

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA REDUÇÃO DE RUÍDO DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR BARREIRA

por

Mauricio Ludwig Piovezan

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2018.

ANÁLISE DA REDUÇÃO DE RUÍDO DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR BARREIRA
por

Mauricio Ludwig Piovezan

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Leticia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Leticia Fleck Fadel Miguel

Prof. Daniel de Leon

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 30 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Arno e Elma, e ao meu irmão Felipe, pelo imensurável apoio e paciência.

À professora Letícia Fleck Fadel Miguel pelo grande suporte e orientação do trabalho de conclusão do curso.

Ao Hospital de Clínicas de Porto Alegre e ao Engenheiro Bruno Andrade Saldanha, pela disposição e ajuda essenciais.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por seus excelentes professores e funcionários.

A todos meus amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a conclusão do curso.

Piovezan, M. L. **Análise da Redução de Ruído de Sistema de Refrigeração por Barreira.** 2018.15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O trabalho em questão tem o objetivo de avaliar o conforto acústico, segundo a NBR 10151/2000, na vizinhança do Hospital de Clínicas de Porto Alegre e em áreas dentro deste, afetado pela instalação de sete *chillers* com refrigeração a ar. De acordo com a norma brasileira, não há situação de conforto, pois as medições indicam um nível de pressão sonora equivalente crítico de 72,5dB(A) e 62,1dB(A) durante o período diurno e noturno, respectivamente. A análise do espectro de ruído do *chiller* revelou um predomínio de frequências altas, com 89dB(A) para banda de oitava de 2000Hz. A fim de reduzir o ruído dos equipamentos na situação mais crítica para grandes áreas e elevadas alturas (de 11m a 21m), foram propostas soluções ótimas de barreiras acústicas ao redor das fontes. Para gerar o mapa de ruído, foi usado o método de cálculo da norma ISO 9613, através do *software MASdBmap* desenvolvido pela *MAS Environmental*. A acurácia da simulação de ruído foi feita pela comparação com medições em quatro pontos a 1,2m acima do solo, que apontou um erro entre 11,9% e 15,7%. Para a maior atenuação por área de barreira projetada, os resultados obtidos mostram uma altura ideal de 5,8m para configurações de duas e três barreiras com material absoritivo, e 6m para duas barreiras reflexivas. A máxima atenuação média obtida foi de 17,4dB(A), com reduções pontuais de até 21,4dB(A) no ponto mais próximo no hospital e 13,6dB(A) no ponto mais alto e afastado na zona residencial. Portanto, foi mostrado que é possível o controle do ruído dentro do erro esperado e os métodos empregados.

PALAVRAS-CHAVE: Ruído, Barreira, *Chiller*, ISO 9613.

Piovezan, M. L. **Analysis of Noise Reduction of Refrigeration System by Barrier**. 2018.15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the acoustic comfort, according to NBR 10151/2000, in the neighborhood of the Hospital de Clínicas of Porto Alegre as well as in areas within it, affected by the installation of seven air-cooled chillers. According to the Brazilian standard, there is no comfort situation since the measurements indicate a critical equivalent sound pressure level of 72.5dB(A) and 62.1dB(A) during daytime and nighttime, respectively. Noise spectrum analysis revealed that high frequencies are dominant, with 89dB(A) for the 2000Hz octave band. In order to reduce the equipments' noise in the most critical situation for large areas and significant heights (from 11m to 21m), solutions using acoustic barriers around the sources were suggested. To create the noise map, it was used the calculation method of ISO 9613 standard with the MASdBmap software, developed by MAS Environmental. The noise simulation accuracy was tested by comparing its results with measurements at 1.2m above ground level, for which an error between 11.9% and 15.7% was obtained. For the greatest attenuation per projected barrier area, the obtained results show an ideal height of 5.8m for configurations of two and three barriers with absorptive material and 6m for two reflective barriers. The maximum average attenuation obtained was 17.4dB(A), with single point reductions up to 21.4dB(A) at the nearest point in the hospital and 13.6dB(A) at the highest and furthestmost point in the neighborhood. Therefore, it was shown that noise control is possible within the expected error and methods used.

KEYWORDS: Noise, Barrier, Chiller, ISO 9613.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Requisito dimensional (a) e caminhos de propagação em uma barreira (b).	4
Figura 5.1 - Vista frontal das fontes.....	5
Figura 5.2 - <i>Chiller</i> AquaSnap.....	5
Figura 5.3 - Visão lateral da plataforma.....	5
Figura 5.4 - <i>Chiller Scroll</i> CGAD060.....	5
Figura 5.5 - Medidor de nível de pressão sonora.....	6
Figura 5.6 - Medidor de distâncias.	6
Figura 5.7 - Pontos de medição e fontes sonoras	6
Figura 5.8 - Esquema da plataforma e barreiras.....	7
Figura 5.9 - Altura de simulação.....	7
Figura 6.1 - Nível de ruído ambiente medido nos pontos B e C.	8
Figura 6.2 - Ruído medido nos pontos D, E, F e H.	8
Figura 6.3 - Medições no ponto E para situação crítica.....	9
Figura 6.4 - Medições no ponto E no período noturno.....	9
Figura 6.5 - Nível equivalente em banda de oitava para o compressor e <i>chiller</i>	10
Figura 6.6 - Nível de pressão sonora estimado para <i>chillers</i> individuais.....	10
Figura 6.7 - Mapa de ruído sem barreira para altura de 11m.	12
Figura 6.8 - Mapa de ruído para barreira absorviva dupla de 5,4m (a) e tripla de 6m (b).. ..	13
Figura A.1 - Barreira e sombra acústica	16
Figura A.2 - Resultado de comparação dos modelos e métodos, considerando apenas o efeito da difração.....	16
Figura A.3 - Certificado de Calibração do Medidor de Nível Sonoro	17
Figura A.4 - Calibração do Medidor de Nível Sonoro para ponderação A	18
Figura A.5 - Mapa de ruído sem barreira, na altura de 1,2m (a) e 21m (b).....	19
Figura A.6 - Efeito da reflexão para barreira frontal de altura 5.6m.	19
Figura A.7 - Mapa de ruído para três barreiras absorvivas de 5m.	20
Figura A.8 - Mapa de ruído para configurações de maior atenuação por área de barreira, 1-REF (a), 2-REF (b), 2-ABS (c) e 3-ABS (d).. ..	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Fatores atenuantes segundo a norma ISO 9613.....	3
Tabela 3.2 - Acurácia do NPS da norma ISO 9613.	4
Tabela 6.1 - Resumo das medições realizadas e condição de conforto.	9
Tabela 6.2 - Erro estimado do modelo de fontes separadas e fonte única.	11
Tabela 6.3 - Resultados simulados para configuração de 1,2 e 3 barreiras.	12
Tabela A.1 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A).	16
Tabela A.2 - NPS e atenuação prevista por barreira..	16
Tabela A.3 - Nível equivalente por número de compressores.	19

ÍNDICE	Pág.
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
ÍNDICE.....	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	1
2 OBJETIVOS	2
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
3.1 Nível de pressão sonora e o decibel.....	2
3.2 Normas relacionadas ao ruído	2
3.2.1 NBR 10151/2000	2
3.2.2 ISO 9613/1996	3
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
5.1 Fontes Sonoras	5
5.2 Equipamentos.....	6
5.3 Medição do ruído.....	6
5.4 Simulação e dimensionamento de barreira	7
6 RESULTADOS.....	8
6.1 Avaliação do conforto acústico.....	8
6.2 Validação dos resultados	10
6.3 Barreira acústica	11
7 CONCLUSÕES.....	13
7.1 Sugestões para trabalhos futuros	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
ANEXO A	16
APÊNDICE A	19

1. INTRODUÇÃO

Sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) são cada vez mais usados para atender à crescente demanda de atividades industriais, comerciais e hospitalares. Particularmente, há projeções do mercado global de *chillers* – resfriadores de água ou outro líquido – ultrapassar US\$ 11 bilhões em 2022, acompanhado do aumento de unidades com refrigeração por ar, usualmente instaladas em ambientes externos [Krawcke, 2018].

O elevado ruído desses equipamentos exige a atenção de profissionais capacitados pois pode comprometer o conforto e a saúde. Entre os vários problemas de saúde relacionados à exposição ao ruído, menciona-se a indisposição, irritabilidade [Andrade *et al*, 1998], perda de audição, interferência no sono [Bronzaft, 2009] e sobrecarga do coração, cujos efeitos estão associados ao nervosismo e queda no desempenho do trabalho [Gerges, 1992]. No entanto, o ruído de equipamentos AVAC pode ser perturbador para instrumentistas mesmo em níveis baixos de 30dB(A) ou na presença de componentes tonais [Ueno *et al*, 2000].

O controle de ruído pode ser feito na fonte (redução de forças, melhor lubrificação), no receptor (uso de EPI) ou no caminho entre ambos (uso de barreira, enclausuramento), sendo que o primeiro modo é mais eficaz porém mais difícil de realizar [Crocker, 2007]. Diante disso, o mais comum é limitar o ruído após ser emitido, por exemplo, usar uma jaqueta acústica amarrada no compressor ou demais componentes de *chillers*, cuja eficácia depende do seu material e espessura, além de possíveis rasgos no seu tecido [Paulauskis, 1999].

No enclausuramento de máquinas, a redução para baixas frequências é sensível à rigidez enquanto que para as altas depende da densidade dos painéis. Deve-se também evitar aberturas e controlar a reverberação com materiais porosos ou fibrosos [Ashrae, 2009]. Acima de 1kHz a atenuação em compressores varia de 7 a 25dB, porém para frequências abaixo de 500Hz ela é insignificante, mesmo com materiais absorvivos [Forouharmajd; Nassiri; Monazzam, 2012]. Por fim, o ressonador de Helmholtz consiste em um tipo de enclausuramento com uma abertura para o meio externo e é utilizado principalmente como neutralizador de baixas frequências [Gerges, 1992].

