

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Mauricy Cesar Rodrigues de Souza

**DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA EM AMBIENTES INDUSTRIAIS
POR INTENSIMETRIA ACÚSTICA**

TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Florianópolis

2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Mauricy Cesar Rodrigues de Souza

DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA EM AMBIENTES INDUSTRIAIS
POR INTENSIMETRIA ACÚSTICA

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia de Produção –
Área de Concentração: Ergonomia.
Orientador: Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.

Florianópolis

2003

**DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA EM AMBIENTES INDUSTRIAIS
POR INTENSIMETRIA ACÚSTICA**

Esta tese foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Produção no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Edson P. Paladini
Coordenador do PPGEF

Banca Examinadora

Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.
Orientador

Profa. Ana Regina de Aguiar Dutra, Dra. (PPGEP-UFSC)

Prof. Elias Bitencourt Teodoro, Ph.D. (UFU)

Prof. Roberto Jordan, Dr. Eng. (PPGEM-UFSC)

Prof. Neri dos Santos, Dr. (PPGEP-UFSC)

Profa. Stelamaris Rolla Bertoli, Dra. (UNICAMP)

30 de Maio de 2003

SUMÁRIO

Lista de Símbolos.....	vii
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
<u>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</u>	01
1.1 O PROBLEMA MACRO DA PESQUISA.....	01
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	01
1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO DA PESQUISA.....	03
1.4 HIPÓTESES DA PESQUISA	03
1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	04
1.6 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	04
1.7 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	04
1.8 RESUMO.....	05
<u>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: RUÍDO INDUSTRIAL.....</u>	06
2.1 O RUÍDO OCUPACIONAL.....	6
2.1.1 RUÍDO E SAÚDE OCUPACIONAL	6
2.1.2 RUÍDO E SEGURANÇA DO TRABALHO	6
2.2 O RUÍDO INDUSTRIAL	7
2.3 A QUESTÃO DO CONTROLE DO RUÍDO INDUSTRIAL.....	8
2.4 REDUÇÃO DE RUÍDO.....	9
2.4.1 MEDIDAS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL	9
2.4.2 MEDIDAS DE PROTEÇÃO COLETIVA.....	9
2.4.3 ENGENHARIA DE CONTROLE DE RUÍDO	10
2.4.4 MODELOS TEÓRICOS E SUA VALIDAÇÃO	10
2.5 ESCOLHA DE PRIORIDADES	11
2.6 IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES SONORAS.....	11
2.7 PRESSÃO, POTÊNCIA E INTENSIDADE	11
2.8 PROCEDIMENTOS PARA A DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA.....	12

2.8.1	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA POR MEDIÇÕES DE PRESSÃO	12
2.8.2	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA POR MEDIÇÕES DE INTENSIDADE	13
2.8.3	NORMAS PARA DETERMINAR A POTÊNCIA POR MEDIÇÕES DE INTENSIDADE	13
2.9	RESUMO.....	14

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: INTENSIMETRIA ACÚSTICA..... 15

3.1	PRINCÍPIOS TEÓRICOS	15
3.1.1	POTÊNCIA SONORA	15
3.1.2	INTENSIDADE SONORA.....	16
3.1.3	PRESSÃO SONORA	16
3.1.4	VELOCIDADE DE PARTÍCULA	17
3.1.5	INTENSIDADE ATIVA E REATIVA	17
3.1.6	DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	19
3.2	PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO.....	20
3.2.1	MEDIÇÕES EM PONTOS DISCRETOS	20
3.2.2	MEDIÇÕES POR VARREDURA	20
3.3	ERROS DE MEDIÇÃO.....	24
3.3.1	ERROS SISTEMÁTICOS	25
3.3.2	ERROS ALEATÓRIOS.....	30
3.4	AÇÕES DE MELHORIA	35
3.4.1	FONTE EXTERNA À SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO	36
3.4.2	FORTE COMPONENTE REVERBERANTE	36
3.4.3	CAMPO PRÓXIMO	36
3.4.4	RADIAÇÃO LOCALIZADA DA FONTE	36
3.5	DISTÂNCIA ENTRE MICROFONES.....	37
3.6	RESUMO.....	38

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS: RUÍDO DE FUNDO.. 40

4.1	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA	41
4.2	PROCEDIMENTOS DA NORMA ISO 9614-2	41
4.3	ENSAIOS DE PRESSÃO PARA DETERMINAR POTÊNCIA.....	43
4.4	ENSAIOS DE INTENSIDADE	43
4.4.1	FONTES SONORAS	44

4.4.2	FORMA DE AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS	45
4.5	ENSAIOS DE INTENSIDADE REALIZADOS.....	45
4.5.1	ENSAIOS FONTE TORNADO	46
4.5.2	ENSAIOS FONTE ROBOT	50
4.5.3	ENSAIO 2 FONTE ROBOT.....	53
4.6	SISTEMA DE MEDIÇÃO	57
4.6.1	SISTEMA PARA OS ENSAIOS DE INTENSIDADE SONORA	57
4.6.2	SISTEMA PARA OS ENSAIOS DE PRESSÃO SONORA	58
4.7	CONCLUSÕES	58

CAPÍTULO 5 – PROC. METODOLÓGICOS: LINHAS ALTERNADAS 60

5.1	SOBRE A VARREDURA COM LINHAS CONTÍNUAS.....	61
5.1.1	RUÍDO DE FUNDO NÃO ESTACIONÁRIO	62
5.1.2	SIMULAÇÃO: ESTUDO DE CASO COM FONTE EXTERNA INTERMITENTE.....	62
5.2	PROCEDIMENTO DE VARREDURA COM LINHAS ALTERNADAS	64
5.3	ENSAIOS DESTA PESQUISA EM SALA COMUM.....	66
5.3.1	ENSAIO SEM FONTE DE RUÍDO EXTERNA À SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO	68
5.3.2	ENSAIO COM FONTE EXTERNA DE RUÍDO ESTACIONÁRIO DISTANTE	70
5.3.3	ENSAIO COM FONTE EXTERNA DE RUÍDO ESTACIONÁRIO PRÓXIMA	70
5.3.4	ENSAIO COM FONTE EXTERNA PRÓXIMA E RUÍDO NÃO ESTACIONÁRIO	73
5.4	ENSAIOS EM AMBIENTE INDUSTRIAL.....	76
5.4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS EM AMBIENTE INDUSTRIAL.....	77
5.5	SISTEMA DE MEDIÇÃO	79
5.6	CONCLUSÕES	80

