



ALINE LISOT

**MODELO EM ESCALA REDUZIDA AO AR LIVRE
COMO FERRAMENTA DE VALIDAÇÃO DE
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE BARREIRAS
ACÚSTICAS**

**CAMPINAS
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

ALINE LISOT

**MODELO EM ESCALA REDUZIDA AO AR LIVRE COMO
FERRAMENTA DE VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL DE BARREIRAS ACÚSTICAS**

Orientadora: Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, na área de Arquitetura e Construção.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELA ALUNA ALINE LISOT E ORIENTADA PELA
PROFA. DRA. STELAMARIS ROLLA BERTOLI.**

PROFA. DRA. STELAMARIS ROLLA BERTOLI

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Stel - Bertoli", is written over a horizontal line.

**CAMPINAS
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

L69m Lisot, Aline, 1980-
Modelo em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação de simulação computacional de barreiras acústicas / Aline Lisot. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Controle de ruído. 2. Subestações elétricas. 3. Simulação computacional. I. Bertoli, Stelamaris Rolla, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Scale outdoor models as validation tool for computer simulation of noise barriers

Palavras-chave em inglês:

Noise control

Electrical substations

Simulação computacional

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Doutora em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Stelamaris Rolla Bertoli [Orientador]

Lucila Chebel Labaki

Paulo Fernando Soares

Maria Lygia Alves de Niemeyer

Elcione Maria Lobato de Moraes

Data de defesa: 09-08-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**MODELO EM ESCALA REDUZIDA AO AR LIVRE COMO
FERRAMENTA DE VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL DE BARREIRAS ACÚSTICAS**

Aline Lisot

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli
Presidente e Orientadora/FEC/Unicamp



Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki
FEC/Unicamp



Prof. Dr. Paulo Fernando Soares
UEM



Profa. Dra. Maria Lygia Alves de Niemeyer
UFRJ



Profa. Dra. Elcione Maria Lobato de Moraes
UFPA

Campinas, 09 de agosto de 2013.

Dedico este trabalho à minha mãe Nelsi, que é a grande merecedora de minhas conquistas e é quem sonha meus sonhos junto comigo; à minha irmã Anelise, que me alegra com seu “cantar”; e ao meu pai Anilso, que tão cedo deixou a saudade em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Não, não é simplesmente agradecer que quero. Quero trazer para dentro do meu texto aqueles que já o percorrem nas entrelinhas.

A Deus, pela vida, por guiar minhas escolhas e pela capacidade de fazê-las.

À minha orientadora, Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli, pela dedicação, disponibilidade, confiança em mim depositada, pelos ensinamentos e pela amizade construída durante esses anos.

À minha mãe, Nelsi Lisot, porque é minha mãe e isso bastaria, mas ela sempre fez questão de fazer muito mais, inclusive ajudar nos monitoramentos de ruído. Exemplo de coragem, amor, determinação, retidão e perseverança. Agradeço pelo estímulo e apoio incondicional, pela paciência com a qual sempre me escuta e pela sensatez de suas palavras.

Ao meu pai, Anilso Lisot (in memoriam), por ter-me ensinado o gosto pelas “idéias” e pelo exemplo de vida que foi.

À minha irmã, Anelise Lisot Marthos Gasperoni, que sempre me incentiva com seus elogios e grande amor; que com seu espírito alegre e contagiante faz-se próxima e presente em todos os momentos.

Ao meu cunhado, Marcos Mendes Lisot Marthos Gasperoni, que tenho como um grande amigo, pelos conselhos “certeiros” que costuma me dar.

Ao primo Rodolfo Balbinot, tão querido quanto um irmão, pelo imenso auxílio na realização dos monitoramentos de ruído.

Aos queridos amigos Igor e Iara Bresolin, por me acolherem em sua casa tantas vezes e pela atenção que sempre dedicaram a mim.

À Doralice Aparecida Favaro Soares e ao Paulo Fernando Soares, pelo incentivo, pela amizade e pela “mão estendida” a me apoiar em todos os momentos.

Ao amigo Alexandre Maiorino, pelo auxílio e empenho na gravação do ruído e no trabalho com o sinal sonoro e pelo desprendimento com que divide sua experiência profissional.

Aos colegas das disciplinas do doutorado Fabiana Ramires, Jorge Luiz Monteiro, Tiago Ferreira Mattos e Rodolfo Thomazelli, pelos momentos de brincadeiras e diversão, pela troca de experiências e principalmente pela amizade que construímos.

Aos amigos Iara Cunha, Roberta Smiderle, Obadias Pereira da Silva Junior e Daniel Celente por estarem sempre por perto com sua alegria e espontaneidade.

Ao colega Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis pela torcida, pela amizade e pelas conversas que sempre me fazem muito bem.

À colega Marcela Paula Maria Zanin Meneguetti pelos bons conselhos sempre regados por uma personalidade ímpar; um misto de inteligência e ousadia que surpreende e cativa.

Ao tio Anilo Pedro Lisot, por ser exemplo em sua vida profissional e por me falar de suas experiências que, em vários momentos, me ajudaram a tomar decisões acertadas.

À amiga Rubya Vieira de Mello Campos, que torce tanto pelo meu sucesso e me dá apoio em todos os momentos.

Ao João Batista Sarmiento dos Santos Neto e ao Luis Felipe Favaro Soares pelo auxílio nos monitoramentos de ruído.

Ao amigo Marcelo Lemos Barini, pela paciência, pelo incentivo, pela presença e por acreditar na minha capacidade mesmo quando tenho dúvidas se sou capaz.

À amiga Laura Granzotto, pelo auxílio nos monitoramentos de ruído, pelas boas risadas e por me escutar e aconselhar.

À amiga Nathália Fabiana Alves, pelo exemplo de vida que é e porque nem imagina o quanto é uma pessoa especial na vida de todos que têm a sorte de conhecê-la.

À prefeitura do campus sede da Universidade Estadual de Maringá, na pessoa do prefeito Igor José Botelho Valques, pela prontidão em providenciar o que solicitei para a realização dos ensaios de campo.

À Universidade Estadual de Maringá por ceder o programa utilizado nas simulações computacionais.

À gerência da Subestação Elétrica, por permitir o acesso à subestação e o monitoramento de ruído e pela atenção que a mim sempre dispensaram.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram na realização deste trabalho, seja pela ajuda ou por uma palavra de amizade. A todos que não mencionei, mas que foram igualmente importantes nesta caminhada, o meu

“MUITO OBRIGADA”!

“Às vezes ouço passar o vento; e só de ouvir o vento
passar, vale a pena ter nascido”.

Fernando Pessoa

RESUMO

As barreiras acústicas têm sido empregadas como soluções de mitigação de ruído ambiental. O estudo sobre desempenho de barreiras acústicas é comumente realizado por meio de simulações computacionais em programas específicos de propagação sonora. Testes de modelos em escala reduzida efetuados em câmara anecóica também são ferramentas empregadas neste tipo de avaliação e podem auxiliar na validação do modelo computacional elaborado. A restrição de acesso a câmaras anecóicas e as grandes dimensões de algumas fontes sonoras, como é o caso de subestações elétricas, podem impossibilitar a realização de ensaios em tais câmaras e conduzir aos testes de modelos reduzidos ao ar livre. Estes testes são praticamente inexistentes na literatura, o que confere caráter original à pesquisa apresentada neste trabalho. No caso de subestações elétricas que porventura sejam causadoras de perturbação sonora no seu entorno, assinala-se a impossibilidade de implementação de soluções mitigadoras para posterior validação da solução empregada. Tal restrição ocorre devido, principalmente, à complexidade e às dimensões da fonte. Em casos como o mencionado, é indispensável um estudo prévio da solução mitigadora, o que pode ser feito por meio de simulações computacionais validadas através de modelos em escala reduzida. O presente trabalho tem por objetivo a verificação da viabilidade de utilização de modelos em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação de simulação computacional de barreiras acústicas. De caráter experimental e cunho exploratório, o trabalho buscou validar modelo de barreira acústica em escala reduzida ao ar livre para teste de propagação sonora em subestação elétrica. A metodologia envolveu a caracterização da fonte sonora em questão, a construção e teste de modelo e a modelagem/simulação computacional da situação reproduzida em escala reduzida com o programa SoundPLAN 6.4[®]. Os resultados dos testes em escala reduzida foram empregados para validação de simulação computacional de barreira acústica. Concluiu-se que é possível utilizar modelos reduzidos para tal fim, porém, é necessário que se avalie as condições do entorno durante os ensaios. Dentre as características do entorno a serem avaliadas, citam-se as variáveis climáticas no momento da medição, o ruído de fundo do local, a topografia, o tipo de solo e a presença de vegetação e de edificações. Tais informações podem auxiliar na obtenção de resultados fidedignos e, desta forma, garantir o futuro desempenho de soluções mitigadoras de ruído por meio da utilização de modelos em escala reduzida para validação de simulação computacional.

Palavras-chave: Controle de ruído, Subestações elétricas; Direcionalidade de fonte sonora; Propagação sonora.

ABSTRACT

Noise barriers have been used as solutions to mitigate environmental noise. The study on performance of noise barriers is commonly accomplished through computer simulations with the specific sound propagation software. Tests of reduced scale models made in anechoic chamber are also tools used in this type of evaluation and can assist in validating the developed computer model. The restriction of access to anechoic chambers and the large dimensions of certain sources, such as electrical substations, may not allow tests in these chambers and lead to reduced model tests outdoors. These tests are practically nonexistent in the literature, which gives unique character to the research presented in this work. In the case of electrical substations that may be causing noise disturbance in their surroundings, it is pointed out the impossibility of implementing mitigation solutions to post-validate the solution employed. This restriction is due mainly to the complexity and size of the source. In similar cases, it is necessary a previous study on mitigation solutions, which may be done by way of computer simulations validated through reduced scale models. This work aims to verify the feasibility of using reduced scale outdoor models as a tool for validation of computer simulation of noise barriers. On the basis of experimental approach and exploratory nature, the application to the sound propagation in electrical substations is considered. The methodology involves the characterization of the sound source in question, the construction and testing of reduced scale model and modeling/simulation of the situation reproduced on a reduced scale with the software SoundPLAN 6.4[®]. The results of tests with scale outdoor model were used to validate computer simulation of acoustic barrier. It was concluded that it is possible to use reduced models for this purpose; however, it is necessary to evaluate the conditions of the environment during the tests. Among the characteristics of the environment to be evaluated, climatic variables at the time of measurement, background noise of the place, topography, soil type and presence of vegetation and buildings are considered. Such information can assist in obtaining reliable results and thus they guarantee the future performance of noise mitigation solutions through the use of reduced scale models for validating computer simulation.

Keywords: Noise control, Electrical substations; Sound source directionality, Sound propagation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fatores que contribuem para atenuação total de ruído	9
Figura 2.2 – Contornos de mesmo nível de pressão sonora no entorno de um transformador	10
Figura 2.3 – Diagramas polares de índices de diretividade de um alto-falante	11
Figura 2.4 – Valores aproximados da atenuação em excesso devido à absorção sonora do ar	15
Figura 2.5 – Efeito das condições meteorológicas sobre a propagação do som	17
Figura 3.1 – Propagação sonora na direção radial para uma fonte linear	29
Figura 3.2 – Ilustração do método de pesquisa por ângulos	32
Figura 3.3 – Divisão da geometria na pesquisa por ângulos	33
Figura 5.1 – Medida de ruído para o projeto de barreira acústica	43
Figura 5.2 – Modelo de Barreira Acústica com Difrator Lamelar no Topo	45
Figura 5.3 – Modificações no Topo da Barreira Acústica	46
Figura 8.1 – Área energizada da subestação – parcela de interesse da fonte sonora	62
Figura 8.2 – Croqui dos pontos de monitoramento – pátio dos transformadores	63
Figura 8.3a – Direcionalidade da fonte – pátio dos transformadores	67
Figura 8.3b – Direcionalidade da fonte – pátio dos transformadores	68
Figura 8.4 – Local para ensaios em escala reduzida – campus sede UEM	72
Figura 8.5 – Visualização do entorno da área de teste – campus sede UEM	73
Figura 8.6 – Local para ensaio de barreira acústica em escala reduzida	74
Figura 8.7 – Visualização do entorno da área de teste de barreira acústica em escala reduzida	75
Figura 8.8 – Ferramenta de equalização programa Wavelab [®] - direção 1	77
Figura 8.9 – Curva de resposta por frequência do alto-falante F6 da Bravox S/A	78
Figura 8.10 – Pontos de monitoramento – modelo em escala reduzida sem barreira acústica	80

Figura 8.11 – Pontos de monitoramento para determinação da direcionalidade da fonte sonora em escala reduzida	83
Figura 8.12a – Direcionalidade da fonte – comparação situação real e modelo em escala reduzida	86
Figura 8.12b – Direcionalidade da fonte – comparação situação real e modelo em escala reduzida	87
Figura 8.13 – Avaliação de barreira acústica – face voltada para a fonte sonora	90
Figura 8.14 – Avaliação de barreira acústica – face oposta à geração do ruído	91
Figura 8.15 – Modelagem da direcionalidade da fonte sonora em 50Hz no programa SoundPLAN®	96
Figura 8.16a – Mapas de ruído - direcionalidade da fonte sonora por faixa de frequência	99
Figura 8.16b – Mapas de ruído - direcionalidade da fonte sonora por faixa de frequência	100
Figura 8.16c – Mapas de ruído - direcionalidade da fonte sonora por faixa de frequência	101
Figura 8.17a – Mapas de ruído – efeito sonoro da barreira acústica por faixa de frequência	103
Figura 8.17b – Mapas de ruído – efeito sonoro da barreira acústica por faixa de frequência	104
Figura 8.17c – Mapas de ruído – efeito sonoro da barreira acústica por faixa de frequência	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 8.1 – Espectro sonoro – ponto de controle	70
Tabela 8.2 – Ensaio de barreira acústica em escala reduzida – impacto sonoro	93
Tabela 8.3 – Simulação de barreira acústica – impacto sonoro	106
Tabela A.1 – Dados de nível de pressão sonora – pátio dos transformadores	118
Tabela A.2 – Direcionalidade da fonte – pátio dos transformadores	119
Tabela A.3 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P25 – calibração da potência da fonte sonora	120
Tabela A.4 – Dados de nível de pressão sonora – modelo em escala reduzida	121
Tabela A.5 – Direcionalidade da fonte – modelo em escala reduzida	122
Tabela A.6 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P26 – modelo em escala reduzida sem barreira acústica	123
Tabela A.7 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P27 – modelo em escala reduzida sem barreira acústica	124
Tabela A.8 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P28 – modelo em escala reduzida sem barreira acústica	125
Tabela A.9 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P26 – modelo em escala reduzida com barreira acústica	126
Tabela A.10 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P27 – modelo em escala reduzida com barreira acústica	127
Tabela A.11 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P28 – modelo em escala reduzida com barreira acústica	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Atenuação proporcionada pela absorção atmosférica a 100m	15
Quadro 3.1 – Valores de K_{Ω} para diferentes geometrias	31
Quadro 4.1 – Resumo das características de estudos em escala reduzida com barreiras acústicas	39
Quadro 4.2 – Resumo das características de estudos em escala reduzida de ambientes urbanos	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 8.1 – Massa de dados de Nível de Pressão sonora – pátio dos transformadores	65
Gráfico 8.2 – Calibração da potência da fonte sonora	81
Gráfico 8.3 – Massa de dados de Nível de Pressão sonora – modelo em escala reduzida	84
Gráfico 8.4 – Atenuação sonora – ponto P27	107
Gráfico 8.5 – Atenuação sonora – ponto P28	107

SUMÁRIO

RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
LISTA DE FIGURAS	xix
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE QUADROS	xxiii
LISTA DE GRÁFICOS	xxv
SUMÁRIO	xxvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa e hipótese	3
1.2 Proposta	4
1.3 Objetivos	4
2 PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE	7
2.1 Diretividade da fonte	9
2.2 Absorção atmosférica	14
2.3 Gradientes de temperatura e de velocidade do vento	15
2.4 Absorção proporcionada pelo solo	18
2.5 Efeito da vegetação	19
2.6 Barreiras acústicas	21
2.7 Aspectos normativos	24
3 SIMULAÇÃO DE PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE	27
3.1 SoundPLAN [®] : princípios de cálculo	27
3.2 Propagação sonora	28
3.3 Absorção do ar	29

3.4	Difração	29
3.5	Efeito do solo, K_{Ω}	30
3.6	Reflexão	31
3.7	O método da pesquisa por ângulo	31
3.8	Tempo de simulação versus precisão	32
4	MODELOS EM ESCALA REDUZIDA	35
5	BARREIRAS ACÚSTICAS: ESTADO DA ARTE	43
6	TRANSFORMADORES DE ENERGIA ELÉTRICA ENQUANTO GERADORES DE RUÍDO	49
7	MATERIAIS E MÉTODOS	51
7.1	Objeto de estudo	52
7.2	Caracterização da fonte sonora	52
7.3	Determinação da escala reduzida	53
7.4	Reprodução da fonte sonora em escala reduzida	54
7.5	Validação da fonte sonora em escala reduzida	55
7.6	Ensaio de barreira acústica em escala reduzida	56
7.7	Modelagem da área de teste	57
7.8	Simulação computacional	58
8	RESULTADOS E ANÁLISES	61
8.1	Caracterização da fonte sonora	61
8.2	Determinação da escala reduzida	70
8.3	Reprodução da fonte sonora em escala reduzida	75
8.4	Validação da fonte sonora em escala reduzida	78
8.5	Ensaio de barreira acústica em escala reduzida	89
8.6	Modelagem da área de teste	94

8.7	Simulação computacional	97
9	CONSIDERAÇÕES	109
10	CONCLUSÕES	111
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A	117

1 INTRODUÇÃO

No século XX foi possível observar um intenso crescimento urbano de várias cidades brasileiras. Junto a este crescimento agravaram-se problemas de cunho social e ambiental tal como o ruído proveniente do tráfego de veículos e da construção civil. Atrelada ao desenvolvimento dos centros urbanos surgiu a necessidade de adequar a infraestrutura que dá suporte ao funcionamento das cidades. Um exemplo são as subestações elétricas, as quais estão presentes nas proximidades de inúmeros centros urbanos, quando não, inseridas nos mesmos.

Seja devido às subestações elétricas ou devido a outras fontes sonoras, o ruído tornou-se parte do dia-a-dia da sociedade e, atualmente, é reconhecido como uma forma de poluição. Sabe-se que a exposição prolongada a níveis de pressão sonora elevados pode provocar efeitos danosos à saúde da população. Os danos podem ser físicos ou psicológicos e interferem na saúde, no comportamento e nas interações das pessoas com outros na sociedade.

Subestações elétricas geram ruído de grande intensidade principalmente nas baixas frequências, o qual tem uma grande capacidade de propagação. Devido ao posicionamento das subestações, à natureza do ruído gerado e à topografia da região onde estejam instaladas é possível que tal ruído perturbe a população que habita em áreas residenciais próximas às subestações ou a população que frequenta o entorno das subestações por outros motivos.

Nesse contexto, evidencia-se a importância de se estudar o ruído gerado pelos equipamentos instalados em subestações elétricas e a possibilidade de proteger a população do entorno para que não sofra influências danosas à sua saúde.

A simulação computacional da propagação sonora é uma forma de se efetuar a previsão do nível sonoro de acordo com as fontes sonoras existentes, considerando-se, além das características das fontes, o relevo, a presença de edificações, a influência da absorção do solo entre outros fatores. Os resultados gerados por essa ferramenta devem ser validados para que possam ser empregados com segurança na elaboração de projetos de mitigação sonora.

Uma forma de se fazer esta validação é a utilização de ensaios com modelos em escala reduzida, os quais permitem a reprodução da área simulada com bom nível de detalhamento. A validação pode ser efetuada por meio da mensuração do nível de pressão sonora em pontos de controle no modelo em escala reduzida, dados estes que são confrontados com dados coletados em pontos equivalentes *in loco* garantindo assim a validade do modelo em escala reduzida. Tradicionalmente os modelos em escala reduzida são ensaiados em câmaras anecóicas, sendo este um artifício para controlar-se com facilidade a influência das movimentações das massas de ar, dos gradientes de temperatura e da umidade relativa, além de reproduzir a situação de campo livre quando se trata de modelos para reprodução de ambientes abertos. O emprego de modelos em escala reduzida ao ar livre é pouco mencionado na literatura.

É importante mencionar a dificuldade de acesso a câmaras anecóicas de grande porte destinadas a ensaios acústicos no Brasil. Existem câmaras anecóicas de uso particular, como por exemplo, de indústrias do ramo automobilístico. No entanto, em universidades públicas ou institutos de pesquisa tem-se acesso a câmaras menores, da ordem de 30m³ (trinta metros cúbicos), geralmente destinadas ao uso em conjunto com uma câmara reverberante para ensaios de isolamento acústico de painéis, não sendo possível a realização de ensaios de modelos em escala reduzida que reproduzam situações ao ar livre.

Neste trabalho, avaliou-se a possibilidade de utilização de modelos em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação para a simulação computacional de barreiras acústicas. Sabe-se que a utilização de modelos em escala reduzida ensaiados em câmara anecóica gera resultados satisfatórios para este fim. O objetivo desta pesquisa foi verificar a possibilidade da utilização de modelos em escala reduzida ao ar livre com o mesmo objetivo, estabelecendo critérios de aceitação para os mesmos.

Para tanto, primeiramente elaborou-se uma revisão acerca da teoria de propagação sonora ao ar livre. Dentre os fatores intervenientes na propagação sonora, destacou-se o emprego de barreiras acústicas. Discorreu-se sobre a direcionalidade de fontes sonoras e sobre transformadores de energia elétrica enquanto geradores de ruído. Além disso, fez-se uma explanação sobre a simulação computacional de propagação sonora ao ar livre e sobre modelos

em escala reduzida que reproduzem tal situação de propagação. Abordaram-se os assuntos mencionados nos capítulos 2, 3, 4, 5 e 6 do trabalho.

O ambiente ensaiado reproduziu uma subestação elétrica, a qual tem por característica a emissão de ruído direcional com grande variação da direcionalidade por faixa de frequência. Tal direcionalidade é uma das características da fonte sonora que foi reproduzida em modelo em escala reduzida ao ar livre, sendo este um dos desafios deste trabalho, já que não existe fonte sonora comercial capaz de emitir sons considerando a direcionalidade da fonte e tampouco a variação desta direcionalidade por faixa de frequência. Também em modelo reduzido ensaiou-se barreira acústica, cujos resultados foram utilizados para validação de simulação computacional.

Efetuaram-se as simulações computacionais neste trabalho por meio do programa SoundPLAN[®]. Nele inseriram-se, dentre outras, as características topográficas da área ensaiada e de direcionalidade da fonte sonora. Depois de calibrado o modelo computacional que reproduziu a situação real, simulou-se barreira acústica para se efetuar a proteção sonora da área do entorno da subestação que é passível de perturbação sonora pelo ruído gerado na subestação. A simulação de barreiras acústicas é uma forma adequada de verificar a eficiência da aplicação de uma barreira em determinada situação de projeto. O detalhamento do método de pesquisa, os resultados e a discussão dos mesmos são apresentados nos capítulos 7 e 8.

1.1 Justificativa e hipótese

Justificativa

A subestação em foco tem por característica a geração de ruído devido à conversão de energia realizada permanentemente por seus equipamentos, os quais operam na frequência de 60Hz. Sendo subestações elétricas fontes sonoras, verifica-se que os ruídos mais intensos são mensurados nas baixas frequências do espectro audível. Considerando a variação de configuração topográfica do entorno de fontes sonoras, em especial fontes de grande porte, tal como subestações elétricas, e o tipo de ruído gerado, é importante que se verifique se tal ruído gera incômodo em áreas ocupadas nas proximidades destas instalações e também, que se efetuem

estudos referentes ao controle de tal ruído. A subestação em foco e seus equipamentos são de grande porte e, portanto, não é viável a execução de qualquer medida mitigadora sem antes avaliar sua eficácia, o que é aplicável a outras situações de geração, propagação e controle de ruído. Desta forma justifica-se o presente trabalho como uma ferramenta para auxílio no estudo, na validação e no projeto de solução mitigadora para proteção de áreas onde porventura haja incômodo causado pelo ruído gerado em subestações ou outras instalações industriais de grande porte. Vale ressaltar que não foi avaliado se a subestação em foco nesta pesquisa afeta a região do entorno no que diz respeito à perturbação sonora. No entanto, o ruído gerado em tal subestação foi utilizado para caracterizar a fonte sonora durante o desenvolvimento da pesquisa.

Hipótese

Modelos em escala reduzida ao ar livre podem ser eficazes como ferramenta de validação de simulação computacional de barreiras acústicas.

1.2 Proposta

Propõe-se o estudo da viabilidade de utilização de modelos em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação para a simulação computacional de barreiras acústicas, de forma a ter-se uma alternativa à utilização de câmaras anecóicas para este tipo de ensaio devido à restrição de acesso a tais câmaras no Brasil.

1.3 Objetivos

Objetivo geral

- Avaliar a aplicabilidade de modelos em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação de simulação computacional de barreiras acústicas.

Objetivos específicos

- Caracterizar a fonte sonora por meio de avaliações *in loco*;
- Determinar os parâmetros que influenciam no teste ao ar livre de modelos reduzidos;

- Compatibilizar a escala do ruído emitido durante os testes de modelos reduzidos à escala de redução adotada;
- Validar modelo em escala reduzida ao ar livre para teste de propagação sonora em estação elétrica;
- Analisar qual a forma mais representativa para modelagem do ruído de transformadores de energia elétrica;
- Modelar área de teste considerando geometria, características acústicas e fontes sonoras;
- Simular e validar simulação de área de teste em programa específico de propagação sonora ao ar livre;
- Estabelecer as limitações da construção de modelos acústicos em escala reduzida utilizados em ensaios ao ar livre.

2 PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE

Conforme Bistafa (2011), ao se estudar a propagação sonora ao ar livre, em geral, faz-se referência a três componentes da propagação: a fonte sonora, a trajetória de propagação da onda sonora e o receptor. A fonte sonora, por definição, é uma estrutura capaz de vibrar e sensibilizar o meio no seu entorno, possibilitando a mensuração de um nível sonoro nesta região. A partir da emissão sonora pela fonte, o som se propaga por uma trajetória e, neste percurso, sofre uma série de interferências do meio e é atenuado. O receptor, conforme Sharland (1994), é a pessoa que é sensibilizada pelas flutuações de pressão causadas pela fonte sonora no meio de propagação.

São inúmeras as fontes geradoras de ruído em ambientes ao ar livre, dentre as quais se citam os tráfegos rodoviário, ferroviário e aéreo, as indústrias, os parques eólicos e os transformadores de energia. Destacam-se os transformadores como fontes sonoras fixas instaladas em subestações elétricas geralmente próximo a áreas habitadas, sendo sua presença usual em inúmeras cidades brasileiras. Segundo Portal Brasil (2013), o Brasil possui uma matriz de energia elétrica com 77,1% de participação da hidreletricidade, o que denota a dependência do país em relação às usinas hidrelétricas e, conseqüentemente, em relação às subestações elétricas, as quais viabilizam a distribuição da energia elétrica gerada.

Conforme Sharland (1994), ao tratar-se de propagação sonora ao ar livre é importante conhecer a forma de geração de ruído pela fonte sonora e as formas de atenuação sonora do meio no entorno da fonte, já que a propagação é condicionada por estes fatores. Nas situações de propagação sonora ao ar livre se torna difícil a intervenção no receptor e, para sua proteção, é necessário que se faça o controle na fonte e/ou na trajetória de propagação.

Os mecanismos que interferem na propagação sonora ao ar livre e provocam a atenuação sonora são inúmeros. Os mais relevantes que podem estar presentes no meio de propagação sonora são absorção atmosférica, gradientes de vento e temperatura, absorção proporcionada pelo solo, espalhamento sonoro na copa das árvores e barreiras acústicas.

Segundo Sharland (1994), tanto no estágio de projeto como no de intervenção acústica é necessário que seja possível avaliar de quais parâmetros depende o nível de pressão sonora. Desta forma orienta-se a tomada de decisões, ou seja, define-se sobre qual parâmetro é indicado intervir para obter resultados expressivos de redução sonora.

Sharland (1994) afirma que o caso mais simples de propagação do ruído em ambiente externo que se pode considerar é aquele em atmosfera uniforme e tranquila. A maior parte das situações de propagação sonora por via aérea diretamente da fonte ao receptor pode ser representada por este modelo de forma simplificada. O autor salienta que, somente após realizados os cálculos em condições de propagação ideal, efetuam-se as correções que forem oportunas de forma a considerar as variações reais em relação às condições atmosféricas, presença de vegetação, barreiras acústicas, entre outros mecanismos de atenuação presentes. No que diz respeito às condições de atenuação atmosférica, o equacionamento está estabelecido nas normas ISO 9613¹ partes 1 e 2. De acordo com Kang (2007) distâncias entre fonte e receptor a partir de cem metros requerem uma análise mais aprofundada sobre estes mecanismos.

Bucur (2006) relata que a atenuação total de ruído é composta pela atenuação normal, devido à geometria, e pela atenuação em excesso. A Figura 2.1 sintetiza os fatores que influenciam na atenuação do ruído durante a propagação.

¹ ISO 9613: *Attenuation of sound during propagation outdoors*. Part 1 (1993): *Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. Part 2 (1996): *General method of calculation*. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland.

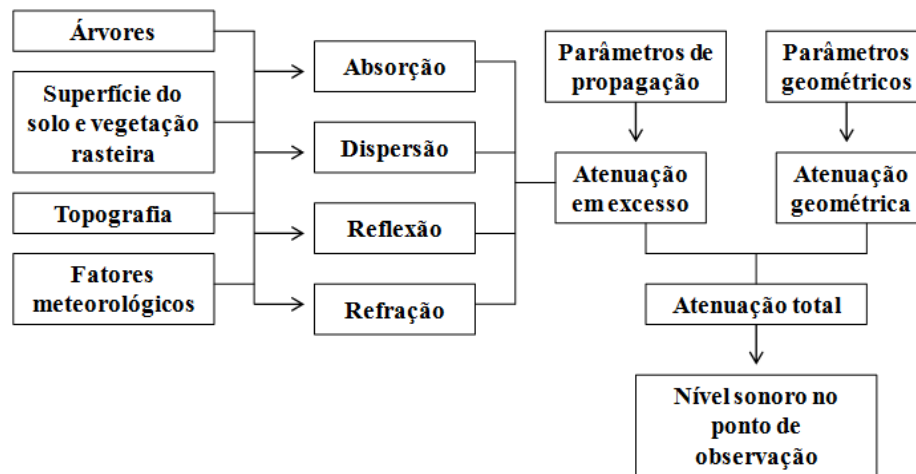


Figura 2.1 – Fatores que contribuem para atenuação total de ruído

Fonte: Adaptado de KELLOMÄKI; HAAPANEN; SALONEN² (1976 apud BUCUR, 2006)

A seguir, faz-se uma explanação a respeito da diretividade da fonte sonora, pois esta é uma característica interferente na forma de propagação do ruído emitido e é um dos fatores que determinam a área atingida pelo ruído e a intensidade do mesmo neste local. Na sequência abordam-se os mecanismos mais significativos de atenuação sonora ao ar livre e os aspectos normativos relevantes.

2.1 Diretividade da fonte

Segundo Bistafa (2011), uma fonte sonora é direcional quando apresenta direções preferenciais de irradiação sonora. A omnidirecionalidade de uma fonte sonora é perdida quando sua forma não é esférica e/ou quando não são uniformes a amplitude e a fase das vibrações de suas superfícies. Como resultado, uma fonte direcional apresenta, a uma mesma distância da fonte, níveis de pressão sonora diferentes em direções diferentes. De acordo com Guarato et al. (2011), a direcionalidade de uma fonte sonora pode ser calculada por meio da intensidade relativa dos sons emitidos em diferentes direções.

² Kellomäki, S.; Haapanen, A.; Salonen, H. *Tree stands in urban noise abatement*. Silva Fennica, v. 10, p. 237–256, 1976.

Conforme Henrique (2002) faz-se a caracterização da direcionalidade de uma fonte sonora de forma experimental, medindo o nível de pressão sonora em várias direções a uma distância fixa da fonte sonora. A partir desta medição obtém-se o diagrama de direcionalidade da fonte, o qual, normalmente varia com a frequência. Zhang (2010) afirma que a direcionalidade de uma fonte pode ser distorcida por fatores como interferência entre os raios sonoros, absorção e reflexão proporcionada pelo solo, reflexão e difração devido à presença de edificações próximas.

Na Figura 2.2 visualiza-se o campo sonoro no entorno de um transformador de energia elétrica de grande porte (PETERSON; GROSS³, 1978 apud BISTAFA, 2011). Cada contorno ao redor do transformador representa pontos aonde é verificado o mesmo nível de pressão sonora compondo o diagrama de direcionalidade da fonte. Neste caso, o diagrama ilustra que uma das faces da fonte sonora irradia mais ruído do que as outras, o que é característico de fontes direcionais.

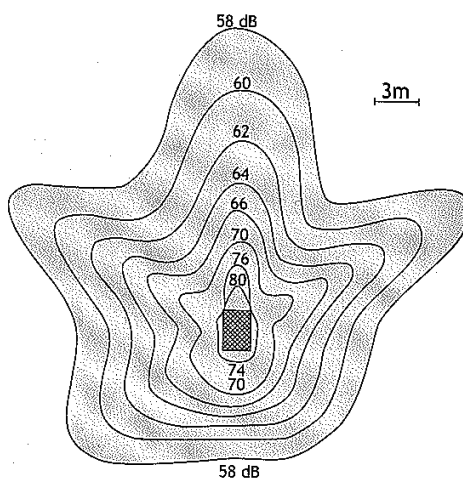


Figura 2.2 – Contornos de mesmo nível de pressão sonora no entorno de um transformador

Fonte: PETERSON; GROSS (1978 apud BISTAFA, 2011)

No caso de fontes sonoras direcionais, segundo Bistafa (2011), além da potência sonora, é necessário conhecer-se o índice de diretividade em todas as direções e nas faixas de

³ PETERSON, A. P. G.; GROSS, E. E. *Handbook of noise measurements*. 8.ed. General Radio: Concord, 1978.

frequência de interesse para que seja possível caracterizá-las de forma completa. É usual representar os índices de diretividade na forma de diagramas polares para facilitar a visualização da forma de irradiação sonora da fonte (BISTAFA, 2011). Apresentam-se na Figura 2.3 os diagramas polares de índices de diretividade de um alto-falante no plano horizontal em função do ângulo θ , nas faixas de oitava de 125Hz à 16kHz. O ângulo θ representa o ângulo medido a partir da linha perpendicular à face frontal da fonte e varia no sentido anti-horário de 0° à 360° .

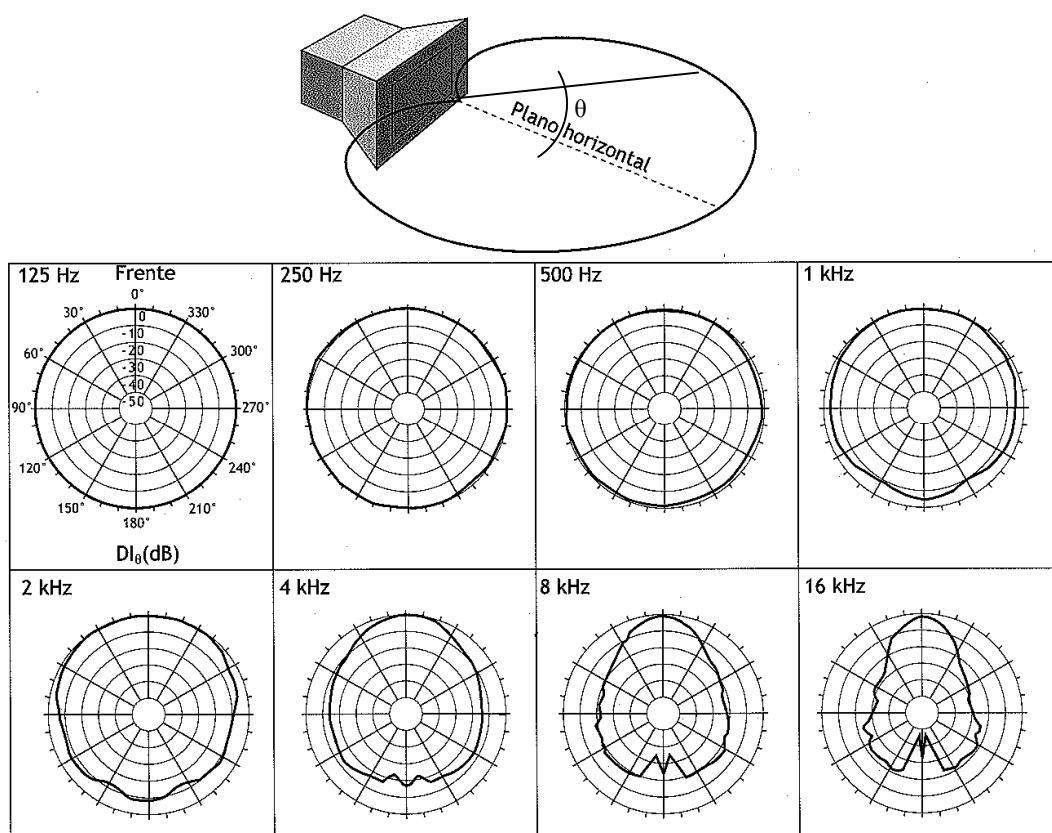


Figura 2.3 – Diagramas polares de índices de diretividade de um alto-falante

Fonte: Adaptado de BISTAFA (2011)

Conforme Kang (2007), para fontes sonoras consideradas grandes, quando comparadas ao comprimento de onda da onda sonora, é importante considerar as suas características relativas à direcionalidade. Neste sentido, Bies e Hansen (1996) afirmam que em geral a irradiação sonora é direcional, sendo maior em algumas direções e menor em outras.

Bies e Hansen (1996) definem o fator de diretividade “Q” como um número capaz de expressar as propriedades de direcionalidade de um som em função do ângulo de propagação da intensidade sonora.

Kang (2007) define o fator de diretividade como a razão entre a intensidade sonora em uma determinada distância e ângulo em relação à fonte e a intensidade no mesmo ponto caso a fonte irradiasse com a mesma potência sonora em todas as direções. O fator de diretividade é expresso pela Equação 2.1.

$$Q = \frac{I_{\theta}}{I} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Onde:

- Q é o fator de diretividade;
- I_{θ} é a intensidade sonora na direção θ [W.m^{-2}];
- I é intensidade sonora no mesmo ponto em que foi medida I_{θ} considerando a propagação a partir de uma fonte omnidirecional [W.m^{-2}].