As barreiras acústicas são amplamente usadas em áreas urbanas, com mais de 1200 milhas construídas nos Estados Unidos somente no ano de 2001. Muito utilizadas na redução do ruído de tráfego para proteção de grandes áreas residenciais, as barreiras possuem grande eficiência quando instaladas próximas da fonte sonora [Horoshenkov; Lam; Attenborough, 2007].

Em aplicações onde múltiplas reflexões causadas pelo uso da barreira são previstas, é desejável o uso de materiais que absorvam parte da energia. Os resultados nesse caso são superiores apenas quando a distância até a fonte é menor ou comparável à altura da barreira. Outro aspecto de aumento na eficiência é o formato da borda superior que pode contribuir de 2 a 2,5dB na perda de transmissão para formas em 'T' [Horoshenkov; Lam; Attenborough, 2007].

Há estudos sobre o efeito psico-acústico que comparam percepção do ruído e sua medição física. Um interessante caso mostrou um resultado inesperado – enquanto a fonte permanece visível, sua visibilidade acompanha uma redução de ruído aparente, mas quando a visão da fonte é completamente bloqueada, a percepção de ruído aumenta [Aylor e Marks, 1976].

Entre os métodos mais conhecidos para cálculo de barreiras estão o de Maekawa, para uma aproximação de barreiras semi-infinitas [Maekawa, 1968], de Kurze e Anderson baseado na teoria da difração de Keller (1962) [Kurze e Anderson, 1971], e o da norma ISO 9613-2, de 1996, o qual será utilizado neste trabalho para estimar o ruído de *chillers* e a sua atenuação por barreiras acústicas.

1.1 Motivação

A redução de ruído em ambientes externos é um grande desafio para profissionais da área de engenharia e acústica aplicada, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos como difração, absorção, reverberação e efeitos no som devido ao vento, solo, temperatura e atmosfera. Com o crescente uso de equipamentos ruidosos, são cada vez mais importantes os

estudos de caso e métodos para estimar e controlar o ruído a fim de promover conforto e saúde à quem possa ser afetado.

O Hospital de Clínicas de Porto Alegre apresenta tal situação com uma recente instalação de equipamentos de refrigeração de água com arrefecimento a ar (*air-cooled chillers*), em local considerado inadequado – numa plataforma metálica três metros acima do solo na fronteira do hospital, próximo à vizinhança. Em razão dessas condições, descartou-se do escopo do trabalho a análise do enclausuramento completo de cada fonte, por questões de reverberação, ou da plataforma inteira, pela grande área ocupada.

Por conseguinte, optou-se pela instalação de barreiras acústicas, sendo esta uma solução mais simples uma vez que a maior necessidade é reduzir o ruído propagado na direção das residências. Além do benefício ligado ao conforto para funcionários e pacientes, a solução acústica também implica em benefícios financeiros para o hospital uma vez que o desligamento dos equipamentos, por ordem judicial, pode prejudicar o funcionamento da instituição.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar a situação de conforto acústico em regiões próximas aos equipamentos, dentro e fora da área do hospital, de acordo com a norma NBR 10151/2000, e encontrar uma solução otimizada para redução do ruído por barreiras acústicas, através de uma ferramenta computacional baseada na norma ISO 9613/1996. Ao comparar com as medições de nível de pressão sonora, o estudo também avalia a acurácia das simulações de ruído e com isso sugere configurações de barreiras por critérios de condição de conforto acústico em pontos críticos, para o período noturno, e a atenuação média para diferentes zonas em relação à altura e área das barreiras.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Nível de pressão sonora e o decibel

O nível de pressão sonora (abreviado por NPS) é uma grandeza utilizada para quantificar a sensibilidade do ouvido humano ao som, sendo dB sua unidade de medida, chamada decibel [Bistafa, 2011]. A soma resultante NPS_R de níveis de pressão sonora (NPS_i) provenientes de n fontes é obtida por:

$$NPS_R = 10 \log\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS_i}{10}}\right) \text{ dB} \quad (3.1)$$

3.2 Normas relacionadas ao ruído

3.2.1 NBR 10151/2000

A NBR 10151/2000, nomeada “Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento”, regula as condições para avaliação do ruído em comunidades, mesmo na ausência de reclamações. O método de avaliação envolve medições do nível de pressão sonora equivalente (L_{Aeq}), em decibel ponderado em “A”, conforme a equação:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \text{ dB(A)} \quad (3.2)$$

onde n é o número de medições e L_i é o nível de pressão sonora em dB(A), lido em resposta rápida. Para ambientes externos, a condição de conforto é atendida quando L_{Aeq} é inferior ao nível de critério apresentado na Tabela A.1 do Anexo A ou ao ruído ambiente. Para Porto Alegre, o período diurno estabelecido é das 07 às 19 horas e o noturno das 22 às 07 horas do dia seguinte.

3.2.2 ISO 9613/1996

Enquanto que a primeira parte dessa norma lida com detalhes da absorção do ar, a segunda apresenta um método de engenharia para o cálculo da atenuação de ruído durante a propagação em ambiente externo, de forma empírica, podendo ser usado para obter o nível de pressão sonora devido a diversas fontes pontuais. De acordo com a ISO 9613-2, o nível e pressão sonora contínuo equivalente (para uma parcela) em banda de oitava com vento a favor $L_{FT}(DW)$ pode ser obtido por:

$$L_{FT}(DW) = L_W + D_C - A \text{ [dB]} \quad (3.3)$$

onde L_W é o nível de potência sonora da fonte em banda de oitava medido, D_C é a correção de diretividade e A é o fator de atenuação dado pela equação abaixo cujos componentes são resumidos na Tabela 3.1.

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

Tabela 3.1 – Fatores atenuantes segundo a norma ISO 9613.

Fator	Descrição	Aplicação
A_{div}	Atenuação pela divergência geométrica	$A_{div} = [20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11]$ d: distância fonte – receptor (m) d_0 : 1m
A_{atm}	Atenuação pela absorção atmosférica	$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000}$ α : coeficiente atmosférico (dB/km) d: distância de propagação (m)
A_{gr}	Atenuação pelo efeito do solo.	$G = \begin{cases} 0, \text{ solo duro (concreto, asfalto)} \\ 1, \text{ solo poroso (vegetação)} \\ 0 - 1, \text{ solo misto} \end{cases}$
A_{bar}	Atenuação por barreira	Difração do som
A_{misc}	Atenuação por efeitos diversos	Vegetação, sítio industrial, zona urbana

O fator de divergência leva em consideração a propagação esférica em campo aberto de uma fonte pontual, que podem ser assim consideradas se: As fontes têm aproximadamente a mesma potência, altura e condições de propagação das fontes pontuais ao receptor. De forma geral, a atenuação pelo ar atmosférico e pela vegetação é significativa para altas frequências e longas distâncias, sendo o coeficiente α fortemente influenciado pela frequência do som, temperatura e umidade relativa do ar. O efeito do solo na atenuação é resultado da interferência do som refletido pelo piso com o som transmitido diretamente e tem maior relevância próximo da fonte e receptor. Os efeitos diversos consideram um percurso de propagação curvo com arco de 5km, aplicado em trajetórias através de vegetações, área industrial ou residencial.

As barreiras acústicas são usadas para provocar difração do som em suas bordas e assim criar a chamada zona de sombra acústica, maior para altas frequências conforme Figura A.1, onde o ruído é reduzido. Um objeto é classificado como barreira pela ISO 9613-2 quando atende a 3 requisitos: superfície fechada (sem grandes aberturas); densidade superficial mínima de 10 kg/m² e dimensão horizontal perpendicular à linha que une uma fonte S e um receptor R maior que o comprimento de onda λ , isto é, $(l_l + l_r) > \lambda$, conforme a Figura 3.1(a). O cálculo da atenuação por barreira A_{bar} , para cada banda de oitava, é dado por:

$$A_{bar} = 10 \log \left[3 + \left(\frac{C_2}{\lambda} \right) C_3 z K_{met} \right] \text{ dB} \quad (3.5)$$

onde C_2 é igual a 20 e inclui o efeito de reflexões no solo; C_3 é igual a 1 para barreiras únicas; λ é o comprimento de onda da banda de oitava, em metros; z é a diferença entre o caminho difratado e o direto. O fator de correção de efeitos meteorológicos K_{met} vale aproximadamente 1 para distâncias menores que 100m. Para mais de um caminho de propagação significativo como na Figura 3.1(b), os cálculos do fator são separados e as contribuições para o NPS no receptor são somadas.

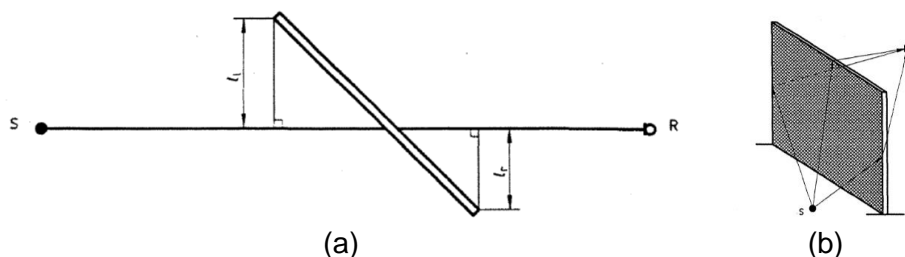


Figura 3.1 – Requisito dimensional (a) e caminhos de propagação em uma barreira (b). (Fonte: ISO 9613-2, 1996)

A atenuação esperada pela equação 3.5 para cada banda de oitava não deve ser maior que 20dB (barreira fina) e 25dB (barreira grossa). Materiais usuais em barreiras variam de 4,4 kg/m² para 1,59mm de alumínio a 244 kg/m² para 100mm de concreto denso [Horoshenkov, Lam e Attenborough, 2007].

