.5    87.8    88.0    89.8
89.4    89.6    88.3    86.7    88.9
89.8    90.5    86.5    88.3    88.9
90.3    90.4    87.1    87.6    87.9
89.7    91.3    87.6    88.5    88.9
91.3    91.0    86.8    89.8    88.5
90.6    91.5    87.1    89.2    88.0
90.6    93.6    87.0    91.9    88.8
91.3    90.7    85.8    90.4    88.0
89.8    93.0    87.0    91.7    87.9
91.6    92.4    86.8    93.1    88.0
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);

```

```

ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS(dBA) Global da PA IV: Piso da Air Housing (Mínimo: ', ...
      num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
      'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid(0.56:0.1:96.68,0.63:0.1:11.02);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-0.5 98 -0.5 11.8])
grid off
axis off
hold off
toc

```

A.9. Arquivo “Mapa_acustico_PA_IV_Piso_Turbina.m”

```

%LIMPA OS COMANDOS DA JANELA COMAD WINDOWS.
clc
%LIMPA AS VARIAVEIS SALVAS NA MEMORIA DO COMPUTADOR PELO MATLAB.
clear all
%INICIA CONTAGEM DE TEMPO. PODE SER DESCARTADO.
tic
%CRIAR UMA JANELA PARA PLOTAR O MAPA ACUSTICO.
f=figure(1);
%
set(f,'Color',[1 1 1])
%
hold on
%CRIAR O RETANGULO QUE REPRESENTA A AREA INTERNA DO LOCAL EM ESTUDO. ONDE O
%ELEMENTO a11 E a12 SAO ORIGEM (x,y) E a13 E a14 SAO COMPRIMENTO E ALTURA
%RESPECTIVAMENTE.
a=rectangle('Position',[0 0 97.5 11.6],'LineWidth',1.5);
%MATRIZ COM AS COORDENADAS X DOS PONTOS DE MEDICOES.
x=[
2.21 28.63 62.65
0.56 29.60 64.68
2.21 32.37 64.68
0.56 32.37 66.71
2.21 30.72 66.71
4.63 30.72 68.73
0.56 32.37 68.73
2.44 34.82 72.97
0.56 30.72 72.97
0.56 32.61 71.32
1.81 30.72 71.32
3.02 30.72 72.97
3.02 31.97 75.39
4.45 34.61 71.32
4.45 34.61 72.97
6.80 36.96 71.32
6.80 36.96 71.32
8.79 38.96 72.57
8.79 38.96 75.21
12.50 42.66 75.21
12.50 42.66 77.56
11.64 41.80 77.56
12.50 42.66 79.56
12.50 42.66 79.56
10.24 40.40 83.26
15.61 45.77 83.26
15.61 45.77 82.40
13.96 44.12 83.26
13.96 44.12 83.26
15.61 45.77 81.00

```

```

18.03  48.19  86.37
13.96  44.12  86.39
15.84  45.77  84.72
13.96  44.12  84.72
13.96  44.12  86.39
15.21  45.37  88.79
17.85  48.01  84.72
17.85  48.01  86.39
20.20  50.36  84.72
20.20  50.36  84.72
22.19  52.36  85.97
22.19  52.36  88.61
25.90  55.20  88.61
25.90  55.20  90.96
25.04  55.20  90.96
25.90  55.20  92.96
25.90  55.20  92.96
23.64  53.80  96.66
27.28  58.59  96.66
28.63  58.59  95.80
27.28  60.62  96.66
28.63  60.62  96.66
27.28  62.65  94.40
];
%MATRIZ COM AS COORDENADAS Y DOS PONTOS DE MEDICOES.
y=[
11.05  8.84  1.54
9.58   8.84  0.51
9.58  11.05  1.54
7.00   9.58  0.51
7.00   9.58  1.54
7.00   7.00  0.51
4.62   7.00  1.54
4.62   7.00  11.05
2.94   4.62  9.58
0.53   4.62  9.58
0.53   2.94  7.00
0.53   0.53  7.00
2.94   0.53  7.00
0.53   0.53  4.62
1.71   1.71  4.62
0.53   0.53  2.94
1.71   1.71  0.53
0.53   0.53  0.53
1.71   1.71  0.53
0.53   0.53  1.71
1.71   1.71  0.53
4.99   4.99  1.71
7.09   7.09  0.53
9.46   9.46  1.71
11.02  11.02  0.53
11.05  11.05  1.71
9.58   9.58  4.99
9.58   9.58  7.09
7.00   7.00  9.46
7.00   7.00  11.02
7.00   7.00  11.05
4.62   4.62  9.58
4.62   4.62  9.58
2.94   2.94  7.00
0.53   0.53  7.00
0.53   0.53  7.00
0.53   0.53  4.62
1.71   1.71  4.62
0.53   0.53  2.94
1.71   1.71  0.53
0.53   0.53  0.53
1.71   1.71  0.53
0.53   0.53  1.71
1.71   1.71  0.53
4.99   4.99  1.71
7.09   7.09  0.53
9.46   9.46  1.71
11.02  11.02  0.53
4.83   0.51  1.71
4.83   1.54  4.99
6.56   0.51  7.09

```

```

6.56    1.54    9.46
8.84    0.51   11.02
];
%MATRIZ COM OS VALORES DE NIVEL DE PRESSAO SONORA.