O índice de diretividade “DI” é determinado, segundo Bies e Hansen (1996), por meio de medições de intensidade sonora em orientação angular e distância da fonte específicas ou por meio de medições de nível de pressão sonora. Beranek e Vér (1992) apresentam as Equações 2.2 e 2.3 para o cálculo do índice de diretividade.

$$DI = 10 \log Q \quad [\text{dB}] \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$DI = L_{p\theta} - L_{ps} \quad [\text{dB}] \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Onde:

- DI é o índice de diretividade [dB];
- Q é o fator de diretividade;
- $L_{p\theta}$ é o nível de pressão sonora medido na distância “r” e ângulo “ θ ” da fonte [dB];

- L_{pS} é o nível de pressão sonora medido na distância “r” de uma fonte omnidirecional [dB].

Ambos os níveis de pressão sonora $L_{p\theta}$ e L_{pS} são determinados para a mesma distância em relação à fonte.

No caso mais simples de propagação sonora em campo livre, considerando uma fonte pontual e uma distância “d” entre fonte e receptor, a intensidade sonora no receptor é calculada conforme a Equação 2.4, apresentada por Kang (2007), onde a potência sonora é dividida pela área esférica da frente de propagação da onda sonora na distância “d”.

$$I = \frac{W}{4 \pi d^2} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Onde:

- I é a intensidade sonora em [W.m⁻²];
- W é a potência sonora em [W];
- d é o raio da área esférica da frente de propagação da fonte pontual em [m].

Baseado na Equação 2.4, Kang (2007) calcula o nível de pressão sonora (L_p) a partir do nível de potência sonora (L_w) (Equação 2.5). Neste caso, ocorre uma redução de 6dB no nível de pressão sonora cada vez que se dobra a distância em relação à fonte

$$L_p = L_w - 10 \log(4 \pi d^2) = L_w - 20 \log(d) - 11 \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Onde:

- L_p é o nível de pressão sonora em [dB];
- L_w é o nível de potência sonora em [dB];
- d é o raio da área esférica da frente de propagação da fonte pontual em [m].

Para a propagação semiesférica do som, caso em que a fonte sonora está localizada próxima ao chão duro e, portanto, ocorrem reflexões do som emitido, o nível de pressão sonora é dado pela Equação 2.6 (KANG, 2007).

$$L_p = L_w - 20\log(d) - 8 \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Para o caso de fonte sonora linear, considerando comprimento infinito e campo livre, o nível de pressão sonora pode ser determinado, de acordo com Kang (2007), utilizando a propagação cilíndrica, conforme a Equação 2.7, sendo que ocorre uma redução de 3dB no nível de pressão sonora cada vez que se dobra a distância em relação à fonte.

$$L_p = L_w - 10\log(2\pi d) = L_w - 10\log(d) - 8 \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Caso a fonte sonora linear esteja próxima ao chão duro, o nível de pressão sonora na distância “d” é calculado conforme a Equação 2.8 (KANG, 2007).

$$L_p = L_w - 10\log(d) - 5 \quad \text{Eq. (2.8)}$$

2.2 Absorção atmosférica

No que diz respeito à absorção atmosférica, segundo Kang (2007), existem dois mecanismos por meio dos quais a energia sonora é absorvida pela atmosfera: relaxamento molecular e efeito da viscosidade. A absorção atmosférica depende da temperatura e da umidade relativa e os efeitos de absorção atmosférica são significativos para grandes distâncias e/ou altas frequências.

Conforme Sharland (1994) a atenuação proporcionada pela absorção atmosférica é a atenuação em excesso mais importante em longas distâncias. A Figura 2.4 traz valores de atenuação em excesso proporcionada pela absorção atmosférica para várias frequências em função da distância em relação à fonte sonora. Estes valores de atenuação devem ser subtraídos do nível de pressão sonora calculado para as condições ideais de propagação sonora.

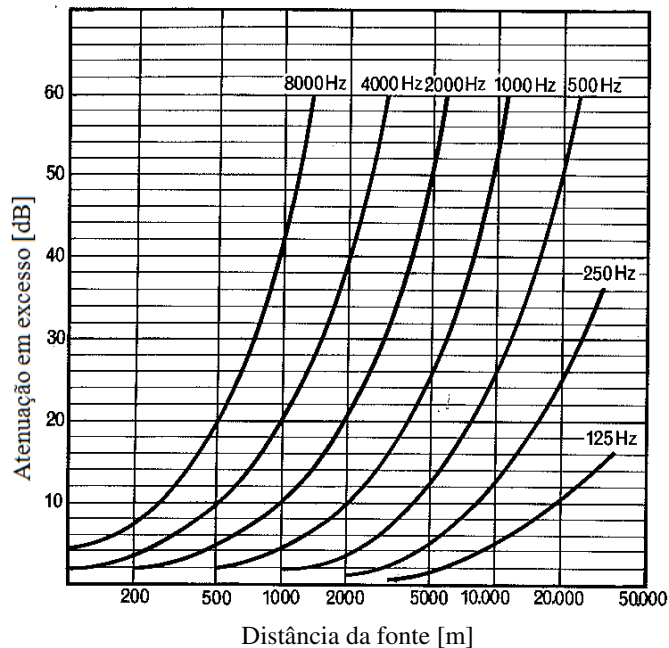


Figura 2.4 – Valores aproximados da atenuação em excesso devido à absorção sonora do ar
Fonte: SHARLAND (1994)

Lawrence⁴ (1970 apud KANG, 2007) dá valores de atenuação proporcionada pela absorção atmosférica para uma distância de 100m (cem metros), temperatura de 20°C (vinte graus Celsius) e umidade relativa igual a 50% (cinquenta por cento) (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Atenuação proporcionada pela absorção atmosférica a 100m

Freq. [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Atenuação [dB]	0,032	0,072	0,18	0,42	1,0	2,6	8,3

Fonte: LAWRENCE (1970, apud KANG, 2007)

2.3 Gradientes de temperatura e de velocidade do vento

Conforme Bistafa (2011), os gradientes, ou seja, as variações de temperatura e de velocidade do vento que ocorrem de acordo com a altitude, provocam gradientes de velocidade de propagação do som. Sharland (1994) salienta que a velocidade de propagação do som no ar

⁴ LAWRENCE, A. *Architectural Acoustics*. London: Elsevier, 1970.

aumenta com a temperatura e varia conforme a direção dos ventos. Portanto a velocidade de propagação do som no ar diminui quando a propagação ocorre a barlavento e aumenta quando ocorre a sotavento.

Além disso, conforme Sharland (1994), de acordo com a variação da temperatura e do vento em relação ao solo, a direção de propagação das ondas sonoras tende a curvar-se em direção ao alto ou em direção ao solo conforme ilustra a Figura 2.5. Tais efeitos passam a ser significativos quando o som se propaga em distâncias maiores do que algumas centenas de metros.

Observa-se na Figura 2.5 que quando há um gradiente de temperatura normal, ou seja, quando a temperatura diminui com a altura, cria-se uma região de sombra acústica além do ponto em que as ondas tocam o chão para depois propagarem-se para cima (SHARLAND, 1994). Já nas condições de inversão térmica e com propagação à sotavento, o efeito é inverso. Neste caso Sharland (1994) relata que a energia que em situação normal de propagação seria irradiada pra cima, passa a ser direcionada para baixo, sendo possível que nestas condições ocorra uma atenuação negativa, sendo possível mensurar níveis de pressão sonora mais elevados do que os esperados considerando a distância e a diretividade.

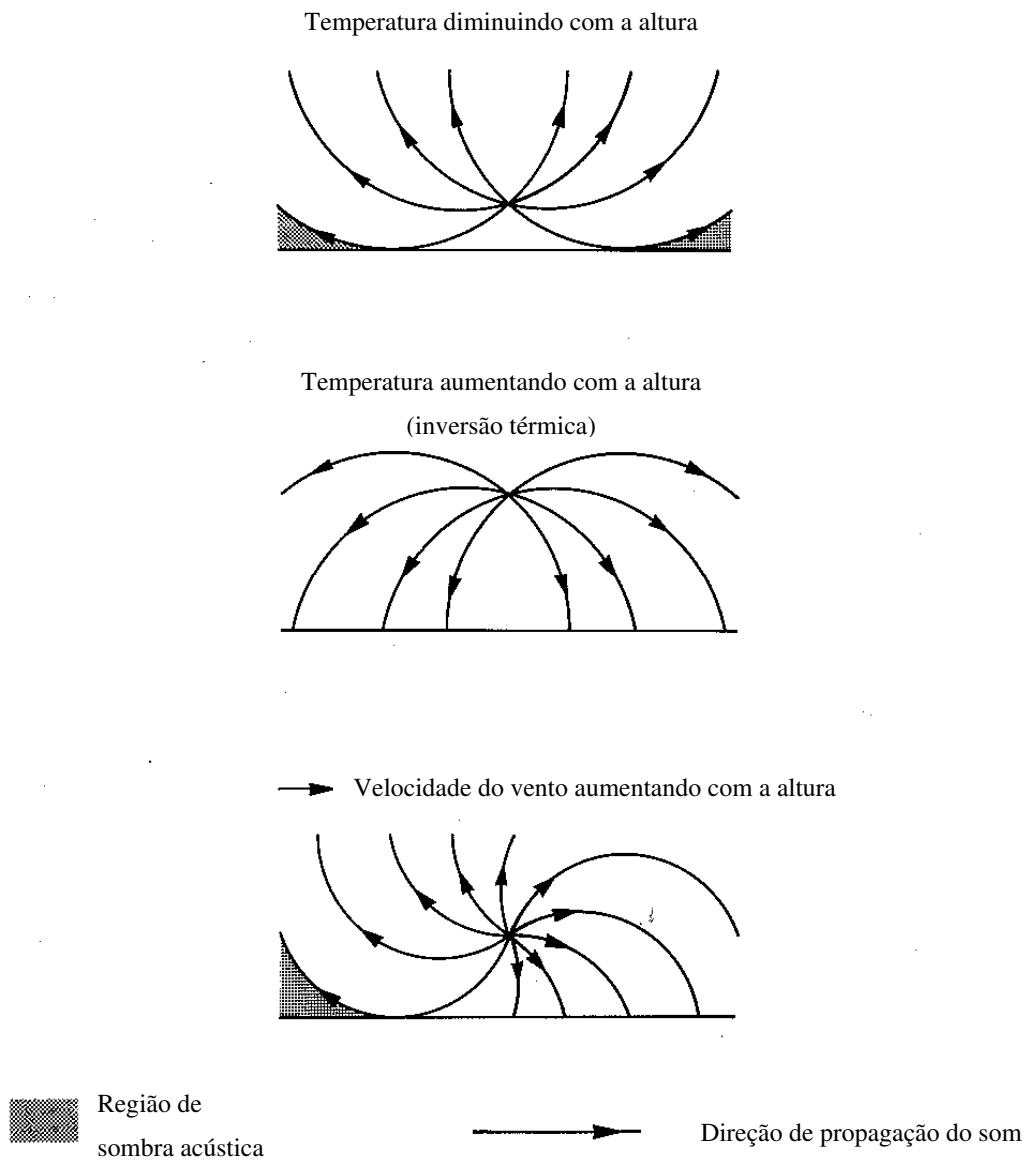


Figura 2.5 – Efeito das condições meteorológicas sobre a propagação do som

Fonte: Adaptado de SHARLAND (1994)

Sharland (1994) ainda menciona que os efeitos das condições atmosféricas sobre a propagação do som estão entre aqueles de difícil quantificação. Logo, não é possível estabelecer regras gerais que apontem para um resultado exato.

2.4 Absorção proporcionada pelo solo

Conforme Bistafa (2011), as reflexões que ocorrem no solo geram raios sonoros que interferem com o raio direto. Dependendo das fases das duas ondas, onda incidente e onda refletida, pode ocorrer a atenuação ou a amplificação do nível de pressão sonora em função da frequência. Ainda segundo o autor, as atenuações podem ser da ordem de 20dB a 30dB, sendo esta uma interferência destrutiva quando os dois raios estão defasados em 180°. Já as amplificações podem ser de até 6dB no nível de pressão sonora, o que corresponde à duplicação da pressão sonora em frequências para as quais os raios estão com a mesma fase.

Bistafa (2011) afirma que, em propagações sonoras sobre solos “duros” como asfalto, terra batida, água e solo inundado, ocorrem tanto interferências destrutivas como construtivas sendo que o resultado é uma amplificação média de cerca de 3dB em relação ao som direto.

No que se refere aos solos “macios” como terra arada ou aerada, neve, solo com vegetação entre outros, Bistafa (2011) indica que durante a propagação sonora as reflexões provenientes do solo podem ocorrer com inversões de fase da onda, exceto em frequências muito baixas, o que causa significativa atenuação sonora. O efeito de absorção devido ao solo é indicado pelo termo A_{gr} e, segundo Bies e Hansen (1996), dependendo da superfície do solo, poderá variar de -3dB até 0dB.

A norma ISO 9613-1, descreve o método para calcular o efeito de absorção devido ao solo, sendo este utilizado somente para solos planos, na horizontal e com inclinação constante. Kang (2007) relata que, para a determinação da atenuação devido ao solo, o método proposto pela norma ISO 9613-1 distingue três regiões entre fonte sonora e receptor. Na região da fonte sonora a atenuação A_s é calculada para uma distância mínima h_s de trinta vezes a altura da fonte em relação ao solo e distância máxima d_p igual à distância entre fonte sonora e receptor. Na região do receptor, a atenuação A_r é calculada para uma distância mínima h_r igual a trinta vezes a altura do receptor em relação ao solo e distância máxima d_p . A atenuação A_m é calculada para a região intermediária (média) que compreende a distância entre as regiões da fonte e do receptor. Não haverá região intermediária se d_p for menor que $(30h_s + 30h_r)$. As atenuações devem ser

calculadas para as três regiões em cada banda de oitava para depois serem adicionadas para obter a atenuação total por banda de oitava.

Kang (2007) explica que o efeito de absorção do solo é considerado por meio do fator G, ou seja, A_s , A_r e A_m são calculadas com base em tal fator. O fator G é igual a zero para solos “duros”, igual a um para solos “macios” e varia de zero a um para solos mistos. A atenuação total em banda de oitava devido ao solo é determinada pela aplicação da Equação 2.9.

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Caso o ruído não seja um tom puro e o fator G seja próximo de 1, Kang (2007) apresenta a Equação 2.10 como uma alternativa que pode ser empregada para a determinação da absorção devido ao solo obtendo-se um valor de nível de pressão sonora ponderado pela curva A.

$$A_{gr} = 4,8 - \frac{2h_m}{d_r} \left(17 + \frac{300}{d_r} \right) \geq 0 \quad \text{Eq. (2.10)}$$

Onde:

- h_m é a altura média da trajetória de propagação [m];
- d_r é a distância entre fonte e receptor [m].

2.5 Efeito da vegetação

É comum a afirmação, por parte da população em geral, de que o plantio de algumas árvores vai ajudar a criar uma barreira para a propagação do ruído. No entanto, a vegetação não é considerada uma barreira acústica a não ser que apresente configuração de plantio e dimensões específicas. Faulkner e Bilawchuk (2008) afirmam que árvores e arbustos isolados são meios ineficazes de atenuação sonora e agem como um placebo acústico: “fora da vista, fora da mente”. Ou seja, se a fonte sonora não é visualizada pelo receptor, sua percepção é amenizada.

Segundo Bistafa (2011), um cinturão verde posicionado entre fonte sonora e receptor terá a função de uma barreira acústica vazada, ou seja, que permite a passagem do som através

dela, sendo que o som incidente poderá ser absorvido ou espalhado. O referido autor destaca que folhagens, pequenos ramos e arbustos têm a propriedade de absorver parcialmente o som, enquanto troncos, ramos grandes e folhagem densa provocam o espalhamento do som. O espalhamento do som tem maior influência na capacidade de atenuação do cinturão verde do que a absorção, o que corrobora o fato de que tal capacidade de atenuação é mais dependente da densidade, da largura e da altura da vegetação do que dos tipos e formas de folhas e galhos.

As características mais influentes na capacidade de isolamento acústico de uma faixa de vegetação de acordo com Bistafa (2011) são a largura, a localização e a altura do cinturão e a configuração de plantio. Leonard e Parr (1970), além destes fatores, mencionam que a densidade arbórea, o vento, a umidade, a temperatura e o relevo afetam a forma de propagação do ruído.

Conforme Bistafa (2011), para que haja o efeito de proteção acústica, a largura do cinturão deve ser superior a 15m (quinze metros), verificando-se uma atenuação da ordem de 7dB para cada 30m (trinta metros) de largura, atenuação esta que ocorre somente a partir de 15m (quinze metros) de largura. Leonard e Parr (1970) afirmam que é possível obter uma atenuação de cerca de 8dB por meio de massas arbóreas com 30 m (trinta metros) de largura. Conforme Kang (2007), mesmo bosques com vegetação densa e largura do cinturão verde maior que 30m (trinta metros) terão sua capacidade de atenuação limitada pela transmissão sonora sobre a parte superior da copa das árvores.

No que diz respeito à localização do cinturão verde, a posição menos favorável é a meio caminho entre fonte sonora e receptor. Quando o cinturão é localizado mais próximo da fonte ocorre um aumento considerável da atenuação, ao passo que, quando o cinturão localiza-se mais próximo do receptor, o acréscimo de atenuação será inferior. A altura do cinturão verde deve ser de ao menos 5m (cinco metros) acima da linha de visão para que este atue como barreira acústica (BISTAFA, 2011).

Quanto à configuração de plantio do cinturão verde, Bistafa (2011) apresenta quatro condições a serem atendidas para que a atenuação desejada seja obtida: sub-bosque denso para evitar a propagação sonora sob a copa das árvores; vegetação densa caracterizada pelo impedimento de visualização da fonte pelo receptor de forma que se impeça a propagação sonora

entre as árvores; altura do cinturão verde decrescente no sentido da fonte para induzir o direcionamento das ondas sonoras para cima e; vegetação perenifólia para evitar atenuações sazonais.

Kragh⁵ (1982, apud KOTZEN; ENGLISH, 1999) efetuou ensaios de campo para verificação da atenuação sonora proporcionada pela vegetação. O referido autor monitorou sete cinturões verdes com larguras entre 15m (quinze metros) e 40m (quarenta metros). As maiores atenuações foram obtidas em baixas frequências, em torno de 250Hz, e em altas frequências, acima de 1kHz. O autor relata que o aumento da atenuação nas baixas frequências deve-se à absorção proporcionada pelo solo, o qual tem a porosidade superficial aumentada devido às folhas e aos ramos caídos. Já a atenuação nas altas frequências ocorre devido à vegetação propriamente dita. Martens⁶ (1980, apud KOTZEN; ENGLISH, 1999) observou que a atenuação máxima ocorreu quando a dimensão das folhas era igual à metade do comprimento de onda do som. Tal fato indica que a atenuação em uma faixa de frequências mais ampla é obtida com a utilização de várias espécies vegetais em conjunto.

Segundo Gerges (2000), o uso da vegetação tende a fornecer pouca eficiência na atenuação do ruído, sendo, no entanto, de grande eficácia na obstrução visual entre fonte sonora e receptor, proporcionando um efeito psicológico favorável.

2.6 Barreiras acústicas

Conforme Kang (2007), qualquer obstáculo sólido que impeça a linha de visão entre fonte sonora e receptor e crie uma zona de sombreamento na face oposta à geração do ruído pode ser considerado uma barreira acústica.

⁵ KRAGH, J. *Road traffic noise attenuation by belts of trees and bushes*. Report N° 31. Lyngby, Denmark: Danich Acoustical Laboratory, 1982.

⁶ MARTENS, M. J. M. *Foliage as a low pass filter: experiments with model forests in an anechoic chamber*. Nijmegen, Netherlands: Geluid en Groen, Katholieke Universiteit, 1980.

O fundamento da física básica empregado no estudo do desempenho de barreiras acústicas é a teoria da difração, fenômeno este que, segundo Laranja (2004), teve sua primeira descrição publicada no ano de 1665 com o título de *Physico Mathesis de Lumiere, Coloribus et Iride*, pouco depois da morte do autor Francesco Maria Grimaldi (1618-1663). De acordo com Kotzen e English (1999), o desempenho de barreiras acústicas é dependente da frequência e determinado em função do número de Fresnel N, que é um número adimensional, definido conforme a Equação 2.11.

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad \text{Eq. (2.11)}$$

Onde:

- δ é a diferença de percurso entre a onda sonora difratada e a onda direta [m];
- λ é o comprimento de onda [m].

Kurze e Anderson⁷ (1971 apud KOTZEN; ENGLISH, 1999) apresentam a Equação 2.12 para o cálculo da perda na inserção (*insertion loss*, IL) em decibels proporcionada por uma barreira acústica em função do número de Fresnel (N).

$$IL = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

Conforme os mesmos autores, a Equação 2.12 é válida para valores de N entre (-0,2) e 12,5. Para N maior que 12,5 a perda na inserção é igual a 24dB.

Segundo Kotzen e English (1999), quando a barreira acústica tem altura pouco maior que a linha de visão entre fonte sonora e receptor, acontece uma atenuação do ruído igual a 5dB. Como para o cálculo do número de Fresnel é considerada a diferença de percurso entre a onda

⁷ KURZE, U. J.; ANDERSON, G. S. *Sound attenuation by barriers*. Applied Acoustics, 4, 35-53, 1971.

sonora difratada e a onda direta, é possível obter valor de perda na inserção igual a 5dB substituindo na Equação 2.12 um valor de N próximo de zero.

Kang (2007) salienta que a Equação 2.12 não contempla o efeito da difração pelos flancos da barreira e, portanto, deve ser empregada em conjunto com regras empíricas. Tais regras são recomendações de Pirinchieva⁸ (1991 apud KANG, 2007) e apontam as seguintes configurações típicas, sendo as considerações baseadas em uma fonte pontual:

- O comprimento da barreira deve ser tal que a distância da fonte até as extremidades da barreira seja de pelo menos duas vezes a distância normal da fonte até a barreira, ou;
- A barreira deve abranger um ângulo de 160° (cento e sessenta graus) a partir do receptor, ou;
- O comprimento da barreira deve ser de pelo menos quatro ou cinco vezes a sua altura.

Para o caso de fonte linear paralela à barreira, Kurze e Anderson (1971 apud KOTZEN; ENGLISH, 1999) afirmam que a perda na inserção será cerca de 5dB menor.

De acordo com Kang (2007), a eficiência da barreira depende também das reflexões sonoras que acontecem na barreira, da absorção do material que compõe a barreira e da transmissão sonora através da mesma. Kang (2007) afirma que a capacidade de isolamento do painel componente da barreira deve ser 10dB maior que o som difratado. Conforme a norma NBR 14313 (1999), uma barreira acústica deve ter estanqueidade sonora, ou seja, capacidade de isolamento à passagem do som através dela de pelo menos 25dB(A). Ainda segundo a referida norma, a densidade superficial mínima deve ser de 40kg/m².

Kotzen e English (1999) acrescentam que, além de a barreira acústica reduzir o ruído até os níveis adequados e ser considerada aceitável pelos responsáveis pelo planejamento das

⁸ PIRINCHIEVA, R. K. *The influence of barrier size on its sound diffraction*. Journal of Sound and Vibration, 148, 183-92, 1991.

idades, ela deve ser aprovada pelos habitantes do local onde for implantada e para tanto, a barreira deve ser projetada para integrar-se ao entorno.

2.7 Aspectos normativos

Apresentam-se neste item as normas NBR 10151 (2000), ISO 10847 (1997), ISO 9613-1 (1993) e ISO 9613-2 (1996) pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho.

A norma NBR 10151 (2000) emitida pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) intitula-se “Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade”. Nesta pesquisa essa norma é utilizada como parâmetro para efetuar o monitoramento de ruído *in loco*, já que em seu texto faz recomendações para tal atividade. O ruído gerado em subestações elétricas, a partir de transformadores, apresenta componentes tonais e, portanto, é interessante destacar que a norma NBR 10151 estabelece uma penalização de 5dB(A) para ruídos que apresentem componentes tonais na faixa de frequências audível, ou seja, o nível mensurado deve ser acrescido de 5dB(A).

A norma ISO 10847 (1997) emitida pela *International Organization for Standardization* intitula-se “*Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types*”. Esta norma especifica os métodos para a determinação *in-situ* da perda por inserção de barreiras acústicas instaladas em ambientes abertos considerando posição de microfones, especificação da fonte sonora e condições ambientais para os locais de medição. De acordo com essa norma é possível determinar a perda por inserção de duas formas: o método direto fazendo a diferença de níveis antes e depois da instalação da barreira acústica e o método indireto, por meio do qual se estimam os níveis de pressão sonora antes da instalação da barreira. Neste trabalho, a norma ISO 10847 será utilizada para determinar a perda por inserção de barreiras acústicas instaladas em modelo em escala reduzida. Será empregado o método direto.

A norma ISO 9613 emitida pela *International Organization for Standardization* intitula-se “*Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors*”. A parte 1 (1993) tem por subtítulo “*Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*” e, a parte 2 (1996), “*General method of calculation*”. Esta norma é o parâmetro utilizado pelos modelos matemáticos

de programas de simulação computacional de propagação de ruído ambiental, como, por exemplo, o programa SoundPLAN[®] para quantificar a atenuação atmosférica. Os algoritmos consideram os efeitos físicos de divergência geométrica, absorção atmosférica, efeito de absorção do terreno, reflexões em superfícies e difração em obstáculos.

3 SIMULAÇÃO DE PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE

Os programas de simulação computacional de barreiras acústicas de maior emprego no Brasil são SoundPLAN[®], CadnaA[®], e Predictor Type 7810[®]. Os três programas mencionados permitem que se estude o impacto ocasionado em um ambiente após a inserção de barreiras acústicas, bem como possibilitam que se efetue a otimização do projeto de tais barreiras.

Dentre estes programas, escolheu-se o SoundPLAN[®] para aplicação nesta pesquisa, pois este atende às necessidades de detalhamento da barreira acústica e da fonte sonora a serem analisadas e era o programa que estava disponível para utilização. Apresenta-se a seguir o programa SoundPLAN[®], bem como alguns de seus princípios de cálculo.

3.1 SoundPLAN[®]: princípios de cálculo

O programa SoundPLAN[®] é caracterizado neste item a partir de informações obtidas no manual do usuário disponível no *website* da empresa Grom, distribuidora do programa no Brasil (GROM, 2005).

O SoundPLAN[®] é um programa que permite a elaboração de mapas de ruído. Para tanto, os níveis sonoros são calculados para receptores pontuais, os quais compõem uma malha de pontos com níveis sonoros conhecidos, a partir da qual é construído o mapa de ruído.

Ao descrever os níveis sonoros de cada receptor pontual, as fontes sonoras são consideradas de forma independente e seu efeito sobre cada ponto da malha pode ser calculado separadamente. A contribuição de cada fonte pode ser adicionada para a obtenção do nível sonoro resultante no receptor utilizando a Equação 3.1.

$$L_{i,sum} = 10 * \log \left[\sum_{i=1}^n (10^{L_i/10}) \right] \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Onde:

- $L_{i,sum}$ é o nível sonoro total emitido [dB];
- L_i é a contribuição de uma fonte pontual, ou seja, o nível de pressão sonora medido no receptor [dB].

O nível de pressão sonora é dado considerando-se a potência da fonte sonora subtraindo-se as atenuações que ocorrem durante a propagação sonora. A contribuição “ L_i ” de uma fonte pontual é descrita pela Equação 3.2.

$$L_i = L_w - C_1 - C_2 \dots C_n \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Onde:

- L_w é o nível de potência sonora [dB];
- $C_1 \dots C_n$ são coeficientes que descrevem os aspectos da propagação sonora.

Conclui-se, a partir da Equação 3.2, que o nível sonoro medido em um receptor deriva da potência sonora emitida e da forma de propagação. Os coeficientes considerados são de propagação sonora, absorção do ar, difração, efeito de absorção do solo e reflexão.

3.2 Propagação sonora

A definição de potência sonora é baseada na energia distribuída através de uma esfera com a área superficial de um metro quadrado. Conforme a distância a partir da fonte aumenta, a área da superfície também aumenta. Considerando a área da esfera conforme a Equação 3.3, o nível de pressão sonora propagado a partir de uma fonte esférica a qualquer distância da fonte sonora é dado pela Equação 3.4.

$$\text{Área superficial da esfera} = 4 * \pi * R^2 \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Onde:

- R é o raio da esfera [m].

$$L_w = 10 * \log(R_0 / (4 * \pi * R^2)) \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Onde:

- R_0 é o raio de referência [m].

Considerando-se R_0 igual à unidade e rearranjando a Equação 3.4, tem-se como resultado a Equação 3.5.

$$L_w = -11 - 20 * \log(R) \quad \text{Eq. (3.5)}$$

Quando a fonte linear é muito mais longa que a distância da fonte ao receptor, a propagação é calculada a partir da fonte linear e aumenta somente em duas dimensões (Figura 3.1). Com o aumento da distância entre fonte e receptor as características de propagação aproximam-se de uma fonte pontual.

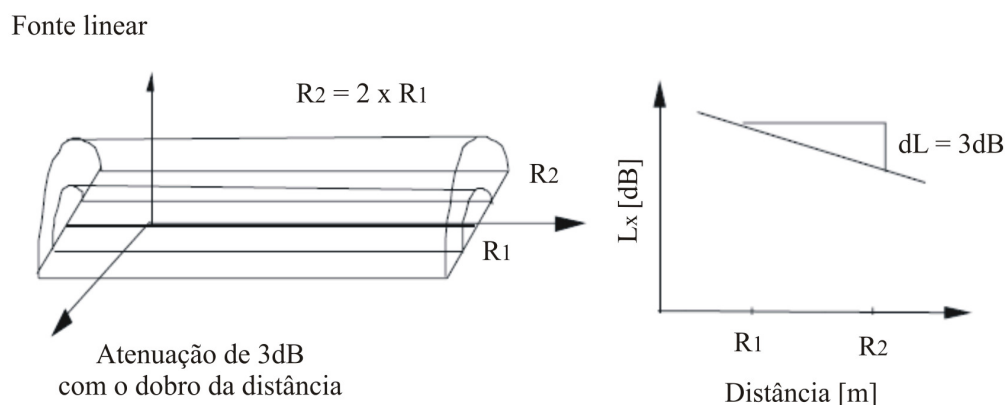


Figura 3.1 – Propagação sonora na direção radial para uma fonte linear

Fonte: GROM (2005)

3.3 Absorção do ar

O ar, assim como os outros meios, não permite que as ondas sonoras se propaguem sem perdas. Para considerar o efeito da absorção sonora na propagação, o programa SoundPLAN[®] utiliza as recomendações constantes na norma ISO 9613 (1993), de acordo com a qual, para tons puros, a atenuação devido à absorção atmosférica é especificada em termos do coeficiente de absorção sonora, sendo este função das variáveis frequência do som, temperatura do ar, umidade do ar e pressão atmosférica.

3.4 Difração

O programa considera a difração quando uma onda sonora atinge a extremidade de um obstáculo, podendo esta extremidade ser horizontal ou vertical. O SoundPLAN[®] tem por padrão a avaliação do efeito da difração apenas sobre os obstáculos, mas é possível ativar a função de avaliação da difração horizontal por ocasião da escolha da forma de consideração dos

parâmetros envolvidos na simulação. A difração é avaliada conforme a frequência da onda sonora e a diferença do percurso entre a onda sonora difratada e a onda direta.

Para grandes distâncias a diferença do percurso percorrido pela onda sonora conduz a uma superestimativa da difração sonora, fato este devido à atmosfera. Como a pressão do ar diminui com o aumento da altitude, a atmosfera curva as ondas sonoras em direção ao chão. Isso significa que o som viaja por uma trajetória curva e não uma linha reta. Em grandes distâncias o caminho extra para trajetórias curvas é muito menor do que para uma trajetória retilínea entre fonte e receptor.

No SoundPLAN® o efeito da difração é considerado em barreiras, elevações do terreno e objetos refletoras. Até mesmo barreiras com altura próxima de zero são consideradas. É recomendado gerar um modelo do terreno com curvas de nível, já que são avaliados o efeito de barreira e de absorção do solo.

No que diz respeito à difração lateral, o programa considera somente a difração para as interações diretas entre fonte e receptor. Para as reflexões seguintes é avaliada somente a difração vertical.

3.5 Efeito do solo, K_{Ω}

Uma onda sonora interage com o solo ao percorrer uma trajetória próxima a ele. A onda é refletida e absorvida e podem ocorrer interferências entre a onda direta e a refletida. Segundo a norma ISO 9613 (1993), se uma fonte sonora está sobre uma superfície refletora, a propagação não será esférica, mas sim uma meia esfera. Também é considerado que todas as energias refletidas sobre um chão “duro” duplicam-se, assim como os níveis sonoros para as ondas propagadas (adição de 3 dB). Se a fonte sonora estiver localizada no encontro de duas paredes, a propagação se fará pela superfície de um quarto de esfera, novamente duplicando o nível de ruído para a propagação com a adição de 3 dB. Esta adição será de 0dB para uma fonte distante de qualquer superfície refletora. Estas correções são tabeladas em norma e recebem a denominação K_{Ω} . Está implícito nas fórmulas que consideram o efeito do solo a inclusão da correção. No Quadro 3.1 apresentam-se os valores de K_{Ω} empregados de acordo a geometria de propagação.

Quadro 3.1 – Valores de K_{Ω} para diferentes geometrias

K_{Ω}	Caso de aplicação
0 dB(A)	Propagação esférica. Exemplo: fumaça de cigarro
+3 dB(A)	Propagação em meia esfera. Exemplo: empilhadeira trabalhando em superfície dura.
+6 dB(A)	Propagação em um quarto de esfera. Exemplo: fonte sonora no encontro de duas paredes.
+9 dB(A)	Propagação em um oitavo de esfera. Exemplo: ventilador em um canto (encontro de duas paredes e teto)

Fonte: GROM (2005)

3.6 Reflexão

O princípio da reflexão adotado no programa é o que obedece às leis da ótica. Os ângulos de incidência e reflexão considerados são no pavimento e na terceira dimensão. Os ângulos não são o único critério que qualifica a reflexão de um plano. A altura do objeto deve ser no mínimo do tamanho da metade de um comprimento de onda, senão a onda sonora será absorvida. Esta restrição também é aplicada às outras dimensões do objeto. Se uma onda sonora incidir em um plano com um ângulo maior que 85° (oitenta e cinco graus), ela não será refletida.

À reflexão está associada uma perda de energia da onda sonora devido à parcela de energia absorvida pela superfície de incidência da onda. A absorção é uma característica do material que deve ser informada por ocasião da modelagem da área de simulação no ambiente do programa SoundPLAN[®].

3.7 O método da pesquisa por ângulo

O SoundPLAN[®] utiliza um método de busca por setores, ou seja, a partir do receptor faz uma varredura em raios detectando a geometria das fontes sonoras, barreiras à propagação e terreno, além das reflexões e da atenuação proporcionada pelo solo. A varredura é efetuada com um ângulo de incremento constante escolhido pelo usuário do programa. Quanto menor o ângulo de incremento, maior será a precisão e mais lento será o processo de simulação computacional.

Ao efetuar a pesquisa por ângulos, o SoundPLAN[®] forma triângulos adjacentes que cobrem a área de simulação. Ao detectar uma fonte na direção de pesquisa de um raio específico, o programa determina qual parcela da fonte está contida em cada triângulo e faz o processamento

da fonte parcial. Fontes lineares passam a ser representadas e tratadas como uma série de fontes pontuais. Apresenta-se na Figura 3.2 a representação da triangulação efetuada pelo programa, bem como a substituição de uma fonte linear por sucessivas fontes pontuais.

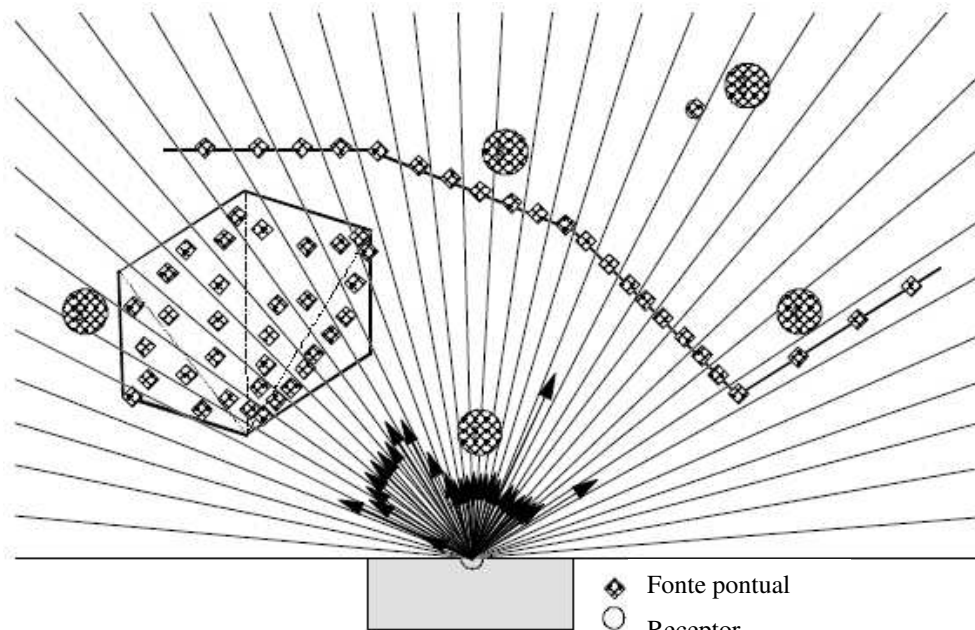


Figura 3.2 – Ilustração do método de pesquisa por ângulos

Fonte: GROM (2005)

Na Figura 3.2 as contribuições em termos de ruído, que atingem o receptor, provenientes de todas as direções são desenhadas em escala com o receptor ao centro. A partir do tamanho das setas é possível medir-se a contribuição de ruído na direção em que a seta aponta. Durante a simulação isto pode ser visualizado por meio de contornos com mesmo nível de pressão sonora representados a cada 10dB.

3.8 Tempo de simulação versus precisão

Dependendo da distância entre fonte e receptor ou entre a fonte e um obstáculo, uma parte de uma fonte ou o afastamento entre edifícios podem não ser reconhecidos corretamente durante a simulação. Tal reconhecimento parcial de fontes e afastamento entre edifícios pelo programa ocorre pois, durante o processo de simulação, o programa SoundPLAN® aplica o método da pesquisa por ângulos a partir dos receptores. Desta forma, próximo a cada receptor os raios traçados durante a simulação estarão próximos uns dos outros e reconhecerão muitos

detalhes influentes no entorno do receptor. Porém, conforme ocorre o afastamento em relação ao receptor e dependendo do ângulo de pesquisa utilizado, os raios vão se distanciando uns dos outros e passa-se a ter regiões não analisadas durante a simulação. É possível que nestas regiões encontrem-se detalhes importantes do ambiente a ser simulado, detalhes estes que serão desprezados no resultado da simulação. Observa-se, na Figura 3.3, uma edificação em cinza claro e uma faixa adjacente à mesma em cinza escuro, além do traçado de raios a partir do receptor com um ângulo de pesquisa específico. Verifica-se que, no lado direito da edificação, há uma parte da mesma que não é reconhecida durante a simulação devido ao distanciamento entre os raios. Esta é uma falha que pode ser atenuada com a diminuição do ângulo de pesquisa.