A acurácia de todo o cálculo da norma para o NPS na ausência de reflexão ou atenuação causada por barreira é dada pela Tabela 3.2. Para 3dB e sem considerar erros sistemáticos, o erro total de cálculo com a incerteza do instrumento de medição é de 4,24dB por fonte e 1,34dB para 10 fontes sonoras [Kuehner, 2007].

Tabela 3.2 - Acurácia do NPS da norma ISO 9613 (Fonte: ISO 9613-2, 1996)

	Distância entre fonte-receptor	
	0-100m	100-1000m
Altura média de fonte-receptor	0-5m	±3dB
	5-30m	±1dB

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem poucos dados experimentais sobre a atenuação por barreira, especialmente ao ar livre, e a maioria dos trabalhos realizados são baseados em modelos em escala ou em câmaras anecóicas [Laranja, 2004]. Através de um algoritmo próprio, o autor comparou a atenuação prevista por diferentes métodos em um ponto distante 50m de uma barreira fina de 4m de altura. Os resultados mostrados na Figura A.2 do Anexo A deste trabalho revelam que em altas frequências a estimativa de atenuação pela norma ISO 9613 se aproxima dos demais métodos. Além disso, o autor destaca que o motivo para o limite de atenuação de 20-25dB, experimentalmente comum de ser usado, é devido à utilização em modelos que não consideram a difração pelos flancos da barreira ou as condições atmosféricas. Em frequências superiores a 2kHz, a imposição deste limite é justificada pela interferência significativa da refração causada pelo gradiente de velocidade sonora.

Um estudo para prever o ruído de uma rodovia foi realizado com um método adaptado da ISO 9613, que considera a atenuação pelo terreno ondulado, divergência geométrica no campo próximo à fonte e vento de curta duração. As medições feitas em pontos de 1,5m a 5,6m acima do solo, sem e com a presença de uma barreira de 4,5m de altura, mostraram boa concordância com os resultados a uma distância de 30m da estrada, com diferença média de 0,3dB e desvio padrão de 2,05dB [Cho *et al*, 2004].

A respeito da propagação de ruído de 2 *chillers* tipo *scroll* resfriado a ar instalados no topo de um prédio de 4 andares, um estudo obteve uma estimativa de NPS com programa baseado

na ISO 9613-2 de 3,3dB(A) a mais do que a medição com um receptor a 1,5m do solo e distância horizontal de 10m das fontes [Fahim e Seddeq, 2010]. Os resultados da Tabela A.2 do Anexo A mostram que o modelo sem a absorção do ar apontou níveis e erros maiores para frequências altas, acima de 1kHz, que segundo os autores, pode ser devido ao efeito da flutuação da absorção atmosférica. Ao adicionar no programa uma barreira em três lados do *chiller*, distante 5m e com 2m de altura a mais do que o equipamento, a atenuação prevista no mesmo ponto foi de 19,3dB.

Contudo, uma análise mostrou que os resultados obtidos através da ISO 9613-2 são mais imprecisos se comparados aos dos métodos mais avançados. O autor ressalta, porém, que tais métodos ainda são computacionalmente custosos e suas implementações em *softwares* tornam seu uso mais difícil do que aquele descrito na norma, sendo esta ainda amplamente utilizada [Economou e Charalampous, 2012].

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Fontes sonoras

Na plataforma visualizada nas Figuras 5.1 e 5.3, encontram-se instalados cinco *chillers* AquaSnap modelo 30 RBA 100226 Scroll Chiller, da Springer Carrier (Figura 5.2) e dois *chillers* Scroll CGAD060 da Trane (Figura 5.4), na área mais afastada da plataforma. Cada unidade possui quatro compressores tipo *scroll*, de 29,6 TR de capacidade para o AquaSnap e 15 TR para o da Trane.



Figura 5.1 – Vista frontal das fontes.



Figura 5.2 – Chiller AquaSnap.



Figura 5.3 – Visão lateral da plataforma.

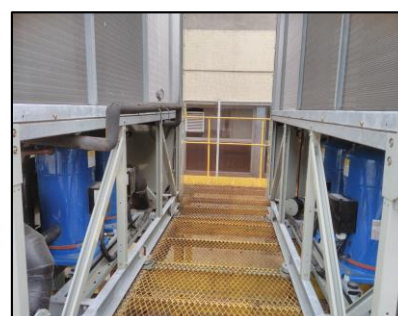


Figura 5.4 – Chiller Scroll CGAD060.

Cada *chiller* possui seis ventiladores na parte superior, porém foram considerados como fontes do sistema apenas os compressores pois seus níveis de ruído são dominantes em unidades refrigeradoras [Bistafa, 2011]. Pela posição dos compressores, observa-se que as fontes possuem diretividade e não podem ser perfeitamente aproximadas como omnidirecionais, isto é, o campo sonoro não é igual em todas as direções como em fontes pontuais, embora o ruído das fontes seja aproximadamente constante no tempo.

5.2 Equipamentos

A Figura 5.5 mostra o equipamento utilizado para medição do ruído, Decibelímetro Modelo 2700 *Impulse Sound Level meter* da *Quest Technologies*, junto com o filtro de banda de oitavas que abrange frequências de 31,5Hz a 16kHz. Informações de calibração do equipamento e a incerteza associada para cada banda de oitava estão nas Figuras A.3 e A.4 do Anexo A deste trabalho. Para medição de distâncias optou-se pelo medidor laser de distâncias *Bosch GLM 50 C Professional* da Figura 5.6, com precisão típica de $\pm 1,5\text{mm}$.

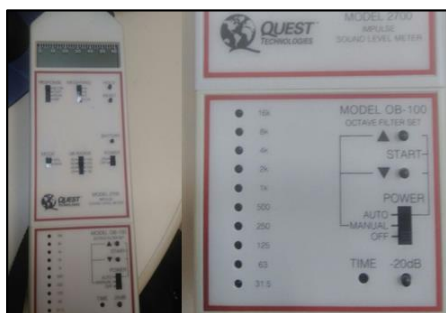


Figura 5.5 – Medidor de nível de pressão sonora.



Figura 5.6 - Medidor de distâncias.

5.3 Medição do ruído

A Figura 5.7 mostra a imagem via satélite do hospital e da vizinhança residencial analisada, localizada entre a Rua São Manoel e Silva Só.



Figura 5.7 - Pontos de medição e fontes sonoras (Fonte: adaptado de *Google Earth*).

A região circular destacada em vermelho foi considerada crítica para o conforto acústico da vizinhança, devido à maior proximidade dos *chillers* e poucos obstáculos ao som, seguida das áreas adjacentes em amarelo, onde árvores cortam a linha de visão com as fontes sonoras da plataforma (retângulo vermelho). Para análise do conforto, foram feitas medições de ruído nos pontos D, F e H no período diurno e no ponto E (diurno e noturno), distante aproximadamente 71m das fontes.

As unidades refrigeradoras possuem um sistema automático que liga e desliga os compressores conforme a demanda de energia, sendo desativados manualmente somente para a manutenção do equipamento. Dada a impossibilidade de desligar todos os *chillers* em razão de sua importância para o funcionamento do hospital, o ruído ambiente (ou de fundo) foi estimado

no ponto B, cerca de 180m dos equipamentos, para a área residencial, e no ponto C para a área interna do hospital, sem a interferência aparente do ruído dos *chillers*.

Os critérios de medição foram norteados pela norma NBR 10151, com o cálculo do nível de pressão sonora equivalente pela Equação 3.2. Conforme a Tabela A.1, foi utilizado como nível de critério limite os valores de 50 e 45dB(A) para período diurno e noturno, respectivamente, referente à categoria de área estritamente residencial urbana, de hospitais ou de escolas.

5.4 Simulação e dimensionamento da barreira

Para a comparação de resultados, estimativas de ruído na região e dimensionamento de barreiras atenuantes em situações críticas de ruído, foi utilizado o *software MASdBmap* versão 0.5 desenvolvido pela *MAS Environmental Ltd* 2015, que utiliza o método de cálculo da norma ISO 9613.

Pela ausência de dados de fabricante, buscou-se um outro equipamento igual ao *chiller AquaSnap*, situado no ponto A da Figura 5.7, em condição de baixo uso que permitiram mensurar o nível de ruído em banda de oitava para um único compressor e calcular o NPS emitido por um *chiller* com 2, 3 e 4 compressores ativos, pela Equação 3.3. Por não ter sido possível aplicar o mesmo método para o *chiller da Trane*, este teve seu espectro de ruído substituído pelo do outro nas simulações, que foram realizadas com os seguintes critérios:

- Fontes – A Figura 5.8 mostra um esquema feito com o *software SketchUp* 2018, onde os 4 compressores de cada *chiller* (A1-A7 para *AquaSnap* e T1-T2 para *chiller da Trane*) foram aproximados por uma única fonte pontual de NPS por banda de oitava conforme Tabela A.3 do Apêndice A, na altura que se encontram em relação ao solo;
- Receptores – Foram posicionados a 1,2m do solo e 1m abaixo da altura dos edifícios. Sendo predominante na região prédios de 12m, a altura para o mapa de ruído foi de 11m, como mostra a Figura 5.9.
- Barreiras – Com variação de altura em 0,2m de 5m, estimada como a altura mínima que intercepta a linha de visão das fontes de um receptor a 11m, até 6m. Consideradas finas e orientadas conforme a Figura 5.8: Sem barreira; com configuração de barreira frontal; barreira dupla (frontal+inferior) para material reflexivo e absoritivo; barreira tripla absoritiva (frontal+inferior+superior). Os comprimentos da barreira frontal, inferior e superior são iguais a 16,4m, 12m e 8,4m, respectivamente.