CAPÍTULO 6 – PROC. METODOLÓGICOS: ALTA FREQUÊNCIA 81

6.1	LIMITAÇÕES DA INTENSIMETRIA EM ALTAS FREQUÊNCIAS	81
6.2	CORREÇÕES CONFORME BALANT <i>ET AL.</i>	84
6.2.1	VALORES DAS CORREÇÕES CONFORME BALANT <i>ET AL.</i>	84
6.3	CORREÇÕES CONFORME JACOBSEN <i>ET AL.</i>	85
6.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA	86
6.5	ENSAIOS DESTA PESQUISA EM ALTAS FREQUÊNCIAS (1/1 OITAVA).....	87
6.6	RESULTADOS DAS CORREÇÕES (BANDAS DE 1/1 OITAVA)	88

6.7	ENSAIOS DESTA PESQUISA EM ALTAS FREQUÊNCIAS (1/3 OITAVA).....	89
6.8	RESULTADOS DAS CORREÇÕES (BANDAS DE 1/3 OITAVA)	89
6.9	SISTEMA DE MEDIÇÃO	91
6.10	CONCLUSÕES	92

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS 93

7.1	ANÁLISE E RECOMENDAÇÕES SOBRE A NORMA ISO 9614-2	93
7.2	AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES COM LINHAS ALTERNADAS.....	94
7.3	AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS EM BANDAS DE ALTA FREQUÊNCIA	95
7.4	ANÁLISE E RECOMENDAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE MEDIÇÃO	95
7.5	LIMITAÇÕES DOS RESULTADOS DA PESQUISA.....	96
7.6	SOBRE A DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA VERDADEIRA	97

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS 98

8.1	ELEVADO RUÍDO DE FUNDO E NORMA ISO 9614-2	98
8.2	MEDIÇÕES POR VARREDURA COM LINHAS ALTERNADAS	98
8.3	INTENSIMETRIA ACÚSTICA E FREQUÊNCIA SUPERIOR ESTENDIDA	99
8.4	RECOMENDAÇÕES DE FUTUROS TRABALHOS	100

REFERÊNCIAS..... 101

APÊNDICE – AVALIAÇÕES PRELIMINARES..... 106

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	<i>posição de microfone</i>
<i>B</i>	<i>posição de microfone</i>
F_{pl}	índice de pressão intensidade
<i>I</i>	intensidade sonora
ImG_{AB}	parte imaginária do espectro cruzado dos sinais A e B
I_r	intensidade sonora em uma determinada direção <i>r</i>
\hat{I}_r	magnitude, na direção <i>r</i> , da intensidade instantânea, \hat{I}_r
J_r	intensidade sonora reativa na direção <i>r</i>
k_0	número de onda acústica
<i>k</i>	fator de incerteza
$[L_p]$	nível médio de pressão, ponderado na superfície de medição
L_W	nível de potência
L_{Wi}	nível de potência no segmento <i>i</i>
L_k	índice de reatividade do campo sonoro
L_{ko}	índice de intensidade residual do sistema de medição
<i>p</i>	pressão sonora
p_{rms}	pressão quadrática média
<i>r</i>	direção
<i>s</i>	desvio padrão da reprodução de resultados do ensaio
<i>S</i>	superfície
<i>t</i>	tempo
<i>u</i>	velocidade de partícula instantânea
W_s	potência sonora média líquida gerada pela fonte dentro da superfície <i>S</i>
$\partial\Phi/\partial r$	gradiente de fase
Δr	<i>distância entre microfones</i>
δ_{plo}	índice de pressão intensidade residual
ρc	impedância acústica do meio
ω	freqüência angular

Resumo

SOUZA, Mauricy C. R. de, **Determinação da Potência Sonora em Ambientes Industriais por Intensimetria Acústica**. 2003. 110p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

As dificuldades para projetar e implementar medidas de redução de ruído diminuem sensivelmente quando é possível identificar as principais fontes. Essa identificação se dá de forma plena mediante a determinação *in loco* da potência sonora das máquinas. Procedimentos para a determinação de potência sonora por medições de pressão exigem requisitos muitas vezes não atendidos em ambientes industriais, especialmente quanto à interferência de outras fontes de ruído além daquela ensaiada. Procedimentos baseados na técnica de intensidade com dois microfones se propõem a isso. Foram investigados procedimentos para ampliar a abrangência das aplicações da intensimetria acústica na determinação da potência sonora em condições comumente encontradas em ambientes industriais. Essas condições se referem especialmente ao elevado nível do ruído de fundo, ao ruído de fundo não estacionário e ao ruído da fonte ensaiada em bandas de alta frequência. Os resultados dos ensaios realizados indicaram ser possível determinar a potência sonora sob condições de interferência do ruído de fundo mais severas do que as estipuladas pela norma internacional ISO 9614-2. O procedimento com linhas alternadas para varrer a superfície de medição, ao invés das linhas contínuas normalmente utilizadas, mostrou-se uma ferramenta útil para ampliar as possibilidades de uso da intensimetria em ambientes com significativas variações do ruído de fundo. Os resultados dos ensaios para determinar a potência sonora melhoraram com a correção da perda da sensibilidade de pressão dos microfones nas altas frequências.

Palavras-chave: intensimetria acústica, potência sonora, ruído industrial

Abstract

SOUZA, Mauricy C. R. de, **Determinação da Potência Sonora em Ambientes Industriais por Intensimetria Acústica**. 2003. 110p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

The identification of the main noise sources is essential to the industrial noise control and this depends on sound power determination of machines *in situ*. Sound power determination procedures using pressure measurements are seriously affected by certain conditions usually found at industrial environments, especially related to strong extraneous noise sources, but not the procedures based on the sound intensity. This research has investigated some procedures to improve the applications of the sound intensity measurements to the sound power determination at industrial environment conditions. The investigated conditions are the high level of the background noise, the non-stationary noise, in time, and the source noise at high frequency bands. The results of the investigations have indicated good possibilities to determine the sound power under conditions of the background noise more severe than those specified by international standard ISO 9614-2. The procedure to sweep the measurement surface with alternated lines, instead of the continuous lines usually used, was shown a useful tool to enlarge the possibilities of use of the sound intensity measurements at environments with significant variations of the background noise. It was necessary to compensate the drop of the pressure sensitivity at high frequencies to find better results.