z=[
93.5    90.3    83.9
93.6    90.4    84.0
93.7    91.0    84.3
93.2    91.2    84.8
98.4    91.4    84.7
99.4    91.4    86.0
91.8    97.2    85.9
91.7    98.5    89.7
90.4    90.0    90.9
89.4    89.9    91.2
89.5    89.4    91.4
89.5    88.9    97.3
90.2    89.9    97.9
89.9    89.2    89.7
89.3    89.3    89.9
90.3    88.3    88.3
89.0    89.6    87.0
89.2    88.0    88.8
88.9    88.5    87.5
88.9    88.1    87.8
89.7    89.0    86.9
90.9    90.4    88.8
91.8    91.4    86.7
91.9    91.0    87.5
91.2    90.8    87.0
91.6    91.0    87.9
92.0    91.7    89.3
92.4    91.7    90.8
92.3    92.0    91.0
98.6    98.3    89.7
99.6    99.1    90.5
91.1    90.5    91.2
90.8    90.2    91.3
90.0    89.4    91.6
89.0    88.5    97.6
88.9    89.7    98.9
88.6    88.0    90.1
89.2    88.2    89.9
88.7    87.3    88.7
89.9    88.9    87.6
88.2    86.4    87.4
88.3    86.8    87.2
87.9    85.5    87.5
88.5    86.0    87.1
89.4    86.9    88.6
90.8    88.6    86.9
90.2    87.9    87.4
90.2    88.0    86.2
88.1    84.8    87.1
88.4    85.0    87.9
88.6    83.9    90.5
88.8    83.9    88.6
89.5    83.9    88.0
];
ValorminimoNPS=min(z);
ValorminimoNPS=min(ValorminimoNPS);
ValormaxemNPS=max(z);
ValormaxemNPS=max(ValormaxemNPS);
title(['Mapa Acústico de NPS(dBA) Global da PA IV: Piso da Turbina (Mínimo: ', ...
      num2str(ValorminimoNPS), '; Máximo: ',num2str(ValormaxemNPS),')'], ...
      'FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')

[XI,YI] = meshgrid(0.56:0.1:96.68,0.63:0.1:11.02);
% ZI = interp2(x,y,z,XI,YI);
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI);
surf(XI,YI,ZI)
shading interp
% [C,h] = contour(XI,YI,ZI,20);
% clabel(C,h)
colorbar('horiz','FontSize',20, 'FontName', 'Times New Roman')
% colormap jet
axis([-0.5 98 -0.5 11.8])

```

```
grid off  
axis off  
hold off  
toc
```

APÊNDICE B – VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA EXPERIMENTAIS E VALIDADOS (NUMÉRICOS)

B.1. NPS (dBA) Piso do Gerador da PA IV

Posição	EXPERIMENTAL	VALIDADO	DIFERENÇA
1	87,1	87,6	-0,5
2	87,2	87,7	-0,5
3	87,2	87,8	-0,6
4	87,6	87,7	-0,1
5	87,3	87,8	-0,5
6	87,7	87,8	-0,1
7	88,1	87,9	0,2
8	88,1	88	0,1
9	87,5	87,7	-0,2
10	87,6	87,5	0,1
11	88	87,5	0,5
12	88,1	87,7	0,4
13	88,2	89,4	-1,2
14	88,8	89,3	-0,5
15	88,1	87,9	0,2
16	88,1	88	0,1
17	87,9	88,4	-0,5
18	87,9	88,5	-0,6
19	88,1	87,8	0,3
20	87,6	87,9	-0,3
21	87,3	87,5	-0,2
22	87,6	87,7	-0,1
23	87,7	87,9	-0,2
24	87,6	87,8	-0,2
25	87,8	87,9	-0,1
26	88,2	87,8	0,4
27	87,8	87,7	0,1
28	87,9	87,8	0,1
29	87,7	87,7	0
30	87,4	87,6	-0,2
31	87,6	87,7	-0,1
32	88,5	87,8	0,7
33	88,1	87,8	0,3
34	88,1	87,7	0,4
35	87,9	87,8	0,1
36	89,1	87,8	1,3
37	88,1	88,3	-0,2

38	88,2	88,2	0
39	87,7	87,7	0
40	87,7	88,2	-0,5
41	88	88,2	-0,2
42	88,4	87,6	0,8
43	88,3	88,9	-0,6
44	87,8	89,7	-1,9
45	87,2	87,7	-0,5
46	87,2	87,4	-0,2
47	88,1	87,6	0,5
48	87,3	87,7	-0,4
49	87	87,2	-0,2
50	87	87	0
51	87,9	87	0,9
52	87,2	87,1	0,1
53	87,7	87,2	0,5
54	87,2	87	0,2
55	88,2	87,1	1,1

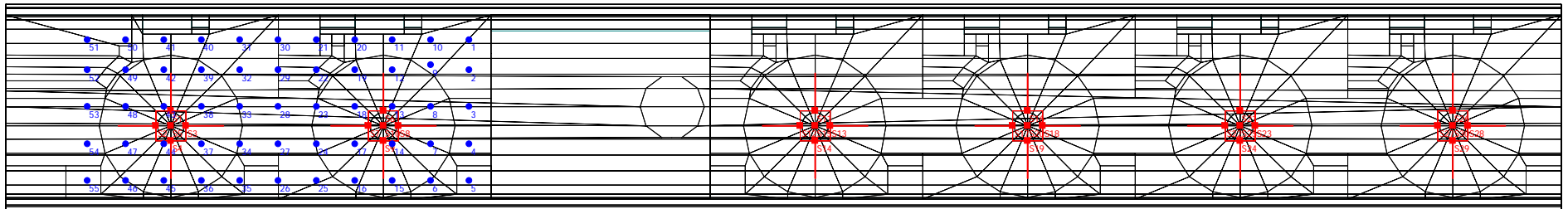


Figura B.1.1 – Modelo do Piso do Gerador da PA IV no ODEON, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones, em azul.