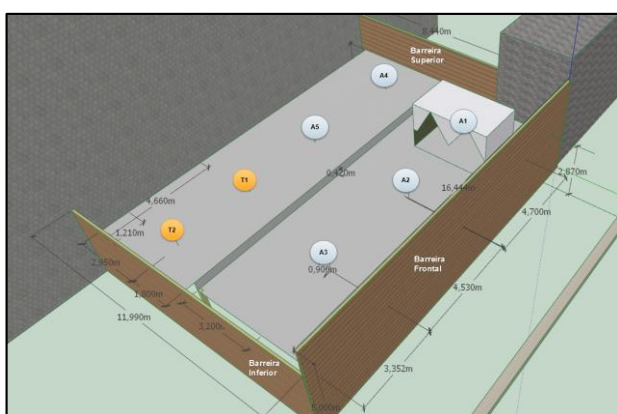


Figura 5.8 – Esquema da plataforma e barreiras.



Figura 5.9 – Altura de simulação.

Foi considerado um coeficiente de reflexão $\rho = 1$ para barreira reflexiva e $\rho = 0,2$ para a absoritiva. Em todas as simulações foi adotada uma umidade relativa do ar de 70%, temperatura ambiente de 25°C, fator de solo $G = 0$ (solo duro) e duas reflexões por raio sonoro.

6. RESULTADOS

6.1 Avaliação do conforto acústico

Os níveis de ruído ambiente medidos a cada segundo para o ponto B (na rua São Manoel), e C (dentro do hospital) constam na Figura 6.1.

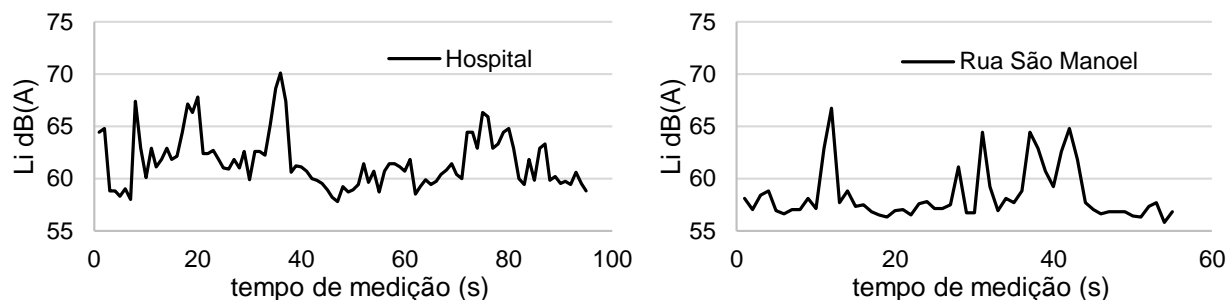


Figura 6.1 – Nível de ruído ambiente medido nos pontos B e C.

Foi obtido um nível equivalente L_{Aeq} de 59,4dB(A) em B e 62,6dB(A) em C, com sucessivos picos de ruído. O nível elevado para o hospital se deve à proximidade de diferentes fontes ruidosas, tais como veículos leves, transeuntes e obras, enquanto que na rua São Manoel, os níveis altos são causados principalmente por veículos. O gráfico da Figura 6.2 mostra a medição de ruído para os pontos D, E, F (vizinhança) e H (no hospital) realizadas em momentos distintos do mesmo dia.

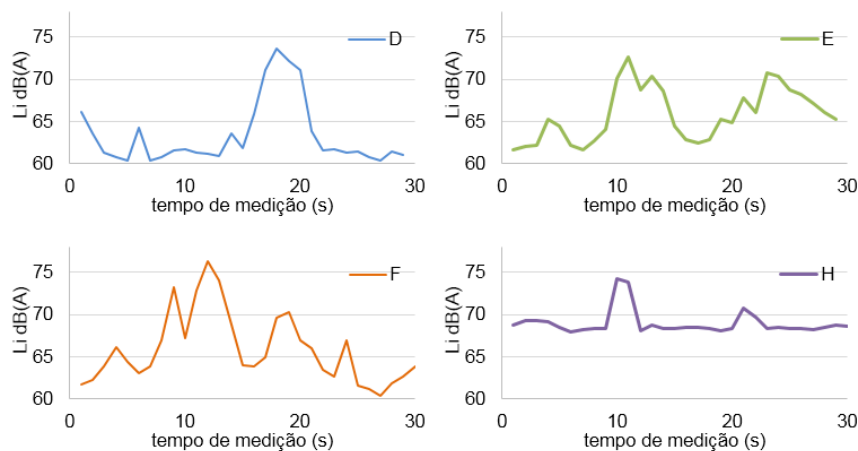


Figura 6.2 – Ruído medido nos pontos D, E, F e H.

Os pontos D e F apresentaram picos maiores (73,7 e 76,3dB(A)) comparados ao ponto E (72,7dB(A)) devido à maior proximidade deste à entrada e saída de automóveis do hospital, onde a velocidade dos veículos é menor. Ressalta-se como contribuição ao ruído a pavimentação da rua, do tipo paralelepípedo, e a velocidade de diferentes veículos – carros, caminhões e ônibus coletivo. A maior ocorrência desses picos de ruído é traduzida em um elevado nível equivalente de 68,5dB(A) para o ponto F e 66,9dB(A) para o ponto E.

Pela observação dos níveis mais baixos para cada ponto, pode-se deduzir a contribuição do ruído dos *chillers* na ausência de perturbações sonoras do ambiente, onde o maior nível mínimo é em E (61,7dB(A)), o que indica ser este ponto o mais grave. Também foi registrado um alto nível em H, mínimo de 68dB(A), e com poucas flutuações, implicando que o ruído ambiente para o hospital mostrado anteriormente não é adequado a este ponto.

A Figura 6.3 mostra uma segunda medição de maior duração realizada para melhor avaliar o ruído no ponto E, para uma situação mais crítica de ruído a uma temperatura próxima de 30°C ao invés de 25°C como nas demais medições.

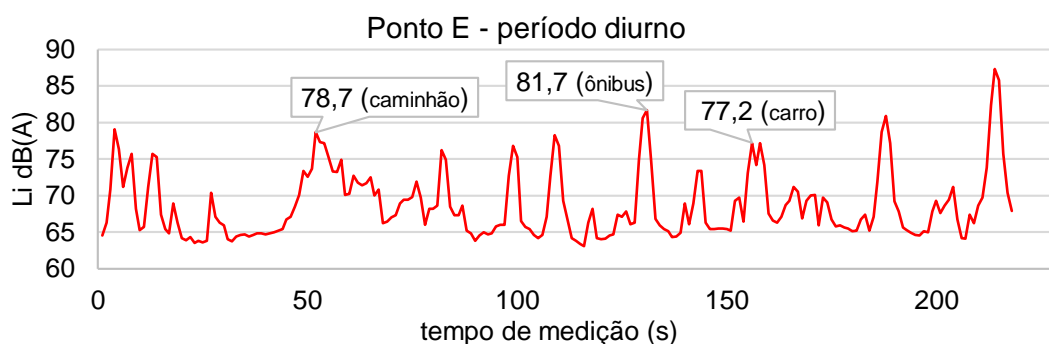


Figura 6.3 – Medições no ponto E para situação crítica.

Com uma grande variação de 63,1 a 87,3dB(A), o nível equivalente L_{Aeq} foi de 72,5dB(A), superior ao nível ambiente. Nota-se um aumento nos níveis mais baixos, por causa do aumento de compressores ligados, que oscilam em 65dB(A). Para o período noturno, obteve-se o ruído da Figura 6.4, medido próximo às 23h39 e 04h55 da manhã seguinte.

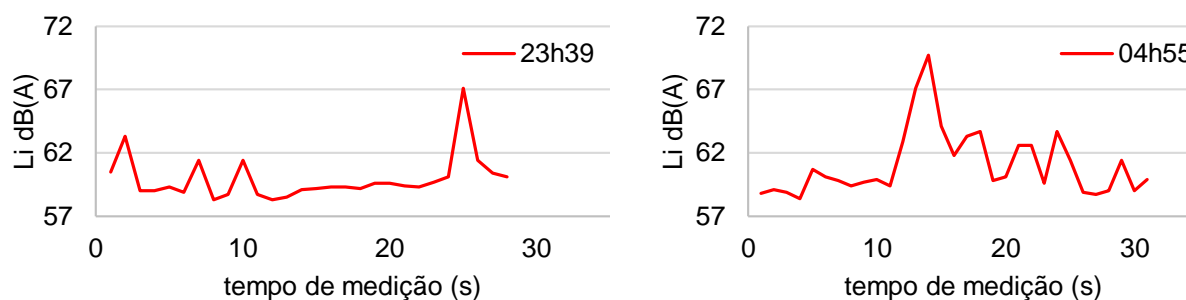


Figura 6.4 – Medições no ponto E no período noturno.