Keywords: industrial noise, sound intensity measurement, sound power

Este primeiro capítulo apresenta sucintamente o problema macro da pesquisa. São abordados, então, a justificativa, os objetivos específicos, as hipóteses, as limitações, a caracterização e as contribuições da pesquisa.

1.1 O Problema Macro da Pesquisa

O ruído é atualmente uma das principais causas de problemas de saúde ocupacional e segurança do trabalho nas plantas industriais em todo o mundo.

Em função disso, as autoridades competentes estabeleceram limites de exposição ao ruído em ambientes de trabalho. Isso ocorreu a nível internacional (ISO 9612, 1997), incluindo-se o Brasil (NR 15, 1978).

Assim, esta pesquisa se originou da necessidade de se reduzir a exposição dos trabalhadores ao ruído ocupacional nos ambientes industriais, visto que as empresas ainda têm muitas dificuldades para atender aos limites de ruído estabelecidos.

Portanto, o problema macro da pesquisa é aumentar os recursos técnicos para a adoção de medidas que visam reduzir o elevado ruído ocupacional nos ambientes industriais.

1.2 Justificativa da Pesquisa

A implementação de medidas coletivas para reduzir a exposição dos trabalhadores ao ruído em ambientes industriais depende da identificação das fontes sonoras.

A identificação de uma fonte sonora significa, em geral, localizá-la e determinar a sua potência sonora, parâmetro fundamental para projetar adequadamente as medidas de controle de ruído.

A escolha da intensimetria acústica, como método para determinar a potência sonora, ocorre em função desta apresentar menos limitações de utilização, em ambientes não controlados, do que as tradicionais medições de pressão sonora.

As medições de intensidade sonora podem ser utilizadas em ambientes industriais, mesmo com a operação normal do processo de produção, o que normalmente não é possível ao utilizar medições de pressão sonora.

Pesquisas já realizadas e procedimentos estabelecidos para utilizar a intensimetria para determinar a potência sonora em campo mostram, no entanto, que também há limitações e que estas inviabilizam grande parte das possíveis aplicações da técnica.

Após visitas de avaliação a diversas fábricas (Apêndice 1), observou-se que há características que, embora presentes na maioria das situações de ruído industrial, não são cobertas por aquilo que se propõem os procedimentos de intensimetria atualmente existentes, ou são cobertas apenas parcialmente. As características mais observadas e que não são atendidas pelos atuais procedimentos de medição da intensidade sonora serão investigadas por esta pesquisa.

Os procedimentos propostos são, principalmente, complementares ou variações da série de normas ISO 9614, avançando uma linha de pesquisa já estabelecida. Se por um lado as normas ISO 9614 ainda apresentam muitas limitações para o uso em ruído industrial, por outro lado essas normas já possuem razoável aplicação prática, o que não é interessante desprezar.

1.3 Objetivo Específico da Pesquisa

Esta pesquisa tem por objetivo ampliar as possibilidades de utilização da intensimetria para determinar a potência sonora de máquinas e processos em ambientes industriais, especificamente em relação às seguintes questões:

- (i) o elevado nível do ruído de fundo, acima dos limites aceitos pelos critérios dos procedimentos já publicados;
- (ii) o ruído de fundo não estacionário;
- (iii) o ruído da fonte nas bandas de frequências de 8 kHz e 10 kHz, bandas de um terço de oitavas.

1.4 Hipóteses da Pesquisa

Serão assumidas as seguintes três hipóteses:

- (i) A intensimetria acústica pode ser utilizada em ambientes com elevado nível do ruído de fundo, acima dos limites aceitos pelos critérios dos procedimentos publicados;
- (ii) A intensimetria acústica pode ser utilizada em ambientes com o ruído de fundo não estacionário se for aplicado procedimento com melhor distribuição da amostragem do campo sonoro ao longo do tempo;
- (iii) A intensimetria acústica pode ser utilizada para determinar a potência sonora de fontes de ruído em bandas de frequências situadas acima de 6,3 kHz.

1.5 Limitações da Pesquisa

A generalização das conclusões sobre as investigações a serem realizadas, além das próprias condições dos ensaios, só poderá ocorrer após a utilização dos novos procedimentos propostos em diversas situações práticas e por diferentes usuários.

A determinação da incerteza dos resultados obtidos pelo uso dos novos procedimentos propostos também dependerá de um número maior de aplicações destes procedimentos.

1.6 Caracterização da Pesquisa

Esta pesquisa, de fundamento experimental, baseia-se na realização de ensaios para avaliar a adequação de procedimentos de medição e cálculo para determinar a potência sonora por intensimetria acústica, em condições encontradas nos ambientes industriais.

Os procedimentos propostos por esta pesquisa podem ser utilizados em determinados ambientes industriais nos quais, em função da complexidade do campo acústico, os procedimentos por intensimetria atualmente padronizados não são indicados ou não têm os seus critérios satisfeitos.

1.7 Contribuições da Pesquisa

Serão investigados procedimentos para determinar a potência sonora em condições não atendidas pelos procedimentos normalizados atuais.

O conhecimento da potência sonora reduz as dificuldades técnicas e econômicas tanto na identificação de fontes de ruído quanto na avaliação do desempenho de medidas de controle, o que tornará viável a implantação de medidas de redução de ruído de forma mais abrangente.

A consequência natural do controle de ruído coletivo será a diminuição da exposição dos trabalhadores ao ruído ocupacional na indústria.

1.8 Resumo

Este capítulo apresentou o problema, a justificativa, os objetivos específicos, as hipóteses, as limitações, a caracterização e as contribuições da pesquisa.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: RUÍDO INDUSTRIAL

O capítulo 2 aborda, resumidamente, as questões mais genéricas envolvidas no controle de ruído industrial, dos principais problemas causados pelo ruído ocupacional às dificuldades para implementar medidas para a sua atenuação, incluindo-se as medidas para redução de ruído.