B.2. NPS (dBA) Piso da Air Housing da PA IV

Posição	EXPERIMENTAL	VALIDADO	DIFERENÇA
1	89,8	90	-0,2
2	89,7	90,4	-0,7
3	89,8	90,4	-0,6
4	89,8	91,3	-1,5
6	89,6	90,7	-1,1
7	90,7	91	-0,3
8	90,7	91,3	-0,6
9	90,4	90,6	-0,2
10	90,4	91	-0,6
11	91,3	91,4	-0,1
12	91	89,8	1,2
13	91,3	91,5	-0,2
14	89,5	91,3	-1,8
15	89,8	90,2	-0,4
16	89,4	90,7	-1,3
17	89,5	90,8	-1,3
18	89,2	90,4	-1,2
19	89,6	90,4	-0,8
20	89,1	90,2	-1,1
21	89,4	90,3	-0,9
22	89,8	91,5	-1,7
23	89,5	91,1	-1,6
24	89,2	90,6	-1,4
25	88,4	90	-1,6
26	89,9	90	-0,1
27	89,9	90,5	-0,6
28	89,4	90,8	-1,4
29	89,8	91,4	-1,6
31	89,7	90,9	-1,2
32	91,3	90,9	0,4
33	90,6	91	-0,4
34	90,6	91,1	-0,5
35	91,3	91,3	0
36	89,8	90,6	-0,8
37	91,6	91,3	0,3
38	91,9	91	0,9
39	90,8	89,5	1,3
40	89,2	89,5	-0,3
41	89,4	89	0,4
42	88,5	88,6	-0,1
43	88,7	88,7	0

44	88,5	89,6	-1,1
45	88,5	89,9	-1,4
46	89,2	90,9	-1,7
47	88,9	90,2	-1,3
48	88,8	89,8	-1
49	88,6	88,8	-0,2
50	88,7	90,1	-1,4
51	88,9	90,3	-1,4
52	89,1	89,8	-0,7
53	89,1	90,7	-1,6
54	89,2	90,5	-1,3
55	89,1	90	-0,9
56	89,9	90,2	-0,3
57	89,2	90,6	-1,4
58	89,8	90,4	-0,6
59	90,3	90,3	0
60	90	90,1	-0,1
61	89,7	90,1	-0,4
62	89,4	89,2	0,2
63	89,9	89,7	0,2
64	89,5	90,2	-0,7
65	89,6	90,7	-1,1
67	90,4	90,3	0,1
68	91,3	91,3	0
69	91	91,3	-0,3
70	91,5	92	-0,5
71	93,6	92,7	0,9
72	90,7	90,6	0,1
73	93	91,5	1,5
74	92,4	91	1,4
75	91,5	89,6	1,9
76	90	89,9	0,1
77	90,1	90,1	0
78	88,7	89,3	-0,6
79	89,3	89,5	-0,2
80	89,2	89,3	-0,1
81	89,3	89,6	-0,3
82	89,5	90,8	-1,3
83	89,6	90,3	-0,7
84	89,5	90,3	-0,8
85	89,7	89	0,7
86	90,2	89,8	0,4
87	89,7	90,1	-0,4
88	89,7	90,8	-1,1
90	89,6	90,2	-0,6

91	90,5	90,2	0,3
92	90,1	90,3	-0,2
93	89,9	90,6	-0,7
94	90,5	90,9	-0,4
95	89,5	89,5	0
96	91,4	90,7	0,7
97	90,5	90,2	0,3
98	89,6	88,6	1
99	89,5	89,2	0,3
100	90,2	89,5	0,7
101	87,8	88,5	-0,7
102	88,3	88,7	-0,4
103	86,5	88,3	-1,8
104	87,1	87,8	-0,7
105	87,6	87,9	-0,3
106	86,8	88	-1,2
109	85,8	86,8	-1
110	86,7	88,8	-2,1
111	88,3	89,3	-1
112	87,6	89,5	-1,9
113	88,5	90,1	-1,6
115	89,2	89,8	-0,6
116	91,9	91,1	0,8
117	90,4	91	-0,6
118	91,7	92	-0,3
119	93,1	92,9	0,2
120	90,5	89,5	1
121	93,3	90,8	2,5
122	92,2	90,6	1,6
123	91,5	88,8	2,7
124	89,1	88,8	0,3
125	89,6	88,3	1,3
126	87,6	87,7	-0,1
127	88,5	88	0,5
128	87,5	89,5	-2
129	88,6	89,4	-0,8
130	89,1	90,7	-1,6
131	89,6	90,3	-0,7
132	89,5	90	-0,5
133	90,6	88,9	1,7
134	90,8	89,6	1,2
135	90	90	0
136	89,9	90,8	-0,9
138	90,1	90,2	-0,1
139	91,1	90,2	0,9

140	89,9	90,1	-0,2
141	90,4	90,4	0
142	91,7	90,9	0,8
143	89	89,7	-0,7
144	91	90,8	0,2
145	89,8	90,5	-0,7
146	89,8	89,5	0,3
147	88,9	89,5	-0,6
148	88,9	89,8	-0,9
149	87,9	88,8	-0,9
150	88,9	89	-0,1
151	88,5	87,4	1,1
152	88	87,8	0,2
153	88,8	89,7	-0,9
154	88	88,6	-0,6
155	87,9	87,5	0,4
156	88	87,2	0,8

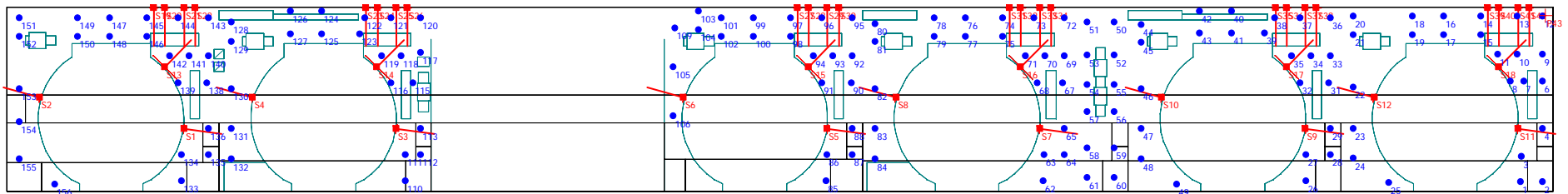


Figura B.2.1 – Modelo do Piso da Air Housing da PA IV no ODEON, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones, em azul.