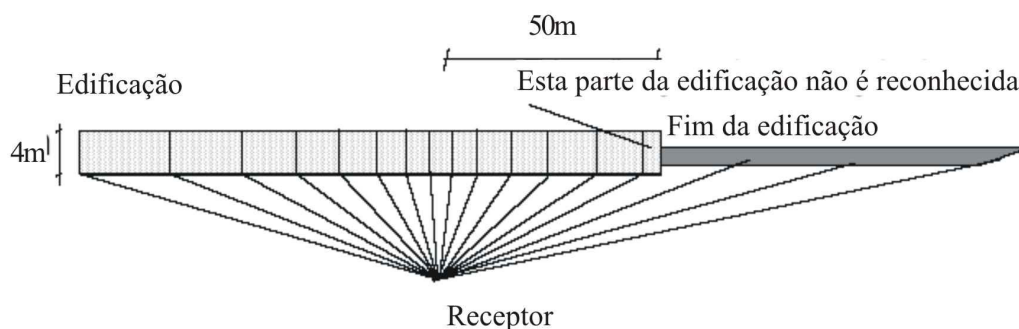


Figura 3.3 – Divisão da geometria na pesquisa por ângulos

Fonte: GROM (2005)

Salienta-se que a precisão de cálculo ao utilizar-se o método de pesquisa por ângulos é alta próximo ao receptor. No entanto, conforme aumenta a distância em relação ao receptor, diminui a precisão dos resultados.

4 MODELOS EM ESCALA REDUZIDA

O estudo de fenômenos de propagação sonora em escala reduzida tem sido empregado, tanto para avaliação de propagação em ambientes fechados (JEON et al., 2008) como propagação ao ar livre (HOROSHENKOV; HOTHERSALL; ATTENBOROUGH, 1996). Arizmendi (1980) enfatiza que experimentos realizados com modelos reduzidos demonstraram empiricamente que este é um excelente sistema para obter informações precisas sobre as futuras propriedades acústicas de um ambiente, mesmo antes de tê-lo construído.

Os modelos em escala reduzida são desenvolvidos a partir de inúmeras simplificações que incluem desde textura dos materiais empregados até expectativa de variação de gradientes de pressão e temperatura. Ainda assim, a partir da delimitação das condições de contorno e monitoramento dos parâmetros influentes na propagação das ondas, é possível obter previsões bastante realistas do comportamento sonoro dos ambientes. Faz-se, portanto, uma previsão das condições do protótipo a partir de observações de modelos.

Conforme Arizmendi (1980), do ponto de vista acústico pode-se definir como semelhantes o ambiente projetado, ou seja, o protótipo, e o modelo quando a propagação sonora ocorre em ambos com trajetórias semelhantes e existe uma relação constante entre as grandezas mensuradas durante a propagação em todos os pontos homólogos. Para tanto é imprescindível que se estabeleça a semelhança geométrica entre o ambiente projetado e o modelo.

O estabelecimento da semelhança geométrica (semelhança de forma) é obtido mantendo-se constante a razão entre qualquer comprimento no modelo e seu comprimento correspondente no protótipo (ARIZMENDI, 1980). Esta razão é o fator de escala.

Em geral os modelos em escala reduzida geram custos baixos se comparados com o risco de executarem-se obras com previsões de desempenho de pouca confiabilidade. Modelos em escala reduzida que representam com fidelidade a situação real permitem economia na fase de execução da obra devido ao maior detalhamento na fase de projeto. No entanto, quando a complexidade da obra a ser executada é elevada, os modelos tornam-se caros devido ao nível de

detalhamento necessário e, portanto, passa-se a empregar outras ferramentas para previsão de desempenho.

Devido à própria situação de ensaio e à reprodução da situação real, todos os ensaios de modelos em escala reduzida referentes a ambientes fechados são efetuados em ambientes controlados. No que diz respeito a modelos que reproduzem situações de propagação ao ar livre, o que se observa é o estabelecimento de um procedimento de ensaio pelos pesquisadores da área, aonde esses modelos são submetidos aos testes também em ambientes controlados: as câmaras anecóicas ou semianecóicas.

Nesse item apresentam-se algumas publicações relevantes para a caracterização das pesquisas desenvolvidas sobre modelos em escala reduzida relacionadas ao estudo da propagação sonora ao ar livre. Destaca-se, sempre que possível, a escala de redução empregada bem como o motivo da escolha de tal escala; o ambiente de teste; o tipo de ambiente reproduzido e detalhes referentes ao modelo que tenham sido destacados pelos autores das pesquisas. As publicações são apresentadas considerando duas temáticas: primeiramente barreiras acústicas e, na sequência, propagação do ruído em ambiente urbano.

Koyasu e Yamashita (1973) utilizaram um modelo em escala reduzida para verificar a capacidade de atenuação de barreiras acústicas quando submetidas a ruído gerado por fonte linear. A opção pela utilização de modelo em escala reduzida foi feita devido à dificuldade de estimar a atenuação sonora durante a propagação em áreas com superfícies variadas e presença de obstáculos. Os experimentos foram efetuados em câmara anecóica. Não é especificada a escala de redução adotada, sendo apenas mencionado que a barreira ensaiada tinha altura de 16cm (dezesesseis centímetros). Os primeiros estudos de caráter científico sobre barreiras acústicas ocorreram, segundo Kotzen e English (1999), no final da década de 1960. Torna-se, portanto, importante mencionar o estudo de Koyasu e Yamashita (1973), pois introduziram o uso de modelos em escala reduzida como ferramenta para a verificação do desempenho de barreiras acústicas nos anos seguintes aos primeiros estudos científicos sobre o assunto.

Porada (1975) ensaiou barreiras acústicas nas escalas 1:100 e 1:20. O autor não apresenta justificativa para o uso das duas escalas de redução. Seu objetivo era avaliar o

desempenho de barreiras acústicas quando expostas a fontes lineares. Os ensaios envolveram barreiras simples e barreiras duplas e foram realizados em câmara semianecóica (anecóica com piso reflexivo).

May e Osmand (1980) apresentam trabalho em que é descrito o desempenho acústico de barreiras com alterações no topo e inclinações da própria barreira, sendo tais estruturas destinadas à utilização em rodovias. O desempenho das barreiras acústicas foi estabelecido por meio de testes na escala 1:16. Não há referência quanto ao local aonde foram realizados os ensaios.

Radwan e Oldham (1987) desenvolveram um modelo computacional para prever a atenuação sonora proporcionada por muro de contenção construído acrescentando, em suas extremidades, paredes menores perpendiculares ao mesmo para aumentar a sua estabilidade estrutural. O objetivo era verificar a influência destas paredes menores na atenuação sonora proporcionada pelo muro de contenção. Os resultados obtidos foram validados por meio de ensaios em escala reduzida. Foi utilizada a escala de redução 1:10 e os ensaios foram realizados em câmara anecóica.

Hayek (1990) desenvolveu um modelo matemático, baseado na teoria da difração, para avaliação de barreiras acústicas com geometria simples ou mais elaborada. Tais barreiras acústicas teriam como foco interferir na propagação de ruídos gerados em rodovias. Para a verificação da eficiência do modelo matemático, foram realizados ensaios na escala 1:5. O modelo em escala reduzida foi testado no interior de um grande ginásio, o qual, apesar de não reproduzir a situação de campo livre, permitiu que os ensaios fossem efetuados em ambiente controlado.

Crombie, Hothersall e Chandler-Wilde (1995) efetuaram estudo para avaliação do desempenho acústico de barreiras com topo modificado. Os experimentos foram realizados na escala 1:20 em câmara anecóica. Foi feita comparação dos resultados de atenuação obtidos a partir dos ensaios em escala reduzida com os resultados obtidos a partir de modelo numérico desenvolvido com o método dos elementos de contorno, de forma a validar tal modelo numérico.

Watts e Morgan (1996) realizaram ensaios de barreiras acústicas em escala real com o objetivo de verificar a variação da atenuação sonora proporcionada pelas barreiras, cuja configuração do limite superior era alterada. No topo das barreiras era introduzido um duto aberto revestido com material de baixa densidade e os resultados eram comparados com os valores de atenuação proporcionada por barreiras simples. Os ensaios foram realizados em ambiente aberto. Durante o período de testes foram monitoradas a temperatura do ar, a umidade relativa e a pressão atmosférica.

Em estudo de controle de ruído rodoviário, Busch e Hodgson (2003) desenvolveram modelo em escala reduzida para ensaio de barreiras acústicas e avaliação da perda na inserção proporcionada por tais estruturas. A modelagem das superfícies do solo e dos diversos tipos de barreiras acústicas testadas foi feita na escala 1:31,5 e os ensaios efetuados sobre plataforma posicionada em câmara anecóica. Na publicação não há justificativa para a escolha da escala ou para o fato do teste ter sido realizado em câmara anecóica.

Cianfrini, Corcione e Fontana (2007), utilizaram modelo na escala 1:10 para estudar o desempenho de barreiras acústicas com superfícies difusivas para uso em rodovias. Os testes foram realizados em câmara semianecóica. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com um modelo teórico/computacional desenvolvido para avaliação do campo sonoro no entorno de barreiras acústicas com superfícies difusivas.

No Quadro 4.1 apresenta-se um resumo das características dos modelos com barreiras acústicas testados nas pesquisas apresentadas, bem como as justificativas para as escolhas efetuadas.

Quadro 4.1 – Resumo das características de estudos em escala reduzida com barreiras acústicas

Autores	Ambiente reproduzido	Escala	Justificativa escala reduzida	Ambiente de teste	Justificativa ambiente de teste
Koyasu e Yamashita (1973)	Área urbana, barreiras acústicas	-	Dificuldade para estimar a atenuação sonora na propagação	Câmara anecóica	-
Porada (1975)	Rodovia, barreiras acústicas	1:100 1:20	-	Câmara semianecóica	-
May e Osmans (1980)	Rodovia, barreiras acústicas	1:16	-	-	-
Radwan e Oldham (1987)	Rodovia, barreiras acústicas	1:10	-	Câmara anecóica	-
Hayek (1990)	Rodovia, barreiras acústicas	1:5	-	Grande ginásio	Efetuar ensaio em ambiente controlado
Crombie, Hothersall e Chandler-Wilde (1995)	Área urbana, barreiras acústicas	1:20	-	Câmara anecóica	-
Watts e Morgan (1996)	Rodovia, barreiras acústicas	1:1	-	Campo livre	-
Busch e Hodgson (2003)	Área urbana, barreiras acústicas	1:31,5	-	Câmara anecóica	-
Cianfrini, Corcione e Fontana (2007)	Rodovia, barreiras acústicas	1:10	-	Câmara semianecóica	-

* O uso do hífen indica que não foi possível obter tal informação.

Picaut e Simon (2001) apresentam um estudo de propagação sonora em áreas urbanas na escala 1:50. A opção pela escala reduzida foi feita pela possibilidade de reprodução de fenômenos físicos como múltiplas reflexões e espalhamento em fachadas irregulares. Os ensaios foram realizados em câmara semianecóica e não há relato no estudo sobre a possibilidade de teste

em ambiente aberto. Foi aplicada uma compensação por ocasião do processamento de cada sinal monitorado de forma a considerar a variação da atenuação atmosférica em relação à escala 1:1. Importante salientar que o fator de escala elevado tornou complicado o processamento digital do sinal e a compensação da atenuação atmosférica.

Ismail e Oldham (2004) utilizaram um modelo em escala reduzida para mensurar os efeitos do espalhamento em fachadas de edificações. O experimento foi efetuado em câmara anecóica. O fator de escala empregado foi de 1:15 e a escolha deste fator foi baseada nas características do equipamento de medição e nas dimensões da câmara anecóica. Foi efetuada uma correção devido ao efeito da absorção sonora proporcionada pelo ar, já que esta não pôde ser desprezada devido aos pequenos comprimentos de onda analisados.

Hornikx e Forssén (2008) relatam estudo de propagação sonora em áreas urbanas desenvolvido com o intuito de aprimorar o conhecimento sobre a propagação sonora em cânions urbanos considerando fachadas com complexo detalhamento arquitetônico e caracterizando-as com coeficientes de absorção e difusão sonora. Os ensaios foram realizados em câmara anecóica, porém, foi introduzida na câmara anecóica uma estrutura sob o modelo representando o pavimento da área testada, sendo assim alteradas as características da câmara, passando-se a ter uma câmara semianecóica. A opção por teste em câmara anecóica deu-se para mitigar os efeitos do ruído de fundo e de reflexões indesejadas. Foi adotada a escala 1:40 e a determinação da mesma foi baseada nos aspectos práticos de manipulação do modelo e nas dimensões da câmara de ensaio.

No Quadro 4.2 apresenta-se um resumo das características dos modelos de ambientes urbanos testados nas pesquisas apresentadas, bem como as justificativas para as escolhas efetuadas.

Quadro 4.2 – Resumo das características de estudos em escala reduzida de ambientes urbanos

Autores	Ambiente reproduzido	Escala	Justificativa escala reduzida	Ambiente de teste	Justificativa ambiente de teste
Picaud e Simon (2001)	Área urbana	1:50	Possibilidade de reprodução de fenômenos físicos	Câmara semianecóica	-
Hornikx e Forssén (2008)	Área urbana, cânion urbano	1:40	Aspectos práticos de manipulação do modelo; dimensões da câmara	Câmara anecóica	Mitigar os efeitos do ruído de fundo e de reflexões indesejadas
Ismail e Oldham (2004)	Área urbana, fachadas de edificações	1:15	Características do equipamento de medição, dimensões câmara anecóica	Câmara anecóica	-

* O uso do hífen indica que não foi possível obter tal informação.

Há que se mencionar que ao se aplicar uma escala a um modelo, deve-se fazer uma análise quanto às limitações do equipamento utilizado para coleta de dados. Tais limitações fazem referência principalmente às faixas de frequência às quais o equipamento é sensível, de forma a não impossibilitar o estudo devido à necessidade de monitoramento sonoro em faixas de frequência aquém ou além da capacidade do aparelho.

Verifica-se que são raras as aplicações de modelos testados ao ar livre. Isso ocorre devido à grande quantidade de variáveis influentes e à dificuldade de controlá-las quando se está em ambiente aberto, fato este que explica a predominância da escolha de ensaios para reprodução de situações ao ar livre em câmaras anecóicas e semianecóicas. No entanto, a possibilidade de efetuar tais ensaios em ambiente aberto existe desde que sejam considerados o entorno do modelo, o controle das variáveis influentes e a necessidade de aplicação de correções devido às simplificações adotadas por ocasião da construção do modelo.

5 BARREIRAS ACÚSTICAS: ESTADO DA ARTE

As primeiras barreiras acústicas foram construídas intuitivamente nos Estados Unidos da América a partir da metade do século XX, quando o tráfego de veículos começou a aumentar. Somente no final dos anos 1960 as pesquisas na área de acústica começaram a validar a eficácia de barreiras acústicas projetadas nas adjacências de vias específicas. No Reino Unido as barreiras acústicas foram instaladas a partir da década de 1960 (KOTZEN E ENGLISH, 1999).

Nos Estados Unidos da América foram realizados estudos de volume de tráfego em dezenas de rodovias existentes e projetadas visando o projeto de barreiras acústicas, sendo que a maioria destes estudos foi solicitada pelo Departamento de Auto-estradas (FHWA, 2001). Foram quatro grupos envolvidos nestas pesquisas: Caltrans Headquarters em Sacramento, Califórnia; ESL inc. em Palo Alto, Califórnia; Bolt, Beranek e Newman em Cambridge, Massachusetts e uma equipe de pesquisadores da Universidade da Flórida (FHWA, 2001). A Figura 5.1 apresenta a imagem de um pesquisador efetuando medidas de ruído para o projeto de uma barreira acústica em Santa Clara County, na Califórnia.



Figura 5.1 – Medida de ruído para o projeto de barreira acústica

Fonte: FHWA (2001)

De acordo com FHWA (2001) é possível que o primeiro trabalho publicado sobre uma barreira acústica projetada cientificamente tenha sido um estudo para a “Foothill Expressway” em Los Altos, Califórnia no final da década de 1960. Até o final dos anos 1970 vários grupos de pesquisa nos Estados Unidos da América aplicavam modelos computacionais

semelhantes e abordavam pelo menos duzentos diferentes pontos de estudo, os quais estavam localizados nas rodovias estudadas a pedido do Departamento de Auto-estradas (FHWA, 2001).

Segundo Kotzen e English (1999), o aumento do emprego de barreiras acústicas na Europa, nos Estados Unidos da América, na Austrália e no extremo Oriente refletiu o crescimento da preocupação da população em relação ao ruído causado particularmente por estradas e ferrovias.

Suh, Mongeau e Bolton (2001) mencionam que barreiras acústicas têm sido empregadas para controlar o ruído de tráfego há várias décadas e que elas podem ser construídas de madeira, estuque, concreto, alvenaria, metal e outros materiais. Os autores salientam que os estudos para o desenvolvimento da tecnologia de barreiras acústicas passaram a incluir o estudo dos efeitos do vento, de gradientes de temperatura, dos tratamentos superficiais de absorção da barreira bem como de modificações na geometria do topo da barreira, com o intuito de melhorar o desempenho das barreiras.

O estudo de tratamentos superficiais em barreiras foi abordado por Fujiwara, Ando e Maekawa (1977) que, em sua pesquisa, apresentaram um método para estimar a atenuação em excesso proporcionada por barreiras acústicas revestidas com materiais de absorção sonora. Também Watts e Godfrey (1999) abordaram o assunto quando mensuraram o efeito no nível sonoro em rodovias proporcionado por barreiras acústicas revestidas com materiais de absorção sonora.

Muradali e Fyfe (1999) enfocaram em seu estudo o fato de que os modelos mais comuns para a previsão de desempenho de barreiras acústicas levam em consideração o efeito da difração assumindo condições de atmosfera homogênea, o que normalmente resulta projetos de barreiras acústicas superestimadas. Com o intuito de obter resultados mais precisos, Muradali e Fyfe (1999) associaram, ao efeito da difração, os efeitos atmosféricos.

Inúmeros estudos foram desenvolvidos para verificar o efeito de modificações da geometria do topo das barreiras. De acordo com Boone (2005), uma forma de interferir no comportamento das ondas sonoras para obter maior atenuação com barreiras acústicas é a

utilização de chapas horizontais finas, ou lamelas, colocadas no topo da barreira acústica, constituindo um difrator lamelar (Figura 5.2).



Figura 5.2 – Modelo de Barreira Acústica com Difrator Lamelar no Topo

Fonte: BOONE (2005)

Segundo Boone (2005), a vantagem desta aplicação se encontra no fato de as lamelas horizontais serem bem menos resistentes ao vento se comparadas a uma barreira fechada e mais alta. Boone (2005) salienta que se trata de uma construção aberta por onde passam também as ondas sonoras, no entanto, o posicionamento das lamelas é tal que interfere destrutivamente na transmissão do ruído devido à mudança de fase da onda ao passar pelas lamelas. Existe a possibilidade de ajustar a frequência de maior interferência do difrator lamelar alterando a largura e o distanciamento entre as lamelas em função da frequência da fonte sonora (BOONE, 2005).

Outros tipos de modificações no topo de barreiras acústicas foram abordados em pesquisa desenvolvida por Sakuma (2005), cujas propostas de modificações são ilustradas na Figura 5.3.

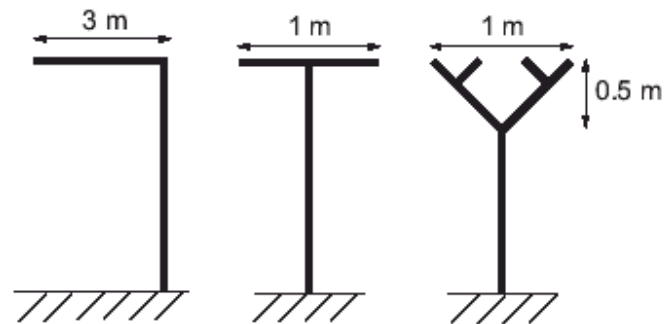


Figura 5.3 – Modificações no Topo da Barreira Acústica

Fonte: SAKUMA (2005)

Monazzam e Lam (2005) verificaram o desempenho de barreiras com o topo em “T” coberto com difusores de resíduo quadrático (QRD). Em estudo subsequente, Monazzam e Lam (2008) introduziram características de absorção aos difusores de resíduo quadrático por meio do revestimento com fibra de vidro. Monazzam e Lam (2008) empregaram em sua pesquisa o princípio de que o topo de barreiras acústicas funciona como uma fonte sonora imaginária e que o controle da pressão sonora nesta região pode reduzir a fonte e diminuir o campo difratado atrás da barreira.

O controle ativo de ruído também é um artifício utilizado para melhorar o desempenho de barreiras acústicas. Han e Qiu (2007) empregaram esta tecnologia em seu estudo para o controle de intensidade sonora por barreiras. Hart e Lau (2012) conduziram pesquisa sobre controle ativo de ruído em barreiras acústicas com a disposição de uma série de fontes sonoras controladas paralelamente a uma série de sensores, ambos posicionados no topo da barreira.

Em seu estudo, Schröder, Svensson e Vorländer (2011), mencionam que os métodos de simulação utilizados atualmente para avaliação do efeito da difração são apenas aproximações, podendo gerar falsas previsões quando se simula geometrias complexas, ou quando a influência de múltiplas ondas difratando e do espalhamento das superfícies deve ser considerada. Desta forma, os métodos de previsão computacional utilizados para a simulação de barreiras acústicas devem ser avaliados comparando os resultados com medições, a exemplo do que já é feito em larga escala quando se trata da acústica de ambientes fechados. Os autores efetuaram medições

em modelo em escala reduzida construído em câmara anecóica para fazer tal comparação de resultados, ou seja, para a verificação da validade dos resultados das simulações computacionais.

A simulação computacional de barreiras acústicas têm sido empregada para previsão e otimização do desempenho das barreiras (GERGES, 2000; DEFRANCE; JEAN, 2003; BISTAFA, 2011; TSAI; LIN; CHEN, 2009; MURPHY; KING, 2011). Na Europa o dimensionamento de barreiras acústicas está inserido no contexto de mapas de ruído estratégicos, os quais são amplamente discutidos na Directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do conselho de 25 de junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. O Decreto Lei n° 9/2007 publicado no Diário da República de Portugal em 17 de janeiro de 2007 prevê a elaboração de mapas de ruído pelas câmaras municipais. Estes mapas devem apoiar a elaboração, alteração e revisão dos planos diretores municipais e dos planos de urbanização.

A Directiva Européia 2002/49CE ressalta que, constitui parte da política comunitária, atingir um elevado nível de proteção da saúde e do ambiente, sendo a proteção contra o ruído um dos objetivos a atingir. Dentre os requisitos mínimos elencados como parte dos mapas de ruído estratégicos destacam-se os seguintes:

- Situação sonora existente, anterior ou prevista em função de um indicador de ruído;
- Ultrapassagem do nível de ruído estabelecido pela legislação como aceitável para a região;
- Número estimado de habitações, escolas e hospitais numa determinada zona que estão expostos a valores específicos de um dado indicador de ruído;
- Número estimado de pessoas localizadas numa zona exposta ao ruído.

A partir destas exigências é possível determinar quais as áreas cuja ação para combater os efeitos da incidência do ruído deve ser imediata. A simulação de barreiras acústicas permite fazer-se um estudo detalhado destas ações e, desta forma, direciona a implantação de barreiras adequadas a cada situação.

6 TRANSFORMADORES DE ENERGIA ELÉTRICA ENQUANTO GERADORES DE RUÍDO

De acordo com Diniz (2003), subestações elétricas têm a função de converter a energia elétrica recebida em alta voltagem para baixa voltagem, para depois distribuí-la à população. São os transformadores de energia elétrica que fazem tal conversão.

Segundo Diniz (2003), os transformadores são as principais fontes de ruído em subestações elétricas. Conforme Medeiros et al. (2001), são dois os principais fatores de contribuição dos transformadores para a geração de ruído: a vibração estrutural dos transformadores e o sistema de ventilação dos mesmos. Os autores acrescentam que, embora possam existir outras fontes de ruídos como ruído de chaveamento, efeito Corona entre outros, em subestações elétricas pode-se restringir o estudo à análise do ruído associado aos transformadores.

De acordo com Medeiros et al. (2001), o ruído de ventilação em transformadores é de baixa intensidade iniciando-se em faixa de frequência próxima aos harmônicos mais agudos do ruído estrutural do transformador. Devido a estas características, o ruído de ventilação só será relevante caso a subestação esteja muito próxima dos receptores.

No que diz respeito à vibração estrutural dos transformadores, Medeiros et al. (2001) e Diniz (2003) explicam que ela resulta da excitação do núcleo do transformador pelas forças de magnetoestricção e de atração e repulsão magnéticas, sendo a primeira a mais influente. Conforme Medeiros et al. (2001), o mecanismo de acoplamento estrutural e a interação do fluido (óleo do transformador) com a estrutura são os agentes que transmitem a vibração do núcleo para as extremidades, as quais passam a funcionar como placas irradiantes.

O primeiro harmônico acústico corresponde ao dobro da frequência de operação do transformador, sendo no Brasil igual a 120Hz (MEDEIROS et al., 2001; FEDERAL PACIFIC TRANSFORMER COMPANY, 2003). A força de magnetoestricção causa a vibração com o dobro da frequência de corrente e, no Brasil, esta frequência é igual a 60Hz (DINIZ, 2003).

Medeiros et al. (2001) citam possíveis soluções de controle do ruído de subestações elétricas, sendo elas: modificação de projeto na fonte de ruído; barreiras e defletores; filtros acústicos (cavidades ressonadoras); absorvedores acústicos; enclausuramentos e isoladores; controle ativo acústico (no percurso) e; controle ativo vibro-acústico (na estrutura).

Relacionados a essas soluções de controle de ruído, Medeiros et al. (2001) citam três fatores que devem ser considerados no caso de subestações elétricas: grande geração de calor pelos equipamentos com necessidade de ventilação; necessidade de operações regulares de manutenção/inspeção; presença de elevadas tensões com distância para abertura de arco elétrico da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda acústico.

A presença de elevadas tensões é possivelmente a restrição mais séria em subestações elétricas devido à formação de arco elétrico. O arco elétrico resulta de um fluxo de corrente elétrica em um meio normalmente isolante, tal como o ar, podendo ocorrer a liberação de energia. Um arco elétrico é a luz e o calor produzidos a partir deste fenômeno. A energia elétrica presente pode ser suficiente para causar incêndios e lesões em pessoas, como queimaduras (NFPA 70E, 2012). Desta forma, ao instalarem-se soluções de controle de ruído, como por exemplo, barreiras acústicas, é necessário que se respeite um afastamento, em relação aos transformadores, maior que a distância para abertura do arco elétrico. Em relação às operações de manutenção/inspeção é importante manter a acessibilidade aos equipamentos por ocasião da instalação de soluções de controle de ruído.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa visa avaliar a aplicabilidade de modelos em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação de simulação computacional de barreiras acústicas. Este capítulo é estruturado em oito itens, sendo eles: objeto de estudo, caracterização da fonte sonora, determinação da escala reduzida, reprodução da fonte sonora em escala reduzida, validação da fonte sonora em escala reduzida, ensaio de barreira acústica em escala reduzida, modelagem da área de teste e simulação computacional. Caracteriza-se a seguir o método de pesquisa empregado para o cumprimento das etapas da pesquisa.

O propósito desta pesquisa é de cunho exploratório, cujo objetivo, segundo Gil (2009), é proporcionar maior familiaridade com o problema para torná-lo mais claro ou constituir hipóteses. Este enfoque permite um planejamento flexível, sendo possível considerar inúmeros aspectos relativos ao objeto de estudo.

Com base nos procedimentos técnicos utilizados, a pesquisa é caracterizada como experimental. Segundo Gil (2009), “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”. Desta forma, o método de trabalho consiste em controlar os fatores influentes sobre um evento e verificar o efeito nos resultados, sendo o pesquisador quem define as formas de controle, tornando-se ele um agente ativo na pesquisa.

Gil (2009) salienta que a pesquisa experimental é uma boa ferramenta para testar hipóteses e estabelecer relações de causa e efeito entre as variáveis. A maior limitação deste tipo de pesquisa é que algumas variáveis têm manipulação difícil ou impossível.

Uma pesquisa experimental pode ser realizada em laboratório ou em ambiente externo e, conforme Gil (2009), deve apresentar as seguintes propriedades:

- Manipulação: o pesquisador deve manipular pelo menos uma das características dos elementos estudados;

- *Controle*: o pesquisador deve introduzir um ou mais controles na situação experimental, criando um grupo de controle;
- *Distribuição aleatória*: elementos que fazem parte de grupos experimentais e de controle devem ser designados aleatoriamente.

7.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo abordado neste trabalho é uma subestação elétrica. Os equipamentos instalados em tal subestação trabalham na frequência de 60Hz e nas tensões de 500kV e 345kV em corrente alternada, conforme informado pela gerência da subestação.

7.2 Caracterização da fonte sonora

Para a caracterização da fonte sonora, primeiramente verificou-se quais eram os equipamentos instalados na área energizada da subestação. Para tanto se utilizou material disponibilizado pela administração da subestação. Dentre estes equipamentos, buscaram-se determinar quais eram os geradores de ruído de médias e baixas frequências, sendo este o foco da pesquisa. Utilizou-se este critério, pois quanto mais grave o ruído, maior a capacidade de esta onda sonora propagar-se no ar e, conseqüentemente, maior a probabilidade deste ser um ruído causador de incômodo no entorno da subestação.

Após a identificação dos equipamentos geradores do ruído de interesse, selecionou-se a área a ser monitorada levando em consideração além do ruído gerado, o modo de operação dos equipamentos instalados na subestação. O modo de operação faz referência aos equipamentos que trabalham em conexão a uma determinada linha de transmissão.

Selecionada a área de monitoramento, procedeu-se à medição do ruído na área, de forma a caracterizar a direcionalidade da fonte sonora. Estabeleceu-se uma circunferência no entorno dos equipamentos de interesse cujo centro coincidiu em planta com o centro geométrico de tais equipamentos. Sobre a circunferência marcaram-se os pontos de monitoramento sendo que se buscou contemplar pontos no alinhamento dos equipamentos bem como entre os mesmos. Este procedimento permitiu mensurar as diferenças de nível sonoro percebido ao fazer-se o

caminhamento sobre a circunferência de monitoramento. Foram coletados dados de nível de pressão sonora em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava de 50Hz a 10kHz. Os dados climatológicos relativos ao período de monitoramento foram fornecidos pela estação meteorológica instalada na subestação.

A partir dos espectros sonoros monitorados, calculou-se a direcionalidade da fonte para cada frequência do espectro de 1/3 de oitava de 50Hz a 10kHz. Efetuou-se este cálculo comparando-se os níveis medidos para uma determinada frequência em cada ponto de monitoramento, com o maior nível sonoro obtido naquela frequência. O maior nível sonoro tornou-se o nível de referência de uma fonte sonora omnidirecional e, em relação a esta, calculou-se a diferença de nível de pressão sonora em cada direção, obtendo-se a direcionalidade.

Efetuoou-se a gravação do sinal sonoro para que este fosse posteriormente trabalhado eletronicamente, ou seja, para que fosse efetuada sua equalização e a conversão da escala de frequência, e utilizado por ocasião dos ensaios com o modelo em escala reduzida. A locação do ponto de gravação foi condicionada à interferência eletromagnética no equipamento de gravação. Buscou-se um local aonde não ocorresse interferência. Neste mesmo ponto monitorou-se o nível de pressão sonora em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava de 50Hz a 10kHz. Utilizaram-se tais valores para calibrar a potência da fonte sonora no modelo em escala reduzida e no modelo computacional.

7.3 Determinação da escala reduzida

Para a determinação da escala reduzida levaram-se em consideração as faixas de frequência reconhecidas pelo equipamento utilizado para coleta de dados de nível de pressão sonora, a área disponível para teste e a altura da fonte sonora.

O equipamento utilizado nas medições de nível de pressão sonora no modelo em escala reduzida foi o mesmo utilizado para as medições *in loco*. Este foi ajustado para coletar dados de nível de pressão sonora em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava, de 50Hz a 10kHz. O fato de se trabalhar com modelo em escala reduzida torna a capacidade de captação de dados do equipamento um limitador. Tal capacidade faz referência à frequência mais aguda que o

equipamento é capaz de detectar. A limitação mencionada é devido ao fato de que conforme se diminui a escala, aumenta-se a frequência de interesse para que se mantenha a correlação entre modelo reduzido e o tamanho real. Desta forma, foi necessário avaliar a escala reduzida que melhor se adaptaria à situação real, levando-se em consideração as frequências cujos níveis de pressão sonora monitorados eram mais elevados, ou seja, as frequências de interesse na pesquisa.

Ainda em relação ao equipamento utilizado na coleta de dados de nível de pressão sonora, considerou-se, para a determinação da escala, a altura na qual seria posicionado o microfone por ocasião dos ensaios em escala reduzida. Esta altura é condicionada pela altura do medidor de nível de pressão sonora *in loco*.

No que diz respeito à área disponível para os ensaios em escala reduzida, estabeleceu-se a necessidade de um espaço sem obstruções verticais próximas e com níveis de ruído de fundo que não causassem interferência durante os testes.

A altura da fonte sonora influenciou na escolha da escala, pois, juntamente com a frequência do ruído, é uma das condicionantes da altura da barreira acústica que será ensaiada posteriormente em escala reduzida. Considerando-se a altura efetiva da barreira acústica como aquela medida acima da linha reta que liga fonte e receptor, analisou-se qual a escala reduzida que permitiria o ensaio de uma barreira acústica com altura adequada à situação em análise, sem dificultar o ensaio devido a uma altura excessiva.

7.4 Reprodução da fonte sonora em escala reduzida

Devido à quantidade de detalhes dos equipamentos geradores de ruído e dificuldade de reproduzi-los igualmente em escala reduzida, o conjunto de fontes sonoras distribuídas na área de monitoramento foi substituído por uma fonte única. Esta fonte foi utilizada para reprodução do sinal sonoro no modelo em escala reduzida, sendo capaz de emitir o ruído com suas características de direcionalidade preservadas.

Determinou-se, de acordo com a escala de redução adotada, qual a faixa de frequências à qual a fonte sonora utilizada deveria responder. Fez-se também um estudo sobre a

capacidade das fontes sonoras disponíveis no mercado no que diz respeito à reprodução da direcionalidade da fonte.

A altura da fonte sonora em escala reduzida foi calculada a partir da altura da fonte sonora real considerando-se a escala de redução adotada.

7.5 Validação da fonte sonora em escala reduzida

Para o cumprimento desta etapa foi necessário estabelecer dois momentos para os ensaios. O primeiro refere-se ao processo de calibração da potência da fonte sonora em escala reduzida e, o segundo, refere-se à reprodução da direcionalidade da fonte sonora. Por meio destes procedimentos validou-se a fonte sonora em escala reduzida.

A fonte sonora foi instalada em um ponto equivalente em planta ao centro geométrico dos equipamentos geradores de ruído de interesse, sendo sua altura condicionada pela altura da fonte sonora em tamanho real e pela escala de redução adotada. A orientação da fonte sonora em escala reduzida variou conforme o ruído emitido de forma a reproduzir a direcionalidade do ruído monitorado *in loco*. Os pontos de monitoramento foram locados sobre uma circunferência no entorno da fonte sonora com raio equivalente ao tamanho real considerando-se a escala de redução. Locou-se também o ponto de controle, equivalente ao ponto de gravação do sinal sonoro na situação real.

Para a calibração da potência da fonte sonora posicionou-se o medidor de nível de pressão sonora no ponto de controle e monitorou-se o ruído incidente neste ponto devido à emissão sonora em cada uma das direções, sendo estas direções referentes aos pontos de monitoramento sobre a circunferência. Variou-se a potência sonora da fonte até se obterem, no ponto de controle, níveis de pressão sonora em função de frequência equivalentes aos níveis monitorados *in loco*.

Estabelecida a potência da fonte sonora, procedeu-se à reprodução da direcionalidade da fonte. Para isto, repetindo-se o esquema de monitoramento empregado na caracterização da fonte sonora *in loco*, monitoraram-se em cada ponto locado sobre a circunferência os níveis de

pressão sonora em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava contemplando as frequências de interesse após a aplicação do fator de escala. A partir destes dados calculou-se a direcionalidade da fonte sonora em escala reduzida por meio do mesmo procedimento utilizado para o cálculo da direcionalidade da fonte sonora real. Obteve-se a validação por meio da comparação entre a direcionalidade calculada a partir das medições *in loco* e a direcionalidade calculada a partir das medições no modelo em escala reduzida.

Durante o procedimento efetuado para a reprodução da direcionalidade da fonte, monitoraram-se também os pontos receptores destinados à avaliação do desempenho de barreira acústica. A cada mudança de direção da fonte sonora monitorou-se o ruído de fundo no ambiente.

Ao longo do período de monitoramento coletaram-se dados de temperatura e umidade relativa do ar. Os dados de velocidade do vento foram fornecidos pela Estação Climatológica Principal de Maringá, instalada no campus sede da Universidade Estadual de Maringá, Estado do Paraná. Tais dados climatológicos destinaram-se à verificação do atendimento aos critérios estabelecidos pela norma ISO 10847 (1997).

7.6 Ensaio de barreira acústica em escala reduzida

O ensaio de barreira acústica foi efetuado de acordo com os procedimentos indicados na norma ISO 10847 (1997) – “*Acoustics – In situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types*”. Determinou-se a atenuação proporcionada por barreira acústica posicionada entre fonte sonora e receptor. A localização da barreira foi efetuada de forma a distanciá-la de superfícies verticais próximas existentes na situação real, já que estas superfícies verticais são parte dos transformadores e, além das reflexões que podem ocorrer, é necessário permitir a ventilação no entorno destes equipamentos. A altura da barreira acústica ensaiada foi definida em função da altura da fonte sonora, da frequência a ser atenuada e da passagem da rede energizada, sendo limitadores a altura da rede e a tensão elétrica existente.

A fonte sonora utilizada durante o ensaio de barreira acústica foi a mesma validada quanto à sua potência e à sua direcionalidade. Desta forma, entende-se que o resultado de atenuação, proporcionada pela barreira acústica, mensurado no modelo em escala reduzida é

válido e representativo do resultado que seria obtido caso a barreira fosse construída na situação real.

O desempenho da barreira acústica foi determinado a partir de receptores localizados na face da barreira oposta à geração do ruído, os quais também foram monitorados no modelo sem a barreira acústica. Avaliou-se o ruído também na face da barreira voltada para a fonte sonora por meio de receptor localizado próximo a esta face. Tal avaliação destinou-se a verificar qual o acréscimo de ruído ao qual serão expostos os operadores do sistema nos momentos em que ali estiverem caso seja implementada a barreira acústica.