Neste capítulo, relaciona-se o ruído ocupacional com a saúde e segurança do trabalho.

Por fim, conclui-se que, em função da complexidade dos problemas acústicos e dos custos envolvidos no controle de ruído, é preciso eleger prioridades e isso implica na necessidade da identificação das fontes de ruído.

2.1 O Ruído Ocupacional

2.1.1 Ruído e Saúde Ocupacional

Os problemas trazidos pelo ruído se referem à perda auditiva irreversível (ISO 1999, 1990) e a outros problemas fisiológicos como estresse, hipertensão e alterações do sistema nervoso (ISO 9612, 1997).

Quanto à perda auditiva, são danosas as conseqüências ao trabalhador, tanto na sua vida profissional como no convívio social e familiar.

2.1.2 Ruído e Segurança do Trabalho

O ruído elevado pode contribuir para o surgimento de acidentes, pois dificulta ao trabalhador ouvir avisos preventivos de um companheiro ou de um sinal sonoro de advertência. Devido ao ruído excessivo, o trabalhador tem reduzida a sua percepção da aproximação de veículos ou da queda de objetos.

O nível elevado de ruído interfere na comunicação entre trabalhadores, o

que pode ocasionar um acidente devido ao entendimento errado de uma instrução.

2.2 O Ruído Industrial

É significativo o número de pessoas que apresentam problemas auditivos devido ao ruído de máquinas em ambientes de trabalho, inclusive em países do primeiro mundo.

A Comunidade Européia dedicou enorme esforço no projeto de normalização sobre o assunto (Jacques *et al.*, 2000).

No Reino Unido, por exemplo, há 1,3 milhão de trabalhadores expostos a níveis de ruído potencialmente danosos à audição e 170 mil pessoas consideradas com perda auditiva ou outro problema de audição, induzidos pelo ruído ocupacional, conforme Ward (2001). Por isso, o ruído no trabalho ainda é considerado como uma questão prioritária pelas autoridades britânicas competentes, o que levou a um programa de inspeção sobre ruído, que é explicado com detalhes na referência citada.

Realizamos dezenas de visitas a áreas fabris de empresas espalhadas pelo Brasil nos últimos dez anos e observamos que, em geral, os níveis de ruído industrial nas empresas brasileiras são excessivos, muitas vezes bastante acima dos limites estabelecidos pela legislação.

De uma forma geral, a atenção dada pelas empresas brasileiras para as questões relacionadas ao ruído ainda é superficial, embora haja exceções. Há empresas que se comportam de forma exemplar, contratando profissionais especialistas de comprovada capacitação técnica e também investindo no seu próprio pessoal de engenharia de segurança, medicina do trabalho e fonoaudiologia.

Não são menores os problemas acústicos encontrados em salas administrativas, e que muitas vezes apresentam condições bem distantes daquelas recomendadas, por exemplo, pela norma NBR 10152 (1987), para atividades de esforço intelectual.

2.3 A Questão do Controle do Ruído Industrial

As técnicas de controle de ruído foram sendo desenvolvidas ao longo dos anos, embora ainda sejam, em geral, específicas de cada caso. Isso se deve às particularidades de diversas características como as instalações industriais, a localização e o tipo de máquinas ruidosas e as condições sócio econômicas e do meio ambiente.

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

Adquirir máquinas e processos silenciosos, tanto em novas fábricas como na substituição ou ampliação de instalações existentes, garante um ambiente industrial com nível de ruído adequado (Putnam, 2000). Na prática, no entanto nem sempre isso é possível, mesmo em países desenvolvidos, como pode ser visto, por exemplo, pela situação do ruído na indústria de papel da Holanda, mostrada em trabalho recentemente publicado (Vanweert, 2001).

Muitas vezes, há dificuldade em se adquirir equipamentos que geram baixo nível de ruído, devido à falta de tecnologia do fabricante para projetar máquinas e processos silenciosos. Além disso, o ruído gerado pelas máquinas industriais depende, muitas vezes, das suas condições específicas de instalação e de operação. O comprador pode também ter dificuldades para analisar o produto entregue pelo fabricante, devido à falta de equipamento para medir o ruído ou de conhecimento para fazer a avaliação em uma situação não tão simples, por exemplo, na presença de outras máquinas ruidosas.

Assim, quando o controle não é feito no projeto, há que se partir para a adoção de medidas corretivas de redução do ruído.

2.4 Redução de Ruído

Costuma-se dividir as medidas de controle de ruído industrial em dois grupos: Medidas de Proteção Individual e Medidas de Proteção Coletiva.

2.4.1 Medidas de Proteção Individual

As medidas de proteção individual reduzem a exposição do trabalhador ao ruído sem alterar o nível sonoro do ambiente industrial. São medidas como o uso de protetores auditivos, a permanência em cabines para descanso auditivo e o deslocamento do posto de trabalho.

As medidas de proteção individual têm limitações conforme cada situação específica. São medidas administrativas que devem ser auxiliadas tecnicamente por profissionais da engenharia e da medicina do trabalho

A medida de controle de ruído mais simples e mais econômica, aparentemente, é o uso de protetores auditivos.

Apesar dos benefícios comprovados com o uso de protetores auditivos, ao menos qualitativamente, ainda não há pleno conhecimento sobre sua real eficiência na redução do ruído, nem na redução do risco de perda auditiva.

Muitos trabalhadores consideram desconfortável o uso do protetor auditivo. Há possibilidade de sua rejeição ou mesmo de ser usado de forma incorreta, propositalmente, uma atitude difícil de ser fiscalizada.

2.4.2 Medidas de Proteção Coletiva

As medidas de proteção coletiva reduzem, efetivamente, os níveis de ruído do ambiente.

Embora sempre desejável, a adoção de medidas de proteção coletiva envolve, muitas vezes, complexas questões tecnológicas e econômicas.

As alterações na fonte de ruído, o enclausuramento total ou parcial de máquinas e processos, a instalação de silenciadores em dutos e aberturas e a redução da reverberação do ambiente são medidas de proteção coletiva.