Embora não tenha sido estimado o ruído de fundo noturno, supõe-se que não há condição de conforto, pois o L_{Aeq} de 62,1dB(A) supera o valor correspondente ao ruído ambiente de dia. Diferente do período diurno, os picos são atribuídos somente aos eventuais sons de impacto e à sensibilidade do decibelímetro, mesmo com uso de protetor, ao efeito do vento. A Tabela 6.1 resume as medições realizadas (as mais críticas para o ponto E).

Tabela 6.1 – Resumo das medições realizadas e condição de conforto.

Ponto	Descrição	Número de medições	Nível mínimo [dB(A)]	Nível máximo [dB(A)]	Nível equivalente L_{Aeq} [dB(A)]	Nível Limite [dB(A)]
B	Ambiente Rua	55	55,8	66,7	59,4	50
C	Ambiente Hospital	95	57,8	70,1	62,6	50
D	Chillers+Ambiente Rua	29	60,3	73,7	65,7	59,4
E	Chillers+Ambiente Noturno	218	63,1	87,3	72,5	59,4
F	Chillers+Ambiente Rua	31	58,4	69,7	62,1	45
H	Chillers+Ambiente Hospital	30	60,4	76,3	66,5	59,4
H	Chillers+Ambiente Hospital	32	68,0	74,2	69,3	62,6

De acordo com os métodos empregados e com os dados obtidos, conclui-se que não há condição de conforto para as regiões analisadas e, portanto, é necessário algum controle do ruído. Uma vez que não há soluções práticas para reduzir o ruído elevado do trânsito, a análise

se direciona aos equipamentos, que amplificam o ruído total na vizinhança. Ao aproximar o nível noturno no ponto E de 58,4dB(A) como se fosse produzido unicamente pelos *chillers*, devido ao baixo ruído de fundo, estima-se uma contribuição dos compressores de 35% em relação ao nível mínimo diurno de 63,1dB(A). Portanto, a atenuação deve visar principalmente o conforto acústico da vizinhança à noite, uma vez que durante o dia a contribuição dos *chillers* são menos significantes.

6.2 Validação dos resultados

O gráfico da Figura 6.5 mostra o espectro de ruído em banda de oitava de 1 compressor ativo em duas medições a uma distância de 1m das fontes (em azul) e o calculado para 4 compressores, equivalente ao NPS máximo de um *chiller* (em vermelho), a partir da medição de maior nível (azul escuro).

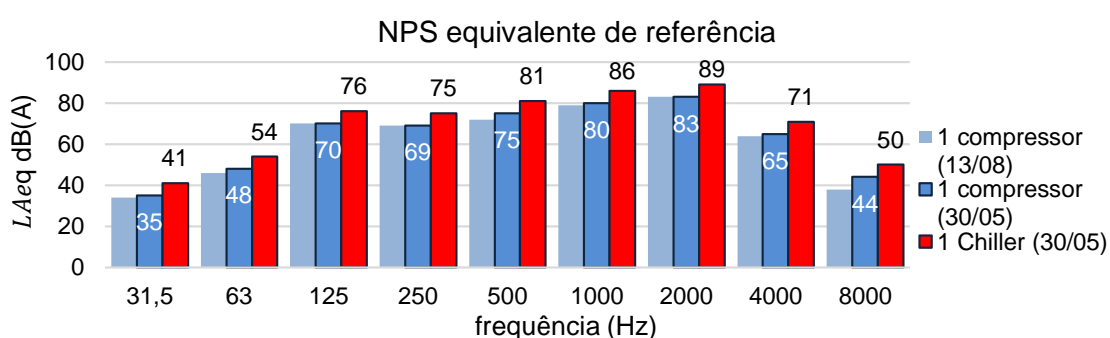


Figura 6.5 – Nível equivalente em banda de oitava para o compressor e *chiller*.

O NPS equivalente geral foi de 87dB(A) para medição feita em maio e 85dB(A) para agosto. É notável o predomínio em altas frequências (83dB(A) para 2kHz) e uma variação significativa na medição de 8kHz, na qual há maior incerteza conforme a calibração do instrumento de medição, igual a 5,2dB(A). Os resultados para dois e três compressores constam na Tabela A.3 do Apêndice A e foram calculados para a medição mais crítica, do dia 30 de maio.

Para avaliar a qualidade do modelo, comparou-se o NPS medido nos pontos D, E, F e H com o valor estimado pelo *software MASdBmap*, mostrado na Figura 6.6. O número de compressores ligados para cada *chiller* nesse caso foi de: A1=0; A2=2; A3=2; A4=2; A5=1; T1=0; T2=2. Também foi simulado o ruído devido a uma fonte única (FU) a uma altura de 3,5m posicionada ao centro da plataforma, com NPS por banda de oitava equivalente a 9 compressores.



Figura 6.6 – Nível de pressão sonora estimado para *chillers* individuais.

Visto que o *software* fornece somente o nível “constante” emitido das fontes, aplicou-se uma variação da Equação 3.1 para primeiro obter o ruído devido somente aos equipamentos, ao subtrair o ruído ambiente do ruído medido total (*chillers*+ambiente), ou seja:

$$NPS_{chillers} = 10 \log\left(10^{\frac{NPS_{chillers+ambiente}}{10}} - 10^{\frac{NPS_{ambiente}}{10}}\right) \quad (6.1)$$

Para a comparação com o resultado obtido do *software*, mostrado na Tabela 6.2, foram usados os valores mínimos medidos para o NPS total e ambiente. Dessa forma, ao supor invariável o número de compressores ativos durante as medições, a estimativa de $NPS_{chiller}$ corresponde a um valor aproximadamente constante, na ausência de perturbações sonoras do ambiente.

Tabela 6.2 – Erro estimado do modelo de fontes separadas e fonte única.

Ponto	NPS dos <i>Chillers</i> [dB(A)]			Erro [dB(A)]			
	Medição (Equação 6.1)	Fontes separadas	Fonte única	Fontes separadas		Fonte única	
D	58,4	49,2	41,8	9,2	15,7%	16,6	28,4%
E	60,4	50,6	51,5	9,8	16,2%	8,9	14,7%
F	58,6	49,5	49,1	9,1	15,5%	9,5	16,1%
H	67,6	59,5	58,4	8,1	11,9%	9,2	13,6%

A simplificação de fonte única se mostrou mais imprecisa e sensível à posição da fonte em relação ao modelo de fontes separadas, com variação de 14,8dB(A) entre os pontos analisados dos quais D apresentou a maior diferença. Tal resultado é devido provavelmente à concentração de todo NPS num só ponto, que reduz o número de trajetórias do som e explica uma maior exatidão para o ponto E (14,7%), cuja posição o torna menos sensível à difrações de obstáculos e reflexões.

Embora menor, o modelo de fontes separadas apresentou erros ainda significativos (entre 8,1 e 9,2dB(A)) e maiores em relação aos apresentados na revisão da literatura e na norma. Entretanto, as estimativas da Tabela 3.2 foram obtidas para situações sem efeitos de reflexão ou atenuação por difração, diferentemente da situação complexa estudada neste trabalho. Mesmo não necessária para fins de avaliar níveis gerais de pressão sonora, uma análise da exatidão para cada banda de oitava pode mostrar se há uma maior concentração do erro em algumas faixas de frequência.

Destacam-se algumas limitações da análise efetuada, tais como a desconsideração da incerteza da medição de ruído e distância, dos possíveis obstáculos ao som (cercas), do efeito do vento e da diretividade real das fontes, bem como a não representação da plataforma metálica, cujo efeito da vibração na emissão sonora não foi analisado. Das simplificações menores pode-se mencionar a uniformidade do solo, a ausência de atenuação por vegetação (presente em D e F), e o baixo número de medições, a fim de minimizar o erro pela variação de compressores ativos durante o período.

6.3 Barreira acústica

A Figura 6.7 apresenta o mapa de ruído na altura de 11m e temperatura 25°C, sem barreira, para condição mais crítica de 7 *chillers* com 4 compressores ativos cada. Conforme a escala da legenda, admitiu-se 36 e 40dB(A) como níveis limite aceitáveis (para o conforto no período noturno) com um erro aproximado de 25% e 12%, respectivamente. Para hipóteses mais otimistas, os níveis de 45 e 50dB(A) são valores limites com erro zero no período noturno e diurno.

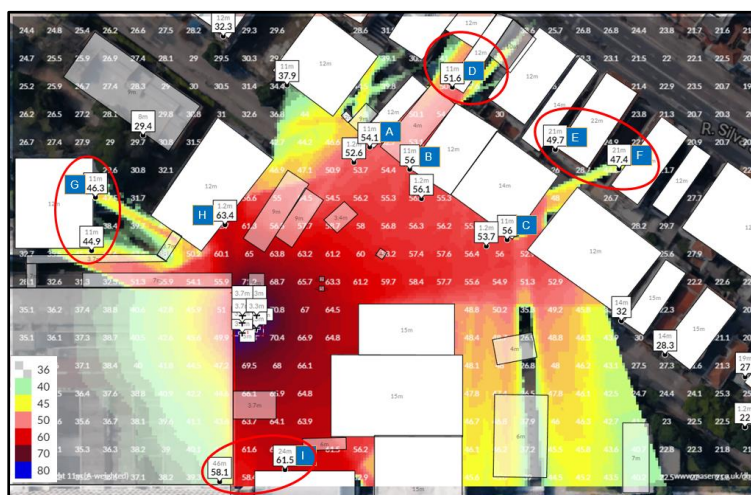


Figura 6.7 – Mapa de ruído sem barreira para altura de 11m.