O procedimento de medição seguiu o mesmo esquema utilizado no modelo em escala reduzida sem barreira acústica. Emitiu-se o ruído em cada direção da fonte sonora e monitorou-se a sua incidência nos receptores. Primeiramente seguiu-se este procedimento para o monitoramento do ruído incidente no ponto localizado próximo à face da barreira voltada para a fonte sonora. Em seguida, repetiu-se a emissão sonora em todas as direções para monitorar os pontos receptores localizados próximo à face da barreira oposta à geração do ruído. A cada mudança de direção da emissão sonora monitorou-se o ruído de fundo no ambiente.

Os resultados obtidos a partir do ensaio de barreira acústica foram utilizados para validar o modelo computacional. A obtenção dos dados climatológicos seguiu o mesmo procedimento utilizado durante a etapa “validação da fonte sonora em escala reduzida”.

7.7 Modelagem da área de teste

A modelagem da área de teste destinou-se a efetuar a entrada de dados no ambiente do programa SoundPLAN[®] versão 6.4 utilizado para a simulação de propagação sonora em ambientes abertos.

Primeiramente criou-se um arquivo base no programa AutoCAD[®] versão 2007. Este arquivo continha a representação de curvas de nível e as referências de pontos de monitoramento, de fonte sonora e de barreira acústica.

O arquivo base criado no programa AutoCAD® foi importado pelo programa SoundPLAN® e neste, foram atribuídas as características relacionadas à acústica pertinentes à simulação. A representação de curvas de nível foi convertida em objeto do tipo “terreno” de forma que os outros componentes do modelo estivessem dispostos sobre tal superfície. Os pontos de monitoramento foram inseridos como receptores pontuais, sendo sua altura um dado de entrada. A fonte sonora escolhida também foi pontual e os dados de entrada foram altura, espectro sonoro, potência sonora e direcionalidade por faixa de frequência. A barreira acústica foi caracterizada quanto à sua altura e à característica de absorção sonora da superfície.

O modelo computacional foi elaborado para atender a duas etapas da simulação computacional. A primeira etapa referiu-se à calibração da potência sonora e reprodução da direcionalidade da fonte sonora e, a segunda etapa, à simulação de barreira acústica. Inseriu-se a barreira acústica no modelo computacional somente na segunda etapa da modelagem.

Para viabilizar a simulação computacional da propagação sonora no modelo tridimensional criado, foi estabelecida uma área de cálculo, a qual no programa SoundPLAN® tem a função de delimitar a área de simulação.

7.8 Simulação computacional

A simulação computacional dividiu-se em duas etapas. A primeira etapa compreendeu a calibração do modelo computacional e a reprodução da direcionalidade da fonte sonora e a segunda etapa compreendeu a simulação do desempenho de barreira acústica.

Na primeira etapa, a calibração do modelo computacional foi efetuada por meio de ponto de controle, conforme os valores coletados *in loco* de nível de pressão sonora em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava. Este procedimento permitiu que fosse ajustada a potência da fonte sonora. Após a calibração do modelo, procedeu-se à simulação, por meio da qual se obtiveram os níveis de pressão sonora incidentes no receptor próximo à face da barreira voltada para a fonte e nos receptores próximos à face da barreira oposta à geração do ruído. Geraram-se também gráficos em escala de cores para visualização da direcionalidade da fonte sonora, onde cada cor refere-se a um intervalo de níveis sonoros.

O programa SoundPLAN[®] tem por procedimento de cálculo o método do “traçado de raios” e, portanto, escolheu-se a variação angular entre os raios, a quantidade de reflexões e a dimensão da malha que compôs o resultado. Estas características são as que condicionam o nível de detalhamento da simulação.

Na segunda etapa da simulação utilizou-se o modelo computacional com barreira acústica. Por meio desta simulação se obtiveram os níveis de pressão sonora incidentes nos receptores localizados próximo à barreira e também gráficos em escala de cores para visualização do efeito sonoro proporcionado pela presença da barreira acústica.

Os dados de níveis de pressão sonora obtidos para os receptores nas situações com e sem barreira acústica foram comparados. O resultado foi o impacto sonoro proporcionado pela inserção da barreira acústica no modelo.

O processo de validação do modelo computacional compreendeu a comparação entre o impacto sonoro proporcionado pela barreira acústica no modelo computacional e o impacto sonoro provocado no modelo em escala reduzida.

8 RESULTADOS E ANÁLISES

Apresentam-se neste capítulo os resultados e as respectivas análises no que se refere à caracterização da fonte sonora, determinação da escala reduzida, reprodução da fonte sonora em escala reduzida, validação da fonte sonora em escala reduzida, ensaio de barreira acústica em escala reduzida, modelagem da área de teste e simulação computacional.

8.1 Caracterização da fonte sonora

Dentre os equipamentos instalados na subestação, conforme informado pela gerência, os transformadores são os equipamentos que geram ruído mais intenso nas baixas e médias frequências, de forma a propagar-se com maior facilidade no entorno da subestação. Desta forma, estabeleceu-se como foco de estudo o ruído gerado por tais equipamentos.

Ao todo são vinte e quatro transformadores instalados na subestação, sendo que cada conjunto de seis transformadores corresponde a um dos circuitos elétricos que compõem a subestação, o qual é conectado a dois edifícios de controle. Estabeleceu-se esta como a parcela de interesse da fonte sonora para a sua caracterização. A Figura 8.1 é uma imagem aérea de parte da subestação onde estão instalados os transformadores, próximo aos quais se podem observar oito edifícios de controle. Destacam-se com contorno amarelo os oito edifícios e, com contorno vermelho, os vinte e quatro transformadores. Ainda na Figura 8.1 observa-se a parcela de interesse da fonte sonora, sendo os transformadores delimitados por contorno verde. São delimitados pelo contorno alaranjado os edifícios de controle conectados à parcela de interesse da fonte sonora.



Figura 8.1 – Área energizada da subestação – parcela de interesse da fonte sonora
Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH (2013)

Para a determinação da direcionalidade da fonte sonora analisada, estabeleceram-se pontos de medição localizados sobre uma circunferência de raio igual a cinquenta metros no entorno dos seis transformadores. A circunferência tinha seu centro coincidindo com o ponto central entre os transformadores. Respeitou-se uma distância mínima de 5,0m (cinco metros) entre os pontos de medição e os transformadores ou os edifícios de controle para evitar interferência eletromagnética no sistema de medição e reflexões dos raios sonoros, em superfícies verticais dos equipamentos instalados na subestação, que pudessem interferir no nível de pressão sonora monitorado. A distância de cinco metros corresponde ao maior afastamento possível dos pontos de monitoramento localizados sobre a circunferência em relação aos edifícios de controle e aos transformadores. Os edifícios, apesar de trabalharem conectados aos transformadores, não foram incluídos na área de monitoramento por não serem considerados fontes sonoras.

Determinaram-se vinte e quatro pontos de monitoramento. Quatro destes pontos (1, 7, 13 e 19) foram localizados a cinco metros de cada canto do conjunto de transformadores, formando

um ângulo de 45° com a normal de cada face do conjunto. Dez pontos (2, 4, 6, 8, 12, 14, 16, 18, 20 e 24) foram marcados sobre retas perpendiculares às faces dos transformadores, e centralizadas em relação às mesmas, que se prolongaram até a circunferência. Marcaram-se também dez pontos intermediários entre estes (3, 5, 9, 10, 11, 15, 17, 21, 22 e 23) com o intuito de melhor caracterizar a direcionalidade da fonte. O conjunto dos vinte e quatro pontos de monitoramento permitiu que se percebessem as variações de nível sonoro ao se fazer o caminhar sobre a circunferência de monitoramento, sendo estas variações influenciadas pela direcionalidade da fonte sonora. Na Figura 8.2 é apresentado um croqui com os pontos de monitoramento.

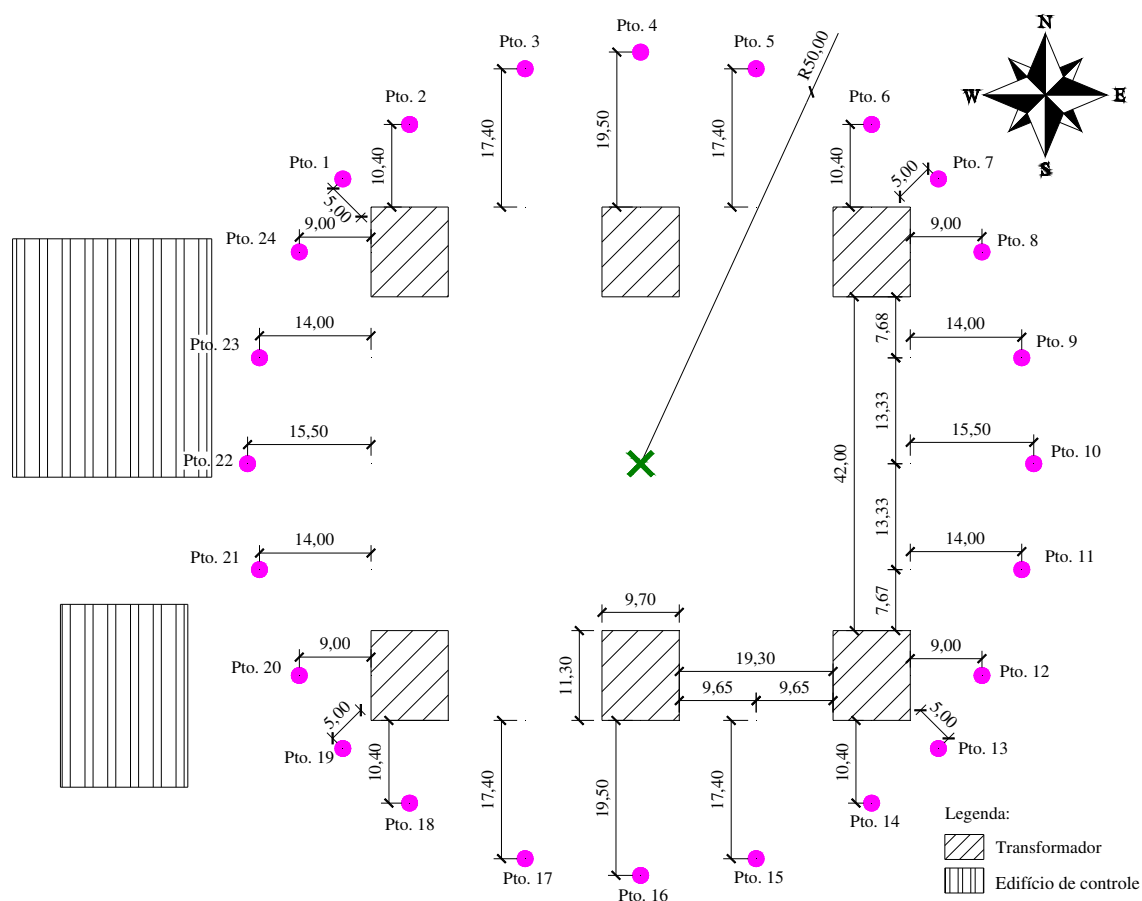


Figura 8.2 – Croqui dos pontos de monitoramento – pátio dos transformadores

Nos vinte e quatro pontos coletaram-se dados de nível de pressão sonora em função de frequência em faixa de $1/3$ de oitava de 50Hz a 10kHz. Utilizou-se um medidor de nível de

pressão sonora da marca Brüel & Krær, modelo 2238 com microfone de ½” capaz de captar sinais sonoros de 20Hz a 12,5kHz (BRÜEL & KRÆR, 2012). Em cada ponto o medidor foi posicionado a 2,0m (dois metros) de altura. Esta altura atende à altura mínima de 1,2m (um metro e vinte centímetros) determinada pela norma ISO 10847 (1997) – “*Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types*”. O tempo de medição em cada ponto foi determinado selecionando no aparelho o modo otimizado, de forma que o próprio medidor calculasse o tempo necessário para a coleta de dados em cada frequência. Durante toda a medição utilizou-se o protetor de vento no microfone.

O monitoramento iniciou às 10h e 39min do dia 09 de fevereiro de 2011 e se estendeu até às 13h e 52min do mesmo dia (horário de verão). Neste período a temperatura média variou de 20,9°C no início do monitoramento até 28,9°C no final do monitoramento. A norma ISO 10847 (1997) estabelece as condições meteorológicas ideais para efetuar-se o monitoramento do desempenho de barreiras acústicas. Como se testaram barreiras durante o desenvolvimento da pesquisa, adotaram-se os parâmetros indicados pela norma para todos os monitoramentos de ruído efetuados. Em relação à temperatura do ar, a referida norma indica que a variação da temperatura durante o período do monitoramento não deve ser maior que 10°C. Portanto, este critério foi atendido, registrando-se uma variação de 8°C.

A umidade relativa no início do monitoramento era igual a 95% e, no final do monitoramento, igual a 56%. A norma ISO 10847 (1997) não estabelece um valor máximo para variação da umidade, apenas salienta que a umidade afeta principalmente as ondas sonoras de altas frequências, acima de 3kHz, e recomenda que as condições no início e no final do monitoramento sejam semelhantes. Como o período de monitoramento foi longo não foi possível atender a este critério, já que a umidade relativa varia ao longo do dia. No entanto, entende-se que, como o foco da pesquisa são sons médios e graves, a variação da umidade relativa não influenciou nos resultados obtidos para estes sons. Os sons agudos também foram analisados, mas, conforme recomendação da norma ISO 10847 (1997), não corrigidos em relação à variação da umidade relativa.

Em relação à velocidade do vento, a norma ISO 10847 (1997) estabelece que a variação da velocidade do vento durante o período de monitoramento não pode ser maior que $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (vento forte). A estação meteorológica da subestação não pôde fornecer estes dados, pois a medição foi prejudicada por um defeito no equipamento. Porém, pode-se afirmar que durante o período de monitoramento percebeu-se apenas uma brisa calma, não tendo acontecido rajadas de vento.

Os dados de níveis de pressão sonora em função de frequência coletados nos vinte e quatro pontos monitorados no pátio dos transformadores são apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A. Estes dados são também apresentados no Gráfico 8.1.

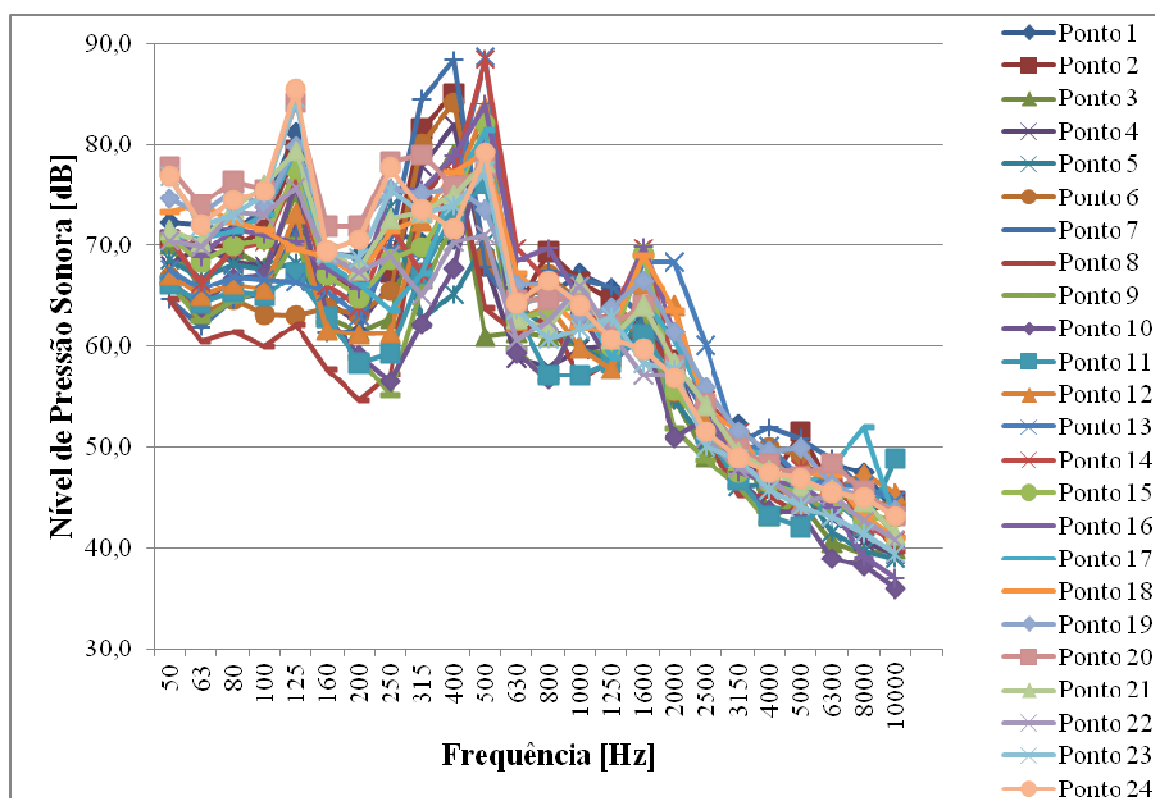


Gráfico 8.1 – Massa de dados de Nível de Pressão sonora – pátio dos transformadores

Por meio da análise dos dados apresentados na Tabela A.1 e observação do Gráfico 8.1, verifica-se a ocorrência de picos de nível de pressão sonora em 125Hz e em 400Hz. A frequência fundamental de vibração dos transformadores é igual a 60Hz e excita os modos

harmônicos dando origem a uma série harmônica de frequências. Logo, é coerente que os picos de ruído gerados ocorram nos harmônicos da frequência fundamental. A coleta de dados foi efetuada em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava onde a frequência central de 125Hz corresponde ao intervalo de frequência de 112Hz à 141Hz e, a frequência central de 400Hz corresponde ao intervalo de 355Hz à 447Hz. Conclui-se que os picos de níveis de pressão sonora ocorreram no primeiro e no quinto harmônicos⁹, que correspondem, respectivamente, às frequências de 120Hz e 360Hz.

Os resultados dos níveis de pressão sonora máximos encontrados (picos) corroboram a informação fornecida pela gerência da subestação de que o ruído mais intenso no entorno dos transformadores é gerado nas baixas e médias frequências. A partir deste fato e considerando que sons de baixas e médias frequências são passíveis de propagação em distâncias maiores e dada a importância das frequências de 125Hz e 400Hz, as mesmas devem ser consideradas na escolha da escala reduzida a ser adotada.

A partir dos dados de níveis de pressão sonora apresentados na Tabela A.1, os quais foram monitorados em pontos marcados sobre a circunferência no entorno da área de análise, calculou-se a direcionalidade do ruído propagado. A diferença de nível de pressão sonora do ponto medido em relação ao nível de referência foi calculada para cada frequência das bandas de 1/3 de oitava entre 50Hz e 10kHz e representa a direcionalidade da fonte naquela frequência. Considerou-se o nível de referência igual ao maior nível de pressão sonora monitorado em cada frequência. O resultado é mostrado na Tabela A.2 do Apêndice A.

Para melhor visualização da direcionalidade do ruído em função de frequência, construíram-se gráficos em coordenadas polares a partir dos dados da Tabela A.2, os quais compõem as Figuras 8.3a e 8.3b.

⁹ Adotou-se nomenclatura utilizada em artigo da área de eletricidade publicado por Medeiros et al. (2001), onde o primeiro harmônico corresponde ao dobro da frequência fundamental e, o quinto harmônico, à frequência fundamental multiplicada por seis.

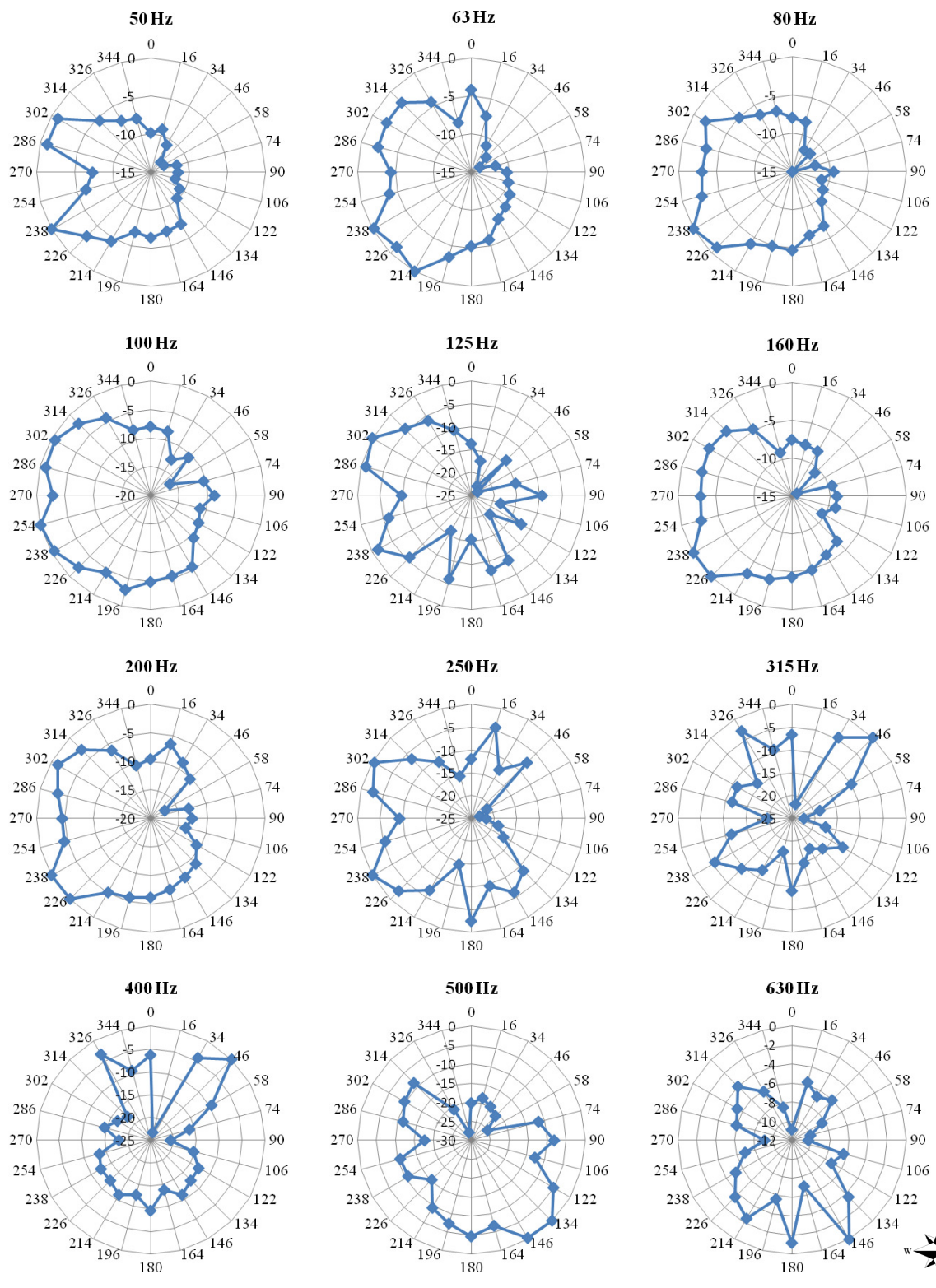


Figura 8.3a – Direcionalidade da fonte – pátio dos transformadores

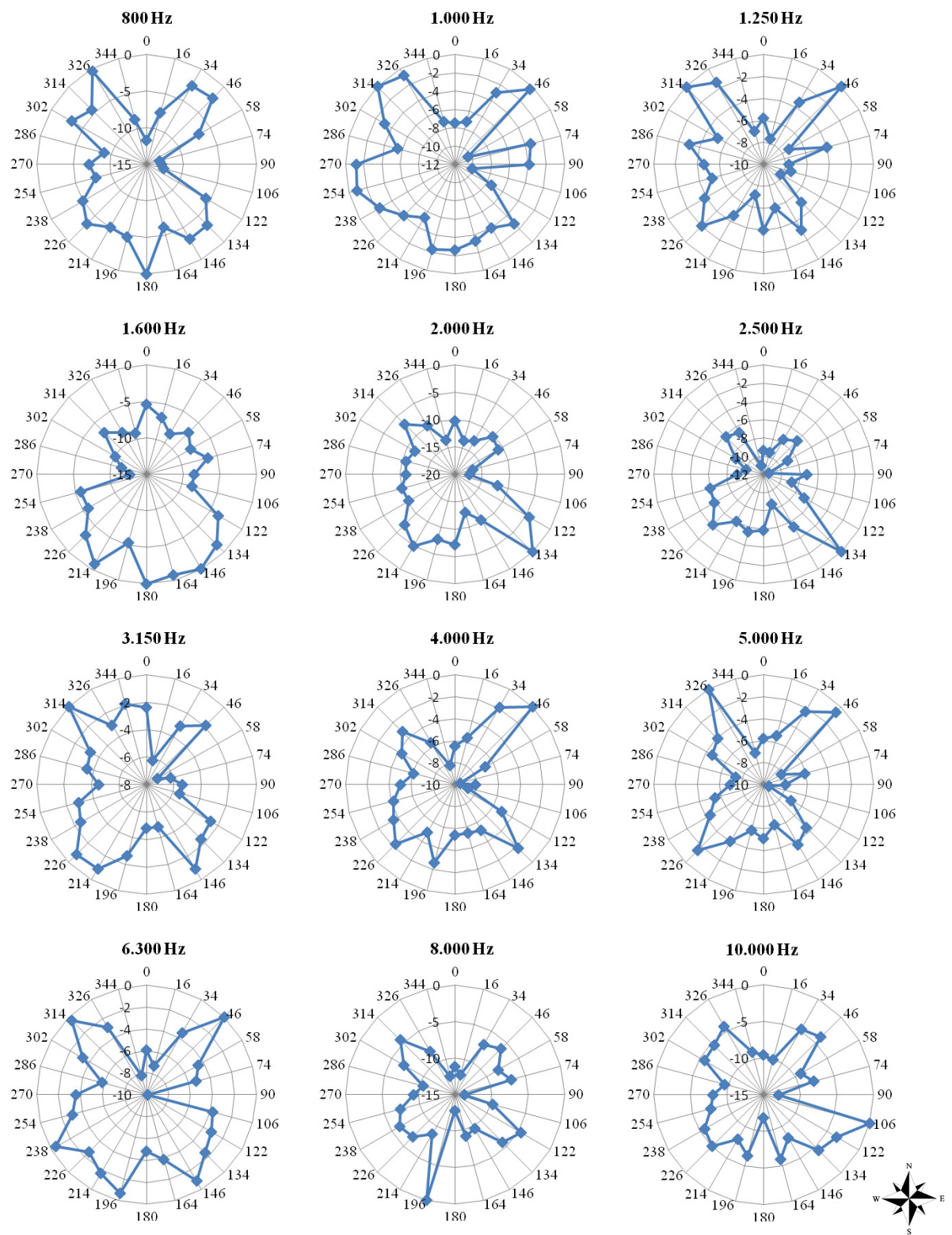


Figura 8.3b – Direcionalidade da fonte – pátio dos transformadores

Observa-se, por meio dos gráficos das Figuras 8.3a e 8.3b que, para as faixas de frequência até 200Hz, há uma direção de propagação definida. No entanto, a partir de 250Hz, a direcionalidade passa a ter caráter aleatório. Não é possível estabelecer uma correlação entre os harmônicos da frequência fundamental.

Chama-se atenção para a direcionalidade para a faixa de frequência de 400Hz, já que esta faixa de frequência apresentou elevados níveis sonoros durante o monitoramento *in loco*, conforme verificou-se no Gráfico 8.1. Observam-se duas direções predominantes de propagação, indicando a possibilidade de incômodo sonoro em áreas ocupadas que se localizam nestas duas direções.

O sinal sonoro para utilização nos ensaios com o modelo em escala reduzida foi gravado a cerca de 63m (sessenta e três metros) do ponto central da área de monitoramento. Sabe-se que o ideal para reprodução do sinal no modelo reduzido seria a gravação do ruído em cada um dos vinte e quatro pontos de monitoramento *in loco* utilizados para a caracterização da direcionalidade. No entanto, devido à interferência eletromagnética não foi possível efetuar a gravação desta forma e optou-se por gravar o sinal em um único ponto e depois trabalhá-lo eletronicamente para introduzir as características de direcionalidade do sinal sonoro. A localização do ponto para gravação do sinal sonoro foi feita por tentativas, de forma a determinar o ponto mais próximo possível da circunferência de monitoramento que não sofresse interferência eletromagnética. Utilizou-se para a gravação um microfone condensador omnidirecional da marca DPA modelo 4090 conectado ao programa ProTools LE[®] versão 7.3 e placa de som da marca Digidesign, modelo MBOX. O sinal gravado tem duração de três minutos, tempo este suficiente para se efetuar uma medição para determinação dos níveis de pressão sonora em função da frequência em faixa de 1/3 de oitava, sendo este o tipo de monitoramento efetuado no modelo em escala reduzida.

No mesmo local da gravação do sinal sonoro foram monitorados os níveis de pressão sonora (NPS) em função da frequência em faixas de 1/3 de oitava de 50Hz até 10kHz. Este local foi chamado de “ponto de controle”. Na Tabela 8.1 apresenta-se o espectro sonoro monitorado no ponto de controle.

Tabela 8.1 – Espectro sonoro – ponto de controle

Freq. [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
NPS [dB]	75,5	71,9	70,8	71,0	71,2	64,1	63,0	70,2	70,9	66,1	63,8	53,2
Freq. [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
NPS [dB]	55,8	55,7	56,0	56,9	55,7	46,7	42,2	39,5	38,3	36,2	34,5	33,3

Os valores de nível de pressão sonora coletados no ponto de controle foram utilizados para a calibração da potência da fonte sonora no modelo em escala reduzida e no modelo computacional, conforme apresentado respectivamente nos itens 8.4 e 8.6.

8.2 Determinação da escala reduzida

Os fatores condicionantes para a escolha da escala de redução são as faixas de frequência reconhecidas pelo equipamento utilizado para coleta de dados de nível de pressão sonora, a área disponível para teste e a altura da fonte sonora. Com base nessas condicionantes, a escala de redução adotada foi 1:5. Neste item apresenta-se o detalhamento da análise desses fatores.

No que diz respeito ao equipamento utilizado para a coleta de dados no modelo em escala reduzida, foi utilizado o mesmo equipamento disponível para as medições *in loco*. O medidor é da marca Brüel & Kjær®, modelo 2238 Mediator com microfone de ½” e dispõe de filtro para coleta de dados em 1/3 de oitava, de 20Hz a 12,5kHz, tendo sido ajustado para coleta de dados entre 50Hz e 10kHz. Considerando-se as frequências estabelecidas como foco da análise, 125Hz e 400Hz, entende-se que os limites em frequência de coleta de dados do medidor utilizado são amplos e permitem que se trabalhe com escalas de redução até a relação 1:25. Ou seja, caso fosse adotada a escala 1:25, a frequência de 400Hz corresponderia, na escala, à frequência de 10kHz. No entanto, apesar de 400Hz ser uma frequência de destaque neste estudo, não se pode desconsiderar a análise das frequências mais altas que esta. Logo, deve-se adotar uma escala de redução com a qual o modelo tenha um tamanho maior do que o modelo na escala 1:25, a qual foi determinada de acordo com os outros fatores condicionantes, os quais são apresentados a seguir.

Quanto à altura do equipamento em relação ao solo, teve-se como ponto de partida a altura do equipamento utilizada nas medições *in loco*, quando se dispunha de um suporte para o medidor com altura de 2m (dois metros). De acordo com a ISO 10847 (1997), durante o monitoramento de parâmetros acústicos o microfone deve estar pelo menos 1,20m (um metro e vinte centímetros) acima do solo. Analisando este valor e relacionando-o com a altura do equipamento durante as medições *in loco*, verificou-se que uma opção seria trabalhar com a escala de redução 1:5. Isso por que a altura do microfone na escala reduzida seria igual a 0,40m (quarenta centímetros), o que atenderia ao mínimo de 0,24m (vinte e quatro centímetros) de distância do solo imposto pela norma (aplicada a escala de redução 1:5 à altura mínima de 1,20m). Caso se optasse pela escala 1:10, a altura do microfone na escala seria de 0,20 (vinte centímetros) e também atenderia ao valor estabelecido pela norma, que passaria a ser 0,12m (doze centímetros). No entanto, entendeu-se que a distância de 0,20m do solo seria muito pequena e poderia acentuar a influência das reflexões provenientes do solo nos resultados. Desta forma, a escala 1:5 tornou-se a escala mais indicada para os ensaios.

Para efetuarem-se os ensaios em escala reduzida foram utilizados dois espaços: um para a o ensaio de reprodução da direcionalidade da fonte sonora e calibração do modelo em escala reduzida e outro para o ensaio de atenuação sonora proporcionada por barreira acústica.

Em relação à área para ensaio de reprodução de direcionalidade da fonte sonora e calibração do modelo em escala reduzida, buscou-se um espaço sem obstruções verticais próximas e com níveis de ruído de fundo que não mascarassem o ruído utilizado no ensaio. Escolheu-se uma área na parte oeste do campus sede da Universidade Estadual de Maringá (UEM), cidade de Maringá, Estado do Paraná, a qual pode ser observada na Figura 8.4. Marca-se no centro da Figura 8.4, com contorno vermelho, o local aonde se realizaram os ensaios.



Figura 8.4 – Local para ensaios em escala reduzida – campus sede UEM

Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH (2013)

A área destacada na Figura 8.4 é gramada e plana, sendo possível estabelecer uma circunferência de cerca de 45m (quarenta e cinco metros) de diâmetro sem obstruções verticais próximas nem desníveis do terreno. O raio da circunferência de monitoramento na subestação é igual a 50m (cinquenta metros). Logo, a escala 1:5 permitiu que se dispusessem os pontos de monitoramento sobre uma circunferência de diâmetro igual a 20m (vinte metros), ajustando-se esta ao espaço disponível. A topografia plana reproduz a situação do local avaliado na subestação.

Apresenta-se na Figura 8.5 uma sequência de fotos do entorno da área de ensaio a partir do seu centro que permite visualizar a situação de desobstrução nas proximidades e a ausência de superfícies reflexivas próximas.



Figura 8.5 – Visualização do entorno da área de teste – campus sede UEM

Em relação à área para ensaio de atenuação sonora proporcionada por barreira acústica, escolheu-se uma área ao norte da cidade de Maringá, Estado do Paraná, junto a um condomínio residencial horizontal. A escolha deu-se devido ao fato de o condomínio ser contornado por muro de 3m (três metros) de altura construído em alvenaria de blocos de concreto. Considerando-se que na área seriam realizados ensaios de modelo em escala reduzida e sendo a escala 1:5, tal muro no tamanho real corresponderia a uma barreira de 15m (quinze metros) de altura. Esta altura é adequada à situação existente na subestação devido à altura da fonte sonora, cerca de 6m (seis metros), e das linhas de transmissão, cerca de 20m (vinte metros). O muro em questão tem grande extensão, o que permite a consideração de barreira infinita por ocasião dos ensaios, garantindo-se que não há prejuízo à atenuação devido à difração pelos flancos da barreira.

A face norte do condomínio residencial faz divisa com uma área de cultivo agrícola. Uma estrada rural margeia o condomínio e o volume de tráfego de veículos é de cerca de três veículos por hora, fato verificado durante o período de monitoramento. Apresenta-se, na Figura 8.6, uma imagem aérea de parte do condomínio horizontal, destacando-se com contorno vermelho na face norte a área escolhida para os ensaios, a qual é distante de fontes sonoras que pudessem interferir no monitoramento e apresenta topografia plana.



Figura 8.6 – Local para ensaio de barreira acústica em escala reduzida

Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH (2013)

A Figura 8.7 traz uma sequência de fotos do entorno da área de ensaio a partir do ponto aonde foi locada a fonte sonora. É possível visualizar a situação de desobstrução nas proximidades e a presença da barreira acústica ensaiada.



Figura 8.7 – Visualização do entorno da área de teste de barreira acústica em escala reduzida

8.3 Reprodução da fonte sonora em escala reduzida

Conforme mencionado no item 8.1 e observado na Figura 8.2, a fonte sonora abordada neste estudo é composta por seis transformadores e foi monitorada quanto à sua direcionalidade tendo como ponto de referência um ponto locado em planta no centro geométrico dos seis transformadores. Utilizou-se para a reprodução do ruído uma fonte pontual posicionada neste local. A opção pela fonte pontual ocorreu devido à dificuldade de reproduzir em escala reduzida os detalhes geométricos dos equipamentos. Além disso, ao caracterizar-se a direcionalidade de uma fonte sonora, monitoram-se os níveis de pressão sonora em pontos locados sobre uma circunferência no seu entorno e, portanto, a fonte é observada como uma fonte pontual.

Não há disponível no mercado caixa acústica para a emissão do ruído considerando-se as características de direcionalidade da fonte sonora. Portanto, optou-se pela emissão do ruído em cada direção monitorada, reproduzindo em cada uma a direcionalidade de forma individual. Para tanto, equalizou-se o ruído gravado na subestação para cada uma das vinte e quatro direções de monitoramento de acordo com a direcionalidade calculada.

Fez-se a equalização com o programa Wavelab[®], versão 6.1. Este programa destina-se à edição de áudio e nele utilizou-se a ferramenta “KarmaFX Equalizer” para a inserção dos valores de direcionalidade por faixa de frequência de 50Hz a 10kHz. Além destas faixas de frequência, o programa permite trabalhar as faixas de frequências de 20Hz, 25Hz, 31,5Hz, 40Hz, 12,5kHz, 16kHz e 20kHz. Para estas frequências inseriu-se a perda máxima possível por direcionalidade, a qual neste programa é igual a -24dB. Salienta-se que na frequência de 500Hz para as direções referentes aos pontos 3 e 8 não foi possível fazer a equalização de acordo com a direcionalidade calculada, que é, respectivamente, -27,9 e -25dB. Como esta situação ocorreu somente para dois pontos em uma única frequência e a diferença ocorrida é praticamente imperceptível ao ouvido humano, considerou-se que o fato não trouxe prejuízo ao desenvolvimento da pesquisa.

A Figura 8.8 traz uma visualização do equalizador com os dados de direcionalidade inseridos no ambiente do programa Wavelab[®]. Esta imagem refere-se à equalização do ruído gravado com a direcionalidade calculada para o ponto de monitoramento 1, cujos valores foram apresentados na Tabela A.2 do Apêndice A.