Tradicionalmente se utilizam medidas de proteção coletiva baseadas no controle de ruído passivo. Nos últimos anos, pesquisou-se também o controle de ruído ativo, que ainda se mostra inviável comercialmente para a grande maioria dos problemas, devido às dificuldades tecnológicas e econômicas, bem mais difíceis de serem resolvidas do que as encontradas no controle passivo.

2.4.3 Engenharia de Controle de Ruído

Parece lógico, e a própria norma ISO 11690-1 recomenda, que as fontes sonoras sejam identificadas e o ruído produzido por elas seja cuidadosamente avaliado, como primeiro passo para a adoção de medidas de controle de ruído. Dessa forma, a seleção das medidas a serem adotadas e a confecção dos respectivos projetos podem ser feitas com otimização técnica e econômica.

As estratégias de controle de ruído colocam-se dentro de um assunto abrangente e muitas vezes complexo. Este é o assunto de que trata efetivamente a engenharia de controle de ruído (Goelzer *et al.*, 2000).

2.4.4 Modelos Teóricos e sua Validação

Há na literatura modelos teóricos para estimar a eficiência dos dispositivos de controle de ruído mais utilizados.

Há solução técnica indicada para boa parte, possivelmente a maioria, das fontes de ruído industrial, se não diretamente na fonte, pelo menos por meio de enclausuramentos e de silenciadores.

Na prática, no entanto, a precisão desses modelos precisa ser validada por meio de ensaios que avaliem a eficiência desses dispositivos.

Há algumas dificuldades para a avaliação do desempenho de dispositivos de controle de ruído no ambiente controlado de um laboratório, como exigir instalações específicas de alto investimento, entre outras.

A avaliação do desempenho de dispositivos de controle de ruído em campo, única forma em alguns casos, é sensível às interferências de um campo acústico complexo.

2.5 Escolha de Prioridades

Em função do considerável investimento necessário para implementar medidas de controle de ruído industrial, as empresas precisam eleger prioridades para otimizar os seus gastos com controle de ruído.

Na escolha das prioridades, diversos fatores devem ser considerados, como o nível de ruído nos postos de trabalho, o número de funcionários e o tempo de exposição ao ruído, os setores com mais casos de perda auditiva, o investimento necessário e outros fatores específicos de cada empresa.

2.6 Identificação das Fontes Sonoras

Depois de escolhidas as prioridades, as principais fontes sonoras precisam ser identificadas para que sejam projetadas as soluções de controle de ruído.

A identificação de uma fonte de ruído industrial consiste na sua localização e na determinação do seu impacto acústico sobre os trabalhadores. Isto pode ser feito por simples medições de pressão sonora, desde que as fontes possam ser acionadas isoladamente e que tenham assim a mesma radiação acústica daquela em funcionamento conjunto, ou seja, sob condições normais do processo. Como isso dificilmente pode ser feito em um processo industrial, há que se determinar a potência sonora das fontes para poder identificá-las.

2.7 Pressão, Potência e Intensidade

A pressão sonora é a variação da pressão total em relação à pressão atmosférica. Se a pressão sonora for superior a 20 μPa e ocorrer em frequências entre 20 Hz e 20 kHz sensibilizará o sistema auditivo humano normal médio.

A pressão sonora gerada por uma fonte de ruído, em um determinado ponto receptor, depende das características de radiação sonora da fonte, mas não apenas disso. Depende da distância entre a fonte e o receptor e, também, do ambiente em que se encontram fonte e receptor, em especial das características de absorção, reflexão e difração acústicas das superfícies envolventes como paredes e objetos.

Dessa forma, a pressão sonora caracteriza o ruído e seu poder de dano à audição ou de interferência na comunicação, mas de forma isolada não caracteriza acusticamente uma fonte de ruído.

A potência sonora é a energia acústica total emitida pela fonte na unidade de tempo. A potência sonora é independente do meio em que se encontra, por isso, em termos teóricos, caracteriza acusticamente a fonte de ruído.

Em magnitude, a intensidade sonora representa a potência sonora transmitida através de uma determinada superfície, dividida pela área desta superfície.

2.8 Procedimentos para a Determinação da Potência Sonora

Esta pesquisa trata, de forma específica, da avaliação de procedimentos para determinar a potência sonora de fontes em ambientes Industriais, como ferramenta de auxílio aos projetos para a redução da exposição dos trabalhadores ao ruído ocupacional.

2.8.1 Determinação da Potência Sonora por Medições de Pressão

Procedimentos para a determinação de potência sonora por meio de medições de pressão, baseados na série de normas ISO 3740, exigem requisitos muitas vezes não atendidos em ambientes industriais, especialmente quanto à interferência de outras fontes de ruído além daquela ensaiada.

O método consiste na medição da pressão sonora em diversos pontos localizados em uma superfície hipotética que envolve totalmente a fonte.

Os pontos de medição são distribuídos de forma a obter-se um valor médio da pressão com o qual se calcula a potência sonora no respectivo campo acústico.

2.8.2 Determinação da Potência Sonora por Medições de Intensidade

Procedimentos baseados em medições de intensidade sonora se propõem a determinar a potência sonora em campo, mesmo com interferência de outras fontes de ruído estacionárias, além daquela ensaiada.

A proposta da intensimetria acústica se justifica, pois essa técnica exclui o ruído radiado por fontes estranhas ao ensaio, ao menos teoricamente, embora também haja restrições que devem ser avaliadas em cada medição.

De qualquer forma, a técnica de medições de intensidade, embora propalada como grande avanço na determinação da potência sonora, ainda é pouco utilizada no controle de ruído industrial.

O limitado uso da intensimetria acústica no controle de ruído industrial deve-se, principalmente, pela exigência de sistema de medição mais sofisticado e caro, além de pessoal técnico com maior treinamento e experiência, em comparação com as medições de pressão sonora.

O usuário de medições de intensidade precisa conhecer os erros inerentes dessa técnica para poder interpretar corretamente os resultados das suas medições específicas. Em resumo, trata-se de uma medição não trivial.

2.8.3 Normas para Determinar a Potência por Medições de Intensidade

Na década de 80 foram publicados muitos trabalhos sobre a teoria, os princípios de medição e as perspectivas de aplicação da intensimetria acústica para determinar a potência sonora em situações práticas.