As regiões circeladas apresentaram níveis elevados não inspecionados no local. O mapa apresenta pontos a 1,2m, cujo mapa sonoro próprio é mostrado na Figura A.5(a) do Apêndice A, com NPS próximo ou menor em relação à altura de 11m, enquanto a Figura A.5(b) se refere ao mapa correspondente para 21m, cujos níveis de ruído elevado alcançam grandes distâncias, porém atingem apenas dois prédios residenciais. A Tabela 6.3 mostra o nível de pressão sonora obtido para diferentes configurações e alturas de barreiras nos pontos críticos identificados em azul de 'A-I', com a cor referente aos níveis de tolerância estabelecidos.

Tabela 6.3 – Resultados simulados para configuração de 1,2 e 3 barreiras.

Tipo	Lt (m)	A (m²)	h(m)	Nível de Pressão Sonora [dB(A)]									At. média [dB(A)]					At. Média/altura [dB(A)/m]					At. média/área [dB(A)/m²]						
				A	B	C	D	E	F	G	H	I	Geral	A-F	A-C	D-F	G-I	Geral	A-F	A-C	D-F	G-I	Geral	A-F	A-C	D-F	G-I		
SEM				54,1	56	56	51,6	49,7	47,4	46,3	63,4	61,5																	
1-REF	16,4	82	5	48,3	44,9	41,4	40,3	46,3	42,5	46,2	63,4	61,5	-5,7	-8,5	-10,5	-6,5	0,0	-1,1	-1,7	-2,1	-1,3	0,0	-7%	-10%	-13%	-8%	0%		
	16,4	85	5,2	48,2	44,5	40,8	40	45,3	41,8	46,1	63,4	61,5	-6,0	-9,0	-10,9	-7,2	-0,1	-1,2	-1,7	-2,1	-1,4	0,0	-7%	-11%	-13%	-8%	0%		
	16,4	89	5,4	48,2	42,9	40,2	39,6	44,7	41,3	46,1	63,4	61,5	-6,5	-9,7	-11,6	-7,7	-0,1	-1,2	-1,8	-2,1	-1,4	0,0	-7%	-11%	-13%	-9%	0%		
	16,4	92	5,6	48,1	42,4	39,7	39,3	44,4	38,5	46,1	63,4	61,5	-7,0	-10,4	-12,0	-8,8	-0,1	-1,2	-1,9	-2,1	-1,6	0,0	-8%	-11%	-13%	-10%	0%		
	16,4	95	5,8	48,1	42	39,2	39,1	43,5	34,6	46,1	63,4	61,5	-7,6	-11,4	-12,3	-10,5	-0,1	-1,3	-2,0	-2,1	-1,8	0,0	-8%	-12%	-13%	-11%	0%		
16,4	98	6	48	41,6	38,7	38,9	43,4	33,8	46,1	63,4	61,5	-7,8	-11,7	-12,6	-10,9	-0,1	-1,3	-2,0	-2,1	-1,8	0,0	-8%	-12%	-13%	-11%	0%			
2-REF	28,4	142	5	48,3	46,7	41,2	38,2	46,8	42,7	46,2	64,8	59,5	-5,7	-8,5	-10,0	-7,0	-0,2	-1,1	-1,7	-2,0	-1,4	0,0	-4%	-6%	-7%	-5%	0%		
	28,4	148	5,2	48,3	46,4	40,5	37,6	45,8	42	46,1	64,8	59	-6,2	-9,0	-10,3	-7,8	-0,4	-1,2	-1,7	-2,0	-1,5	-0,1	-5%	-6%	-7%	-5%	0%		
	28,4	153	5,4	48,2	40,8	39,9	37	46	42,2	46,1	64,8	58,8	-6,9	-10,1	-12,4	-7,8	-0,5	-1,3	-1,9	-2,3	-1,5	-0,1	-5%	-7%	-8%	-5%	0%		
	28,4	159	5,6	48,1	40	39,4	36,4	45,8	39,8	46,1	64,9	58	-7,5	-10,9	-12,9	-8,9	-0,7	-1,3	-1,9	-2,3	-1,6	-0,1	-5%	-7%	-8%	-6%	0%		
	28,4	165	5,8	44,3	39,3	38,9	35,9	45	39	46,1	64,9	57,4	-8,4	-12,1	-14,5	-9,6	-0,9	-1,4	-2,1	-2,5	-1,7	-0,2	-5%	-7%	-9%	-6%	-1%		
28,4	170	6	39,8	38,6	38,3	35,4	44,9	38,7	46,1	64,9	56,9	-9,2	-13,2	-16,5	-9,9	-1,1	-1,5	-2,2	-2,7	-1,7	-0,2	-5%	-8%	-10%	-6%	-1%			
2-ABS	28,4	142	5	42,2	43,7	39,7	38,3	46,3	42,5	46,2	63,4	59,5	-7,1	-10,4	-13,5	-7,2	-0,7	-1,4	-2,1	-2,7	-1,4	-0,1	-5%	-7%	-10%	-5%	0%		
	28,4	148	5,2	41,6	43,2	38,8	37,6	45,3	41,8	46,1	63,4	59	-7,7	-11,1	-14,2	-8,0	-0,9	-1,5	-2,1	-2,7	-1,5	-0,2	-5%	-8%	-10%	-5%	-1%		
	28,4	153	5,4	41,3	40,8	37,9	37	44,7	41,3	46,1	63,4	58,8	-8,3	-12,0	-15,4	-8,6	-1,0	-1,5	-2,2	-2,8	-1,6	-0,2	-5%	-8%	-10%	-6%	-1%		
	28,4	159	5,6	40,5	40	37	36,4	44,4	38,5	46,1	63,4	58	-9,1	-13,0	-16,2	-9,8	-1,2	-1,6	-2,3	-2,9	-1,8	-0,2	-6%	-8%	-10%	-6%	-1%		
	28,4	165	5,8	40,1	39,3	36,3	35,9	43,5	34,6	46,1	63,4	57,4	-9,9	-14,2	-16,8	-11,6	-1,4	-1,7	-2,4	-2,9	-2,0	-0,2	-6%	-9%	-10%	-7%	-1%		
28,4	170	6	39,8	38,6	35,6	35,5	43,4	33,8	46,1	63,4	56,9	-10,3	-14,7	-17,4	-12,0	-1,6	-1,7	-2,4	-2,9	-2,0	-0,3	-6%	-9%	-10%	-7%	-1%			
3-ABS	36,8	184	5	42,2	43,7	39,7	38,2	45	42,5	36,6	44	59,5	-10,5	-10,6	-13,5	-7,7	-10,4	-2,1	-2,1	-2,7	-1,5	-2,1	-6%	-6%	-7%	-4%	-6%		
	36,8	191	5,2	41,6	43,2	38,8	37,6	43,5	41,8	34,9	43,4	59	-11,4	-11,4	-14,2	-8,6	-11,3	-2,2	-2,2	-2,7	-1,7	-2,2	-6%	-6%	-7%	-4%	-6%		
	36,8	199	5,4	41,3	40,8	37,9	37	41,1	41,3	34,2	42,9	58,8	-12,3	-12,6	-15,4	-9,8	-11,8	-2,3	-2,3	-2,8	-1,8	-2,2	-6%	-6%	-8%	-5%	-6%		
	36,8	206	5,6	40,5	40	37	36,4	40,4	38,5	33,4	42,5	58	-13,3	-13,7	-16,2	-11,1	-12,4	-2,4	-2,4	-2,9	-2,0	-2,2	-6%	-7%	-8%	-5%	-6%		
	36,8	213	5,8	40,1	39,3	36,3	35,9	37,6	34,6	33,1	42,3	57,4	-14,4	-15,2	-16,8	-13,5	-12,8	-2,5	-2,6	-2,9	-2,3	-2,2	-7%	-7%	-8%	-6%	-6%		
36,8	221	6	39,8	38,6	35,6	35,4	37	33,8	32,8	42	56,9	-14,9	-15,8	-17,4	-14,2	-13,2	-2,5	-2,6	-2,9	-2,4	-2,2	-7%	-7%	-8%	-6%	-6%			

À direita, é mostrada a atenuação média (maior do vermelho ao verde) 'Geral' para todos os pontos e por região: 'A-F' para toda a área residencial, 'A-C' para as residências próximas, 'D-F' para os pontos mais afastados e 'G-I' para os 3 pontos dentro do hospital. Também foi calculada a redução por altura, em dB(A)/m, e por área total de todas barreiras (A = L_t.h), em dB(A)/m².

A leitura da Tabela 6.3 permite perceber que a atenuação unicamente pela barreira frontal (1-REF) não foi suficiente para o ponto A (mínimo de 48dB(A)), embora tenha a maior atenuação por m², com altura ótima de 5,8m e sem ganhos aparentes com 6m. Tal particularidade nesse

ponto é devido às reflexões nos prédios altos, como mostra a Figura A.6 do Apêndice A para número de reflexões igual a 2,1 e 0. Essa dificuldade é resolvida com a adição da segunda barreira reflexiva perpendicular à primeira (2-REF), com altura de 5,8m. Essa configuração fornece maior atenuação na vizinhança para pontos a 11m de altura, porém agrava o ruído nos pontos mais elevados, E e F, em alturas de 21m, como possível consequência das reflexões.

Presume-se que a barreira dupla de absorção (2-ABS) seja a configuração de maior eficiência por área e com níveis na área residencial abaixo de 45dB(A). Com uma altura de 5,4m, é possível uma redução de 60cm de altura em relação à barreira reflexiva de mesma atenuação por área, que resulta no mapa da Figura 6.8(a). Logo, admite-se que a adição à superfície da barreira de um material fibroso como a lã de vidro, com absorvidades maiores que 0,8 em altas frequências, se mostra útil nas configurações dupla e tripla, mas não na barreira única frontal.