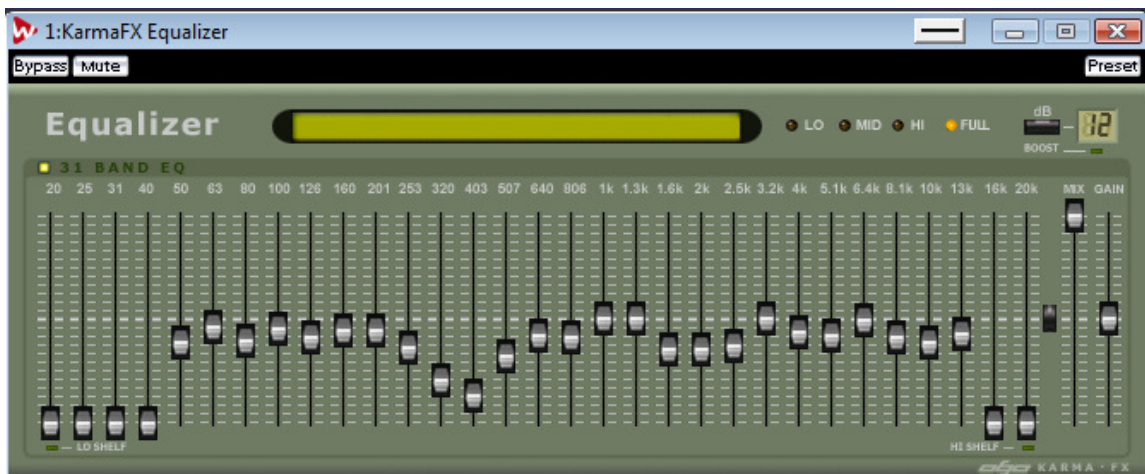


Figura 8.8 – Ferramenta de equalização programa Wavelab® - direção 1

Após a equalização, ainda utilizando o programa Wavelab®, aplicou-se o fator de escala a cada sinal sonoro equalizado. Considerando 1:5 a escala de redução adotada, fez-se o aumento de 28 (vinte e oito) semitons de forma a manter-se a relação com a frequência.

Ao aplicar a escala 1:5 a frequência original torna-se equivalente ao seu valor multiplicado por cinco. Por exemplo, a frequência de 125Hz na escala 1:5 é equivalente à frequência de 625Hz. Entre duas faixas de oitava tem-se a variação de 12 (doze) semitons. Logo, entre duas faixas de 1/3 de oitava tem-se a variação de 4 (quatro) semitons. De 125Hz até 625Hz são sete faixas de 1/3 de oitava e, portanto, 28 (vinte e oito) semitons.

O monitoramento de dados de nível de pressão sonora foi efetuado em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava de 50Hz a 10kHz. Após a aplicação da escala de redução 1:5 ao sinal sonoro estas frequências equivalem à 250Hz e 50kHz. Como se estabeleceu 10kHz como o limite superior de captação em frequência para as medições no modelo em escala reduzida, tem-se que a fonte sonora utilizada no modelo deve responder de 250Hz até 10kHz.

Dentre os alto-falantes disponíveis no mercado, identificou-se como apropriado para o ensaio o modelo F6 da marca Bravox S/A. Tal alto-falante é caracterizado como *full-range* e tem difusor para agudos. Apresenta-se na Figura 8.9 a curva de resposta por frequência do alto-falante.

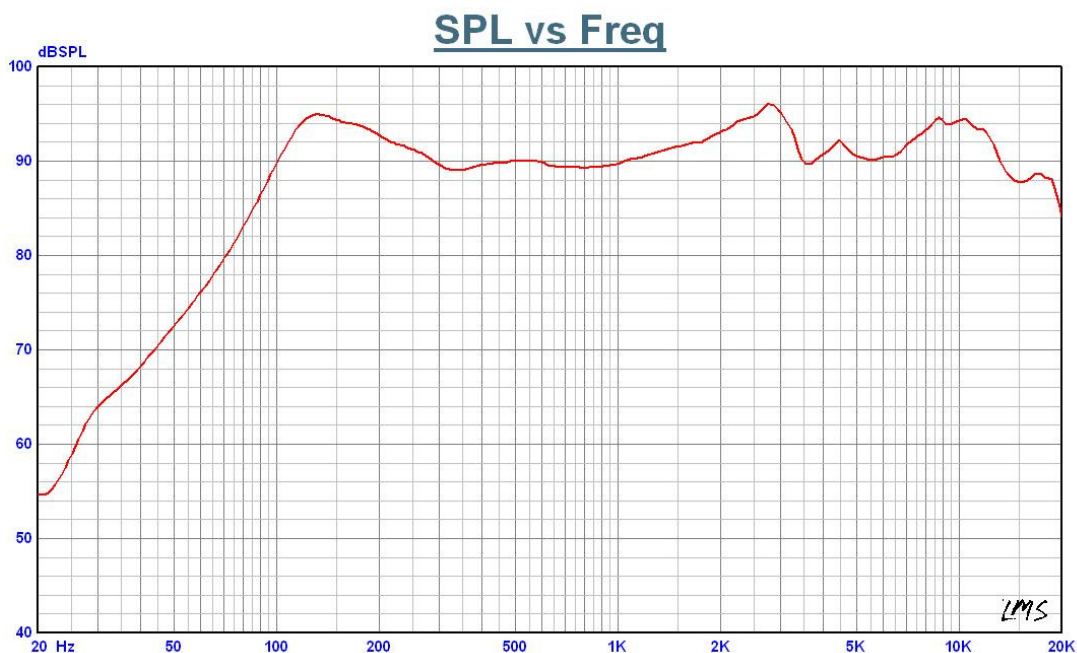


Figura 8.9 – Curva de resposta por frequência do alto-falante F6 da Bravox S/A

Fonte: NUNES (2012)

Observa-se que de 250Hz à 10kHz, as quais são as frequências a serem analisadas no modelo em escala reduzida, a resposta do alto-falante não sofre alterações significativas, podendo ser considerada adequada para a aplicação. Conforme recomendação do fabricante, para uma caixa selada é necessário um volume 12L (12 litros) para que tal alto-falante tenha desempenho correspondente à curva de resposta apresentada na Figura 8.9.

8.4 Validação da fonte sonora em escala reduzida

Esta etapa da pesquisa foi desenvolvida em duas partes: a calibração da potência da fonte sonora em escala reduzida e a reprodução da direcionalidade da fonte.

Para efetuar a calibração da potência da fonte sonora em escala reduzida, primeiramente instalou-se, na área escolhida no campus sede da Universidade Estadual de Maringá, a fonte sonora em escala reduzida conforme descrito no item 7.5. Calculou-se a altura da fonte sonora a partir da altura dos transformadores. Estes têm 6,0m (seis metros) de altura e não há um ponto específico gerador de ruído na estrutura do transformador. Estabeleceu-se que o

alto-falante da fonte sonora utilizada deveria ser posicionado em altura equivalente à altura média dos transformadores. Na escala 1:5 a altura de um transformador é igual a 1,2m (um metro e vinte centímetros) e, portanto, a altura média é igual a 0,6m (sessenta centímetros).

Utilizando o alto-falante modelo F6 da marca Bravox S/A, construiu-se uma caixa acústica que atendesse a tais especificações de altura da fonte sonora. A caixa acústica utilizada como fonte sonora não era amplificada, portanto, foi conectada a um amplificador e a uma mesa de som para que fosse possível a emissão do sinal sonoro.

Locaram-se, em circunferência no entorno da fonte sonora, os vinte e quatro pontos referentes às posições de monitoramento *in loco*. Marcaram-se também outros quatro pontos sendo eles: P25, correspondente ao ponto de controle monitorado na subestação; P26, receptor localizado a 0,20m (vinte centímetros) da circunferência e a 1,6m (um metro e sessenta centímetros) do local aonde posteriormente seria instalada a barreira acústica (distâncias respectivamente iguais a um metro e oito metros no tamanho real); P27 e P28, receptores localizados respectivamente a 1,6m (um metro e sessenta centímetros) e 3,2m (três metros e vinte centímetros) de distância do local aonde posteriormente seria instalada a barreira acústica, na face oposta à geração do ruído (distâncias respectivamente iguais a oito metros e dezesseis metros no tamanho real). A Figura 8.10 ilustra a marcação dos pontos de monitoramento, sendo destacados os pontos P25, P26, P27 e P28 e a fonte sonora.

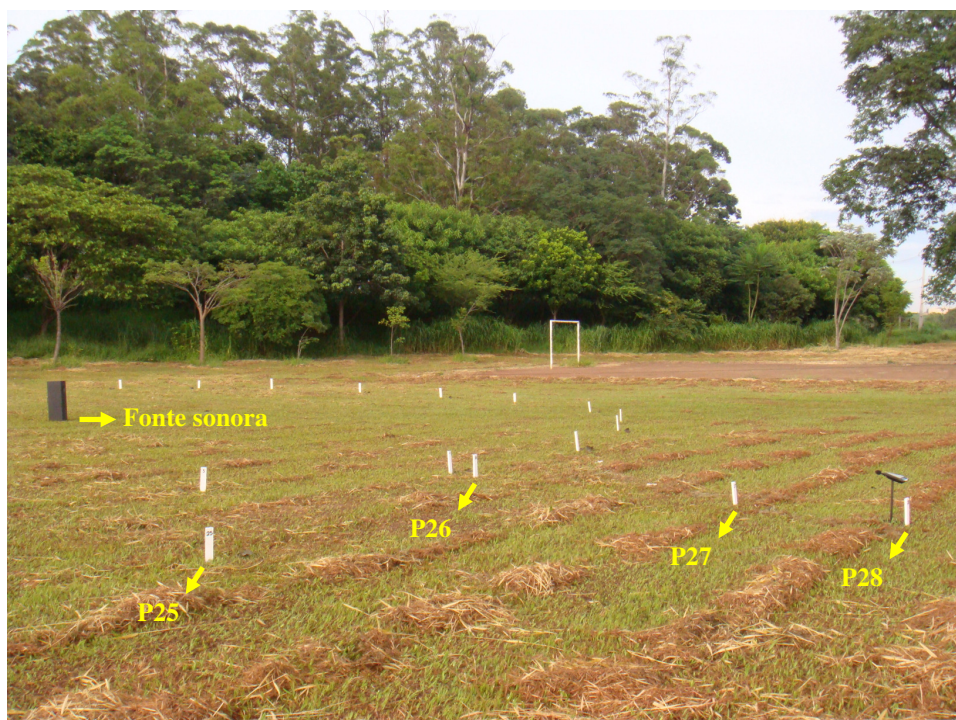


Figura 8.10 – Pontos de monitoramento – modelo em escala reduzida sem barreira acústica

Procedeu-se à calibração da potência da fonte sonora emitindo o sinal sonoro em cada uma das vinte e quatro direções determinadas por meio da marcação dos pontos ao longo da circunferência e, para cada direção de emissão, monitoraram-se os níveis de pressão sonora em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava, de 50Hz até 10kHz, incidentes no ponto P25 (ponto de controle). Comparou-se o ruído resultante no ponto P25 com o ruído mensurado no ponto de controle da subestação. O procedimento foi repetido variando-se a potência da fonte sonora até obter-se a melhor aproximação possível entre os valores mensurados no ponto P25 e no ponto de controle da subestação, situação esta em que a potência da fonte sonora foi considerada calibrada. Durante todo o monitoramento utilizou-se protetor de vento no microfone do medidor de nível de pressão sonora. Apresentam-se na Tabela A.3 do Apêndice A os dados coletados no ponto P25 ao longo do monitoramento, bem como o espectro resultante no ponto P25. O Gráfico 8.2 traz as curvas correspondentes ao espectro resultante no ponto P25 (modelo em escala reduzida) e ao espectro monitorado no ponto de controle da subestação (situação real).

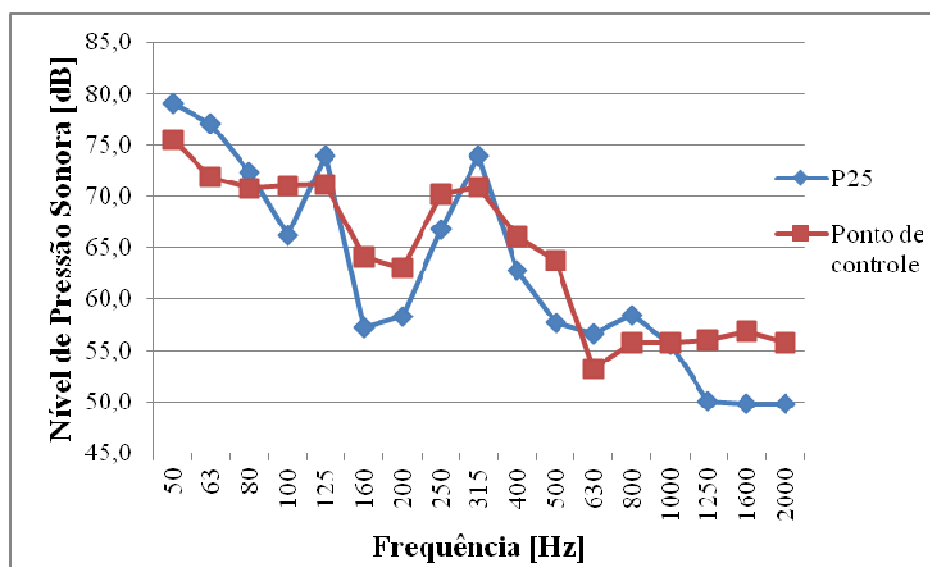


Gráfico 8.2 – Calibração da potência da fonte sonora

Verifica-se, por meio das curvas apresentadas no Gráfico 8.2, que ocorre a aproximação dos níveis de pressão sonora monitorados no ponto P25 e no ponto de controle. Das dezessete frequências analisadas, onze (50Hz, 80Hz, 100Hz, 125Hz, 200Hz, 250Hz, 315Hz, 400Hz, 630Hz, 800Hz e 1kHz) apresentaram, entre os valores medidos, diferenças menores que 5dB e seis (63Hz, 160Hz, 500Hz, 1,25kHz, 1,6kHz e 2kHz) apresentaram diferenças entre 5dB e 7,1dB. Entendeu-se que estes valores eram aceitáveis e, portanto, considerou-se a potência da fonte sonora calibrada. Salienta-se que as frequências apresentadas no Gráfico 8.2 fazem menção à situação real e que o limite superior de 2kHz é condicionado pelo fator de escala de redução adotado.

O monitoramento para a calibração da fonte sonora (período referente à emissão de potência sonora que foi adotado como a melhor opção) iniciou às 08 horas e 50 minutos do dia 24 de janeiro de 2013 e se estendeu até às 11 horas do mesmo dia (horário de verão). Durante o período de monitoramento temperatura do ar variou de 25,5°C até 28,1°C. A umidade relativa variou de 65,9% até 58,8%. Os dados de temperatura do ar e umidade relativa foram coletados com o medidor multifuncional *Environment Meter*, modelo THDL-400 da marca Instrutherm. Conforme dados fornecidos pela Estação Climatológica Principal de Maringá, a velocidade do vento neste período foi igual a 1m.s⁻¹. As variáveis climatológicas monitoradas atenderam aos critérios estabelecidos pela norma ISO 10847 (1997).

Para efetuar a reprodução da direcionalidade da fonte, monitoraram-se, nos vinte e quatro pontos sobre a circunferência no entorno da fonte sonora, os níveis de pressão sonora em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava. Para cada direção que a caixa acústica era voltada, emitia-se o ruído conforme a equalização efetuada para tal direção e monitorava-se o sinal sonoro no ponto sobre a circunferência para o qual a fonte sonora estava voltada. Em cada ponto efetuaram-se três medições. Monitoraram-se também os pontos P26, P27 e P28, sendo que estes valores foram posteriormente utilizados para a avaliação de desempenho de barreira acústica. Efetuou-se o monitoramento do ruído de fundo a cada alteração de direção da fonte sonora. Durante todo o monitoramento utilizou-se protetor de vento no microfone do medidor de nível de pressão sonora.

O monitoramento para reprodução da direcionalidade da fonte sonora e coleta de dados nos pontos P26, P27 e P28 iniciou às 08 horas e 14 minutos do dia 26 de janeiro de 2013 e se estendeu até às 13 horas e 35 minutos do mesmo dia (horário de verão). Durante o monitoramento a temperatura do ar variou de 25,9°C até 36,5°C. A norma ISO 10847 (1997) prevê que a variação máxima da temperatura seja igual a 10°C. Neste monitoramento a variação foi de 10,6°C. Acredita-se que a variação da temperatura do ar pouco acima do limite recomendado não trouxe prejuízos aos resultados. Salienta-se que, devido ao longo período de monitoramento, se está sujeito a variações de temperatura maiores ao longo do dia e, neste caso, o valor de 10°C foi extrapolado somente durante a emissão sonora na direção 24, a última do monitoramento. A umidade do ar variou de 74,6% até 40%. Conforme dados fornecidos pela Estação Climatológica Principal de Maringá a velocidade do vento variou entre 1m.s⁻¹ e 2m.s⁻¹.

A Figura 8.11 ilustra a situação de monitoramento com imagens, a partir de cada ponto de medição, em direção à fonte sonora.

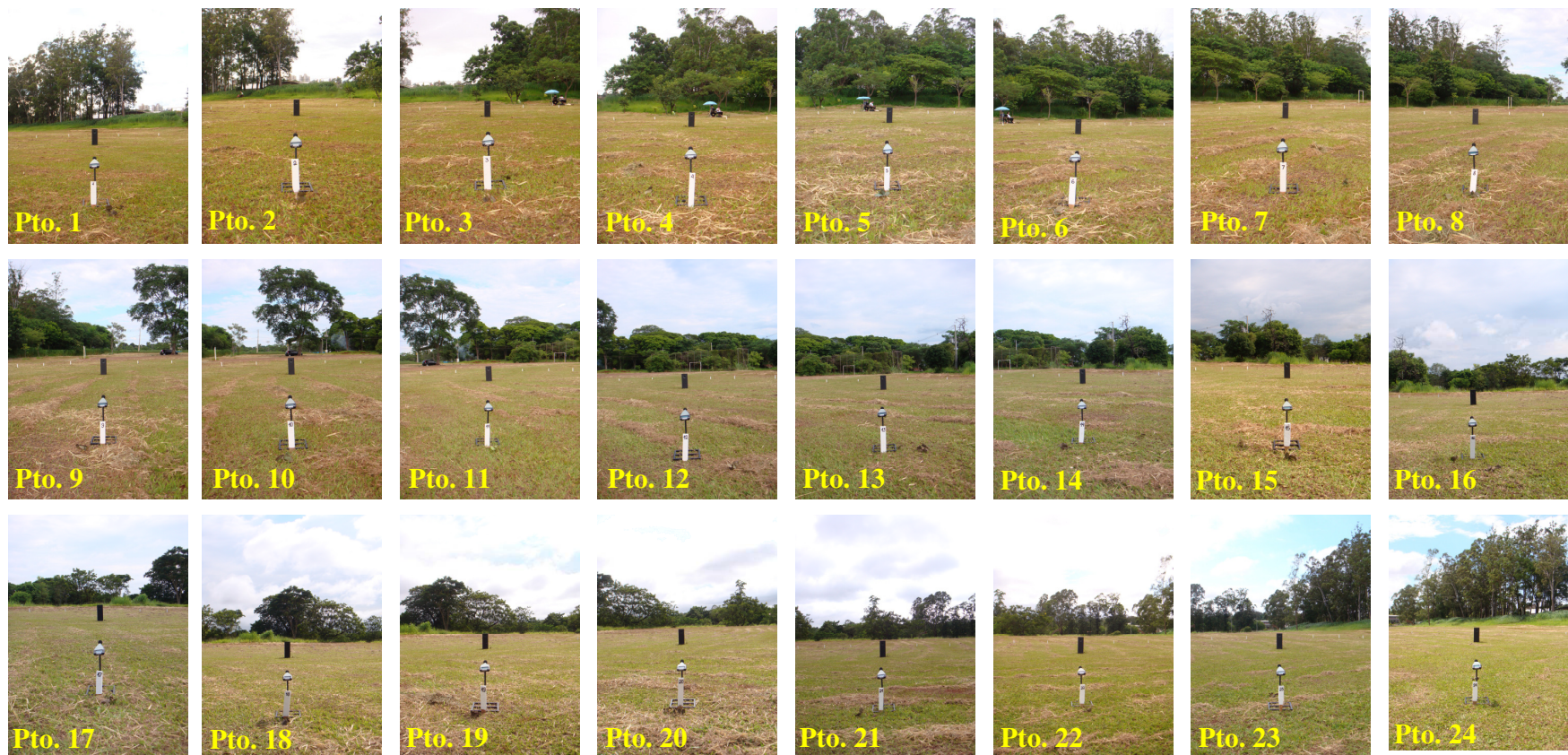


Figura 8.11 – Pontos de monitoramento para determinação da direcionalidade da fonte sonora em escala reduzida

A Tabela A.4 do Apêndice A, traz os dados de nível de pressão sonora em função de frequência monitorados durante o ensaio de reprodução da direcionalidade da fonte. Os mesmos dados são apresentados no Gráfico 8.3 em conjunto com o ruído de fundo.

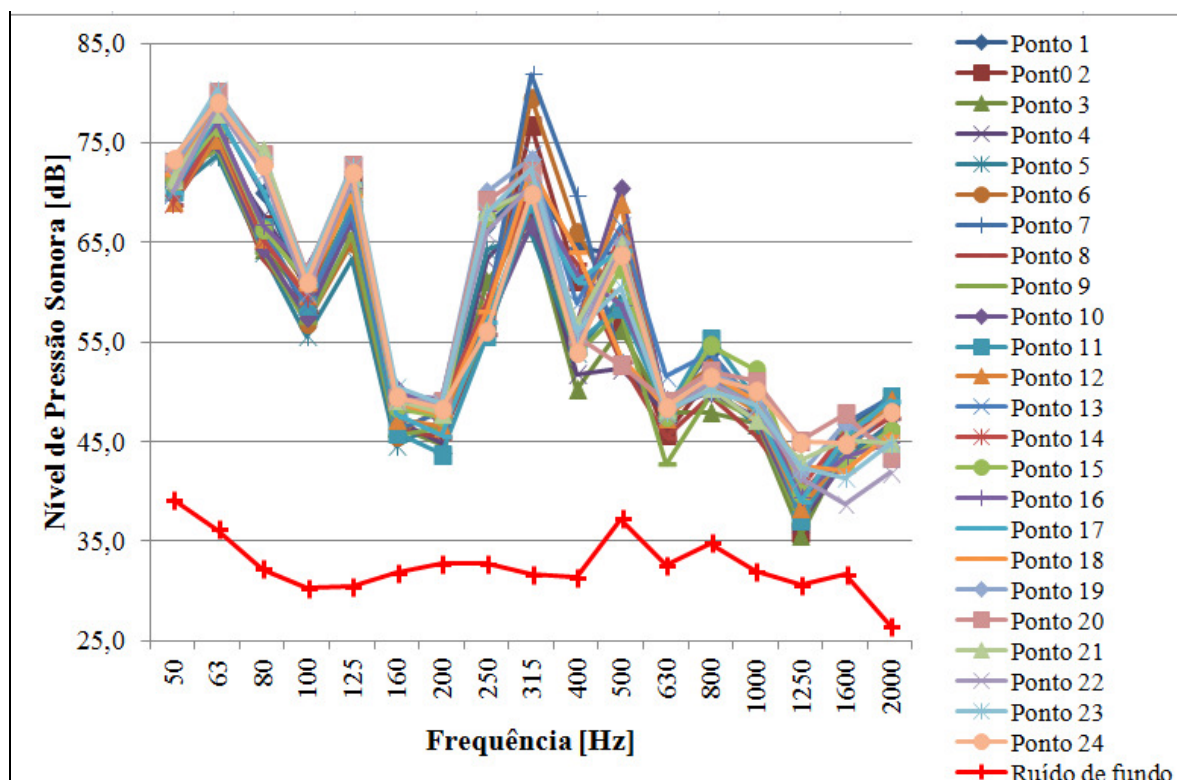


Gráfico 8.3 – Massa de dados de Nível de Pressão sonora – modelo em escala reduzida

Observa-se no Gráfico 8.3 que se repetem os picos de energia sonora identificados por ocasião da coleta de dados na subestação. Acredita-se que em torno das faixas de frequência de 160Hz e 200Hz e entre 630Hz e 2kHz possa acontecer alguma interferência do ruído de fundo no resultado de direcionalidade. Isto porque o ruído emitido tem diferença menor do que 10dB em relação ao ruído de fundo.

Utilizando-se os dados de nível de pressão sonora monitorados em função da frequência, calculou-se a direcionalidade da fonte sonora ensaiada em escala reduzida. Tais valores são apresentados na Tabela A.5 do Apêndice A.

Para visualização da direcionalidade calculada para o modelo em escala reduzida e para fazer-se a comparação com a direcionalidade obtida para a situação real, construíram-se gráficos em coordenadas polares a partir dos dados das Tabelas A.2 e A.5, os quais compõem as Figuras 8.12a e 8.12b. Nestas figuras, os resultados em vermelho correspondem ao modelo em escala reduzida e os resultados em azul correspondem à situação real. A frequência indicada em cada gráfico de coordenadas polares é referente à situação real.

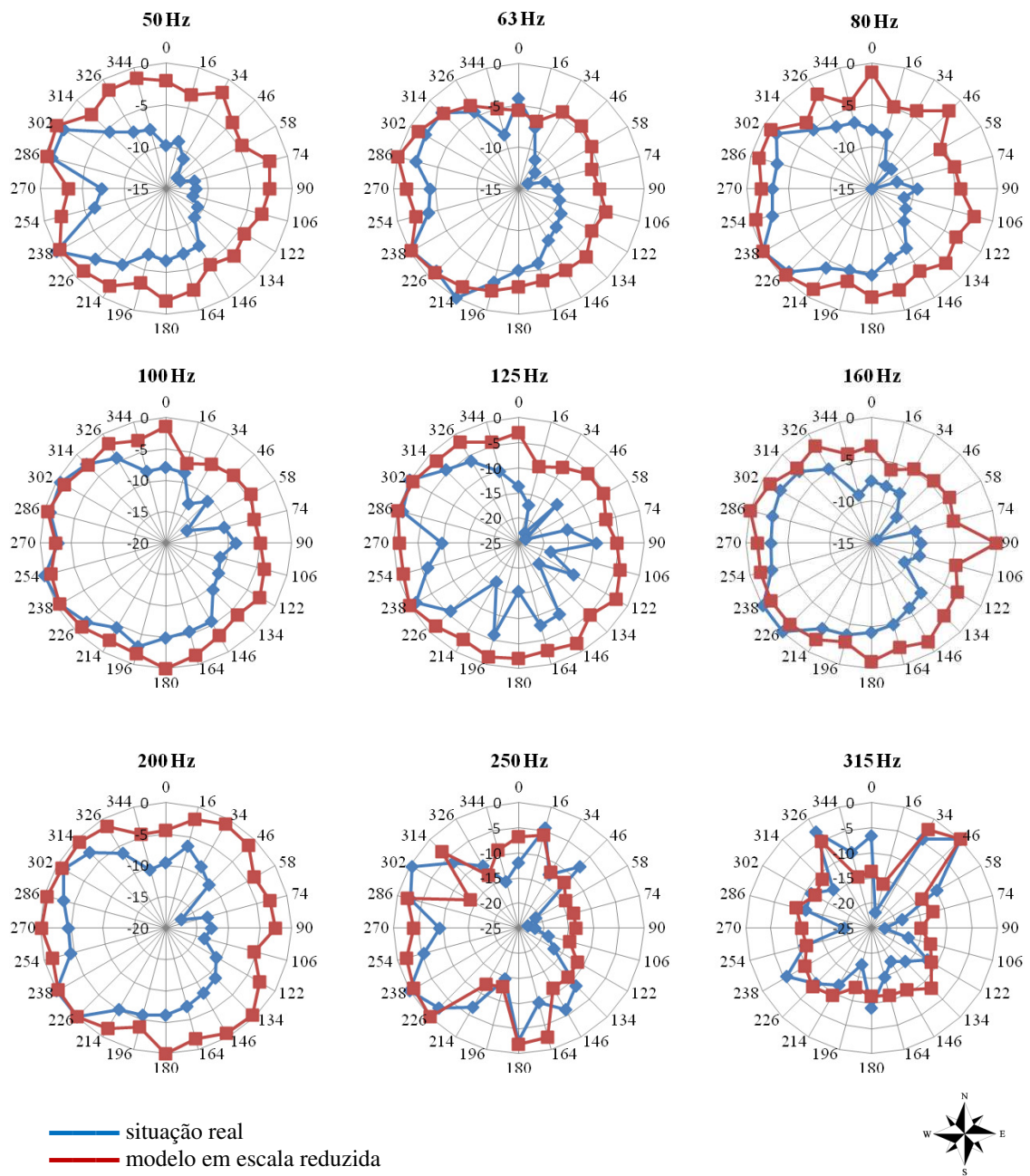


Figura 8.12a – Direcionalidade da fonte – comparação situação real e modelo em escala reduzida

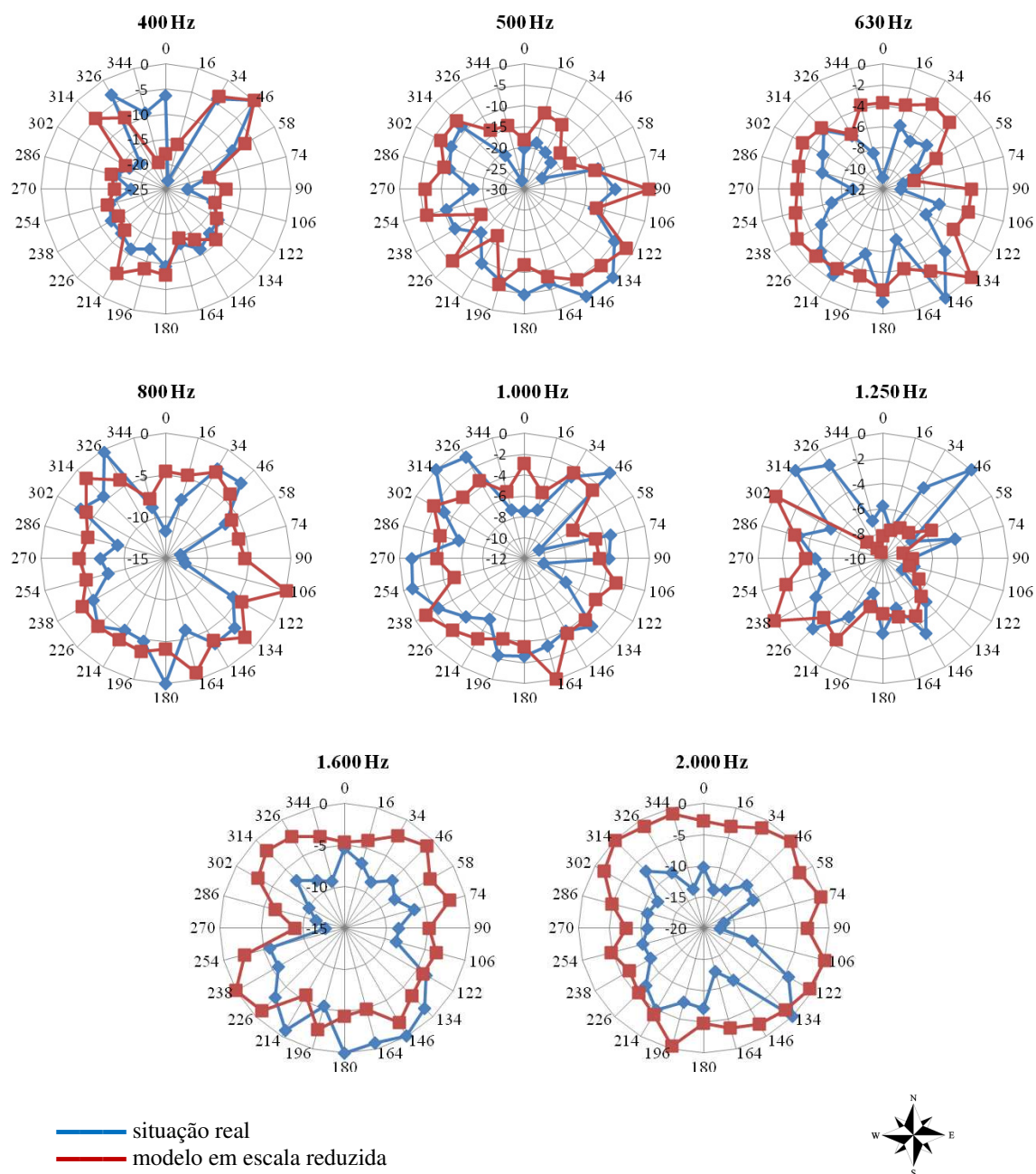


Figura 8.12b – Direcionalidade da fonte – comparação situação real e modelo em escala reduzida

Analisando as Figuras 8.12a e 8.12b verifica-se que para as frequências em faixa de 1/3 de oitava entre 50Hz e 200Hz não se estabelece uma correlação entre a direcionalidade da fonte sonora real e a direcionalidade da fonte sonora utilizada no modelo reduzido. Verificam-se apenas algumas direções em que as direcionalidades real e do modelo reduzido são semelhantes.

Além disso, percebe-se que as direcionalidades obtidas no modelo em escala reduzida sofrem poucas alterações em relação à variação angular, observando-se cada frequência isoladamente, ou seja, aproximam-se da direcionalidade de uma fonte omnidirecional. Conforme foi possível observar no Gráfico 8.3 o ruído de fundo não causa interferência para as medições nestas frequências, com exceção das faixas de frequência de 160Hz e 200Hz. Acredita-se que a diferença entre a direcionalidade monitorada na situação real e a direcionalidade no modelo em escala reduzida é consequência do fato de estas serem frequências com comprimentos de onda longos, o que torna mais difícil a reprodução, no modelo em escala reduzida, da direcionalidade da situação real. Além disso, sabe-se que na situação real podem existir pontos de anulação ou de amplificação do nível de pressão sonora devido à interferência das várias fontes de ruído existentes. No modelo em escala reduzida utilizou-se somente uma fonte sonora, o que exclui a possibilidade de ocorrência de anulação ou amplificação sonora devido à interferência de outras fontes sonoras que estivessem no entorno próximo da área de teste.

Ainda observando as Figuras 8.12a e 8.12b constata-se que para as frequências em faixa de 1/3 de oitava entre 250Hz e 630Hz ocorreram semelhanças no que diz respeito à direcionalidade obtida para a situação real e para o modelo em escala reduzida.

A partir de 800Hz já não há relação entre as direcionalidades, o que pode ser explicado pela interferência do ruído de fundo, o qual para frequências maiores que 630Hz, tem nível sonoro que concorre com nível sonoro do ruído gerado. No entanto, mesmo para essas frequências verificam-se algumas direções em que as direcionalidades real e do modelo reduzido são semelhantes.

Desta forma, entendeu-se que a fonte sonora em escala reduzida foi validada. Há limitações em relação à reprodução da direcionalidade, porém, acredita-se que os resultados dos ensaios com modelo em escala reduzida nestas condições poderão apresentar resultados representativos da situação real.

Apresentam-se nas Tabelas A.6, A.7 e A.8 do Apêndice A os dados de níveis de pressão sonora coletados nos pontos P26, P27 e P28, os quais serão utilizados para avaliação do desempenho de barreira acústica.

8.5 Ensaio de barreira acústica em escala reduzida

Os ensaios de barreira acústica no modelo em escala reduzida foram realizados em condomínio residencial horizontal localizado ao norte da cidade de Maringá, Estado do Paraná, o qual foi apresentado no item 8.2. Ressalta-se que o condomínio é contornado por muro de 3m (três metros) de altura construído em alvenaria de blocos de concreto.

Na parte interna do condomínio marcaram-se a posição da fonte sonora, os vinte e quatro pontos, referentes às direções de propagação sonora, sobre a circunferência e o ponto P26 localizado a 0,20m (vinte centímetros) da circunferência e a 1,6m (um metro e sessenta centímetros) da barreira acústica (distâncias respectivamente iguais a um metro e oito metros no tamanho real). Observa-se na Figura 8.13 o posicionamento do ponto P26, de alguns pontos sobre a circunferência e da barreira acústica.



Figura 8.13 – Avaliação de barreira acústica – face voltada para a fonte sonora

Procedeu-se à emissão do ruído nas vinte e quatro direções, considerando as características de direcionalidade de cada uma, e monitorou-se o ruído incidente no ponto P26 em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava de 250Hz a 10kHz, frequências estas que correspondem respectivamente às frequências de 50Hz e 2kHz no tamanho real. A cada mudança de direção da emissão sonora monitorou-se o ruído de fundo no ambiente. Durante todo o monitoramento utilizou-se protetor de vento no microfone do medidor de nível de pressão sonora. Os valores de nível de pressão sonora monitorados no ponto P26 são apresentados na Tabela A.9 do Apêndice A. Estes dados foram comparados com os dados coletados no ponto P26 no modelo em escala reduzida sem barreira acústica, os quais foram apresentados na Tabela A.6 do Apêndice A.

O monitoramento do ruído incidente no ponto P26 iniciou às 09 horas e 21 minutos do dia 30 de janeiro de 2013 e se estendeu até às 11 horas e 44 minutos do mesmo dia. Neste período a temperatura do ar variou de 26,7°C até 32,1°C e a umidade relativa variou de 55,8% até 44,4%. De acordo com a Estação Climatológica Principal de Maringá a velocidade do vento neste

período foi igual a $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. No entanto, durante o período perceberam-se rajadas de vento. Quando isso aconteceu suspendeu-se a medição e iniciou-se novamente quando as rajadas cessaram.

Na parte externa do condomínio marcaram-se os pontos P27 e P28 alinhados com o ponto P26 localizado na parte interna do condomínio. Localizaram-se os pontos P27 e P28 respectivamente a 1,6m (um metro e sessenta centímetros) e 3,2m (três metros e vinte centímetros) de distância da barreira acústica (distâncias respectivamente equivalentes a oito metros e dezesseis metros no tamanho real). Mantiveram-se na parte interna a fonte sonora e os vinte e quatro pontos sobre a circunferência referentes às direções de emissão sonora. Observa-se na Figura 8.14 o posicionamento dos pontos P27 e P28 na parte externa do condomínio.



Figura 8.14 – Avaliação de barreira acústica – face oposta à geração do ruído

Emitiu-se o ruído nas vinte e quatro direções de propagação, considerando as características de direcionalidade de cada uma, e monitorou-se o ruído incidente nos pontos P27 e P28 em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava de 250Hz a 10kHz, frequências estas que correspondem respectivamente às frequências de 50Hz e 2kHz no tamanho real. A cada mudança

de direção de emissão sonora mediu-se o ruído de fundo no ambiente. Durante todo o monitoramento utilizou-se protetor de vento no microfone do medidor de nível de pressão sonora. Os valores de nível de pressão sonora monitorados nos pontos P27 e P28 são apresentados, respectivamente, nas Tabelas A.10 e A.11 do Apêndice A. Estes dados foram comparados com os dados coletados nos pontos P27 e P28 no modelo em escala reduzida sem barreira acústica, os quais foram apresentados, respectivamente, nas Tabelas A.7 e A.8 do Apêndice A.