B.3. NPS (dBA) Piso da Turbina da PA IV

Posição	EXPERIMENTAL	VALIDADO	DIFERENÇA
1	93,5	91,5	2
2	93,6	92,1	1,5
3	93,7	91,8	1,9
4	93,2	92,8	0,4
5	98,4	98,6	-0,2
6	91,8	91,2	0,6
7	91,7	90,9	0,8
8	90,4	89,1	1,3
9	89,4	86,7	2,7
10	89,5	87,1	2,4
11	89,5	87,7	1,8
12	90,2	88,9	1,3
13	89,9	88,2	1,7
14	89,3	87,8	1,5
15	90,3	88,6	1,7
16	89	88	1
17	89,2	88,8	0,4
18	88,9	88,3	0,6
19	88,9	89,1	-0,2
20	89,7	89,1	0,6
21	90,9	90,9	0
22	91,8	92,1	-0,3
23	91,9	91	0,9
24	91,2	89,9	1,3
25	91,6	89,6	2
26	92	90,2	1,8
27	92,4	90,9	1,5
28	92,3	92,2	0,1
29	98,6	97,7	0,9
30	91,1	91	0,1
31	90,8	90,8	0
32	90	89,6	0,4
33	89	88,7	0,3
34	88,9	87,8	1,1
35	88,6	87,7	0,9
36	89,2	87,6	1,6
37	88,7	87,3	1,4
38	89,9	86,6	3,3
39	88,2	87,5	0,7
40	88,3	86,8	1,5
41	87,9	87,7	0,2

42	88,5	87,6	0,9
43	89,4	88,9	0,5
44	90,8	90,9	-0,1
45	90,2	89,4	0,8
46	90,2	87,6	2,6
47	88,1	89,1	-1
48	88,4	88,9	-0,5
49	88,6	89,9	-1,3
50	88,8	89,6	-0,8
51	89,5	89	0,5
52	90,3	88,9	1,4
53	90,4	88,9	1,5
54	91	87,5	3,5
55	91,2	88,2	3
56	91,4	89,1	2,3
57	91,4	90,2	1,2
58	97,2	97,7	-0,5
59	90	88,6	1,4
60	89,9	87,9	2
61	89,4	87,5	1,9
62	88,9	87,6	1,3
63	89,9	87,4	2,5
64	89,2	87,9	1,3
65	89,3	87,7	1,6
66	88,3	87,8	0,5
67	89,6	87,2	2,4
68	88	88	0
69	88,5	87,4	1,1
70	88,1	88,6	-0,5
71	89	88,7	0,3
72	90,4	90,6	-0,2
73	91,4	92	-0,6
74	91	91	0
75	90,8	89,8	1
76	91	89,5	1,5
77	91,7	90	1,7
78	91,7	90,7	1
79	92	92	0
80	98,3	97,9	0,4
81	90,5	90,7	-0,2
82	90,2	90,6	-0,4
83	89,4	89,3	0,1
84	88,5	88,1	0,4
85	89,7	87	2,7
86	88	86,8	1,2

87	88,2	86,6	1,6
88	87,3	85,9	1,4
89	88,9	85,2	3,7
90	86,4	86	0,4
91	86,8	85,3	1,5
92	85,5	85,8	-0,3
93	86	86,2	-0,2
94	86,9	88,4	-1,5
95	88,6	90,7	-2,1
96	87,9	88,5	-0,6
97	88	86,4	1,6
98	84,8	84,6	0,2
99	85	83,7	1,3
100	83,9	84,2	-0,3
101	83,9	83,4	0,5
102	83,9	83,6	0,3
103	83,9	83,2	0,7
104	84	83,9	0,1
105	84,3	83,3	1
106	84,8	84,4	0,4
107	84,7	83,6	1,1
108	86	85,8	0,2
109	85,9	83,6	2,3
110	89,7	90,6	-0,9
111	90,9	91,1	-0,2
112	91,2	91,2	0
113	91,4	92	-0,6
114	97,3	98	-0,7
115	89,7	89,8	-0,1
116	89,9	89,7	0,2
117	88,3	88,2	0,1
118	87	86,1	0,9
119	88,8	85,6	3,2
120	87,5	86,5	1
121	87,8	85,9	1,9
122	86,9	86,7	0,2
123	88,8	87,3	1,5
124	86,7	87,7	-1
125	87,5	87,3	0,2
126	87	87,8	-0,8
127	87,9	88,5	-0,6
128	89,3	91	-1,7
129	90,8	92,3	-1,5
130	91	90,8	0,2
131	89,7	89,7	0

132	90,5	89,9	0,6
133	91,2	91,4	-0,2
134	91,3	91,3	0
135	91,6	92,4	-0,8
136	97,6	95,5	2,1
137	90,1	90,4	-0,3
138	89,9	90,1	-0,2
139	88,7	89	-0,3
140	87,6	87,8	-0,2
141	87,4	87	0,4
142	87,2	87,3	-0,1
143	87,5	86,2	1,3
144	87,1	86,8	0,3
145	88,6	86,2	2,4
146	86,9	86,5	0,4
147	87,4	86,1	1,3
148	86,2	86,7	-0,5
149	87,1	86,5	0,6
150	87,9	87,1	0,8
151	90,5	89,7	0,8
152	88,6	87,3	1,3
153	88	85	3

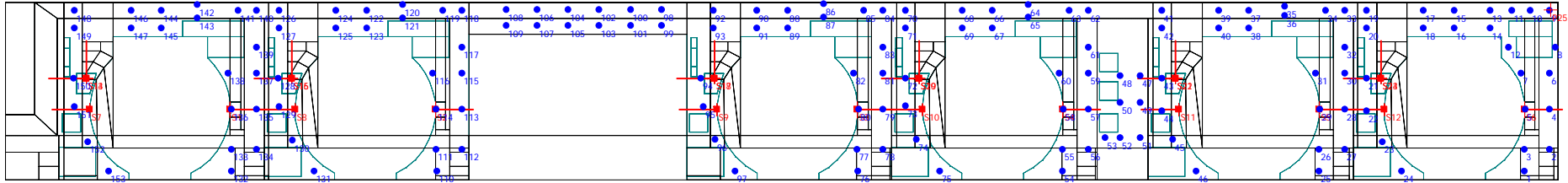


Figura B.3.1 – Modelo do Piso da Turbina da PA IV no ODEON, indicando as fontes sonoras em vermelho e as posições de microfones, em azul.