A partir dos anos 90 e ainda atualmente, observa-se que os principais trabalhos publicados sobre essa técnica se referem aos erros envolvidos na medição e às dificuldades para sua utilização em situações reais de campo.

As pesquisas já realizadas serviram de fundamento para a elaboração de algumas poucas normas de procedimento, especialmente as três normas da série ISO 9614, a princípio para serem utilizadas em qualquer ambiente desde que sejam satisfeitas determinadas condições.

Os resultados obtidos pelas normas serão classificados dentro de classes de exatidão se atendidos alguns critérios que envolvem o campo acústico ensaiado e a instrumentação de medição utilizada.

A avaliação dos critérios estabelecidos pelas normas, que exige cálculos e ensaios complementares, restringe as possíveis aplicações dos procedimentos. Sem a utilização dos critérios, entretanto, nada pode ser dito sobre a exatidão dos resultados obtidos.

Portanto, a determinação da potência sonora por intensimetria tem limitações de acordo com os requisitos e critérios da norma de procedimento utilizada.

2.9 Resumo

Há dificuldades, tanto técnicas quanto econômicas, para projetar e executar medidas de redução de ruído em ambientes industriais, especialmente pela dificuldade em identificar as principais fontes de ruído.

A utilização de medições de intensidade, para determinar a potência sonora das fontes, apresenta-se, na teoria, como ferramenta útil para reduzir consideravelmente essas dificuldades.

Na prática, no entanto, ainda há muitas dúvidas sobre o comportamento da intensimetria acústica diante das características dos ambientes industriais.

Desta forma, este capítulo apresentou as justificativas e os objetivos da tese, bem como as contribuições previstas com esta pesquisa, em especial para aumentar a abrangência de utilização da intensimetria em ruído industrial e com isso reduzir a exposição dos trabalhadores ao ruído ocupacional.

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: INTENSIMETRIA ACÚSTICA

Neste capítulo são apresentados, de forma sucinta, os princípios teóricos da intensimetria acústica com dois microfones, bem como os procedimentos de medição visando a determinação da potência sonora de fontes de ruído, especialmente sob condições normalmente encontradas em ambientes industriais.

Por fim, são discutidos os erros intrínsecos ao método de medição da intensidade sonora.

3.1 Princípios Teóricos

3.1.1 Potência Sonora

O princípio da determinação da potência sonora de uma fonte baseia-se na integração, em uma superfície que envolve totalmente a fonte, da intensidade sonora normal a essa superfície.

A potência sonora média líquida, W_s , gerada pela fonte dentro da superfície S é a integral de superfície da intensidade I_n na direção normal a essa superfície (Fahy, 1995):

$$W_s = \int_S I_n dS \quad 3.1$$

A integral citada fornece a potência sonora radiada para fora da superfície fechada por todas as fontes localizadas dentro dessa superfície. A integral exclui o som radiado por fontes localizadas fora dessa superfície que é a superfície de medição.

Na prática, a exclusão do som radiado por fontes externas à superfície de medição é efetiva somente se essas fontes são estacionárias no tempo,

conforme explícito nas normas ISO 9614. Portanto, essa é uma condição essencial para a efetividade da equação 3.1.

3.1.2 Intensidade Sonora

Segundo Gade (1982), o vetor intensidade sonora se iguala à média temporal do produto da pressão sonora instantânea e da correspondente velocidade de partícula instantânea na mesma posição:

$$\bar{\mathbf{i}} = \overline{\mathbf{p}\mathbf{u}} \quad 3.2$$

A equação 3.2 é válida se o fluxo de ar for desprezível, ou seja, se a velocidade do som for muito maior do que a velocidade de fluxo.

Na direção r , a magnitude da intensidade sonora instantânea I_r é o produto dos sinais da pressão sonora e da velocidade de partícula u_r :

$$I_r = \overline{p u_r} \quad 3.3$$

3.1.3 Pressão Sonora

A grande maioria dos atuais sistemas de medição de intensidade sonora, em produção comercial, é baseada no princípio dos dois microfones. Este princípio considera a pressão sonora instantânea como a média das pressões sonoras medidas nos dois microfones, p_A e p_B :

$$p \cong \frac{p_A + p_B}{2} \quad 3.4$$

3.1.4 Velocidade de Partícula

Segundo Gade (1982), ao aplicar-se uma “aproximação de diferença finita” na Equação de Euler, resultante da segunda Lei de Newton, obtém-se a velocidade de partícula u_r , a partir das pressões sonoras nos dois microfones e do espaçamento entre os microfones Δr :

$$u_r = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\delta p}{\delta r} dt \quad 3.5$$

$$u_r \cong -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_A - p_B}{\Delta r} dt \quad 3.6$$

Naturalmente que o erro envolvido nessa aproximação será tão menor quanto maior for o comprimento de onda λ em relação a Δr .

3.1.5 Intensidade Ativa e Reativa

A intensidade acústica instantânea pode ser dividida em duas componentes, a componente ativa, correspondente ao transporte local de energia sonora e a componente reativa, correspondente ao transporte oscilatório local de energia (Fahy, 1997). Os sistemas de medição de intensidade medem as intensidades ativa e reativa.

A intensidade sonora ativa é a quantidade líquida de energia que se propaga em um campo sonoro, sendo que esta determina a potência sonora. Normalmente a palavra “ativa” não é escrita, mas apenas “intensidade sonora”.

A intensidade sonora em uma determinada direção, I_r , pode ser estimada pela medição do gradiente de fase, $\delta\Phi / \delta r$, entre dois transdutores próximos e cujas posições definem essa direção, utilizando-se instrumentação com dois canais em fase.

Conforme (Ginn²):

$$I_r = \left(\frac{p_{rms}^2}{\rho c k_0} \right) \left(\frac{\delta \Phi}{\delta r} \right) \quad 3.7$$

sendo p_{rms} : pressão quadrática média; k_0 : número de onda acústica; ρ : densidade volumétrica do meio e c : velocidade do som no meio (ρc : impedância acústica do meio de propagação da onda).