Esta etapa do monitoramento iniciou às 13 horas e 35 minutos do dia 30 de janeiro de 2013 e se estendeu até às 16 horas e 19 minutos do mesmo dia. Neste período a temperatura do ar variou de 33,0°C até 35,0°C e a umidade relativa variou de 38,3% até 32,4%. De acordo com a Estação Climatológica Principal de Maringá a velocidade do vento neste período variou entre 1m.s^{-1} e 3m.s^{-1} . Faz-se aqui a mesma ressalva feita para o monitoramento efetuado na parte interna do condomínio em relação às rajadas de vento. Na parte externa do condomínio a vegetação do entorno, durante o monitoramento, era movimentada pelo vento e, apesar de interromper-se o monitoramento sempre que isso era percebido, é possível que haja alguma influência nos resultados. Além disso, foi necessário suspender o monitoramento por ocasião da passagem de veículos na estrada rural que margeia o condomínio.

Na Tabela 8.2 apresentam-se os dados referentes ao ruído incidente nos pontos P26, P27 e P28 para os modelos em escala reduzida sem e com barreira acústica, o ruído de fundo (RF) nos ambientes monitorados, o impacto em termos de ruído no ponto P26 devido à presença da barreira acústica, bem como a atenuação sonora proporcionada pela barreira nos pontos P27 e P28.

Tabela 8.2 – Ensaio de barreira acústica em escala reduzida – impacto sonoro

Freq. [Hz] situação real	Freq. [Hz] modelo em escala reduzida	NPS [dB] (modelo em escala reduzida sem barreira acústica)				NPS [dB] (modelo em escala reduzida com barreira acústica)					NPS [dB] P26 (variação após a inserção da barreira acústica)	Atenuação sonora [dB]	
		P26	P27	P28	RF	P26	RF dentro do condomínio	P27	P28	RF fora do condomínio		P27	P28
50	250	81,9	78,9	77,3	36,6	82,7	33,9	60,4	60,6	28,7	0,8	18,5	16,7
63	315	85,8	83,4	80,8	31,7	88,4	32,5	63,8	62,0	28,5	2,6	19,6	18,8
80	400	76,4	73,7	71,1	27,7	77,5	29,5	56,5	54,8	29,9	1,1	17,2	16,3
100	500	70,8	65,6	63,3	25,8	71,9	29,7	51,5	53,3	27,8	1,1	14,1	10,0
125	630	79,2	73,9	71,8	24,3	82,0	26,8	58,7	62,0	26,1	2,8	15,2	9,8
160	800	56,8	60,2	59,5	24,7	58,5	25,6	45,6	49,8	24,0	1,7	14,6	9,7
200	1000	54,1	56,8	55,4	25,9	55,4	25,7	43,7	43,1	24,1	1,3	13,1	12,3
250	1250	59,0	61,3	58,4	26,0	59,9	26,4	44,6	43,7	21,7	0,9	16,7	14,7
315	1600	71,0	68,5	65,0	26,1	72,7	26,3	50,3	47,6	24,3	1,7	18,2	17,4
400	2000	58,9	57,4	61,0	26,3	59,9	26,5	44,4	49,3	23,5	1,0	13,0	11,7
500	2500	51,8	59,0	55,8	29,3	53,5	26,6	47,0	44,1	23,5	1,7	12,0	11,7
630	3150	55,2	57,9	63,5	28,5	55,4	26,9	44,7	50,3	24,9	0,2	13,2	13,2
800	4000	55,1	60,7	61,8	31,0	56,7	27,5	46,1	47,3	25,5	1,6	14,6	14,5
1000	5000	52,4	58,7	59,6	26,2	53,4	27,7	46,7	48,9	27,5	1,0	12,0	10,7
1250	6300	49,4	55,9	56,6	27,2	50,6	28,1	47,1	49,0	28,1	1,2	8,8	7,6
1600	8000	51,0	56,4	58,1	27,3	52,0	26,4	48,2	49,0	26,7	1,0	8,2	9,1
2000	10000	51,0	53,3	56,2	24,0	51,9	24,6	47,4	48,7	25,5	0,9	5,9	7,5

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8.2 pode-se afirmar que o ruído de fundo não era prejudicial ao andamento dos ensaios já que em todas as situações e frequências analisadas tal ruído foi menor que o ruído emitido. Desta forma foi atendido o critério estabelecido pela norma ISO 10847 (1997) de que o ruído de fundo deve ser pelo menos 10dB menor do que o ruído a ser analisado. No entanto, é necessário ressaltar que o ruído de fundo pode ter sofrido variações, principalmente devido ao vento e à movimentação da vegetação do entorno na parte externa do condomínio. Assim, não se pode garantir que o ruído de fundo era o mesmo nos momentos em que se monitorava o ruído de fundo e nos momentos em que se gerava o ruído no interior do condomínio, sendo este um fator a ser considerado na análise dos resultados.

Verificou-se que no ponto P26, localizado próximo à face da barreira voltada para a fonte sonora, houve um aumento dos níveis de pressão sonora monitorados após a inserção da barreira acústica, aumento este devido às reflexões sonoras provenientes da incidência sonora na superfície da barreira. Apesar de o acréscimo ser pequeno se observadas separadamente as frequências analisadas, ao se calcular o ruído global tem-se um aumento de 13,7dB no ponto P26. Este valor é significativo e, caso de fato sejam instaladas barreiras acústicas próximo à fonte sonora analisada, dever-se-á considerá-lo ao se avaliar a exposição ocupacional ao ruído dos operadores do sistema.

Observam-se, ainda na Tabela 8.2, as atenuações obtidas nos pontos P27 e P28. Estes valores foram utilizados para a validação dos resultados de atenuação proporcionada por barreira acústica obtidos a partir de simulação computacional.

8.6 Modelagem da área de teste

Foi gerado, no programa AutoCAD® versão 2007, um arquivo base contendo a representação do terreno, a fonte sonora, a área de cálculo e a barreira acústica. Este arquivo foi importado pelo programa SoundPLAN® versão 6.4.

Efetuuou-se a modelagem da área de teste em duas etapas. A primeira etapa referiu-se à calibração da potência sonora e reprodução da direcionalidade da fonte sonora e, a segunda etapa, à simulação de barreira acústica.

Iniciou-se a primeira etapa da modelagem da área de teste modelando-se o terreno. Este foi ilustrado como uma área plana retangular de 350m (trezentos e cinquenta metros) por 250m (duzentos e cinquenta metros), considerando-se que esta é a característica da área de monitoramento na subestação elétrica e que interessa reproduzir a condição sonora em uma região próxima a ela.

A direcionalidade da fonte sonora foi observada por faixa de frequência em banda de 1/3 de oitava de 50Hz a 10kHz, conforme monitoramento efetuado na subestação. Para que isso fosse possível, foi necessário gerar uma fonte sonora para cada faixa de frequência e sobrepor estas fontes no modelo tridimensional no SoundPLAN[®]. Optou-se por este procedimento, com a sobreposição das fontes sonoras, pois, desta forma, foi possível fazer a análise dos resultados separadamente em função de frequência. A altura da fonte sonora inserida no ambiente do programa SoundPLAN[®] foi de 3m (três metros), de acordo com a altura da fonte sonora na situação real (fonte sonora com seis metros de altura sem ponto específico para emissão do ruído, sendo considerada a altura média como a altura da fonte para os modelos em escala reduzida e para a simulação computacional). Fez-se a caracterização da fonte sonora por meio da inserção dos valores de direcionalidade calculados para a situação real e apresentados na Tabela A.2 do Apêndice A. A Figura 8.15 traz uma imagem do ambiente de trabalho do programa SoundPLAN[®] na qual observa-se o gráfico de direcionalidade da fonte sonora para a frequência de 50Hz obtido após a inserção dos valores de direcionalidade para tal frequência.

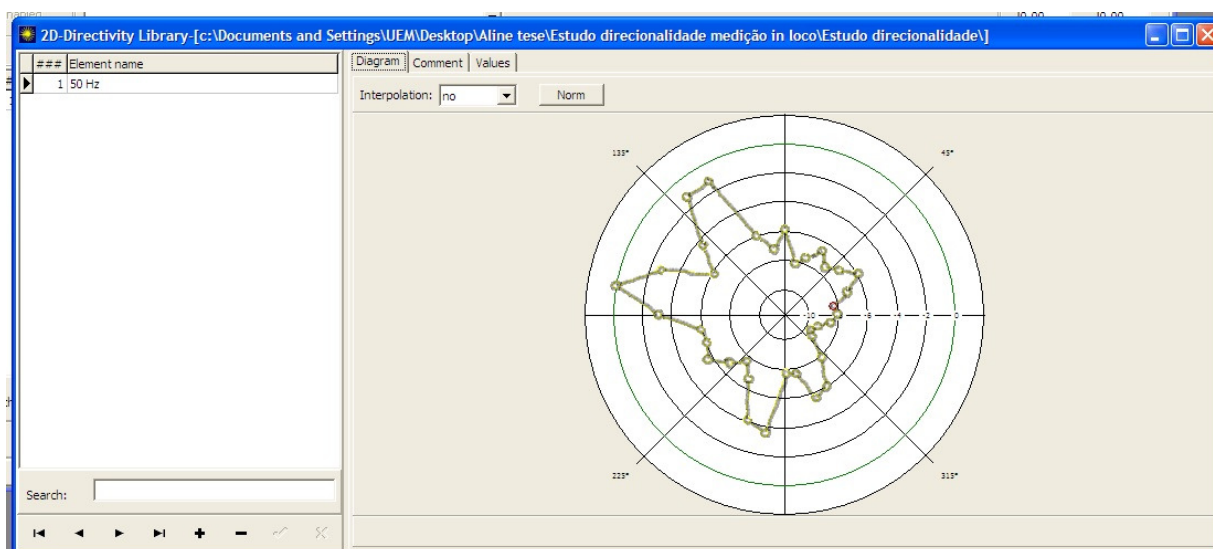


Figura 8.15 – Modelagem da direcionalidade da fonte sonora em 50Hz no programa SoundPLAN®

Ainda na caracterização da fonte sonora, inseriu-se o espectro sonoro, o qual foi monitorado no ponto de controle da subestação, e a potência sonora da fonte. A potência sonora foi calibrada de forma a obter-se, no ponto de controle, o mesmo espectro sonoro monitorado na situação real.

Inseriram-se os receptores pontuais referentes aos pontos P25 (ponto de controle), P26 (próximo à face da barreira voltada para a fonte sonora) e P27 e P28 (próximos à face da barreira oposta à geração do ruído). Caracterizaram-se os receptores com altura igual a 2m (dois metros) conforme a altura dos pontos de monitoramento da situação real.

Estabeleceu-se uma área de cálculo, a qual no programa funciona como um receptor plano, para delimitar a região de propagação sonora a ser avaliada. Adotaram-se para tanto as mesmas dimensões e o mesmo posicionamento do terreno inserido no programa. Após a primeira etapa da modelagem, procedeu-se à simulação computacional do modelo sem barreira acústica, o que é abordado no item 8.7.

A segunda etapa da modelagem compreendeu a inserção da barreira acústica no modelo computacional. A barreira foi caracterizada com 15m (quinze metros) de altura, conforme a altura da barreira no modelo em escala reduzida, e com 350m (trezentos e cinquenta

metros) de extensão, valor igual à largura do terreno. Este critério foi adotado já que no modelo em escala reduzida a barreira tinha grande extensão e foi considerada como barreira infinita. O fato de no modelo computacional a barreira atingir os limites do terreno, os quais coincidem com os limites da área de cálculo, faz com que a análise seja equivalente a uma barreira infinita. Quanto à absorção da superfície da barreira, utilizou-se material disponível na biblioteca do programa SoundPLAN[®] para caracterizá-la com coeficiente de absorção de alvenaria de blocos de concreto. Conforme a situação do modelo em escala reduzida, inseriu-se a barreira acústica a 59m (cinquenta e nove metros) da fonte sonora sendo 50m (cinquenta metros) referentes ao raio da circunferência de monitoramento, 1m (um metro) referente à distância entre a circunferência de monitoramento e o ponto P26 e 8m (oito metros) referentes à distância entre o ponto P26 e a barreira acústica.

Concluída a segunda etapa da modelagem, procedeu-se a simulação da barreira acústica, assunto abordado no item 8.7.

8.7 Simulação computacional

A simulação computacional dividiu-se em duas etapas. A primeira etapa compreendeu a calibração do modelo computacional e a reprodução da direcionalidade da fonte sonora e, a segunda etapa, a simulação do desempenho de barreira acústica.

O conjunto terreno, fonte sonora, receptores e área de cálculo, modelado no ambiente do programa SoundPLAN[®], foi a base para a configuração dos parâmetros necessários à primeira etapa da simulação computacional.

Considerando-se que o procedimento de cálculo utilizado é o método do “traçado de raios”, estabeleceu-se a variação angular entre os raios igual a 1° (um grau). A exatidão do resultado obtido a partir da simulação depende, além da variação angular, da dimensão da malha de cálculo. Portanto, adotou-se uma malha quadrada de lado igual a 1m (um metro) o que em mapas de ruído caracteriza um nível elevado de detalhamento.

Para o processo de calibração do modelo computacional, compreendido na primeira etapa da simulação, fez-se a variação da potência sonora com verificação do impacto no ponto P25, o qual corresponde ao ponto de controle monitorado na situação real. Considerou-se o modelo computacional calibrado quando os níveis de pressão sonora obtidos no ponto P25 igualaram-se aos monitorados no ponto de controle.

Ainda na primeira etapa da simulação computacional, geraram-se mapas de ruído, em função da frequência em faixas de 1/3 de oitava de 50Hz a 10kHz. Nestes mapas, apresentados nas Figuras 8.16a, 8.16b e 8.16c, observa-se a direcionalidade da fonte sonora em cada frequência por meio da escala de cores. Os mapas de ruído foram gerados à 2m (dois metros) de distância do solo, de acordo com a altura do microfone do medidor de nível de pressão sonora durante os monitoramentos de ruído. Os gráficos polares que representam a direcionalidade da fonte *in loco* (em azul) e a direcionalidade da fonte no modelo em escala reduzida (em vermelho) encontram-se sobrepostos aos mapas de ruído. Para as frequências de 2,5kHz até 10kHz apresenta-se somente o gráfico polar referente ao monitoramento na situação real já que, devido ao fator de escala adotado, a direcionalidade não foi determinada para estas frequências no modelo em escala reduzida.

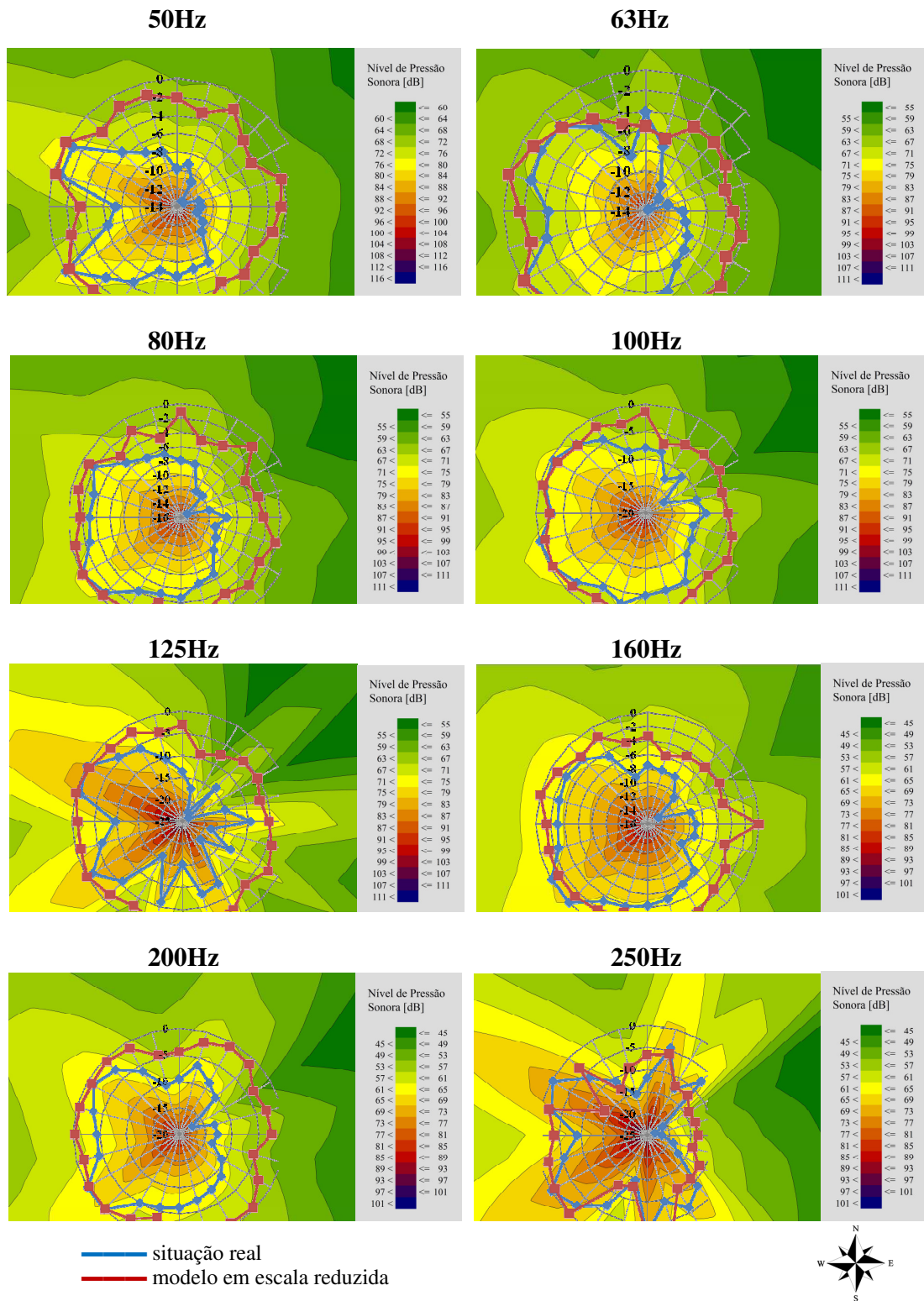


Figura 8.16a – Mapas de ruído - direcionalidade da fonte sonora por faixa de frequência

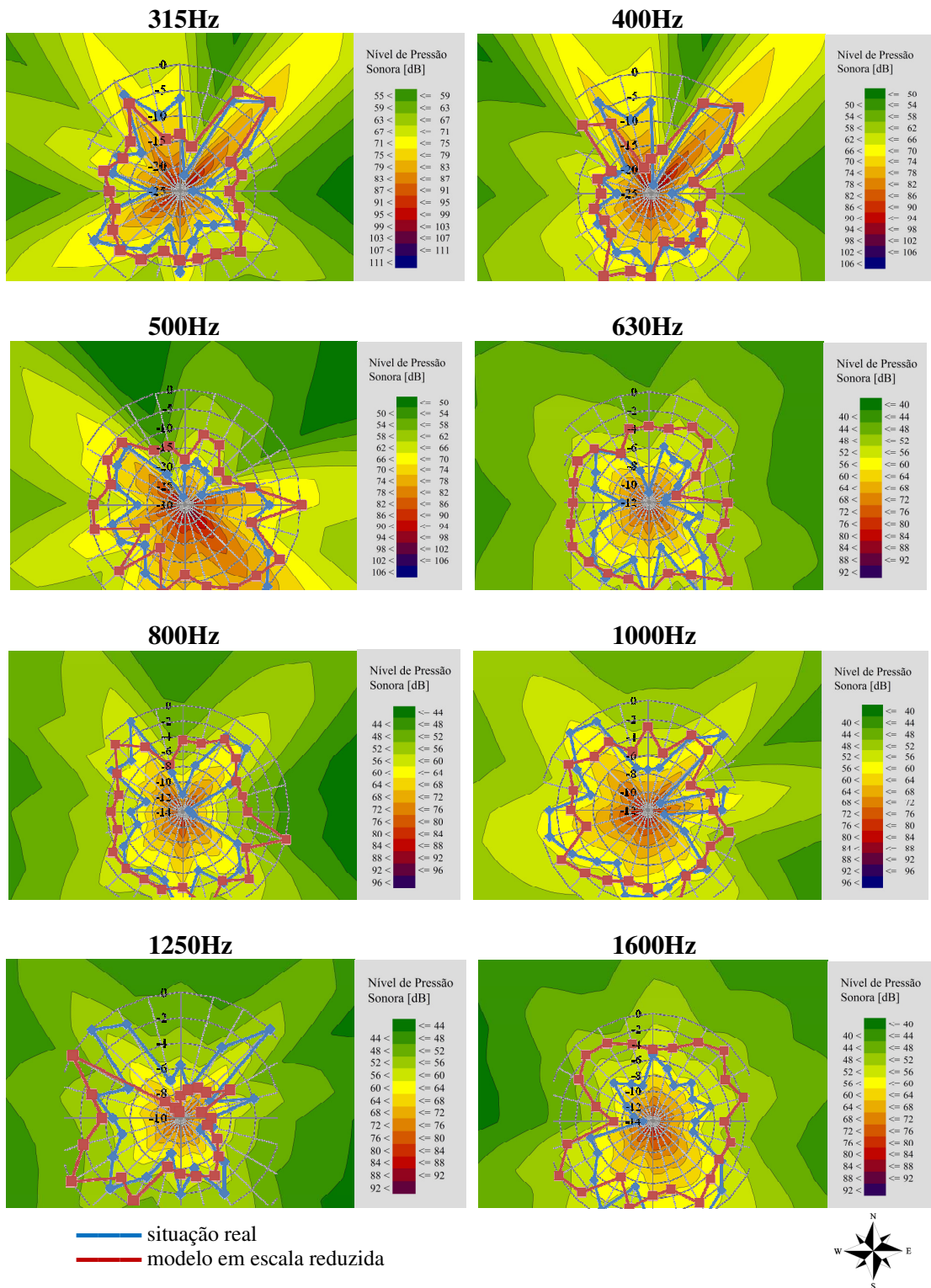


Figura 8.16b – Mapas de ruído - direcionalidade da fonte sonora por faixa de frequência

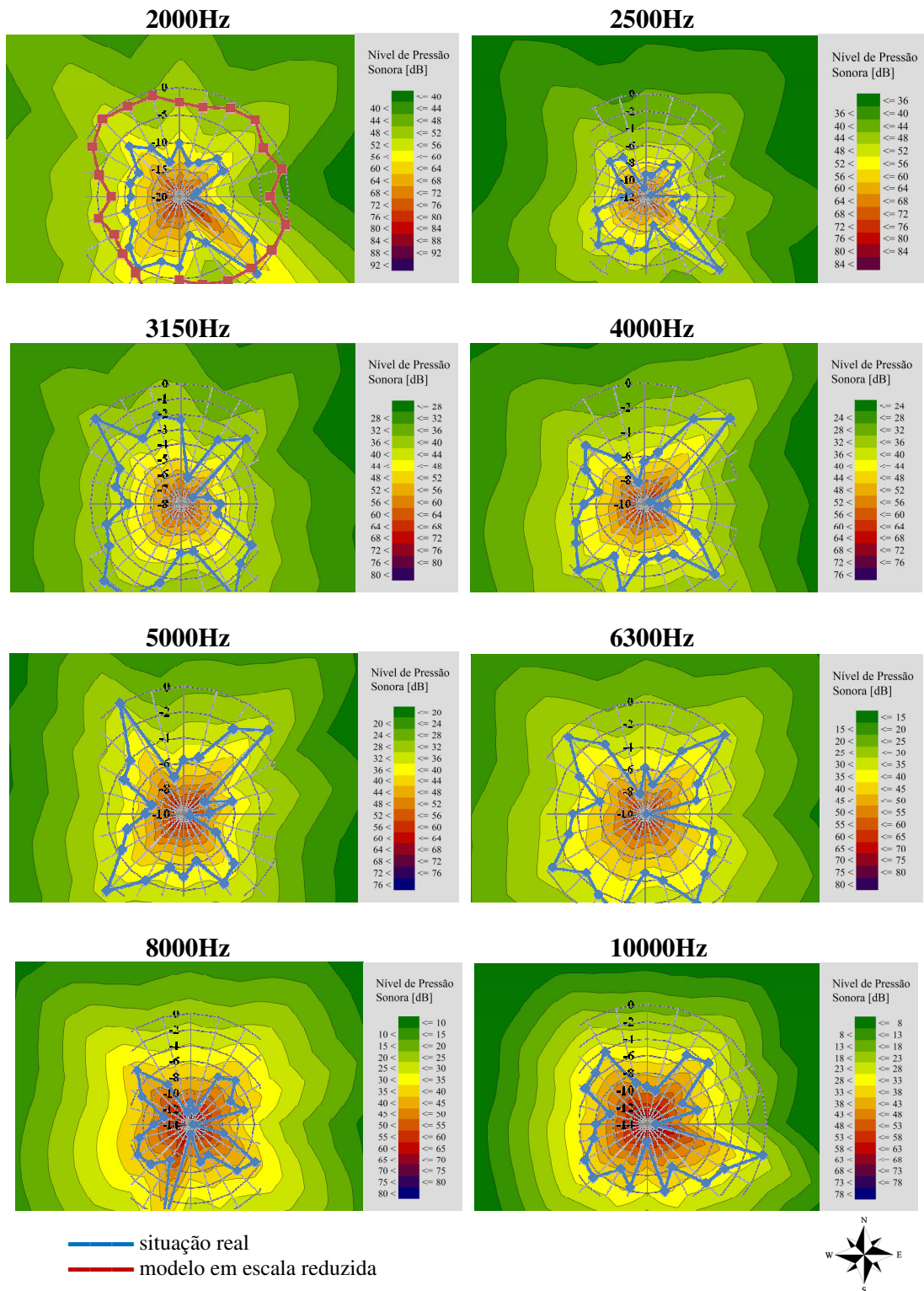


Figura 8.16c – Mapas de ruído - direcionalidade da fonte sonora por faixa de frequência

Observa-se nas Figuras 8.16a, 8.16b, e 8.16c que os mapas de ruído reproduzem com qualidade a direcionalidade calculada da fonte sonora. Este fato pode ser verificado por meio da comparação dos mapas de ruído com os gráficos polares referentes à direcionalidade da fonte na situação real.

Por meio da simulação computacional, obteve-se, para cada receptor, o espectro sonoro resultante. Estes valores foram comparados aos espectros sonoros obtidos a partir da simulação computacional com barreira acústica, sendo o resultado o impacto sonoro nos receptores após a inserção da barreira.

Na segunda etapa da simulação computacional utilizou-se o modelo computacional com barreira acústica. Mantiveram-se as mesmas variação angular, dimensão da malha de cálculo e distância do mapa de ruído em relação ao solo. Geraram-se mapas de ruído, em função de frequência em faixas de 1/3 de oitava de 50Hz a 10kHz. Nestes mapas, apresentados nas Figuras 8.17a, 8.17b e 8.17c, observa-se o resultado, na forma de propagação sonora, após a inserção da barreira acústica. A localização da barreira acústica é indicada pela linha em cor azul.

Por meio da simulação computacional, obteve-se, para cada receptor, o espectro sonoro resultante. Estes valores foram comparados aos espectros sonoros obtidos a partir da simulação computacional sem barreira acústica, sendo o resultado o impacto sonoro nos receptores após a inserção da barreira. Apresentam-se na Tabela 8.3 os níveis de pressão sonora em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava de 50Hz até 10kHz obtidos para os receptores P26, P27 e P28, o impacto sonora no ponto P26 após a inserção da barreira e a atenuação sonora proporcionada pela barreira nos pontos P27 e P28.

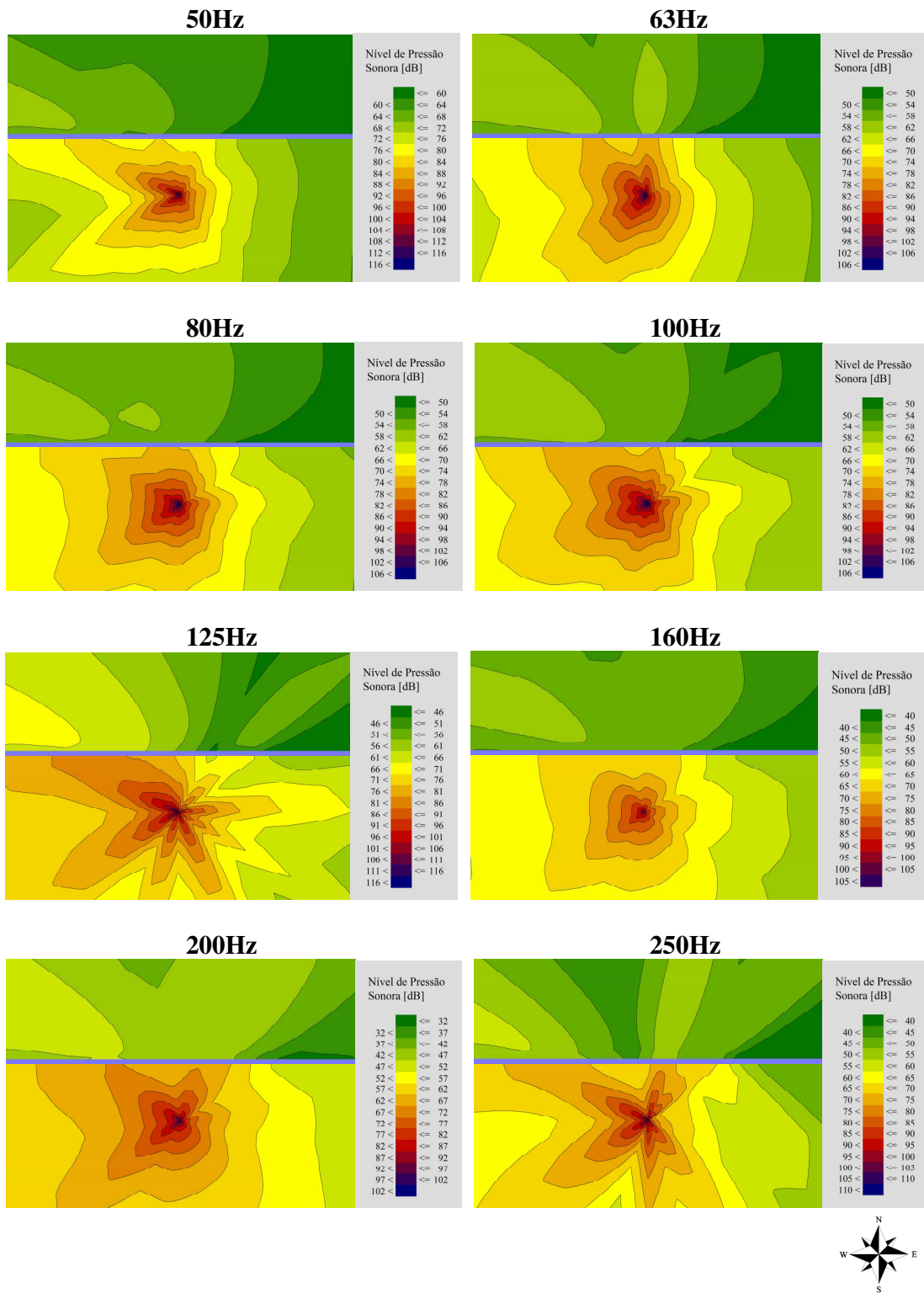


Figura 8.17a – Mapas de ruído – efeito sonoro da barreira acústica por faixa de frequência

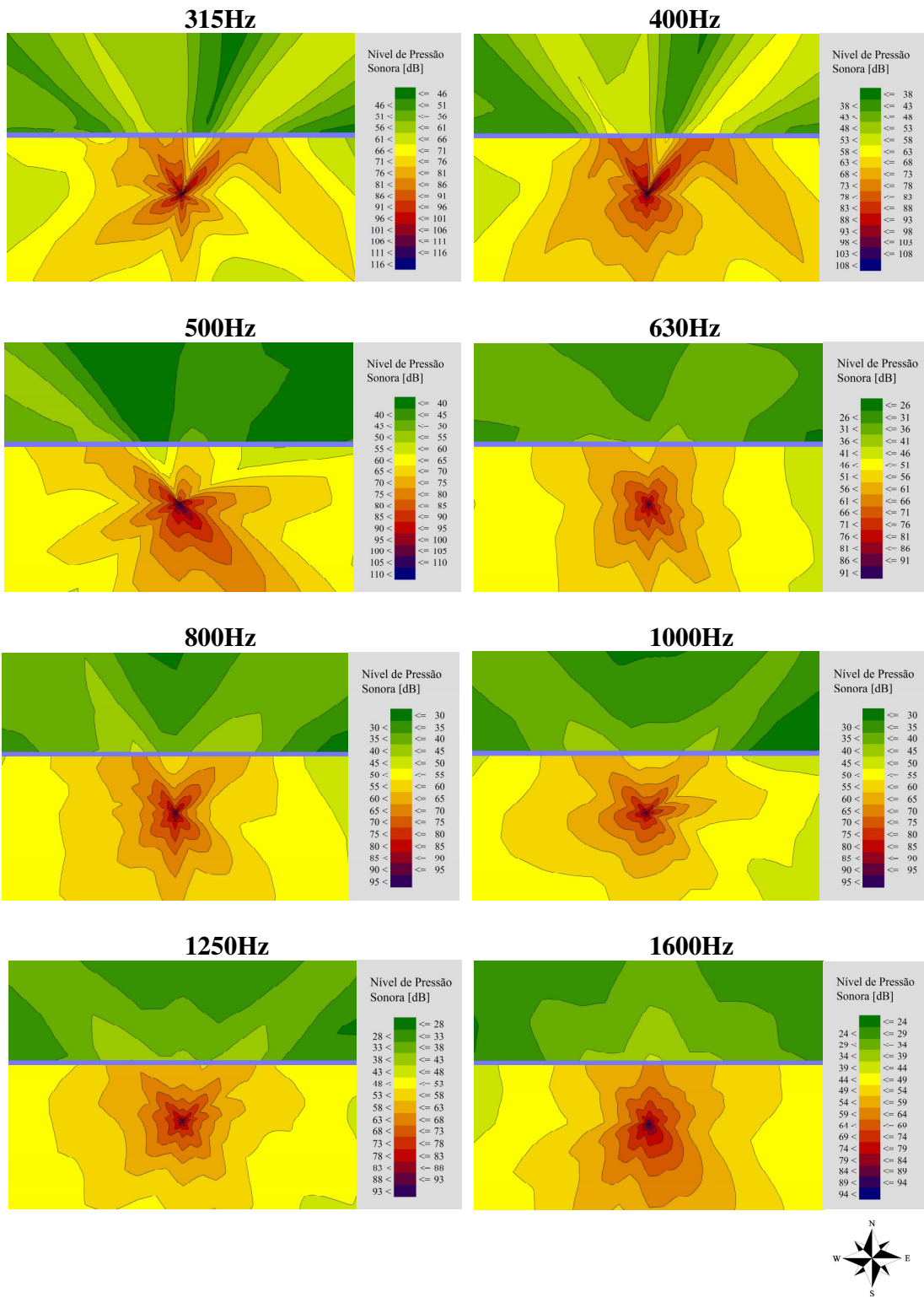


Figura 8.17b – Mapas de ruído – efeito sonoro da barreira acústica por faixa de frequência

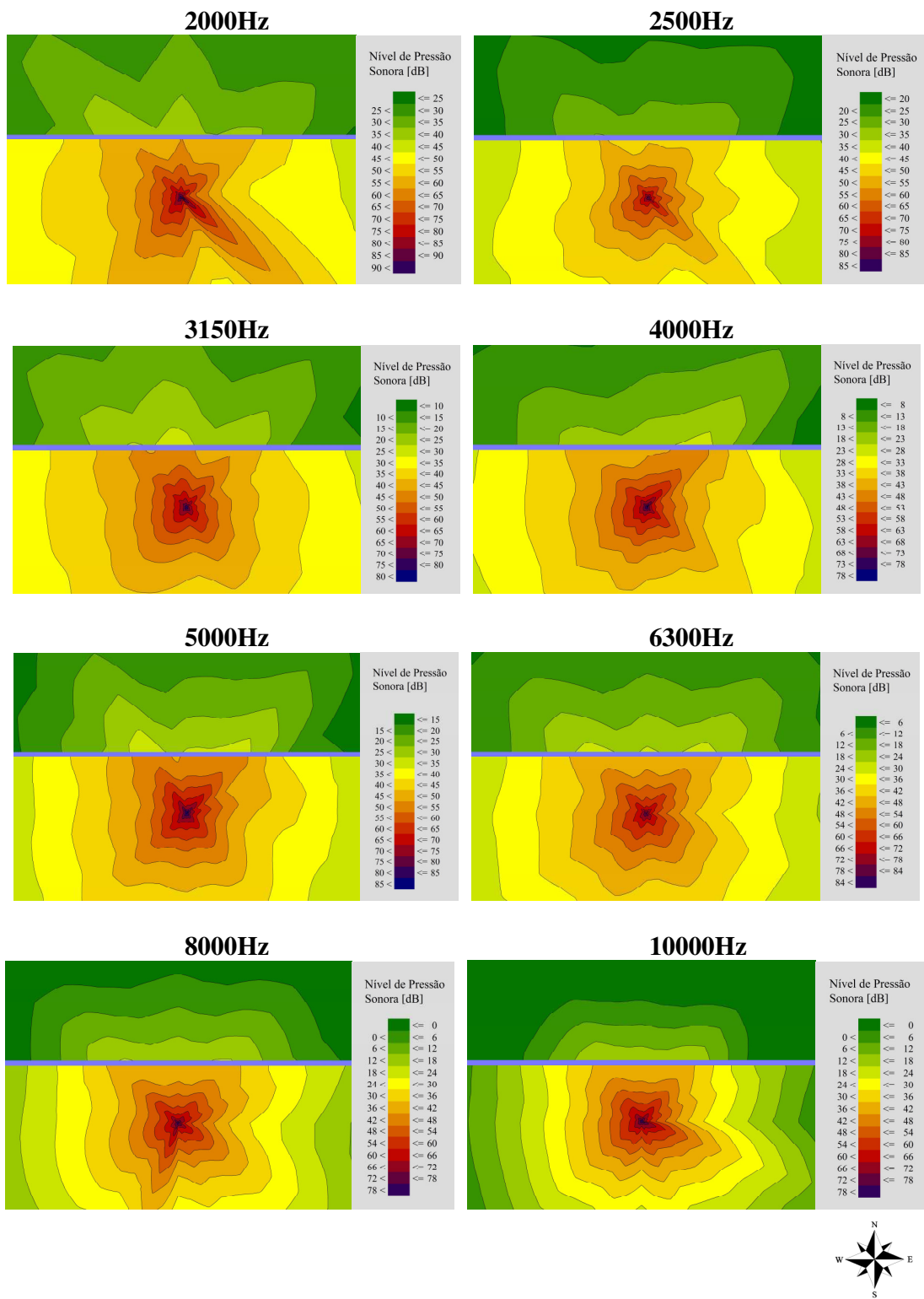


Figura 8.17c – Mapas de ruído – efeito sonoro da barreira acústica por faixa de frequência

Tabela 8.3 – Simulação de barreira acústica – impacto sonoro

Freq. [Hz] situação real	NPS [dB] (modelo computacional sem barreira acústica)			NPS [dB] (modelo computacional com barreira acústica)			NPS [dB] P26 (variação após a inserção da barreira acústica)	Atenuação sonora [dB]	
	P26	P27	P28	P26	P27	P28		P27	P28
50	77,1	74,1	72,9	78,8	63,0	63,5	1,7	11,1	9,4
63	74,7	71,7	70,5	76,4	59,7	60,2	1,7	12,0	10,3
80	72,5	69,5	68,3	74,2	56,6	57,1	1,7	12,9	11,2
100	72,5	69,5	68,3	74,2	55,7	56,2	1,7	13,8	12,1
125	74,1	71,1	69,9	75,8	56,3	56,9	1,7	14,8	13,0
160	66,0	62,9	61,8	67,7	47,2	47,8	1,7	15,7	14,0
200	63,0	60,0	58,8	64,8	43,3	43,9	1,8	16,7	14,9
250	67,1	64,1	62,9	68,9	47,4	47,1	1,8	16,7	15,8
315	80,7	77,7	76,5	82,4	61,0	60,0	1,7	16,7	16,5
400	76,9	73,9	72,7	78,6	57,1	56,1	1,7	16,8	16,6
500	64,1	61,1	59,9	65,8	44,3	43,3	1,7	16,8	16,6
630	52,5	49,4	48,2	54,2	32,7	31,7	1,7	16,7	16,5
800	56,0	53,0	51,8	57,7	36,2	35,2	1,7	16,8	16,6
1000	57,4	54,3	53,1	59,1	37,6	36,6	1,7	16,7	16,5
1250	58,6	55,6	54,3	60,3	38,8	37,8	1,7	16,8	16,5
1600	59,0	55,9	54,7	60,7	39,1	38,1	1,7	16,8	16,6
2000	59,0	55,8	54,6	60,6	39,0	38,0	1,6	16,8	16,6
2500	48,6	45,3	44,0	50,2	28,5	27,5	1,6	16,8	16,5
3150	46,2	42,9	41,5	47,8	26,1	24,9	1,6	16,8	16,6
4000	41,2	37,7	36,2	42,7	20,9	19,6	1,5	16,8	16,6
5000	40,2	36,4	34,9	41,7	19,6	18,3	1,5	16,8	16,6
6300	39,3	35,0	33,3	40,6	18,2	16,7	1,3	16,8	16,6
8000	38,0	33,2	31,0	39,2	16,4	14,4	1,2	16,8	16,6
10000	37,1	31,3	28,7	38,0	14,5	12,1	0,9	16,8	16,6

Para se fazer a validação dos resultados obtidos na simulação computacional, comparou-se o impacto sonoro obtido por meio da simulação com os dados obtidos por meio do ensaio de modelo em escala reduzida. Esta análise foi efetuada para as frequências em faixa de 1/3 de oitava entre 50Hz e 2kHz considerando-se a situação real. Devido à escala de redução adotada, não foi possível avaliar o impacto sonoro proporcionado por barreira acústica no modelo em escala reduzida para as frequências entre 2,5kHz e 10kHz. Apresentam-se no Gráfico 8.4 as

curvas da atenuação sonora no ponto P27 obtidas a partir da simulação computacional (em azul) e do modelo em escala reduzida (em vermelho) e, no Gráfico 8.5, as mesmas curvas relativas ao ponto P28.