A barreira tripla de 5m (Figura A.7 do Apêndice A) consegue reduzir ruído nas áreas dos pontos G e H e promover o conforto acústico com um erro admitido de até 23% (36,6dB(A)). Embora tenha a melhor atenuação geral por metro de altura, é a menos eficiente quando considerada a área superficial, sem proporcionar benefícios significativos nas residências, com exceção no ponto E, quando comparada com a configuração dupla. Sem limitações de material e custo, a barreira tripla (3-ABS) com altura de 6m é a mais indicada pois tem a maior atenuação média geral, igual a 14,9dB(A), conforme mostra a Figura 6.8(b).

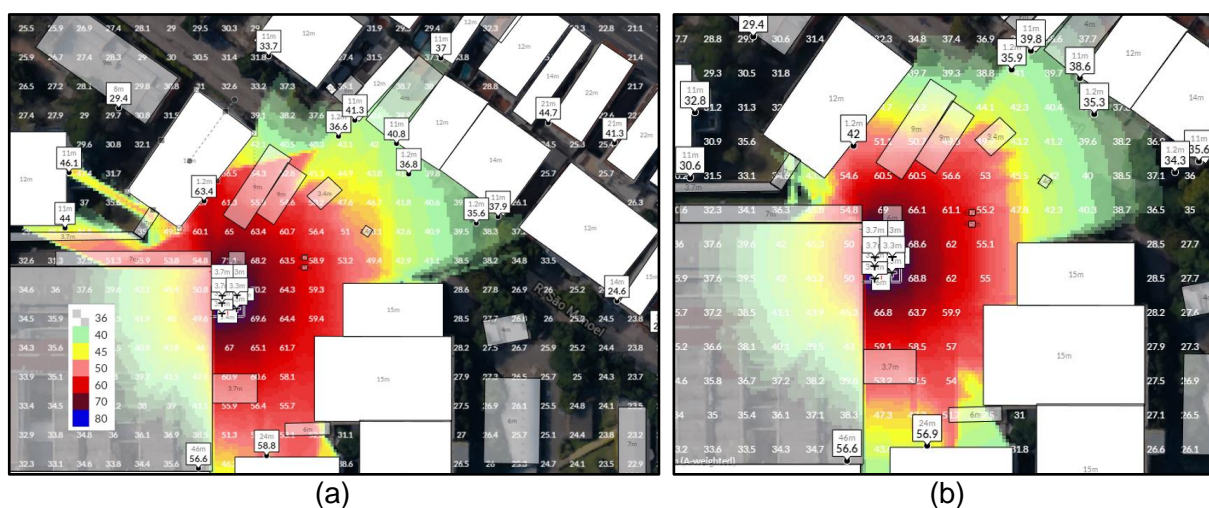


Figura 6.8 – Mapa de ruído para barreira absorptiva dupla de 5,4m (a) e tripla de 6m (b).

Em relação ao espaço hospitalar, os resultados induzem que seria impraticável minimizar o ruído no ponto I, bem como no prédio de 46m ao lado. Logo, deve-se averiguar a necessidade de atenuação nessa área do hospital ou estudar a adição de uma borda superior inclinada para o lado das fontes. Por fim, os mapas sonoros para as configurações de maior atenuação por área são ilustrados na Figura A.8 do Apêndice A.

7. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar o conforto acústico nas áreas mais afetadas pelo ruído dos sistemas de refrigeração (*chillers*), de acordo com as recomendações da norma NBR 10151, e determinar configurações de barreiras com melhores atenuações na situação de máximo ruído dos equipamentos para o horário noturno, mais silencioso.

Foi constatado nas áreas avaliadas que o conforto acústico não foi atendido segundo a norma. Para o período diurno, com um ruído ambiente estimado de 59,4dB(A) para a rua São Manoel e de 62,6dB(A) para a região interna do hospital, o nível de pressão sonora equivalente L_{Aeq} mais crítico registrado foi de 72,5dB(A) e 69,3dB(A) nos locais respectivos. Para a medição noturna foi obtido um L_{Aeq} de 62,1dB(A), de modo que o controle do ruído para este turno seja

mais relevante, em razão do elevado ruído ambiente durante o dia. A medição do nível de pressão sonora (NPS) perto de um compressor do *chiller* revelou o predomínio de altas frequências, com L_{Aeq} máximo de 83dB(A) para frequência de 2kHz e mínimo de 35dB(A) para 31,5Hz.

De acordo com os resultados das simulações, a melhor solução de redução do ruído com uma barreira frontal é de 5,8m de altura com atenuação média na zona residencial de 11,4dB(A), sem obter benefícios das propriedades acústicas do material. Ao adicionar uma segunda barreira perpendicular à frontal, pode-se usar alturas de 5,8m para materiais reflexivos ou 5,4m para barreiras absorptivas (com 20% de reflexão), sendo esta última a configuração de maiores atenuações por m^2 (6-10% nas residências), com menores alturas e razoável tolerância para condição de conforto acústico noturno, com níveis abaixo de 45dB(A).

Para obter uma redução de ruído expressiva em alguns pontos do hospital, às custas de mais material, o conjunto com três barreiras é o mais indicado. Ignorada a baixa atenuação por área das barreiras, pode-se utilizar a configuração tripla de 6m de altura que proporciona atenuação média geral de 14,9dB(A) e 17,4dB(A) nos prédios mais próximos das fontes.

Ajustado genericamente pelo coeficiente de reflexão, o material se mostrou relevante para duas ou mais barreiras. Portanto, para obter redução extra de ruído sem alterar as dimensões das barreiras, é importante a escolha de um material poroso ou fibroso adequado às frequências predominantes dos *chillers*, isto é, de 1kHz a 4kHz.

Através da comparação com as medições realizadas na altura do solo (1,2m), foi obtido um erro significativo entre 11,9% e 15,7% para o simulador de nível de pressão sonora. Todavia, ressalta-se que para alturas médias entre fonte e receptor de 5 a 30m, o cálculo pela norma tem acurácia estimada de 1dB, logo, conjectura-se uma maior segurança nos resultados obtidos neste estudo para alturas de 11 a 21m. Além disso, o ruído do sistema foi superestimado pela substituição do NPS das fontes de menor potência pelo NPS de referência, relativo ao compressor mais potente. Embora não tenha sido detalhadamente analisado, constatou-se que a variação de NPS relacionado à posição das fontes, obstáculos e receptores pode ser significativa, de acordo com o caminho de propagação do som.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

A análise realizada pode ser aprimorada com medições mais exatas dos níveis de ruído e do posicionamento das fontes e obstáculos. Pode-se estudar a relação entre materiais e custos com intuito de viabilizar a construção das barreiras. Sugere-se comparar a análise deste trabalho com a de outros métodos de controle do ruído e, na impossibilidade de usar barreiras altas, estudar uma solução híbrida de barreiras com ressonadores ou jaquetas acústicas.

O trabalho apresentado também pode servir de base para novos estudos. Pode-se realizar medições dentro dos prédios do hospital e em pontos elevados e examinar o real impacto do ruído para conforto e saúde dos pacientes e funcionários do hospital, com o cálculo da dose de ruído a que estão sujeitos. Se necessário, pode-se estudar a eficácia de isolamentos acústicos a partir do espectro de ruído das fontes obtido em bandas de oitava.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade *et al.*; “Efeitos do ruído industrial no organismo”, Pró-fono: Revista de Atualização Científica Vol. 10(1), pp.17-20, São Paulo, 1998.

ASHRAE; “ASHRAE Handbook Fundamentals”, Atlanta, 2009.

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.

Aylor, D. E.; Marks, L.E.; “Perception of noise transmitted through barriers”, The Journal of the Acoustical Society of America Vol. 59(2), pp. 397-400, 1976.

- Bistafa, S. R.; “**Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**”, São Paulo, 2ª edição, 2011.
- Bronzaft, A. L.; Noise:Its Effects and Control; In: Lippmann, M.; “**Environmental Toxicants**”, 3rd edition, 2009. cap 28, pp.1071-1087.
- Cho *et al.*; “**Highway traffic noise prediction using method fully compliant with ISO 9613: comparison with measurements**”, Applied Acoustics, Vol. 65(9), pp. 883-892, 2004.
- Crocker, M. J.; Introduction to Principles of Noise and Vibration Control; In: _____. “**Handbook of Noise and Vibration Control**”, John Wiley & Sons, 2007. cap.54, pp. 649-667.
- Fahim, A. A. M.; Seddeq, H.S.; “**Noise Prediction for Outdoor Cooling Systems; Case Study**”, Journal of American Science, Vol. 6(11), pp. 899-905, 2010.
- Forouharmajd, F.; Nassiri P.; Monazzam M. R.; “**Noise pollution of air compressor and its noise reduction procedures by using an enclosure**”, International Journal of Environmental Health Engineering Vol. 1(1), pp. 1-20, 2012.
- Gerges, S. N. Y.; “**Ruído: fundamentos e controle**”, Florianópolis, 1ª edição, 1992.
- Horoshenkov, K.; Lam, Y. W.; Attenborough, K.; Noise Attenuation Provided by Road and Rail Barriers, Earth Berms, Buildings, and Vegetation. In: Crocker, M. J. (Ed.); “**Handbook of Noise and Vibration Control**”, John Wiley & Sons, 2007. cap 122, p. 1446-1457.
- ISO 9613-1:1996. “**Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere**”, International Organization for Standardization, 1996.
- ISO 9613-2:1996. “**Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation**”, International Organization for Standardization, 1996.
- Krawcke N.; “**Efficiency Propels Chiller Market**”, The Air Conditioning, Heating and Refrigeration News, <https://www.achrnews.com/articles/137110-efficiency-propels-chiller-market>. Acessado em 29/10/2018.
- Kuehner, D. Industrial and commercial noise in the community. In: Crocker, M. J. (Ed.); “**Handbook of Noise and Vibration Control**”, John Wiley & Sons, 2007. Cap 128, pp. 1509-1515.
- Kurze, U. J.; Anderson, G. S.; “**Sound Attenuation by Barriers**”, Applied Acoustics Vol. 4, pp. 35-53, 1971.
- Laranja, R. A. C.; “**Modelo heurístico modificado de barreiras acústicas para uso em áreas urbanas**”, Tese para obtenção de título de doutor em engenharia. Porto Alegre: UFRGS, 2004.
- Maekawa Z.; “**Noise reduction by Screens**”, Applied Acoustics Vol. 1, pp. 157-173, 1968.
- Paulauskis J. A.; “**Addressing Noise Problems In Screw Chillers**”, ASHRAE Journal Vol. 41(6), pp. 23-25, 1999.
- Ueno *et al.*; “**Subjective effect of HVAC noise on music players**”, International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 2000.