APÊNDICE C – VALORES DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA VALIDADOS E RESULTADOS DAS SOLUÇÕES VIRTUAIS DE CONTROLE DE RUÍDO

C.1. Piso do Gerador da PA IV

Posição	VALIDADO	SOLUÇÃO 1	SOLUÇÃO 2	SOLUÇÃO 3	SOLUÇÃO 4
1	87,6	74,4	79,6	73,5	61,1
2	87,7	75,3	79,8	73,5	61,2
3	87,8	75,9	80,1	73,4	61,5
4	87,7	75,9	80	73,3	61
5	87,8	75,5	80	73,5	60,9
6	87,8	77,7	79,9	73	59,5
7	87,9	79,9	81,5	72,7	59,9
8	88	79,9	81,6	73	60,3
9	87,7	77,4	80	73,1	60,5
10	87,5	76	79,2	73,2	60,1
11	87,5	78,2	80,2	72,8	59,7
12	87,7	79,5	80,9	72,8	60,2
13	89,4	84,9	85,3	81,9	81,8
14	89,3	84,9	85,5	83,6	83,5
15	87,9	79,5	80,7	72,9	59,3
16	88	79	80,3	73,1	59,1
17	88,4	82,5	83,3	73,5	58,5
18	88,5	82,4	83,2	74,6	60,3
19	87,8	79	80,5	73	60,1
20	87,9	78	79,9	73	59,7
21	87,5	76,5	79,3	73,4	60,6
22	87,7	77,2	79,7	73,4	60,6
23	87,9	78,4	80,3	73,4	60,8
24	87,8	78,3	80,2	73,2	60,5
25	87,9	77,2	79,7	73,5	60,3
26	87,8	76,5	79,9	73,6	61
27	87,7	76,8	79,6	73,6	61,4
28	87,8	76,7	79,6	73,7	61,9
29	87,7	76,3	79,3	73,6	60,9
30	87,6	75,4	79	73,6	61
31	87,7	75,7	78,7	73,4	60,8

32	87,8	77	79,4	73,5	60,9
33	87,8	78,1	80,1	73,6	61,2
34	87,7	78	80,1	73,4	60,6
35	87,8	77,2	79,6	73,6	60,4
36	87,8	78,9	80,2	73,3	59,4
37	88,3	82,2	83	73,2	59,9
38	88,2	82,1	82,9	74,1	60,4
39	87,7	78,7	80,3	73,3	60,6
40	88,2	77,5	79,8	73,2	60,2
41	88,2	78	79,8	73,3	60,5
42	87,6	79,4	80,8	73,2	60,2
43	88,9	85,2	85,6	85	84,9
44	89,7	85,1	85,6	84,1	84,1
45	87,7	79,6	80,7	73	58,7
46	87,4	77,7	79,6	73,3	59,7
47	87,6	80,1	81,3	72,8	60,4
48	87,7	80,2	81,4	73,1	60,4
49	87,2	77,6	79,7	73,2	60,9
50	87	75,7	78,4	73,2	60,4
51	87	74,1	78,5	73,2	61,4
52	87,1	75,2	79	73,4	61,5
53	87,2	75,9	79,4	73,3	61,3
54	87	75,9	79,2	73,1	61,3
55	87,1	75,4	79,2	73,2	60,7
Média	87,8	78,3	80,6	74,1	62,1
Diferença(Validado - Solução)		9,5	7,3	13,8	25,7

C.2. Piso da Air Housing da PA IV

Posição	VALIDADO	SOLUÇÃO 1	SOLUÇÃO 2	SOLUÇÃO 3	SOLUÇÃO 4	SOLUÇÃO 5	SOLUÇÃO 6
1	90	73,3	85,9	89,1	89,1	83	67,3
2	90,4	75,7	86,2	89,5	89,5	83,3	67,7
3	90,4	77,9	86,2	89,6	89,6	83,2	67,6
4	91,3	83,4	87	90,5	90,5	84	68,3
5	90,7	73,2	88,8	88,9	89,3	85,5	66,5
6	91	82,9	89,6	88,6	89,6	85,7	66,7
7	91,3	80,9	89,6	89,1	89,6	86,5	66,7
8	90,6	80,6	89,4	88,1	89	85,6	66,6
9	91	84	89,8	87,8	89,6	85,1	67,1
10	91,4	86	90,3	88	90,3	85,2	67,7
11	89,8	80,6	88,6	88	87,8	85,8	65,5
12	91,5	86,8	90,7	90,2	88	89,1	65,6
13	91,3	84,2	90,2	89,9	88,7	88,1	66,4
14	90,2	80,3	88,8	88,7	87,9	86,4	65,6
15	90,7	74,4	89	89	88,7	86,3	66,7
16	90,8	76,2	89,1	89,1	88,7	86,4	66,7
17	90,4	73,8	88,7	88,8	88,6	85,8	66,4
18	90,4	74,1	88,6	88,7	88,6	85,8	66,3
19	90,2	77	87,8	88,7	88,8	84,8	66,4
20	90,3	80	88	88,8	88,9	84,9	66,5
21	91,5	84,4	87,8	90,5	90,5	84,9	68,2
22	91,1	81,7	87,3	90,2	90,1	84,5	68
23	90,6	79	86,7	89,7	89,6	83,9	67,6
24	90	75,8	86	89,1	89	83,3	66,9
25	90	75,4	86,3	89,1	89	83,5	67,1
26	90,5	79,2	86,7	89,6	89,5	83,9	67,5
27	90,8	80,7	86,8	89,9	89,8	84	67,9
28	91,4	84,3	87,1	90,7	90,6	84,3	68,5

29	90,9	81,3	87,6	89,9	89,8	84,8	67,5