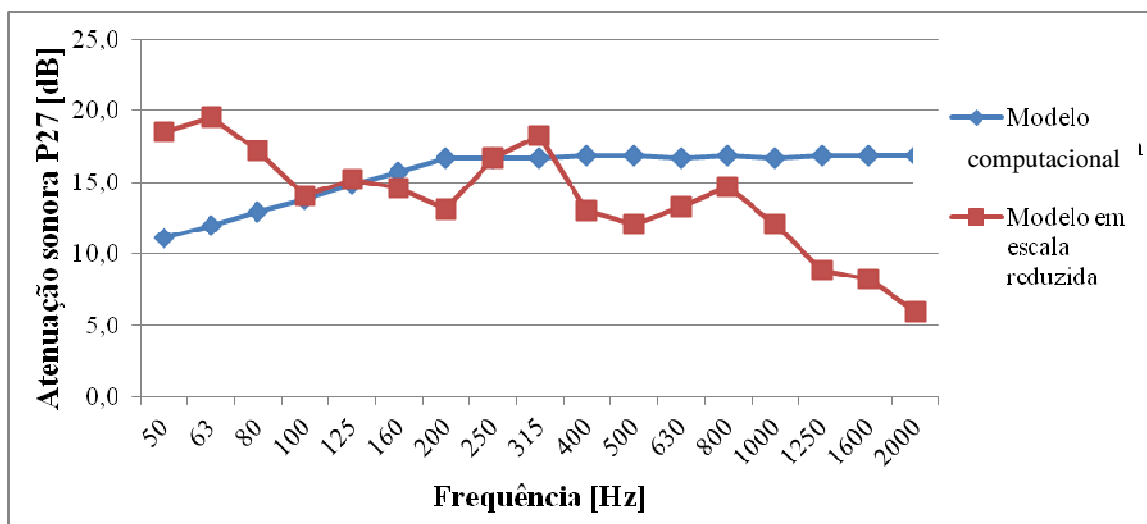


Gráfico 8.4 – Atenuação sonora – ponto P27

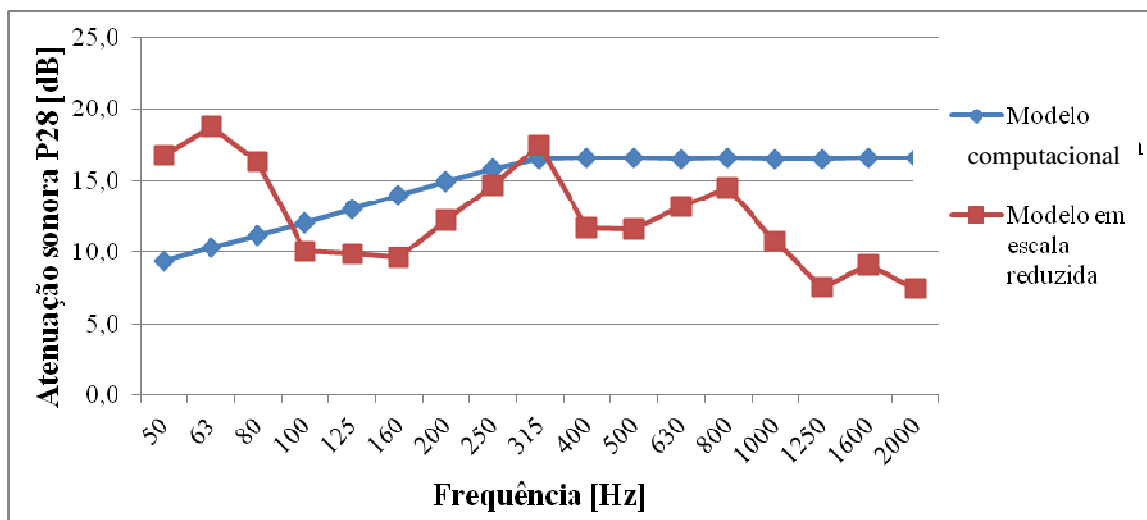


Gráfico 8.5 – Atenuação sonora – ponto P28

Verifica-se que para o ponto P27 a variação entre as atenuações obtidas por meio do modelo computacional e do modelo em escala reduzida, para as frequências em faixa de 1/3 de oitava entre 80Hz e 1kHz, foi menor que 5dB. Para o ponto P28 a diferença entre as atenuações

foi menor ou igual a 5dB para as frequências entre 100Hz e 800Hz. Nas demais frequências a diferença entre as atenuações variou entre 5,1dB e 10,9dB.

Acredita-se que, no caso das frequências graves, a maior diferença entre as atenuações ocorre devido ao grande comprimento de onda das ondas sonoras, o que pode causar distorções nos resultados devido à dificuldade de controlar de tais ondas. Deve-se também atentar ao fato de que no modelo em escala reduzida não foi possível reproduzir com boa aproximação a direcionalidade, nas frequências graves, calculada a partir do monitoramento *in loco*, fato este que pode interferir no ensaio de barreira acústica em escala reduzida.

Para as frequências a partir de 1kHz até 2kHz menciona-se também o fato de dificuldade na reprodução da direcionalidade no modelo em escala reduzida, sendo que neste caso, entende-se que o fator que causa interferência é o ruído de fundo. Salienta-se que, apesar da situação de ruído de fundo adequada apresentada na Tabela 8.2, é possível que tenham ocorrido alterações do mesmo provocadas pelo vento e pela movimentação da vegetação do entorno durante o monitoramento do desempenho da barreira acústica.

9 CONSIDERAÇÕES

A caracterização da fonte sonora foi efetuada por meio de mensuração do nível de pressão sonora *in loco*, de forma a determinar a direcionalidade da fonte. Ao calcular a direcionalidade da fonte em função de frequência em faixa de 1/3 de oitava, percebeu-se que a característica de direcionalidade é bastante acentuada em algumas faixas de frequência. Além disso, os níveis de pressão sonora mensurados remeteram ao fato de que a frequência fundamental de funcionamento dos transformadores e os primeiros harmônicos têm influência direta no ruído emitido na subestação elétrica.

A reprodução da fonte sonora em escala reduzida envolveu a utilização do programa Wavelab[®] para se trabalhar o sinal sonoro gravado *in loco* no que diz respeito à sua direcionalidade. Tal sinal foi reproduzido no modelo em escala reduzida. Como não há disponível no mercado fonte sonora capaz de emitir ruído com características direcionais variadas em função de frequência, a reprodução do ruído foi efetuada separadamente em cada direção de interesse utilizada para caracterização da direcionalidade, o que foi possível devido à criação de filtros eletrônicos por meio do programa Wavelab[®]. Com este procedimento reproduziu-se a direcionalidade da fonte parcialmente no modelo em escala reduzida. Ocorreram distorções da direcionalidade do modelo nas altas frequências provocadas pelo ruído de fundo do ambiente onde estava instalado o modelo em escala e, nas baixas frequências, devido ao fato de trabalhar-se com grandes comprimentos de onda, os quais são de difícil controle. Calibrou-se a potência da fonte sonora do modelo em escala reduzida, havendo uma boa aproximação dos valores. Validou-se o modelo no que diz respeito à direcionalidade da fonte sonora e verificou-se que pode ocorrer influência do ruído de fundo, bem como a anulação ou amplificação do sinal sonoro devido às simplificações adotadas para a construção do modelo. Dentre tais simplificações se destaca o fato de ter sido utilizada no modelo uma única fonte sonora para reproduzir o efeito de todas as fontes influentes na situação real. No entanto, de forma geral, percebeu-se que há reprodução de características de direcionalidade com o método empregado para reprodução da fonte sonora em escala reduzida.

Quanto à modelagem da fonte sonora no programa SoundPLAN[®], optou-se por modelar separadamente cada faixa de frequência, de forma que a direcionalidade do ruído resultante por ocasião da simulação pudesse ser avaliada e comparada com a direcionalidade calculada a partir dos dados mensurados *in loco* enfocando a diversidade em função de frequência existente na situação real. Tal procedimento trouxe bons resultados e mostrou-se eficaz para a avaliação do impacto da direcionalidade da fonte na propagação sonora.

Percebe-se que uma das maiores dificuldades encontradas ao se trabalhar com modelo em escala reduzida ao ar livre foi a impossibilidade de controlar o vento, sendo que este causa outros ruídos no entorno da área avaliada, como, no caso em questão, a movimentação da vegetação.

Entende-se que é possível utilizar modelo em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação de simulação computacional de barreira acústica. Porém é necessário buscar espaços com ruído de fundo de baixa intensidade, pouca vegetação no entorno e realizar os ensaios em dias de brisa calma. É interessante que existam obstruções à passagem de massas de ar, como desníveis do terreno ou edificações, estando estes obstáculos afastados para que não haja interferência no resultado devido a reflexões sonoras nestas superfícies. Desta forma, os resultados obtidos representarão com maior exatidão o efeito proporcionado pela presença da barreira acústica.

10 CONCLUSÕES

A hipótese da pesquisa, “modelos em escala reduzida ao ar livre podem ser eficazes como ferramenta de validação de simulação computacional de barreiras acústicas”, se confirma, no entanto, sua aplicação não é universal. Há restrições no que se refere ao tipo de ruído emitido e às condições do entorno.

A eficácia de modelos reduzidos ensaiados ao ar livre se refere à possibilidade de reproduzir a situação de estudo e manipular as variáveis influentes, de forma a verificar o comportamento do modelo e obter valores de referência para a validação de simulações computacionais de fenômenos acústicos ao ar livre.

Neste trabalho verificou-se que, para o caso de subestações elétricas, a reprodução da fonte sonora considerando suas características de direcionalidade e composição do espectro sonoro é um desafio devido à complexidade da fonte e à inexistência de caixas acústicas disponíveis no mercado para esse tipo de emissão sonora. Comprovou-se que a criação de filtros eletrônicos por meio do programa Wavelab[®] permite resultados satisfatórios na reprodução da direcionalidade da fonte sonora considerando-se a emissão do ruído separadamente em uma série de direções. Por meio de tal procedimento reproduziu-se parcialmente a direcionalidade da fonte no modelo em escala reduzida, sendo limitações as componentes em baixas frequências, a interferência do ruído de fundo e a simplificação das características geométricas dos equipamentos geradores de ruído.

Em relação aos parâmetros influentes nos ensaios em escala reduzida ao ar livre, verificou-se forte dependência em relação à velocidade do vento e à ocorrência de rajadas de vento. As rajadas de vento em especial ao movimentarem a vegetação do entorno do modelo, podem ocasionar distorções nos resultados. Entende-se que a escolha de áreas com obstruções à livre ventilação, como desníveis de terreno ou edificações, desde que suficientemente afastadas do modelo, são benéficas para a obtenção de resultados mais representativos da situação real.

As simulações computacionais, cujos resultados são validados, representam ferramentas importantes no estudo de soluções mitigadoras de ruído. Concluiu-se que modelos

em escala reduzida ao ar livre são passíveis de utilização para validação de modelos computacionais. Para isso, deve-se garantir a reprodução da situação real com boa aproximação dos detalhes condicionantes da propagação, como no caso da direcionalidade e da potência da fonte sonora. Há limitações relacionadas principalmente à dificuldade de controle da velocidade do vento e do ruído de fundo, porém, o estabelecimento de critérios para a realização dos ensaios em escala reduzida pode conduzir a resultados satisfatórios.

Por meio deste estudo reconheceram-se algumas possibilidades de pesquisas relacionadas ao tema abordado, sendo elas:

- Aplicabilidade do método a outras situações considerando, por exemplo, outro tipo de ruído;
- Verificação da influência do horário de monitoramento devido à variação da temperatura e da umidade do ar;
- Estudo de soluções para mitigação da poluição sonora no entorno de subestações elétricas, tal como modificações no topo da barreira, no seu revestimento, alteração da característica de absorção do solo no entorno;
- Refinamento da simulação computacional com adição de fonte sonora plana representativa do ruído de fundo;
- Criação de índice de aceitação da similaridade de condições, de forma a quantificar a satisfação em relação ao modelo reduzido no que diz respeito à reprodução das características da situação real.

REFERÊNCIAS

- ARIZMENDI, Luis Jesús. **Tratado fundamental de acustica en la edificacion**. Pamplona: EUNSA, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10151**: Acústica – avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade – procedimento. Rio de Janeiro 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14313**: Barreiras acústicas para vias de tráfego – características construtivas. Rio de Janeiro 1999.
- BIES, David A.; HANSEN, Colin H. **Engineering noise control: theory and practice**. 2. ed. London: E & FN Spon, 1996.
- BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- BOONE, M. M. **Noise Barrier with a Lamellar Diffractor on Top**. Rio de Janeiro: INTERNOISE, 2005.
- BRÜEL & KRÆR. Disponível em: <<http://www.bksv.com/>> Acesso em: 09 de janeiro de 2012.
- BUCUR, Voichita. **Urban forest acoustics**. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006.
- BUSCH, Todd; HODGSON, Murray. Scale-model study of the effectiveness of highway noise barriers. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 114, n. 4, p. 1947-1954, out. 2003.
- CIANFRINI, Claudio; CORCIONE, Massimo; FONTANA, Lucia. Experimental verification of the acoustic performance of diffusive roadside noise barriers. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 68, p. 1357-1372, 2003.
- CROMBIE, D. H.; HOTHERSALL, D. C.; CHANDLER-WILDE, S. N. Multiple-edge noise barriers. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 44, p. 353-367, 1995.
- DEFRANCE, J; JEAN, P. Integration of the efficiency of noise barrier caps in a 3D ray tracing method: case of a T-shaped diffracting device. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 64, p. 765-780, 2003.
- DINIZ, Fabiano Belisário. **Impacto ambiental das emissões sonoras de subestações de energia elétrica na cidade de Curitiba**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- DIRECTIVA 2002/49/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 25 de junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente.
- FARINA, Angelo. **Valutazione di impatto acústico ambientale previsionale relativamente alle sorgenti più diffuse**. Seminário: Acustica Ambientale - effetti sull'uomo e pianificazione del territorio. Repubblica di S.Marino, 1998. Disponível em: <<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/107-VIA98.PDF>>. Acesso em: 25 abr. 2009.

- FAULKNER, Gary; BILAWCHUK, Steven. **The myths and realities of traffic noise**. Acoustical Consultants Inc: 2008. Disponível em: <http://www.edmonton.ca/transportation/Myths_and_Realities_of_Traffic_Noise.pdf> Acesso em: 08 jan. 2013.
- FEDERAL PACIFIC TRANSFORMER COMPANY. **Understanding Transformer Noise**. Disponível em: <<http://www.federalpacific.com/literature/drytrans/10transformernoise.pdf>> Acesso em: 30 de abril de 2012.
- FHWA. **Keeping the noise down**: highway traffic noise barriers. Washington: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2001.
- FUJIWARA, K.; ANDO, Y.; MAEKAWA, Z. **Noise control by barriers – part 2**: noise reduction by an absorptive barrier. *Applied Acoustics*, v. 10, p. 167-179, 1977.
- GERGES, Samir Nagi Yousri. **Ruído**: fundamentos e controle. 2. ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Ed. Atlas, 2009.
- GOOGLE EARTH: Image DigitalGlobe. Europa Technologies, 2012. Acesso em: 03 de março de 2013.
- GROM. **SoundPLAN**: user's manual. Disponível em: <www.grom.com.br/downloads/sound_plan/manual_outubro_2005.pdf> Acesso em: 28 de dezembro de 2011.
- GUARATO, Francesco; JAKOBSEN, Lasse; VANDERELST, Dieter; SURLYKKE, Annemarie; HALLAM, John. A method for estimating the orientation of a directional sound source from source directivity and multi-microphone recordings: principles and application. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.129(2), p. 1046-1058, 2011.
- HAN, Ning; QIU, Xiaojun. A study of sound intensity control for active noise barriers. *Applied Acoustics*, Elsevier, v. 68, p. 1297-1306, 2007.
- HART, Carl, R.; LAU, Siu-Kit. Active noise control with linear control source and sensor arrays for a noise barrier. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 331, p. 15-26, 2012.
- HAYEK, Sabih I. Mathematical modeling of absorbent highway noise barriers. *Applied Acoustics*, Elsevier, v. 31, p. 77-100, 1990.
- HENRIQUE, Luís L. **Acústica musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- HORNIKX, Maarten; FORSSÉN, Jens. A scale model study of parallel urban canyons. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 94, p. 265-281, 2008.
- HOROSHENKOV, K. V., HOTHERSALL, D. C., ATTENBOROUGH, K. Porous materials for scale model experiments in outdoor sound propagation. *Journal of Sound and Vibration*: v. 194(5), p. 685-708, 1996.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9613-1**. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. Genève, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9613-2**. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors: General method of calculation. Genève, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10847**. Acoustics – *In-situ* determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types. Genève, 1997.

ISMAIL, M. R.; OLDHAM, D. J. A scale model investigation of sound reflection from building façades. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 66, p. 123-147, set. 2004.

JEON, Jin Yong; RYU, Jong Kwan; KIM, Yong Hee; SATO, Shin-ichi. Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model test. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 70, p. 615-625, 2009.

KANG, Jian. **Urban sound environment**. London and New York: Taylor & Francis, 2007.

KOTZEN, Benz; ENGLISH, Colin. **Environmental noise barriers**. London, New York: E & FN SPON, 1999.

KOYASU, Masaru; YAMASHITA, Mitsuyasu. Scale model experiments on noise reduction by acoustic barrier of a straight line source. **Applied Acoustics**, v. 6, p. 233-242, 1973.

LARANJA, Rafael Antônio Comparsi. **Modelo heurístico modificado de barreiras acústicas para uso em áreas urbanas**. 347 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LEONARD, R. E.; PARR, S. B. Trees as a sound barrier. **Journal of Forestry**, Society of American Foresters, v. 68, N° 5, p. 282-282, 1970.

MAY, D. N.; OSMANS, M. M. Highway noise barriers: new shapes. **Journal of Sound and Vibration**. v. 71, p. 73-101, 1980.

MEDEIROS, E. B.; BITTENCOURT, J. B. P.; ALVIM, A. C.; DUARTE, M. L. M.; CIMINI, C. **Controle de ruído em subestações elétricas: análise e projeto**. Campinas: XVI SNPTEE, 2001.

MONAZZAM, M. R.; LAM, Y. W. Performance of profiled single noise barriers covered with quadratic residue diffusers. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 66, p. 709-730, 2005.

MONAZZAM, M. R.; LAM, Y. W. Performance of T-shape barriers with top surface covered with absorptive quadratic residue diffusers. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 69, p. 93-109, 2008.

MURADALI, A.; FYFE, K. R. Accurate barrier modeling in the presence of atmospheric effects. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 56, p. 157-182, 1999.

MURPHY, E.; KING, E. A. Scenario analysis and noise action planning: modelling the impact of mitigation measures on population exposure. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 72, p. 487-494, 2011.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 70E**. Standard for Electrical Safety in the Workplace. Quincy, United States, 2012.

PICAUT, J.; SIMON, L. A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas (Technical Note). **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 62, p. 327-340, 2001.

PORADA, W. Model measurements on noise screening of line sources by single and double barriers. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 8, p. 271-280, 1975.

PORTAL BRASIL. **Matriz energética**. Disponível em:
<<http://www.brasil.gov.br/cop/panorama/o-que-o-brasil-esta-fazendo/matriz-energetica>> Acesso em: 29 de maio de 2013.

RADWAN, M. M.; OLDHAM, D. J. The Return Wall as a Traffic Noise Barrier. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 20, p. 169-182, 1987.

SAKUMA, T. **Numerical Analysis of the Additional Attenuation Due to the Tops of Edge Modified Barriers**. Rio de Janeiro: INTERNOISE, 2005.

SCHRÖDER, Dirk; SVENSSON, U. Peter; VORLÄNDER, Michael. Open measurements of edge diffraction from a noise barrier scale model. **Building Acoustics**, v. 18, n. 1, 2, p. 47-58, 2011.

SHARLAND, Ian. **Manuale di acustica applicata: l'attenuazione del rumore**. 3. ed. Milano: Ed. Woods Italiana, 1994.

SUH, S. S.; MONGEAU, L.; BOLTON, J. S. **Study of the performance of acoustic barriers for Indiana Toll Roads**. Report n° FHWA/IN/JTRP-2001/20 – School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette.

TSAI, Kang-Ting; LIN, Min-Der; CHEN, Yen-Hua. Noise mapping in urban environments: a Taiwan study. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 70, p. 964-972, 2009.

WATTS, G. R.; GODFREY, N. S. Effects on roadside noise levels of sound absorptive materials in noise barriers. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 58, p. 385-402, 1999.

WATTS, G. R.; MORGAN, P. A. Acoustic performance of an interference type noise barrier profile. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 1-16, 1996.

ZHANG, Xuetao. The directivity of railway noise at different speeds. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier, v. 329, p. 5273-5288, 2010.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Dados de nível de pressão sonora – pátio dos transformadores

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Freq. [Hz]	NPS [dB]																							
50	72,3	70,6	70,1	68,0	68,6	66,9	64,6	64,7	66,3	66,4	66,1	67,1	67,6	70,7	70,8	71,4	70,9	73,3	74,7	77,8	71,6	70,5	76,9	76,9
63	72,1	69,8	65,9	70,0	66,8	63,2	62,0	60,5	62,5	63,9	64,3	65,0	65,6	66,3	68,4	68,9	70,7	74,2	73,1	74,0	70,3	69,8	71,9	72,1
80	71,3	70,0	69,6	68,4	68,1	64,6	64,7	61,4	64,5	66,8	65,4	66,1	66,9	69,6	70,0	71,7	71,5	72,3	75,4	76,4	73,7	73,3	73,1	74,6
100	73,8	71,6	67,8	68,0	67,6	63,2	65,3	59,9	65,6	67,1	65,0	65,7	66,6	70,4	70,6	71,1	73,1	71,6	73,8	75,5	76,0	73,1	75,0	75,4
125	81,2	79,5	75,3	71,9	68,3	63,0	71,5	62,2	70,6	76,1	67,3	73,2	66,4	77,0	77,6	70,3	79,5	69,6	79,8	84,2	79,4	75,8	84,6	85,6
160	69,1	67,2	62,9	64,4	64,0	63,8	61,3	57,7	62,4	62,9	62,9	61,6	65,4	66,0	67,1	67,7	68,3	68,8	72,0	71,9	69,3	69,0	69,2	69,5
200	69,0	65,6	61,5	62,3	65,4	63,2	61,6	54,7	58,8	59,1	58,3	61,2	63,1	63,9	64,8	65,7	66,2	66,9	71,9	71,9	67,6	67,4	68,7	70,6
250	71,6	67,4	62,8	66,2	73,8	65,5	70,5	57,2	55,1	56,5	59,4	61,3	69,4	72,0	68,6	75,7	63,6	71,4	75,6	78,2	72,7	69,0	75,5	77,7
315	70,4	81,6	75,2	77,9	62,8	80,1	84,6	74,7	65,9	62,2	67,2	72,4	69,0	67,3	69,8	75,5	67,2	72,7	75,2	79,0	73,3	65,0	73,2	73,5
400	70,6	85,1	79,1	82,0	65,2	84,2	88,4	78,7	72,1	67,7	73,2	75,6	75,8	77,2	74,6	78,9	75,8	77,3	75,8	75,9	75,0	70,4	73,9	71,7
500	80,1	68,0	60,9	68,5	70,3	68,9	67,9	63,8	77,2	80,7	76,2	83,8	88,8	88,5	82,1	84,1	81,5	79,3	73,5	77,9	78,2	71,1	77,4	79,2
630	65,7	63,6	61,3	58,8	64,0	63,0	63,6	61,3	59,7	59,4	63,3	62,5	66,1	69,7	62,7	68,5	64,1	67,2	66,2	64,5	62,8	60,6	63,7	64,3
800	65,2	69,4	61,0	58,0	62,0	67,1	67,5	62,9	56,5	56,8	57,1	64,0	66,4	66,5	63,6	69,7	65,0	64,6	66,2	64,7	61,8	62,5	60,7	66,5
1000	67,2	66,4	60,0	59,7	60,0	64,2	66,8	56,8	63,8	63,3	57,1	59,8	64,4	63,2	63,9	64,6	64,8	61,9	63,1	64,7	66,3	66,0	61,7	64,1
1250	65,8	64,5	59,0	60,1	58,3	62,4	65,9	58,6	61,9	58,2	58,5	57,7	60,8	62,8	60,0	61,9	58,8	61,3	63,8	62,1	60,7	61,3	62,9	60,7
1600	62,9	61,4	60,6	64,4	62,9	61,2	62,9	61,7	63,5	61,3	61,2	66,1	68,4	69,7	69,1	69,8	64,5	69,0	66,5	64,0	64,1	57,1	58,3	59,7
2000	61,4	58,6	54,9	58,2	54,7	55,5	58,2	57,5	51,8	51,0	56,4	64,1	68,4	58,0	55,6	61,3	60,6	63,6	61,4	58,1	58,4	57,3	57,7	56,9
2500	53,9	53,4	49,1	50,7	50,6	52,5	53,3	51,1	48,7	52,8	51,3	53,2	60,1	54,7	51,5	54,2	54,6	54,0	55,9	54,3	54,1	51,0	50,1	51,6
3150	52,3	49,3	50,4	49,9	46,1	49,2	50,4	45,2	46,1	46,9	46,8	49,7	49,9	51,4	47,5	47,5	49,7	51,4	51,5	49,8	49,4	47,8	48,8	49,0
4000	48,7	46,3	43,7	45,4	46,3	50,0	51,9	45,1	42,4	43,8	43,1	46,8	50,1	46,7	46,5	46,5	49,3	46,9	49,6	48,4	47,7	46,9	45,8	47,5
5000	47,4	51,5	44,5	45,7	46,1	49,2	50,8	43,4	45,4	43,5	42,0	44,4	47,0	47,8	45,3	46,4	45,8	47,5	50,0	47,1	46,1	44,5	44,1	46,9
6300	48,4	45,9	40,6	42,9	41,5	45,3	48,8	44,2	43,5	38,9	45,0	45,6	46,3	47,9	44,9	44,0	48,1	47,1	46,2	48,3	45,8	45,2	43,0	45,5
8000	47,5	43,7	39,5	40,7	39,7	44,8	45,8	43,7	44,9	38,2	42,2	47,3	46,1	42,3	42,8	39,1	51,9	43,1	45,0	45,6	44,6	42,6	41,4	45,0
10000	43,4	44,6	39,9	39,3	38,9	44,2	45,0	39,7	41,0	36,0	48,9	45,4	44,6	40,7	43,0	37,0	42,5	40,9	43,8	43,2	41,3	40,8	39,4	43,2

Tabela A.2 – Direcionalidade da fonte – pátio dos transformadores

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Freq. [Hz]	Direcionalidade																							
50	-5,5	-7,2	-7,7	-9,8	-9,2	-10,9	-13,2	-13,1	-11,5	-11,4	-11,7	-10,7	-10,2	-7,1	-7,0	-6,4	-6,9	-4,5	-3,1	0,0	-6,2	-7,3	-0,9	-0,9
63	-2,1	-4,4	-8,3	-4,2	-7,4	-11,0	-12,2	-13,7	-11,7	-10,3	-9,9	-9,2	-8,6	-7,9	-5,8	-5,3	-3,5	0,0	-1,1	-0,2	-3,9	-4,4	-2,3	-2,1
80	-5,1	-6,4	-6,8	-8,0	-8,3	-11,8	-11,7	-15,0	-11,9	-9,6	-11,0	-10,3	-9,5	-6,8	-6,4	-4,7	-4,9	-4,1	-1,0	0,0	-2,7	-3,1	-3,3	-1,8
100	-2,2	-4,4	-8,2	-8,0	-8,4	-12,8	-10,7	-16,1	-10,4	-8,9	-11,0	-10,3	-9,4	-5,6	-5,4	-4,9	-2,9	-4,4	-2,2	-0,5	0,0	-2,9	-1,0	-0,6
125	-4,4	-6,1	-10,3	-13,7	-17,3	-22,6	-14,1	-23,4	-15,0	-9,5	-18,3	-12,4	-19,2	-8,6	-8,0	-15,3	-6,1	-16,0	-5,8	-1,4	-6,2	-9,8	-1,0	0,0
160	-2,9	-4,8	-9,1	-7,6	-8,0	-8,2	-10,7	-14,3	-9,6	-9,1	-9,1	-10,4	-6,6	-6,0	-4,9	-4,3	-3,7	-3,2	0,0	-0,1	-2,7	-3,0	-2,8	-2,5
200	-2,9	-6,3	-10,4	-9,6	-6,5	-8,7	-10,3	-17,2	-13,1	-12,8	-13,6	-10,7	-8,8	-8,0	-7,1	-6,2	-5,7	-5,0	0,0	0,0	-4,3	-4,5	-3,2	-1,3
250	-6,6	-10,8	-15,4	-12,0	-4,4	-12,7	-7,7	-21,0	-23,1	-21,7	-18,8	-16,9	-8,8	-6,2	-9,6	-2,5	-14,6	-6,8	-2,6	0,0	-5,5	-9,2	-2,7	-0,5
315	-14,2	-3,0	-9,4	-6,7	-21,8	-4,5	0,0	-9,9	-18,7	-22,4	-17,4	-12,2	-15,6	-17,3	-14,8	-9,1	-17,4	-11,9	-9,4	-5,6	-11,3	-19,6	-11,4	-11,1
400	-17,8	-3,3	-9,3	-6,4	-23,2	-4,2	0,0	-9,7	-16,3	-20,7	-15,2	-12,8	-12,6	-11,2	-13,8	-9,5	-12,6	-11,1	-12,6	-12,5	-13,4	-18,0	-14,5	-16,7
500	-8,7	-20,8	-27,9	-20,3	-18,5	-19,9	-20,9	-25,0	-11,6	-8,1	-12,6	-5,0	0,0	-0,3	-6,7	-4,7	-7,3	-9,5	-15,3	-10,9	-10,6	-17,7	-11,4	-9,6
630	-4,0	-6,1	-8,4	-10,9	-5,7	-6,7	-6,1	-8,4	-10,0	-10,3	-6,4	-7,2	-3,6	0,0	-7,0	-1,2	-5,6	-2,5	-3,5	-5,2	-6,9	-9,1	-6,0	-5,4
800	-4,5	-0,3	-8,7	-11,7	-7,7	-2,6	-2,2	-6,8	-13,2	-12,9	-12,6	-5,7	-3,3	-3,2	-6,1	0,0	-4,7	-5,1	-3,5	-5,0	-7,9	-7,2	-9,0	-3,2
1000	0,0	-0,8	-7,2	-7,5	-7,2	-3,0	-0,4	-10,4	-3,4	-3,9	-10,1	-7,4	-2,8	-4,0	-3,3	-2,6	-2,4	-5,3	-4,1	-2,5	-0,9	-1,2	-5,5	-3,1
1250	-0,1	-1,4	-6,9	-5,8	-7,6	-3,5	0,0	-7,3	-4,0	-7,7	-7,4	-8,2	-5,1	-3,1	-5,9	-4,0	-7,1	-4,6	-2,1	-3,8	-5,2	-4,6	-3,0	-5,2
1600	-6,9	-8,4	-9,2	-5,4	-6,9	-8,6	-6,9	-8,1	-6,3	-8,5	-8,6	-3,7	-1,4	-0,1	-0,7	0,0	-5,3	-0,8	-3,3	-5,8	-5,7	-12,7	-11,5	-10,1
2000	-7,0	-9,8	-13,5	-10,2	-13,7	-12,9	-10,2	-10,9	-16,6	-17,4	-12,0	-4,3	0,0	-10,4	-12,8	-7,1	-7,8	-4,8	-7,0	-10,3	-10,0	-11,1	-10,7	-11,5
2500	-6,2	-6,7	-11,0	-9,4	-9,5	-7,6	-6,8	-9,0	-11,4	-7,3	-8,8	-6,9	0,0	-5,4	-8,6	-5,9	-5,5	-6,1	-4,2	-5,8	-6,0	-9,1	-10,0	-8,5
3150	0,0	-3,0	-1,9	-2,4	-6,2	-3,1	-1,9	-7,1	-6,2	-5,4	-5,5	-2,6	-2,4	-0,9	-4,8	-4,8	-2,6	-0,9	-0,8	-2,5	-2,9	-4,5	-3,5	-3,3
4000	-3,2	-5,6	-8,2	-6,5	-5,6	-1,9	0,0	-6,8	-9,5	-8,1	-8,8	-5,1	-1,8	-5,2	-5,4	-5,4	-2,6	-5,0	-2,3	-3,5	-4,2	-5,0	-6,1	-4,4
5000	-4,1	0,0	-7,0	-5,8	-5,4	-2,3	-0,7	-8,1	-6,1	-8,0	-9,5	-7,1	-4,5	-3,7	-6,2	-5,1	-5,7	-4,0	-1,5	-4,4	-5,4	-7,0	-7,4	-4,6
6300	-0,4	-2,9	-8,2	-5,9	-7,3	-3,5	0,0	-4,6	-5,3	-9,9	-3,8	-3,2	-2,5	-0,9	-3,9	-4,8	-0,7	-1,7	-2,6	-0,5	-3,0	-3,6	-5,8	-3,3
8000	-4,4	-8,2	-12,4	-11,2	-12,2	-7,1	-6,1	-8,2	-7,0	-13,7	-9,7	-4,6	-5,8	-9,6	-9,1	-12,8	0,0	-8,8	-6,9	-6,3	-7,3	-9,3	-10,5	-6,9
10000	-5,5	-4,3	-9,0	-9,6	-10,0	-4,7	-3,9	-9,2	-7,9	-12,9	0,0	-3,5	-4,3	-8,2	-5,9	-11,9	-6,4	-8,0	-5,1	-5,7	-7,6	-8,1	-9,5	-5,7

Tabela A.3 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P25 – calibração da potência da fonte sonora