A utilização de analisadores de sinais com filtros digitais (Figura 3.1) permite estimar a magnitude, na direção r , da intensidade sonora instantânea, \hat{I}_r , conforme a equação apresentada por Gade (1982):

$$\hat{I}_r = -\frac{1}{2\rho\Delta r} (p_A + p_B) \int (p_B - p_A) dt \quad 3.8$$

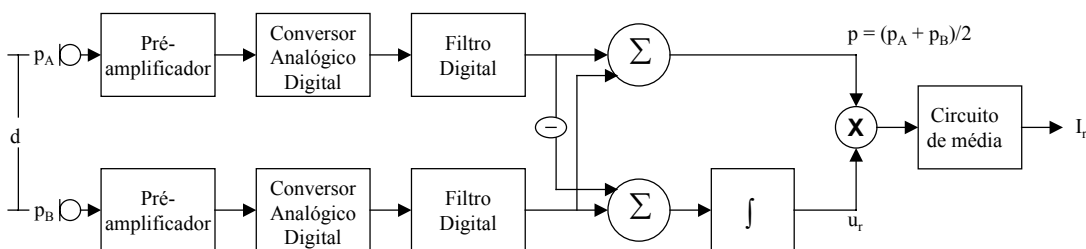


Figura 3.1: Diagrama de blocos do analisador de intensidade de filtros digitais B&K 3360 (Gade, 1982)

A intensidade sonora reativa na direção r , J_r , está relacionada com o gradiente de amplitude no campo sonoro nesta direção (Ginn²):

$$J_r = \left(\frac{-1}{2\rho c k_0} \right) \left(\frac{\delta p_{rms}^2}{\delta r} \right) \quad 3.9$$

Para (Ginn²), a intensidade sonora reativa é uma propriedade que pode auxiliar os engenheiros de controle de ruído, pois fornece informações úteis da parte do campo sonoro que não se propaga, existente próximo a uma determinada fonte, além de poder revelar a presença de onda estacionária.

A capacidade da intensidade sonora reativa de fornecer informações úteis decorre dela estar relacionada diretamente com o gradiente da energia potencial no campo sonoro (Ginn²) e também ao fato de que pressão e velocidade de partícula estão defasadas em 90° no campo reativo (Gerges, 2000).

3.1.6 Domínio da Frequência

No domínio da frequência, utilizando-se analisadores FFT, estima-se a intensidade I na frequência angular ω utilizando-se a parte imaginária do espectro cruzado dos sinais obtidos nos dois microfones, $Im G_{AB}$:

$$I = -\frac{1}{\rho \omega \Delta r} Im G_{AB} \quad 3.10$$

No entanto, o uso de analisadores FFT para ensaios de intensidade em campo, chamado por Gade (1982) de método indireto, não apresenta vantagens evidentes em relação ao uso de filtros digitais.

Apesar de mais sofisticado, tanto em relação aos equipamentos utilizados quanto aos dados que coleta, o método indireto consome mais tempo para a medição e o processamento dos dados. Pode ser de interesse no caso da necessidade de obter-se a coerência entre os sinais, conforme cita Fahy (1995) na página 133.

3.2 Procedimentos de Medição

A literatura apresenta basicamente dois tipos de procedimento de medição para realizar a amostragem da intensidade sonora, a medição em pontos discretos e a medição por varredura.

Os procedimentos são aplicáveis em laboratório ou em campo, desde que sejam atendidas determinadas condições de ensaio. Algumas dessas condições dificilmente poderão ser atendidas em determinados ambientes, como em algumas áreas industriais (Quadro 3.1).

3.2.1 Medições em Pontos Discretos

O procedimento de medição em pontos discretos é o mais antigo utilizado para realizar a amostragem do campo de intensidade acústica.

A norma ISO 9614-1 utiliza o procedimento de medição em pontos discretos. A norma apresenta critérios para que os resultados possam ser considerados com incerteza de grau de precisão, de engenharia ou de avaliação (*survey*), também denominados graus 1, 2 e 3, respectivamente.

3.2.2 Medições por Varredura

As normas ISO 9614, parte 2 e parte 3, apresentam metodologias para a determinação da potência sonora por meio de medições de intensidade sonora por varredura. A metodologia é baseada na amostragem da intensidade normal à superfície de medição por intermédio do movimento contínuo de uma sonda de intensidade ao longo de um ou mais caminhos especificados.

A norma ISO 9614-2 apresenta critérios para que os resultados possam ser considerados com incerteza de grau de engenharia ou de avaliação (*survey*), enquanto que a norma ISO 9614-3 apresenta critérios para que os resultados possam ser considerados com incerteza de grau de precisão.

Quadro 3.1: ISO 9614-2, condições de ensaio

	Observações da norma ISO 9614-2
Ruído radiado pela fonte	estacionário no tempo ou cíclico
Instrumentação utilizada	de acordo com IEC 61043
Fluxos de gás	na sonda: estacionários e menores do que 4m/s
Temperatura	na sonda: constante em tempo/espaço; faixa indicada pelo fabricante
Proximidades	inalterada, principalmente para fonte com ruído de natureza tonal

Seja qual for o procedimento de medição, alguns critérios baseados nos valores dos indicadores de campo precisam ser atendidos para se alcançar um determinado grau de incerteza.

Os critérios dos procedimentos de medição de intensidade sonora foram definidos a partir de trabalhos científicos, nos quais foram realizados ensaios sob certas condições e cujos resultados são considerados válidos para condições mais abrangentes (Hübner & Wittstock, 1999).

Segundo a própria série de normas ISO 9614, há certos casos em que serão encontradas condições de ensaio tão adversas que não permitirão que seus critérios sejam atendidos.

A norma ISO 9614-2 utiliza nos seus critérios (Quadro 3.2) o Indicador de Pressão Intensidade F_{pl} e o Indicador de Potência Parcial Negativa $F_{+/-}$, além da Capacidade Dinâmica do sistema de medição L_d , definidos como:

$$F_{pl} = [L_p] - L_w + 10 \log(S) \quad 3.11$$

sendo:

$[L_p]$: nível médio de pressão sonora ponderado na superfície de medição [dB];

L_w : nível de potência sonora da fonte [dB];

S : área da superfície de medição [m²].

$$F_{+/-} = 10 \log \left[\frac{\sum |W_i|}{\sum W_i} \right] \quad 3.12$$

sendo:

W_i : potência da superfície parcial i .

$$L_d = \delta_{plo} - k \quad 3.13$$

sendo:

δ_{plo} índice de pressão intensidade residual;

k : fator de erro sistemático ($k = 10$ para incerteza de engenharia).