30	90,9	81,7	88,5	89,4	89,5	85,3	66,8
31	91	82,3	88,5	89,4	89,7	85,2	67,4
32	91,1	84,2	89	89,1	90	84,9	67,4
33	91,3	86,1	89,6	88,6	90,3	84,6	67,8
34	90,6	81,6	88,4	89,4	88,9	86	66,6
35	91,3	85,7	89,8	90,2	88,2	88,2	65,8
36	91	86,1	89,8	90	87,5	88,4	64,7
37	89,5	81	87,9	88,1	87,1	85,8	64
38	89,5	69,8	87,7	88,2	87,7	85,1	63,6
39	89	76,8	87,1	87,4	87,1	84,5	63,6
40	88,6	65,5	86,5	87	86,8	83,8	62,6
41	88,7	75,4	86,8	87	87,2	83,6	63,8
42	89,6	78,1	87,6	87,4	88,8	82,4	66
43	89,9	78,8	87,6	87,5	88,9	82,4	66,3
44	90,9	83,8	87,4	89,3	90,2	82,4	67,8
45	90,2	78,8	87,2	88,4	89,5	82,3	67,1
46	89,8	75,8	86,9	87,9	89	81,9	66,7
47	88,8	73,3	86,1	86,8	88	81	65,8
48	90,1	78,8	88,1	87,5	89,3	82,5	67
49	90,3	79,5	88,5	87,7	89,5	83,2	67,1
50	89,8	78,8	87,2	87,8	89	82,2	66,4
51	90,7	82,1	89,3	87,6	89,9	83,7	67,2
52	90,5	80,2	88,5	87,9	89,5	83,4	66,7
53	90	80,3	87	88,3	89,2	82,2	66,6
54	90,2	79,4	87,1	88,5	89,4	82,3	66,9
55	90,6	80,5	87,9	88,4	89,7	83,1	67,1
56	90,4	79,4	87,3	88,7	89,6	82,6	67,3
57	90,3	77,9	87,3	88,5	89,5	82,4	67,2

58	90,1	76,2	87	88,3	89,3	82,3	67
59	90,1	77	87	88,3	89,3	82,3	67,1
60	89,2	75,4	86,1	87,5	88,4	81,4	66,1
61	89,7	79,4	86,4	88,1	89	81,7	66,6
62	90,2	80,4	86,8	88,5	89,4	82,1	67,2
63	90,7	83,6	87,2	89,3	90,1	82,4	67,7
64	90,3	78,8	88,1	87,8	89,3	83,1	66,5
65	91,3	84,9	89,8	87,7	90,4	83,8	67,4
66	91,3	83,9	89,9	87,8	90,4	83,7	67,9
67	92	87,2	91	87,4	91,4	83,4	68,8
68	92,7	89,8	92,2	87	92,3	83,3	70
69	90,6	81,3	89	88,2	89,1	85	66,7
70	91,5	85,8	90,5	89,6	89,1	87,9	66,4
71	91	84	89,9	89,2	88,7	87,3	66,2
72	89,6	79,8	88,3	87,8	87,8	85,4	65,2
73	89,9	74,7	88,2	88,1	88,1	85,3	65,7
74	90,1	76,3	88,5	88,4	88,4	85,6	65,8
75	89,3	73,6	87,4	87,6	87,5	84,5	65,1
76	89,5	74,6	87,7	87,8	87,7	84,8	65,2
77	89,3	79,4	86,6	87,9	88,1	83,4	65,1
78	89,6	81,4	87,2	88,2	88,4	84,1	65,5
79	90,8	84,6	86,8	90	89,9	84	67,4
80	90,3	82	86,2	89,5	89,3	83,5	66,8
81	90,3	81,9	86,1	89,3	89,1	83,5	66,5
82	89	75,9	84,7	88,3	88,1	82,2	65,6
83	89,8	79,4	85,3	89	88,8	82,8	66,2
84	90,1	81,1	85,6	89,3	89,2	82,9	66,8
85	90,8	84,4	85,9	90,1	89,9	83,3	67,5
86	90,2	81,7	86,6	89,2	89,1	83,8	66,4

87	90,2	81,8	87,7	88,8	89,1	84,5	66
88	90,3	82,4	87,7	88,7	89	84,2	66,4
89	90,6	84,2	88,5	88,3	89,4	84	66,8
90	90,9	86,3	89,2	88	89,9	83,8	67,4
91	89,5	81,9	87,3	88,4	87,7	85,2	65
92	90,7	85,6	89,2	89,8	87,5	87,9	65
93	90,2	83,8	88,4	89,4	87,3	87,1	64,8
94	88,6	79,4	86,5	87,9	86,3	85	63,7
95	89,2	74,3	86,6	88,3	87,1	84,9	64,7
96	89,5	76,1	86,9	88,5	87,2	85,3	64,9
97	88,5	72	85,8	87,7	86,7	84,1	64,1
98	88,7	73,9	86	87,8	86,7	84,4	64,1
99	88,3	72,2	85,2	87,4	86,6	83,2	63,8
100	87,8	70,7	84,6	86,6	85,8	82,8	62,9
101	87,9	82,7	81,8	87,4	87	79,9	64,6
102	88	83,4	81,5	87,6	87,3	79,8	64,7
103	86,8	76,6	83,4	85,8	85,6	80,7	63,1
104	88,8	77,6	84,8	87,4	88,2	79,9	65,3
105	89,3	81,5	84,9	88	88,7	80,1	65,7
106	89,5	82,2	85,1	88,3	89	80,2	65,9
107	90,1	84,8	85,5	88,8	89,6	80,6	66,5
108	89,8	81,9	89,2	86	89	83,3	64,3
109	91,1	85,6	90,4	86,1	90	83,8	66,8