ANEXO A

Tabela A.1 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A). (Fonte: adaptado de NBR 10151, 2000)

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

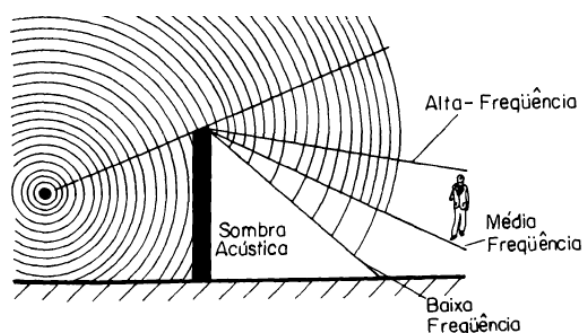


Figura A.1 – Barreira e sombra acústica. (Fonte: Gerges, 1992)

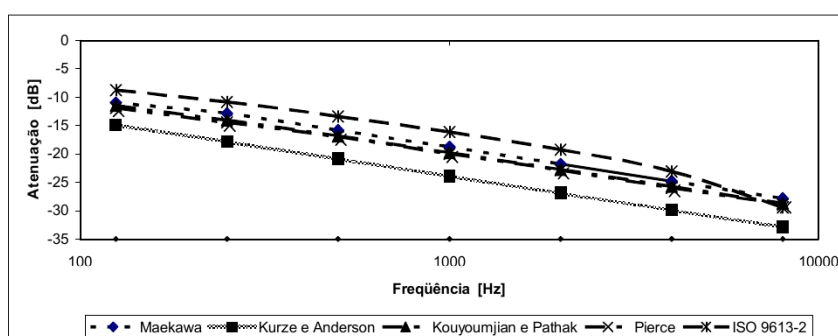


Figura A.2 – Resultado de comparação dos modelos e métodos, considerando apenas o efeito da difração. (Fonte: Laranja, 2004)

Tabela A.2 – NPS e atenuação prevista por barreira. (Fonte: adaptado de Fahim e Seddeq, 2010)

Frequência de oitava (Hz)	NPS medido (dB)	NPS previsto com absorção do ar (dB)	NPS previsto sem absorção do ar (dB)	Atenuação prevista por barreira (dB)
63	48,5	51,7	51,7	12,5
125	50,7	53,4	53,4	15,2
250	60,2	62,2	63,2	19,6
500	69	72,8	72,9	22,3
1000	63,5	66,6	70,6	21,5
2000	54,2	56	59,3	20,6
4000	50,2	52,6	54,6	23,1
8000	40,2	44,5	48,3	19,6
dBA	70,7	74	75,4	-

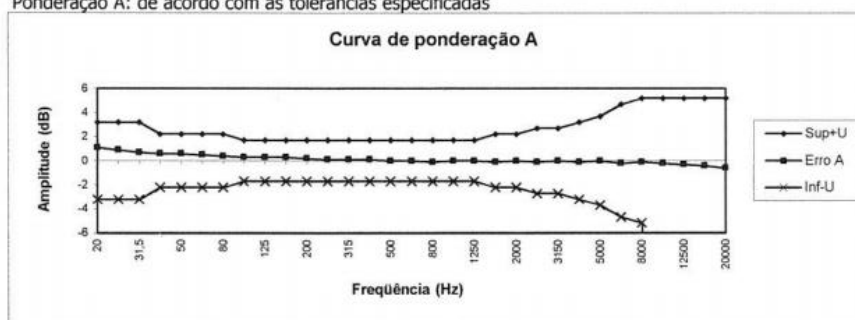
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº: RBC1-10109-687

4- RESULTADOS E DECLARAÇÃO DA INCERTEZA

Nível de Referência: 135 dB U= Incerteza

Frequência Nominal (Hz)	Limite Superior + U (dB)	Limite Inferior - U (dB)	Erro Curva A (dB)	Erro Curva B (dB)	Erro Curva C (dB)	Erro Curva Lin (dB)
20	3,2	-3,2	1,1	0,8	0,5	0,0
25	3,2	-3,2	0,9	0,8	0,5	0,0
31,5	3,2	-3,2	0,7	0,7	0,4	0,0
40	2,2	-2,2	0,6	0,6	0,3	0,0
50	2,2	-2,2	0,6	0,4	0,2	0,0
63	2,2	-2,2	0,5	0,2	0,1	0,0
80	2,2	-2,2	0,4	0,3	0,1	0,0
100	1,7	-1,7	0,3	0,1	0,1	0,0
125	1,7	-1,7	0,3	0,1	0,1	0,0
160	1,7	-1,7	0,3	0,1	0,1	0,0
200	1,7	-1,7	0,2	0,0	0,0	0,0
250	1,7	-1,7	0,1	0,0	0,0	0,0
315	1,7	-1,7	0,1	-0,1	0,0	0,0
400	1,7	-1,7	0,1	0,0	0,0	0,0
500	1,7	-1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
630	1,7	-1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
800	1,7	-1,7	-0,1	0,0	0,0	0,0
1000	1,7	-1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
1250	1,7	-1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
1600	2,2	-2,2	-0,1	0,0	0,0	0,0
2000	2,2	-2,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2500	2,7	-2,7	-0,1	-0,1	0,0	0,0
3150	2,7	-2,7	0,0	-0,1	-0,1	0,0
4000	3,2	-3,2	-0,1	0,0	-0,1	0,0
5000	3,7	-3,7	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
6300	4,7	-4,7	-0,2	-0,1	0,0	-0,1
8000	5,2	-5,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
10000	5,2	-Inf	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3
12500	5,2	-Inf	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4
16000	5,2	-Inf	-0,4	-0,4	-0,4	-0,6
20000	5,2	-Inf	-0,6	-0,6	-0,6	-0,9

Ponderação A: de acordo com as tolerâncias especificadas



Executante: _____

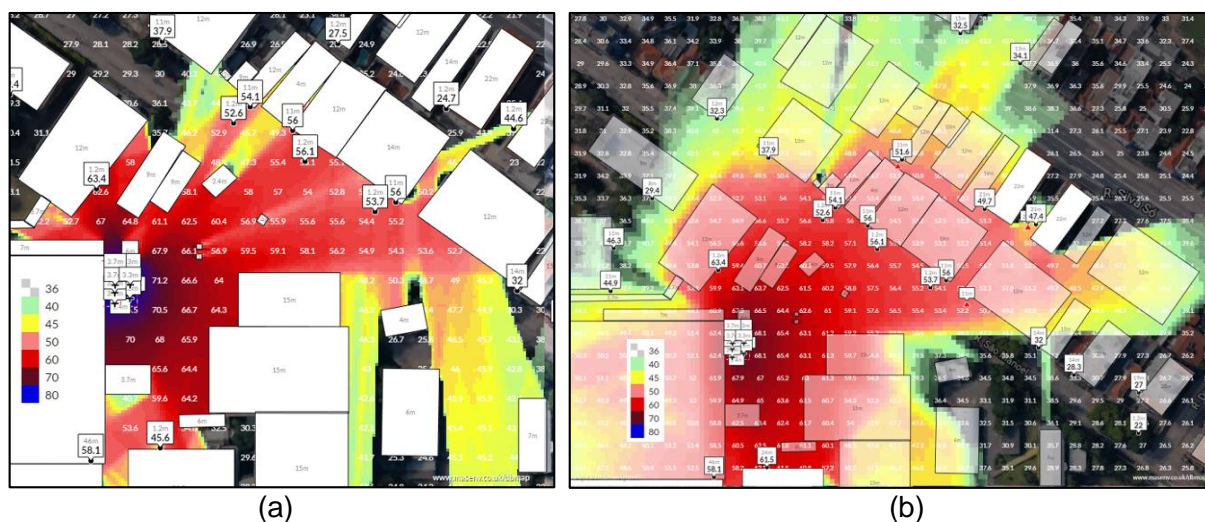
Página: 2/4

Figura A.4 - Calibração do Medidor de Nível Sonoro para ponderação A.

APÊNDICE A

Tabela A.3 – Nível equivalente por número de compressores.

Frequência (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
L_{Aeq} por número de compressores	1	35	48	70	69	75	80	83	65	44
	2	38	51	73	72	78	83	86	68	47
	3	40	53	75	74	80	85	88	70	49
	4	41	54	76	75	81	86	89	71	50



(a) (b)
 Figura A.5 – Mapa de ruído sem barreira, na altura de 1,2m (a) e 21m (b).



Figura A.6 – Efeito da reflexão para barreira frontal de altura 5,6m.