Freq. [Hz] situação real	Direção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NPS P25 [dB]
	Freq. [Hz]	NPS [dB] no ponto P25																								
50	250	67,0	65,8	67,4	67,9	67,2	67,1	66,8	66,1	66,1	66,7	63,1	63,1	62,7	59,2	59,5	60,3	63,1	64,2	64,6	66,1	63,3	63,3	63,8	66,4	79,0
63	315	66,5	66,3	64,6	66,8	65,7	65,7	61,8	65,0	62,9	62,1	61,2	61,2	58,7	58,1	58,8	59,3	61,0	62,2	63,0	62,3	62,2	59,3	63,8	63,8	77,1
80	400	61,0	61,9	58,8	59,7	61,2	61,6	60,6	57,7	56,8	57,7	57,2	57,2	58,1	54,2	54,9	58,0	56,8	56,3	56,5	58,7	56,2	55,5	59,0	59,2	72,4
100	500	50,1	52,9	53,8	54,8	51,4	55,3	55,3	51,3	52,9	50,6	51,9	51,9	50,1	50,4	49,6	53,0	50,1	52,3	50,0	51,7	49,3	50,0	53,0	55,0	66,2
125	630	59,0	58,2	58,0	62,5	59,7	60,5	65,2	61,9	60,0	59,2	52,2	52,3	59,8	59,3	53,3	57,3	60,1	59,3	59,7	61,2	56,8	57,1	62,2	64,4	74,0
160	800	44,6	44,7	43,8	45,4	44,9	45,1	48,3	43,8	43,4	41,7	37,8	40,5	42,9	42,7	39,0	40,2	42,1	41,4	41,8	42,9	38,7	40,5	44,2	45,2	57,2
200	1000	46,9	47,8	46,9	47,4	48,5	48,7	47,7	45,4	44,8	41,8	39,9	44,0	42,3	42,0	38,7	39,6	39,8	38,7	40,9	41,8	38,2	39,2	39,2	43,0	58,3
250	1250	52,5	53,1	52,7	58,0	57,5	58,6	59,4	53,3	56,7	51,0	48,8	49,7	48,9	46,7	44,0	43,2	45,2	45,4	41,0	43,7	43,4	41,9	45,6	48,2	66,8
315	1600	58,7	60,7	59,7	64,9	64,3	65,5	66,3	61,5	65,0	57,9	57,6	57,6	55,2	53,5	52,8	46,1	51,9	48,4	46,3	52,1	49,8	50,3	50,8	54,6	73,9
400	2000	50,8	51,4	51,5	53,6	54,1	54,0	51,4	51,1	50,1	47,2	45,3	45,6	45,0	45,0	42,6	37,5	38,9	43,2	42,1	39,4	40,3	39,5	46,3	47,3	62,8
500	2500	47,1	40,7	40,2	44,5	44,2	54,0	45,0	43,0	39,6	39,0	37,5	36,2	35,6	41,9	34,1	25,0	33,8	45,9	42,3	40,3	34,3	32,1	34,6	43,9	57,6
630	3150	44,0	43,1	47,8	44,1	43,9	53,0	40,5	39,9	36,7	36,1	38,2	38,0	31,6	41,5	30,6	28,2	31,2	35,7	33,7	35,8	37,5	32,0	40,6	37,5	56,5
800	4000	41,2	46,2	46,1	46,9	46,7	55,8	44,9	42,4	38,8	35,8	35,5	35,5	34,0	30,8	30,5	34,3	29,8	31,1	34,9	34,5	41,0	32,9	42,5	36,0	58,4
1000	5000	30,9	34,9	37,4	44,0	46,2	52,6	43,1	40,4	40,1	34,1	42,2	42,0	28,6	34,4	29,1	33,6	28,4	35,6	32,3	32,9	34,4	34,7	39,4	32,0	55,6
1250	6300	33,1	32,4	32,4	30,5	37,5	39,0	36,6	36,7	41,4	35,1	36,4	36,3	33,3	37,0	29,8	41,6	28,0	31,7	30,6	38,8	38,0	32,0	33,3	32,1	50,0
1600	8000	27,8	32,7	31,3	32,3	42,2	35,9	38,4	38,2	37,6	38,2	35,5	34,0	27,1	38,8	20,0	36,1	39,0	31,2	35,5	32,9	37,1	20,0	29,6	35,6	49,8
2000	10000	20,0	29,1	32,9	20,0	43,3	39,0	35,8	35,6	33,6	28,4	44,6	20,0	20,0	36,9	20,0	33,9	34,8	30,8	35,6	33,0	33,2	28,6	20,0	34,3	49,8

Tabela A.4 – Dados de nível de pressão sonora – modelo em escala reduzida

Frea. [Hz] situação real	Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Freq. [Hz]	NPS [dB]																							
50	250	71,0	72,1	72,1	71,4	70,1	71,8	69,7	68,9	71,3	70,8	70,3	69,2	69,9	69,0	71,0	71,9	70,1	71,9	72,4	73,1	71,4	70,1	73,2	73,5
63	315	78,0	76,8	75,2	74,7	73,7	75,9	75,9	75,4	74,4	75,0	76,1	75,4	76,8	76,5	76,6	77,0	77,9	78,8	79,5	80,1	78,0	78,7	80,3	79,1
80	400	70,0	66,9	64,4	67,8	64,0	64,6	67,0	63,3	64,1	64,5	66,6	65,5	66,4	65,3	66,4	66,8	70,3	72,8	73,4	73,9	74,3	72,1	72,9	72,9
100	500	60,0	60,7	59,4	61,1	55,6	57,0	57,7	58,1	57,0	57,6	58,8	59,8	58,7	59,5	61,0	62,5	60,8	60,4	61,4	62,0	61,4	60,0	61,9	61,1
125	630	70,8	70,9	68,5	69,6	63,4	65,1	67,1	67,3	65,8	67,3	68,6	70,1	67,9	70,8	69,8	70,7	71,1	69,8	71,0	72,7	71,5	71,4	72,7	72,1
160	800	48,1	48,9	46,5	47,1	44,6	45,7	46,0	46,3	45,6	50,4	45,9	47,3	47,8	49,1	48,4	49,7	47,7	48,8	49,2	49,3	49,2	49,1	50,5	49,5
200	1000	48,7	48,0	44,7	44,8	47,2	48,4	48,0	45,5	46,4	46,8	43,8	46,5	48,9	48,6	47,5	49,3	45,6	47,7	49,2	49,0	47,9	49,0	48,8	48,4
250	1250	66,7	57,2	61,1	63,3	64,3	58,0	58,0	55,9	56,4	56,6	55,7	58,7	59,0	59,0	67,6	68,2	57,1	58,1	70,1	69,2	68,2	66,1	68,0	56,2
315	1600	70,7	76,8	67,4	68,2	66,0	79,6	81,9	68,5	69,5	66,7	69,0	70,6	73,8	71,1	70,7	70,5	69,1	72,4	73,4	72,2	70,2	70,7	72,4	69,9
400	2000	64,6	61,2	50,2	51,8	53,9	66,1	69,7	62,9	53,8	56,8	54,9	56,5	58,9	56,3	54,9	61,8	61,1	64,1	56,2	55,6	56,8	54,9	56,0	54,0
500	2500	63,6	56,9	56,3	52,4	59,5	58,5	52,9	53,1	58,2	70,6	58,5	68,9	66,6	65,6	62,3	58,7	64,3	53,5	64,9	52,7	64,9	64,4	60,5	63,8
630	3150	47,9	45,7	47,9	47,9	47,9	49,0	48,6	45,5	42,7	48,1	48,1	47,4	51,6	48,7	47,5	49,3	48,2	48,4	48,7	49,1	48,3	47,8	48,0	48,5
800	4000	54,0	51,4	47,9	50,9	50,8	52,5	51,4	49,6	49,6	50,0	55,5	51,0	53,9	51,9	54,7	51,4	52,0	51,7	52,0	52,1	50,4	50,9	50,2	51,5
1000	5000	48,5	48,8	46,8	49,3	46,7	49,7	49,5	45,6	47,3	47,4	49,3	48,1	48,5	48,5	52,2	48,7	48,2	49,1	49,9	51,1	47,2	48,6	48,6	50,2
1250	6300	36,9	36,0	35,6	36,9	37,4	37,9	38,0	39,6	36,8	37,5	37,3	38,4	39,4	40,4	39,9	39,5	39,1	42,6	41,8	45,1	43,1	41,3	42,4	45,0
1600	8000	46,0	45,5	44,2	43,1	43,7	45,6	46,8	44,6	45,9	43,0	44,2	43,7	44,3	45,9	42,9	43,4	45,4	42,1	46,8	47,8	45,2	38,8	41,4	44,8
2000	10000	49,6	48,6	48,7	46,9	46,6	48,3	49,4	47,4	49,0	46,3	49,7	49,2	48,2	47,4	46,2	44,9	49,2	45,7	44,4	43,4	44,9	42,0	44,8	48,0

Tabela A.5 – Direcionalidade da fonte – modelo em escala reduzida

Frea. [Hz] situação real	Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Freq. [Hz]	Direcionalidade																							
50	250	-2,5	-1,4	-1,4	-2,1	-3,4	-1,7	-3,8	-4,6	-2,2	-2,7	-3,2	-4,3	-3,6	-4,5	-2,5	-1,6	-3,4	-1,6	-1,1	-0,4	-2,1	-3,4	-0,3	0,0
63	315	-2,3	-3,5	-5,1	-5,6	-6,6	-4,4	-4,4	-4,9	-5,9	-5,3	-4,2	-4,9	-3,5	-3,8	-3,7	-3,3	-2,4	-1,5	-0,8	-0,2	-2,3	-1,6	0,0	-1,2
80	400	-4,3	-7,4	-9,9	-6,5	-10,3	-9,7	-7,3	-11,0	-10,2	-9,8	-7,7	-8,8	-7,9	-9,0	-7,9	-7,5	-4,0	-1,5	-0,9	-0,4	0,0	-2,2	-1,4	-1,4
100	500	-2,5	-1,8	-3,1	-1,4	-6,9	-5,5	-4,8	-4,4	-5,5	-4,9	-3,7	-2,7	-3,8	-3,0	-1,5	0,0	-1,7	-2,1	-1,1	-0,5	-1,1	-2,5	-0,6	-1,4
125	630	-1,9	-1,8	-4,2	-3,1	-9,3	-7,6	-5,6	-5,4	-6,9	-5,4	-4,1	-2,6	-4,8	-1,9	-2,9	-2,0	-1,6	-2,9	-1,7	0,0	-1,2	-1,3	0,0	-0,6
160	800	-2,4	-1,6	-4,0	-3,4	-5,9	-4,8	-4,5	-4,2	-4,9	-0,1	-4,6	-3,2	-2,7	-1,4	-2,1	-0,8	-2,8	-1,7	-1,3	-1,2	-1,3	-1,4	0,0	-1,0
200	1000	-0,6	-1,3	-4,6	-4,5	-2,1	-0,9	-1,3	-3,8	-2,9	-2,5	-5,5	-2,8	-0,4	-0,7	-1,8	0,0	-3,7	-1,6	-0,1	-0,3	-1,4	-0,3	-0,5	-0,9
250	1250	-3,4	-12,9	-9,0	-6,8	-5,8	-12,1	-12,1	-14,2	-13,7	-13,5	-14,4	-11,4	-11,1	-11,1	-2,5	-1,9	-13,0	-12,0	0,0	-0,9	-1,9	-4,0	-2,1	-13,9
315	1600	-11,2	-5,1	-14,5	-13,7	-15,9	-2,3	0,0	-13,4	-12,4	-15,2	-12,9	-11,3	-8,1	-10,8	-11,2	-11,4	-12,8	-9,5	-8,5	-9,7	-11,7	-11,2	-9,5	-12,0
400	2000	-5,1	-8,5	-19,5	-17,9	-15,8	-3,6	0,0	-6,8	-15,9	-12,9	-14,8	-13,2	-10,8	-13,4	-14,8	-7,9	-8,6	-5,6	-13,5	-14,1	-12,9	-14,8	-13,7	-15,7
500	2500	-7,0	-13,7	-14,3	-18,2	-11,1	-12,1	-17,7	-17,5	-12,4	0,0	-12,1	-1,7	-4,0	-5,0	-8,3	-11,9	-6,3	-17,1	-5,7	-17,9	-5,7	-6,2	-10,1	-6,8
630	3150	-3,7	-5,9	-3,7	-3,7	-3,7	-2,6	-3,0	-6,1	-8,9	-3,5	-3,5	-4,2	0,0	-2,9	-4,1	-2,3	-3,4	-3,2	-2,9	-2,5	-3,3	-3,8	-3,6	-3,1
800	4000	-1,5	-4,1	-7,6	-4,6	-4,7	-3,0	-4,1	-5,9	-5,9	-5,5	0,0	-4,5	-1,6	-3,6	-0,8	-4,1	-3,5	-3,8	-3,5	-3,4	-5,1	-4,6	-5,3	-4,0
1000	5000	-3,7	-3,4	-5,4	-2,9	-5,5	-2,5	-2,7	-6,6	-4,9	-4,8	-2,9	-4,1	-3,7	-3,7	0,0	-3,5	-4,0	-3,1	-2,3	-1,1	-5,0	-3,6	-3,6	-2,0
1250	6300	-8,2	-9,1	-9,5	-8,2	-7,7	-7,2	-7,1	-5,5	-8,3	-7,6	-7,8	-6,7	-5,7	-4,7	-5,2	-5,6	-6,0	-2,5	-3,3	0,0	-2,0	-3,8	-2,7	-0,1
1600	8000	-1,8	-2,3	-3,6	-4,7	-4,1	-2,2	-1,0	-3,2	-1,9	-4,8	-3,6	-4,1	-3,5	-1,9	-4,9	-4,4	-2,4	-5,7	-1,0	0,0	-2,6	-9,0	-6,4	-3,0
2000	10000	-0,1	-1,1	-1,0	-2,8	-3,1	-1,4	-0,3	-2,3	-0,7	-3,4	0,0	-0,5	-1,5	-2,3	-3,5	-4,8	-0,5	-4,0	-5,3	-6,3	-4,8	-7,7	-4,9	-1,7

Tabela A.6 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P26 – modelo em escala reduzida sem barreira acústica

Freq. [Hz] situação real	Direção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NPS P26 [dB]
	Freq. [Hz]	NPS [dB] no ponto P26																								
50	250	71,2	69,9	70,1	70,7	70,9	71,0	68,3	65,6	66,5	66,5	64,5	64,1	62,4	65,6	65,8	67,9	67,1	67,9	66,3	68,0	65,7	65,1	69,2	69,8	81,9
63	315	75,2	74,7	74,4	74,5	73,3	72,4	71,6	70,1	71,1	70,7	68,9	68,7	64,8	69,7	69,2	69,5	70,9	72,8	71,6	70,0	69,6	71,0	73,9	74,9	85,8
80	400	64,9	65,0	62,6	63,9	63,7	65,0	64,5	63,7	61,1	58,9	59,2	59,0	58,4	60,5	59,9	62,4	60,4	61,4	61,2	59,3	60,0	61,8	64,0	66,4	76,4
100	500	56,5	59,6	58,6	59,7	56,2	61,2	61,7	55,1	55,1	52,5	50,8	51,9	52,2	51,9	54,4	56,4	60,3	52,0	53,0	55,3	56,5	54,7	57,2	58,2	70,8
125	630	65,6	69,8	68,1	66,3	65,7	65,1	70,0	65,5	65,5	61,9	58,1	61,5	62,8	61,3	65,5	63,4	62,7	60,5	63,1	66,0	65,7	60,4	66,6	66,5	79,2
160	800	44,6	47,4	45,1	44,6	46,1	45,2	45,9	41,5	42,5	38,3	37,3	39,2	40,5	38,8	41,1	41,5	40,1	38,8	39,6	42,4	42,5	39,3	43,5	44,5	56,8
200	1000	43,4	44,5	42,5	42,9	44,7	44,8	43,5	40,5	37,4	33,7	36,9	37,7	36,5	35,2	35,5	36,7	34,0	32,4	37,3	36,1	36,8	38,1	37,2	41,2	54,1
250	1250	45,6	48,9	48,2	51,4	49,3	48,9	50,8	47,2	43,0	40,0	39,1	35,5	40,0	37,2	34,5	39,6	35,0	35,4	39,8	36,4	37,7	36,5	42,1	44,1	59,0
315	1600	58,3	61,4	60,5	63,4	60,7	59,6	63,0	58,2	55,2	51,2	51,4	48,3	52,4	49,9	45,6	48,9	48,3	48,6	54,1	49,9	50,5	44,9	55,0	57,1	71,0
400	2000	50,7	48,0	48,4	50,6	48,9	48,8	47,5	45,1	41,6	42,4	38,6	40,2	39,1	38,2	31,6	38,8	34,5	35,9	36,8	37,6	37,0	41,5	43,2	45,7	58,9
500	2500	43,7	40,0	39,3	40,9	44,4	40,3	39,2	37,3	34,2	32,7	33,1	36,7	32,7	30,2	32,7	31,7	29,5	33,4	32,4	33,3	34,0	36,5	40,1	36,1	51,8
630	3150	50,0	44,7	45,1	45,3	42,6	40,5	41,3	40,2	36,4	34,4	36,9	38,6	35,1	36,4	33,5	31,1	31,2	33,6	33,8	33,5	38,1	39,1	40,9	42,4	55,2
800	4000	43,9	46,1	46,6	48,7	45,7	42,2	42,2	39,4	36,1	35,6	33,1	37,1	31,6	31,2	31,5	29,4	29,1	30,7	31,5	32,5	33,4	43,2	35,0	38,9	55,1
1000	5000	38,1	40,6	42,1	45,9	43,9	38,2	39,3	37,6	35,1	34,3	30,9	36,2	41,9	32,0	33,0	29,5	27,8	29,3	34,4	33,4	38,2	31,1	32,6	38,6	52,4
1250	6300	36,7	29,9	29,3	35,6	34,1	30,9	33,3	40,5	35,4	36,4	37,1	33,1	30,6	34,3	38,6	20,0	27,6	32,7	28,0	39,0	31,4	31,7	38,2	41,1	49,4
1600	8000	31,7	30,6	32,3	39,0	33,1	29,6	44,0	36,9	34,5	34,6	30,1	33,9	28,5	28,0	34,3	34,6	34,4	28,3	20,0	32,2	27,8	27,0	27,6	47,6	51,0
2000	10000	38,7	37,5	34,1	46,7	35,1	38,5	40,4	34,4	31,9	34,1	33,8	36,4	20,0	31,0	33,7	40,5	34,5	27,8	31,8	33,6	29,0	29,0	29,8	36,2	51,0

Tabela A.7 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P27 – modelo em escala reduzida sem barreira acústica

Freq. [Hz] situação real	Direção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NPS P27 [dB]
	Freq. [Hz]	NPS [dB] no ponto P27																								
50	250	67,3	67,2	68,0	67,6	67,5	66,4	65,3	64,1	65,3	63,3	61,7	60,8	60,6	61,8	61,7	63,3	64,3	64,8	65,5	64,5	63,0	61,6	66,9	66,7	78,9
63	315	73,2	72,7	71,7	71,6	72,0	70,2	68,3	66,9	68,8	67,9	66,2	65,1	67,3	67,1	65,7	68,7	68,9	68,6	68,9	69,4	64,9	66,0	71,7	71,5	83,4
80	400	61,5	63,3	59,5	62,8	60,7	63,2	63,4	61,7	54,6	56,6	56,1	55,8	56,7	56,3	55,9	60,3	57,2	57,7	57,5	58,6	56,7	58,8	60,4	62,1	73,7
100	500	51,1	52,2	53,3	55,5	51,6	55,1	54,4	50,9	50,4	47,5	46,9	47,7	50,7	48,8	50,3	50,4	49,5	49,9	48,0	48,5	54,1	52,2	51,4	55,2	65,6
125	630	57,0	59,3	57,3	62,4	59,2	63,1	64,6	59,4	59,4	56,0	53,3	58,4	57,2	57,3	60,6	59,3	57,5	59,5	57,8	57,3	62,2	59,1	60,6	64,7	73,9
160	800	45,5	46,1	43,9	46,4	44,8	46,3	46,3	42,9	42,2	40,4	39,1	55,9	50,4	41,2	41,9	43,2	40,9	43,9	40,5	41,2	44,2	41,9	43,3	47,3	60,2
200	1000	46,0	47,4	45,4	45,1	47,7	45,6	46,3	41,8	40,4	38,9	38,9	39,5	42,9	40,8	37,7	42,0	37,7	38,9	37,5	37,1	38,3	39,8	39,4	44,4	56,8
250	1250	48,4	53,3	50,0	52,9	51,4	50,9	52,9	47,3	45,3	42,8	41,8	40,0	41,7	40,7	36,5	42,6	38,2	41,8	39,5	38,8	40,0	41,9	44,2	44,8	61,3
315	1600	55,9	60,3	58,4	60,3	58,2	58,6	60,3	54,7	52,3	49,6	47,3	46,5	47,0	47,0	44,0	50,4	45,9	47,4	48,2	46,2	45,5	47,7	51,0	51,4	68,5
400	2000	48,2	47,5	47,0	48,7	48,4	45,3	44,9	42,2	42,3	38,8	36,3	39,8	40,7	38,9	32,6	38,5	38,0	37,3	35,7	36,7	36,5	38,4	41,1	45,5	57,4
500	2500	46,8	45,2	46,9	47,0	48,4	47,6	47,5	45,5	41,2	39,3	39,6	52,7	39,9	43,9	40,9	38,6	41,4	42,6	43,4	41,3	41,0	38,9	43,3	42,8	59,0
630	3150	46,2	44,0	47,3	45,0	43,8	45,6	43,4	41,8	38,2	39,7	34,8	52,7	35,2	32,6	31,5	32,6	32,4	36,9	32,6	36,1	40,2	50,4	39,7	42,5	57,9
800	4000	48,7	49,4	54,7	52,7	47,3	46,5	46,2	44,8	40,2	41,5	48,3	40,5	40,1	33,8	33,8	34,0	41,2	52,4	34,1	40,7	41,4	36,9	41,0	41,6	60,7
1000	5000	44,4	45,9	48,5	52,0	52,3	46,2	44,2	46,7	41,3	40,6	37,3	39,9	37,6	39,5	33,1	26,0	35,9	41,1	41,0	39,3	45,1	35,0	42,3	42,8	58,7
1250	6300	38,0	38,9	36,2	43,4	39,9	40,6	42,2	49,5	39,5	46,7	38,8	41,2	34,0	42,4	41,6	38,6	43,9	40,7	35,8	42,5	45,2	33,8	36,6	38,6	55,9
1600	8000	26,0	33,0	36,2	44,6	43,6	41,6	42,7	45,5	40,1	43,2	36,0	37,5	35,1	34,8	44,0	47,8	37,3	37,8	37,2	37,6	35,6	41,5	51,3	35,5	56,4
2000	10000	37,3	36,4	34,0	44,9	43,3	42,4	37,6	39,9	41,4	40,9	40,4	26,0	43,5	26,0	41,6	37,4	26,0	26,0	33,8	34,6	26,0	36,0	42,3	40,3	53,3

Tabela A.8 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P28 – modelo em escala reduzida sem barreira acústica

Freq. [Hz] situação real	Direção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NPS P28 [dB]
	Freq. [Hz]	NPS [dB] no ponto P28																								
50	250	66,5	65,0	65,6	65,2	67,0	65,7	63,6	61,1	63,4	61,7	62,6	58,1	62,4	60,8	60,8	62,2	60,5	59,8	63,6	62,5	60,9	62,8	63,4	65,1	77,3
63	315	70,3	67,7	68,5	69,6	67,7	69,2	67,4	63,7	66,8	65,3	63,1	58,0	60,5	61,4	65,2	66,8	64,6	64,6	66,4	68,0	66,3	67,7	67,3	70,4	80,8
80	400	56,6	60,1	59,4	61,4	58,3	58,8	58,4	58,2	56,4	53,9	53,2	52,1	54,7	52,9	56,1	57,5	55,3	54,9	53,9	55,5	56,7	56,1	57,1	60,8	71,1
100	500	49,3	53,0	50,3	52,3	49,9	51,2	51,8	48,2	47,2	46,1	46,0	46,8	46,4	47,4	46,9	47,4	47,7	47,4	46,6	47,1	49,9	48,9	53,5	51,0	63,3
125	630	58,2	58,7	57,2	64,4	58,4	57,4	62,3	57,8	57,5	53,8	52,3	55,8	53,9	56,8	57,1	55,8	55,5	56,4	54,4	56,2	55,6	59,7	57,8	58,4	71,8
160	800	48,5	48,7	47,5	49,6	47,3	46,1	47,7	44,5	43,1	42,3	41,3	44,1	43,6	43,6	43,6	42,6	42,6	48,8	42,3	44,0	42,3	44,4	44,4	46,1	59,5
200	1000	44,9	45,3	42,8	43,5	45,0	44,9	43,6	39,6	37,5	37,5	37,0	38,6	47,4	37,5	37,1	37,8	38,7	36,9	35,8	35,9	38,1	37,1	39,1	38,9	55,4
250	1250	45,3	48,8	47,6	49,8	49,5	48,4	49,5	45,5	43,3	39,7	38,8	37,7	37,1	38,1	37,7	39,2	35,8	37,9	38,5	34,8	40,6	39,1	40,7	42,4	58,4
315	1600	51,8	56,2	55,4	56,0	56,7	56,2	53,8	52,9	49,9	45,7	45,9	42,2	43,2	43,7	43,4	44,8	40,2	44,2	44,9	40,8	43,6	45,0	46,8	48,4	65,0
400	2000	52,3	50,0	50,9	50,9	50,3	49,5	49,9	44,4	43,2	43,0	48,0	42,6	44,9	38,3	42,3	39,6	39,1	51,1	38,6	40,5	39,7	41,1	43,0	44,8	61,0
500	2500	38,6	37,5	38,3	39,7	38,9	39,3	37,4	40,4	30,0	53,1	35,2	35,9	45,1	22,0	22,0	22,0	32,8	45,0	38,2	35,4	42,2	34,9	33,5	35,6	55,8
630	3150	49,2	48,6	48,6	55,1	48,4	44,8	45,6	59,4	38,7	45,5	45,7	39,3	54,8	35,0	41,0	35,1	38,4	39,0	40,3	40,9	41,9	51,3	43,5	47,7	63,5
800	4000	48,3	49,5	50,3	49,8	48,8	49,2	45,8	50,7	40,3	41,0	40,6	40,5	56,6	25,0	36,3	34,3	50,1	42,7	35,8	41,8	47,4	48,2	46,2	41,5	61,8
1000	5000	45,1	48,4	49,7	53,7	49,6	48,4	46,4	46,7	40,6	41,7	42,6	48,8	37,6	35,8	40,7	38,5	40,8	43,3	35,6	38,6	36,0	41,6	42,0	40,6	59,6
1250	6300	42,7	38,9	38,5	45,4	45,6	41,3	41,1	47,7	43,4	48,9	40,9	39,1	37,9	41,9	45,6	43,7	37,0	39,0	28,0	40,7	40,0	38,9	38,4	40,7	56,6
1600	8000	34,6	56,7	38,5	45,6	39,5	34,9	34,2	42,8	40,9	39,8	42,7	33,5	38,8	38,3	38,8	41,5	34,5	33,0	24,0	34,8	24,0	24,0	24,0	36,9	58,1
2000	10000	38,6	40,7	46,7	50,8	44,5	41,5	35,6	43,0	37,9	44,5	42,9	36,0	36,4	28,0	39,3	47,5	35,6	28,0	28,0	40,2	28,0	40,9	28,0	37,6	56,2

Tabela A.9 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P26 – modelo em escala reduzida com barreira acústica

Freq. [Hz] situação real	Direção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NPS P26 [dB]
	Freq. [Hz]	NPS [dB] no ponto 26																								
315	63	78,8	77,0	75,7	76,9	76,0	76,9	75,1	71,4	74,2	70,7	70,7	71,4	71,9	73,2	73,1	74,3	73,2	73,6	73,1	72,7	69,2	73,2	76,1	77,2	88,4
400	80	64,5	66,6	64,8	66,6	64,7	65,9	66,8	63,4	62,1	61,0	60,7	61,7	60,5	60,1	59,9	61,4	62,5	60,8	59,5	61,4	61,1	63,1	65,4	67,1	77,5
500	100	60,8	62,4	61,5	61,5	58,4	60,8	60,8	57,1	56,3	55,7	53,5	52,9	52,3	53,2	54,3	56,4	53,5	53,3	53,1	56,3	56,9	55,5	58,7	60,1	71,9
630	125	69,7	73,3	71,8	71,6	67,6	69,9	71,4	66,9	66,7	66,2	64,9	62,6	61,8	64,1	64,6	65,9	64,3	61,4	62,3	65,3	66,9	66,3	69,5	70,6	82,0
800	160	47,4	49,5	47,1	48,8	46,1	46,5	47,4	43,3	42,6	42,8	41,9	40,3	39,1	41,5	41,2	42,2	40,7	38,7	39,3	42,1	44,2	42,7	45,0	46,5	58,5
1000	200	44,4	44,0	43,0	44,8	47,2	46,7	44,7	39,6	39,4	38,0	36,4	36,8	37,8	37,1	38,9	39,4	35,6	34,7	38,7	36,9	40,3	36,5	38,2	40,6	55,4
1250	250	47,7	49,2	49,4	52,9	50,6	50,2	49,8	46,0	40,9	42,4	42,9	40,1	39,7	37,1	36,8	39,0	38,4	38,6	36,7	38,1	36,0	39,4	45,8	45,6	59,9
1600	315	61,5	63,0	62,2	65,0	63,8	60,5	63,7	59,7	54,7	55,5	51,3	53,3	51,2	46,4	47,7	52,0	51,0	47,3	50,2	48,2	49,8	51,3	58,3	59,6	72,7
2000	400	53,8	46,1	48,7	49,2	51,8	47,7	46,5	45,6	44,2	41,5	38,5	39,5	42,9	39,5	35,5	41,8	34,4	40,9	38,2	37,0	39,7	41,6	44,8	48,2	59,9
2500	500	42,5	40,7	43,8	42,7	43,5	44,7	40,1	41,3	37,9	39,4	37,0	38,0	40,1	36,7	35,7	34,5	35,3	37,2	34,3	35,3	37,8	33,1	35,5	35,7	53,5
3150	630	45,2	46,5	45,2	45,7	44,6	45,8	41,3	40,2	39,3	40,3	35,3	38,2	41,8	36,1	36,2	35,8	35,3	37,6	34,5	36,1	40,1	37,8	37,7	41,8	55,4
4000	800	41,9	41,4	45,9	46,7	53,6	43,4	41,8	38,8	37,7	37,6	35,9	36,0	40,4	36,3	37,0	36,4	34,1	36,4	32,7	36,1	36,4	35,1	36,6	41,8	56,7
5000	1000	38,3	41,8	44,5	46,6	43,3	43,7	37,9	38,3	37,0	38,4	33,4	34,7	38,4	36,9	38,1	34,7	35,1	36,6	33,6	36,8	37,3	31,7	32,8	33,6	53,4
6300	1250	35,8	33,0	33,6	41,9	35,0	40,0	35,4	36,0	35,1	40,6	33,0	35,3	39,1	35,5	40,7	35,0	34,8	37,4	33,5	36,4	33,8	32,7	34,4	33,7	50,6
8000	1600	38,1	32,9	43,8	46,5	37,6	40,2	38,1	36,9	35,9	38,6	34,4	34,5	35,9	36,7	37,3	34,3	35,0	35,4	31,9	35,3	33,6	32,2	34,6	34,7	52,0
10000	2000	37,2	35,9	44,1	46,3	37,7	41,3	36,8	33,4	32,7	35,3	39,5	32,4	32,6	39,1	34,8	30,5	31,4	40,2	30,8	34,1	30,3	30,2	32,0	33,6	51,9

Tabela A.10 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P27 – modelo em escala reduzida com barreira acústica

Freq. [Hz] situação real	Direção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NPS P27 [dB]
	Freq. [Hz]	NPS [dB] no ponto P27																								
250	50	49,2	48,5	46,5	47,1	47,8	47,4	47,4	46,1	45,9	45,5	41,2	46,2	45,1	43,8	44,7	47,1	46,1	44,4	47,3	47,5	46,4	46,9	47,4	46,9	60,4
315	63	51,9	53,7	53,0	52,7	49,5	51,0	50,6	48,9	48,6	46,5	42,7	46,0	47,0	48,5	48,4	48,4	48,0	50,1	50,6	50,2	48,6	49,8	49,2	52,0	63,8
400	80	43,2	46,8	46,6	45,6	41,6	45,7	45,5	40,3	42,7	38,6	39,0	39,3	39,1	43,3	39,8	42,8	38,1	39,7	41,1	40,4	42,8	40,1	40,3	43,6	56,5
500	100	39,3	39,0	40,6	39,7	37,6	37,7	39,6	38,7	34,7	34,5	33,3	36,7	34,0	36,9	36,0	38,3	35,1	37,8	35,4	37,5	36,9	36,4	38,8	40,6	51,5
630	125	48,1	48,5	48,4	48,0	41,8	46,1	47,5	44,0	43,4	41,5	39,1	39,3	39,1	42,8	44,6	43,5	44,0	39,5	41,2	44,6	43,1	41,4	46,5	47,5	58,7
800	160	33,3	31,8	31,8	32,9	31,6	31,2	33,0	29,5	31,5	29,1	20,0	30,4	27,3	28,4	28,8	32,9	27,3	20,0	31,9	28,0	31,9	28,6	40,0	30,8	45,6
1000	200	31,4	30,5	32,9	30,3	32,5	30,5	32,8	29,1	30,8	20,0	20,0	30,2	20,0	20,0	27,6	29,5	29,5	20,0	29,1	28,4	30,8	20,0	36,2	20,0	43,7
1250	250	30,8	29,1	32,9	30,4	30,3	31,0	32,8	36,9	29,3	20,0	20,0	20,0	20,0	29,1	20,0	20,0	38,6	20,0	20,0	29,3	20,0	27,3	34,9	20,0	44,6
1600	315	40,5	39,7	41,1	40,1	38,3	39,9	40,6	38,5	35,6	33,6	31,2	30,9	30,4	29,5	29,3	30,0	38,0	20,0	29,9	31,9	32,1	32,2	35,6	29,9	50,3
2000	400	31,6	29,0	20,0	30,0	28,4	28,4	30,5	40,6	35,7	28,4	20,0	20,0	27,1	20,0	28,4	20,0	27,0	20,0	20,0	32,9	20,0	27,3	27,6	20,0	44,4
2500	500	31,3	29,8	33,0	32,0	20,0	30,4	32,1	34,5	29,6	28,2	20,0	33,1	30,0	20,0	29,0	28,6	28,6	30,0	36,8	33,5	20,0	29,6	28,2	43,4	47,0
3150	630	32,7	20,0	30,2	33,3	20,0	30,2	33,6	31,1	31,2	31,2	20,0	37,4	20,0	20,0	30,8	20,0	33,1	20,0	34,4	34,0	20,0	32,0	28,4	20,0	44,7
4000	800	33,3	28,0	33,3	36,8	20,0	33,7	34,0	20,0	31,2	29,9	27,8	30,6	20,0	31,2	34,8	29,1	28,4	29,6	31,3	39,4	20,0	35,7	20,0	28,6	46,1
5000	1000	32,2	29,9	29,9	32,5	27,6	36,0	35,5	33,7	31,3	30,3	20,0	29,3	32,4	32,2	32,4	30,8	32,0	20,0	32,7	37,4	20,0	40,1	27,1	29,5	46,7
6300	1250	32,7	36,5	29,1	36,9	30,6	36,0	36,1	20,0	35,8	33,2	20,0	29,5	29,1	33,3	32,5	31,3	27,8	20,0	28,0	38,9	20,0	37,7	30,0	29,8	47,1
8000	1600	32,6	41,0	27,1	39,3	36,7	37,6	37,3	30,2	34,6	31,5	20,0	30,5	31,2	36,1	34,0	31,9	30,5	20,0	30,0	27,8	20,0	37,8	27,3	28,0	48,2
10000	2000	32,7	36,9	20,0	40,8	34,9	38,2	39,1	20,0	33,5	35,7	27,8	30,2	30,6	32,9	32,2	31,9	31,1	29,0	20,0	20,0	20,0	32,4	20,0	20,0	47,4

Tabela A.11 – Dados de nível de pressão sonora no ponto P28 – modelo em escala reduzida com barreira acústica

Freq. [Hz] situação real	Direção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NPS P28 [dB]
	Freq. [Hz]	NPS [dB] no ponto P28																								
250	50	49,1	45,1	46,6	46,7	47,6	46,5	48,9	43,6	43,8	45,3	42,8	43,5	45,2	44,6	46,6	44,5	46,2	48,0	46,7	48,1	46,5	46,6	49,9	49,4	60,6
315	63	48,6	49,9	51,0	50,2	49,1	50,4	49,8	46,3	44,9	45,6	43,0	42,7	46,8	47,1	45,5	46,7	46,2	48,3	48,2	47,9	48,9	46,2	50,8	49,2	62,0
400	80	42,7	44,6	39,8	37,8	39,9	43,3	41,7	39,9	41,4	38,5	38,8	38,5	39,5	37,7	38,5	38,4	41,6	36,5	35,7	42,8	44,8	42,3	41,6	41,9	54,8
500	100	41,6	41,3	40,3	42,1	38,8	42,9	40,4	35,5	35,5	37,0	33,8	37,8	37,6	37,7	37,8	42,8	37,7	36,3	36,9	37,3	38,4	39,7	39,7	41,9	53,3
630	125	51,0	51,1	50,8	54,3	50,7	48,9	49,4	43,4	43,0	42,9	42,6	41,3	44,0	47,2	47,1	47,2	46,2	44,4	43,7	47,2	47,3	45,1	46,3	50,0	62,0
800	160	35,1	33,5	30,3	32,4	33,3	36,9	34,0	32,5	30,2	31,0	47,4	29,0	30,3	31,0	29,1	31,6	32,9	27,3	32,7	31,8	29,9	31,8	31,2	36,1	49,8
1000	200	30,6	31,3	20,0	27,0	30,2	32,1	31,4	27,8	27,1	31,5	29,9	27,3	28,2	28,4	20,0	20,0	28,6	20,0	28,2	31,7	29,1	28,6	30,9	33,2	43,1
1250	250	31,4	31,0	31,1	29,3	30,8	31,9	33,1	29,5	27,8	32,4	28,0	20,0	20,0	30,3	27,1	20,0	20,0	28,8	20,0	37,0	20,0	20,0	20,0	32,2	43,7
1600	315	35,5	39,6	35,3	31,3	38,4	37,2	34,8	36,8	33,7	33,1	21,0	21,0	21,0	32,6	21,0	21,0	21,0	30,8	29,6	35,2	21,0	30,6	32,2	36,8	47,6
2000	400	43,1	30,3	30,8	27,0	20,0	29,1	27,3	36,7	20,0	33,6	20,0	20,0	20,0	33,7	20,0	20,0	20,0	28,0	20,0	32,2	46,4	30,4	20,0	34,1	49,3
2500	500	31,8	31,7	31,0	33,9	29,1	20,0	30,4	34,5	27,1	36,2	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	31,9	20,0	35,5	20,0	35,3	44,1
3150	630	37,5	36,7	47,5	34,5	28,6	33,2	29,9	35,9	30,5	40,5	20,0	20,0	20,0	29,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	37,4	20,0	38,2	20,0	36,3	50,3
4000	800	34,2	36,2	32,8	28,6	30,3	28,6	30,4	36,4	34,2	41,5	20,0	20,0	20,0	29,5	29,8	20,0	20,0	20,0	20,0	33,6	20,0	39,5	28,2	37,4	47,3
5000	1000	38,4	37,4	30,6	20,0	32,4	35,1	30,3	36,3	33,1	41,1	20,0	20,0	20,0	30,4	33,1	20,0	31,1	20,0	33,1	42,7	30,8	36,4	20,0	38,7	48,9
6300	1250	40,0	37,4	30,6	20,0	33,1	29,0	32,2	37,7	33,9	43,6	20,0	37,5	20,0	28,4	31,5	20,0	32,4	36,0	20,0	32,5	20,0	37,4	20,0	37,6	49,0
8000	1600	40,3	39,1	31,8	20,0	34,7	29,5	31,0	34,8	33,6	44,6	20,0	20,0	20,0	30,5	30,3	20,0	36,0	28,8	20,0	33,7	33,0	34,1	20,0	37,1	49,0
10000	2000	37,9	39,8	31,6	20,0	36,7	20,0	30,2	33,4	31,8	43,2	20,0	20,0	20,0	29,8	31,9	20,0	36,3	20,0	28,6	39,0	35,2	34,1	20,0	37,3	48,7