110	91	85,6	90,8	85,8	90,1	84,2	67,3
111	92	88,2	91,6	85,3	91,4	83,2	68,5
112	92,9	90,6	92,7	85,2	92,5	83,1	70
113	89,5	82	88,8	86	87,8	84,5	65,1
114	90,8	85,8	90,5	88,4	88	87,6	65,3
115	90,6	86,1	90,2	88,6	87,4	87,8	64,3

116	88,8	81,2	88	86,5	86,5	85	63,2
117	88,8	70	87,5	86,5	86,7	84,4	62
118	88,3	77	87,2	86	86,3	83,9	62,7
119	87,7	65,7	86,5	85,6	85,9	83,2	61,5
120	88	75,7	86,3	86	86,2	83,1	62,4
121	89,5	80,1	86,5	88,2	88,5	83,2	65
122	89,4	80,5	86,6	88,1	88,1	83,6	65
123	90,7	84,7	86,2	89,9	89,9	83,2	67,2
124	90,3	82	85,6	89,4	89,4	82,8	66,7
125	90	81,8	85,5	89,4	89,3	82,7	66,3
126	88,9	75,8	84,2	88	87,9	81,4	65,5
127	89,6	78,9	84,8	88,8	88,7	82	66,1
128	90	81,3	85,1	89,2	89,2	82,3	66,6
129	90,8	84,6	85,4	90	90	82,7	67,5
130	90,2	82	86,3	89,2	89,1	83,4	66,4
131	90,2	81,6	87,6	88,8	89,2	84,3	66,1
132	90,1	82,1	87,8	88,3	88,8	84,1	65,8
133	90,4	84,2	88,3	88,2	89,4	83,7	66,5
134	90,9	86,4	89,1	88	89,9	83,6	67,3
135	89,7	81,9	87,2	88,6	87,7	85,2	65,1
136	90,8	85,6	89,2	90	87,8	88	65,2
137	90,5	83,8	88,4	89,8	88	87,1	65,7
138	89,5	79,5	86,8	88,9	87,5	85,3	65,4
139	89,5	74,1	86,5	88,8	87,6	85	65,6
140	89,8	75,9	86,8	89,2	87,9	85,4	65,8
141	88,8	71,7	85,5	88,2	87	84,1	64,9
142	89	72,3	85,8	88,5	87,4	84,3	65,2
143	87,4	70,1	82,3	87	86,2	81	64,1
144	87,8	74,2	81,9	87,4	86,7	80,7	64,6

145	89,7	83,4	82,1	89,4	89,1	80,9	67,1
146	88,6	78,1	81,8	88,4	87,9	80,6	66
147	87,5	69	81,1	87,1	86,6	79,9	64,9
148	87,2	63,8	81	86,9	86,3	79,9	64,7
Média	90,0	79,8	87,3	88,4	88,7	83,9	66,1
Diferença		10,3	2,7	1,7	1,4	6,1	23,9

C.3. Piso da Turbina da PA IV

Posição	VALIDADO	SOLUÇÃO 1	SOLUÇÃO 2	SOLUÇÃO 3	SOLUÇÃO 4
1	91,5	72	76,5	91,3	63,8
2	92,1	78,1	76,8	91,9	64,2
3	91,8	77	76,6	91,7	63,9
4	92,8	83,6	77,4	92,6	64,7
5	98,6	96,9	77	98,6	64,4
6	91,2	76,4	77,5	91	64,9
7	90,9	71,3	77,8	90,7	65,1
8	89,1	63,2	79,3	88,8	66,4
9	86,7	55,6	80,8	84,9	67,3
10	87,1	56	81,4	85,2	68
11	87,7	56,9	81,9	85,8	68,7
12	88,9	65,3	78,3	88,5	65,5
13	88,2	58,5	82,8	86,6	69,4
14	87,8	58,5	82,4	86,1	69,1
15	88,6	60,5	83,1	86,8	70
16	88	59,3	82,7	86,3	69,6
17	88,8	64,8	83,6	87	70,5
18	88,3	62,1	83	86,5	69,9
19	89,1	71,1	84,8	87,1	71,5
20	89,1	72,6	85	87,2	72
21	90,9	80,2	86,8	88,9	74,5
22	92,1	88,1	89,7	88,7	71,9
23	91	83,2	87,3	88,8	69,2
24	89,9	73,2	85	88,3	67,9
25	89,6	74,6	85,2	88,1	69,3
26	90,2	79,1	85,6	88,7	69,8
27	90,9	80	86,1	89,3	69,8
28	92,2	86,1	87,8	90,3	71,5
29	97,7	97	86,8	97,7	70,2
30	91	81,1	87,4	88,6	72,2
31	90,8	81,6	87,9	87,9	71,5
32	89,6	76,7	85,7	87,4	71,1
33	88,7	69,8	84,5	86,6	71,1
34	87,8	63	83,9	85,8	70,6
35	87,7	58,9	83,9	85,5	70,8
36	87,6	58	83,9	85,4	70,7
37	87,3	58,5	83,7	85,2	70,8
38	86,6	57,4	83,1	84,4	70,2
39	87,5	62,3	83,8	85,2	71,1
40	86,8	59,8	83,3	84,7	70,5
41	87,7	67,7	84,3	85,4	71,4

42	87,6	69,4	84,3	85,3	71,7
43	88,9	77,5	85,6	86,6	74,3
44	90,9	87,3	89,2	86,2	71,2
45	89,4	83,1	86,6	86,4	68,5
46	87,6	71,4	83,3	85,8	66,6
47	89,1	79	86,1	86,3	71,5
48	88,9	79,1	86,1	86	70,7
49	89,9	82,2	86,9	87,1	71,1
50	89,6	80,8	86,1	87,2	70,6
51	89	75	84,9	87,1	69,3
52	88,9	73	84,7	87,2	69,8
53	88,9	77,7	84,2	87,4	68,6
54	87,5	73,5	83,3	86	68,3
55	88,2	78,3	83,7	86,8	68,7
56	89,1	78,8	84,2	87,7	69,1
57	90,2	84,5	85,1	88,8	69,5
58	97,7	96,8	84,2	97,1	68,4
59	88,6	78,2	84,8	86,6	69,7
60	87,9	76,9	84,5	85,7	69,2
61	87,5	73,7	83,9	85,4	69,7
62	87,6	70,6	84,5	85	70,2
63	87,4	64,6	84,6	84,5	70,3
64	87,9	60	85,1	85	71,1
65	87,7	61,5	85	84,8	70,7
66	87,8	61,3	84,8	85,2	71,2
67	87,2	60,4	84,1	84,6	70,6
68	88	64,7	85,1	85,4	71,7
69	87,4	62,6	84,5	84,7	70,8
70	88,6	71,4	85,4	85,9	71,9
71	88,7	72,7	85,6	86,2	72,3
72	90,6	80,2	87,2	88,4	74,6
73	92	87,5	89,6	88,3	72,1
74	91	83,6	87,7	88,6	69,7
75	89,8	73,4	85,3	88,1	68,2
76	89,5	74,6	85,5	87,7	69,7
77	90	79	85,7	88,4	70,1
78	90,7	80,1	86,5	89	70,1
79	92	86,1	88,1	89,9	71,8
80	97,9	97,1	87,4	97,6	70,7
81	90,7	81,3	87,7	87,9	72,5
82	90,6	81,9	88,2	87,3	71,8
83	89,3	76,1	86,1	86,6	71,6
84	88,1	70,2	85,2	85,3	71,6
85	87	62,8	84,7	83,7	71
86	86,8	57,9	85,5	83,2	71,4

87	86,6	58	84,7	83	71,1
88	85,9	55,6	84,4	81,5	70,9
89	85,2	54,8	83,8	80,6	70,5
90	86	59,3	84,8	81,3	71,4
91	85,3	56,1	83,9	80,9	70,6
92	85,8	63,7	84,7	80,5	71,4
93	86,2	65,6	85,4	80	72
94	88,4	75,4	88,3	79,5	74,9
95	90,7	87,6	90,6	77,9	72,3
96	88,5	82,7	88,5	74,7	68,8
97	86,4	70,3	86,4	72,9	66,9
98	84,6	55,2	82,8	80,1	69,1
99	83,7	54	82,1	79,4	68,6
100	84,2	53	81,9	80,6	68,1
101	83,4	52,2	81,3	79,8	67,4
102	83,6	51,3	81	81	67,1
103	83,2	51,2	80,5	80,3	66,4
104	83,9	50,8	80,5	81,6	66,3
105	83,3	50,8	79,8	81	65,7
106	84,4	51,6	79,9	82,4	65,9
107	83,6	51,2	79,2	81,6	65,1
108	85,8	52,8	79,8	83,2	65,6
109	83,6	52,5	78,8	82,3	64,7
110	90,6	71,9	75,7	90,5	62,1
111	91,1	78	75,9	90,9	62,4
112	91,2	77,8	76,1	91,1	62,6
113	92	83,1	76,5	91,8	63,3
114	98	96,4	76,2	97,9	63,6
115	89,8	75,8	77,1	89,6	63,4
116	89,7	72,1	75,9	89,5	62,5
117	88,2	70,5	76,8	87,5	63
118	86,1	65	80,3	85	66,3
119	85,6	55,3	81,5	83,9	67,5
120	86,5	56,4	83,2	84,9	69,1
121	85,9	55,2	82,4	84,6	68,8
122	86,7	59,9	83,7	85	70,3
123	87,3	57,9	83,3	84,5	69,9
124	87,7	64	84,3	85,4	70,9
125	87,3	61,2	83,6	84,7	70,1
126	87,8	71,1	85,6	85,8	71,9
127	88,5	72,4	85,5	86,2	72,2
128	91	80	87,1	88,4	74,8
129	92,3	87,7	89,8	88,3	72
130	90,8	83,2	87,6	88,5	69,5
131	89,7	73,6	85,4	88,1	68,1

132	89,9	74,7	85,4	87,9	69,5
133	91,4	79,8	85,9	88,6	70,1
134	91,3	80	86,3	89	70
135	92,4	86	88,1	89,8	71,7
136	95,5	97	87,2	96,9	70,6
137	90,4	81,1	87,7	88	72,4
138	90,1	81,2	88	87,1	71,6
139	89	75,8	86,2	86,5	71,4
140	87,8	70,2	85,6	85,3	71,6
141	87	63,3	85,4	83,6	71,3
142	87,3	57,6	86	82,5	71,9
143	86,2	56,1	85,6	82	71,3
144	86,8	55,1	85,7	81	71,6
145	86,2	55,2	85,2	80	71,2
146	86,5	57,8	85,9	80,8	71,9
147	86,1	55,6	85,4	80	71,4
148	86,7	64	85,8	78,4	72,1
149	86,5	65,9	85,9	78,1	72,5
150	87,1	74,6	86,8	78,5	74,9
151	89,7	87,1	89,5	76,6	71,8
152	87,3	82	86,8	74,7	69,6
153	85	70,4	84,1	73,2	68,1
Média	88,7	70,5	84,1	85,9	69,6
Diferença		18,2	4,7	2,8	19,1

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)