A verificação da repetição da potência parcial, $|L_{wi}(1) - L_{wi}(2)| \leq s$, também é um dos critérios da norma ISO 9614-2, sendo $L_{wi}(1)$ e $L_{wi}(2)$ os valores do nível de potência sonora de duas varreduras ortogonais na superfície parcial de medição e s o desvio padrão do grau de incerteza em questão.

Para Jacobsen (1997), o principal erro sistemático na medição de intensidade sonora está relacionado de uma maneira simples ao índice de pressão intensidade, F_{pl} , um indicador de campo que pode ser determinado simultaneamente à medição e que deve ser comparado com o índice de pressão intensidade residual, δ_{plo} . Este último é a diferença entre o nível de pressão e o nível de intensidade, indicados pelo sistema de medição, em um campo sonoro de intensidade zero.

Para as normas ISO 9614, a incerteza na determinação dos níveis de potência sonora, se forem atendidos os respectivos critérios e requisitos, está relacionada ao maior valor possível do desvio padrão da reprodução de resultados do ensaio, s . Dessa forma, a correta aplicação do procedimento levará a resultados, por exemplo, dentro de um intervalo de $\pm 2s$ ao redor do valor verdadeiro com um nível de confiança de 95%. Trata-se de uma simplificação da extremamente complexa questão de erros em medições de intensidade sonora, descrita com detalhes por Jacobsen (1997).

Os erros aleatórios associados às medições estão considerados nos valores da incerteza dos procedimentos normalizados. Por outro lado, o máximo erro sistemático, devido à diferença de fase da instrumentação, está considerado na escolha do fator de erro sistemático k . Esse fator não inclui, entretanto, outros erros sistemáticos devido, por exemplo, à absorção sonora da fonte, que devem ser analisados separadamente.

Quadro 3.2: Critérios da norma ISO 9614-2

	Observações da norma ISO 9614-2
<p>Critério 1 <u>Adequação do sistema de medição</u> $L_d > F_{pl}$</p>	pode ser utilizado para estimar previamente o limite inferior do alcance de frequências, com uma certa precisão, em um determinado campo acústico
<p>Critério 2 <u>Limite de potência parcial negativa</u> $F_{+/-} \leq 3 \text{ dB}$</p>	limita o nível de intensidade externa; além disso recomenda-se também $F_{pi} < 10 \text{ dB}$
<p>Critério 3 <u>Verificação da repetição da potência parcial</u> $L_{wi}(1) - L_{wi}(2) \leq s$</p>	avalia se o campo de intensidade está estacionário suficientemente

3.3 Erros de Medição

A intensidade sonora não é propriamente medida, mas sim estimada a partir de medições de pressão sonora.

A incerteza na determinação da potência sonora resulta dos erros das seguintes três etapas: (i) medições de pressão nos dois microfones; (ii) estimativa da intensidade, a partir das pressões medidas e (iii) cálculo da potência, a partir da intensidade estimada.

Da revisão bibliográfica conclui-se que a interpretação dos resultados das medições de intensidade exige minuciosa avaliação. Em função da complexidade do tema, não se pode iludir com os mapas coloridos e bem acabados resultantes dos programas comerciais que por vezes acompanham os sistemas de medição. De qualquer forma, o primeiro passo é saber se o sistema de medição utilizado é compatível com a informação que se deseja obter.

Determinados resultados podem não ter significado nenhum devido aos erros de medição. Esses erros precisam ser estimados pelo emprego da calibração do sistema e da determinação de alguns parâmetros, os indicadores de campo, simultaneamente à medição de intensidade.

O erro estimado é a diferença entre valor real e valor estimado pela aplicação do procedimento de medição. O erro total é a soma entre o erro sistemático e o erro aleatório, e para Hübner (1987) ambos devem ser considerados na análise de erros ao se determinar a potência sonora por meio da intensimetria.

O usuário de um sistema de medição de intensidade precisa conhecer os erros envolvidos na medição para interpretar corretamente os resultados das medições. São erros que, sob diversas condições de campo acústico, têm levado a um número considerável de trabalhos publicados.

Krishnappa (1994), por exemplo, considera que a questão dos erros de medição de intensidade envolve a natureza do campo sonoro da fonte, a natureza do ambiente acústico e o procedimento de medição empregado. Outros autores deram ênfase a itens como o equipamento de medição, a distância entre microfones, a faixa de frequências de interesse, entre outros.

A série de normas internacionais ISO 9614 assume que a potência, determinada por meio da simples aplicação dos seus procedimentos, provavelmente difere da potência real, embora não se possa avaliar o quanto. No entanto, a norma estipula um percentual de confiança de que o valor determinado se encontra dentro de uma certa faixa ao redor do valor real, desde que o ensaio atenda determinadas condições e critérios.

3.3.1 Erros Sistemáticos

Para Hübner (1987), na determinação da potência sonora por intensimetria devem ser considerados os seguintes erros sistemáticos:

- erro dinâmico, relativo à faixa dinâmica do equipamento;
- erro causado pela absorção do ruído de fundo dentro da superfície de medição;
- erro de correlação, ou seja, o desvio causado pela interação entre componentes sonoros da fonte ensaiada e componentes correlacionados de fontes externas.

Os trabalhos posteriormente publicados trataram com detalhes os dois primeiros mas não foi dada a mesma atenção para o último.

Para Jacobsen (1997), os erros sistemáticos são mais complexos do que os erros aleatórios pois nenhuma quantidade de amostras irá reduzir tais erros. Felizmente, comenta o citado autor, o mais sério erro sistemático na medição de intensidade sonora está relacionado de uma maneira simples a um indicador de campo, de pressão intensidade, que pode ser determinado simultaneamente à medição e que deve ser comparado com o indicador de pressão intensidade residual.

Erro devido à Diferença de Fase

Para Fahy (1997), o erro sistemático é originado principalmente da diferença de fase entre os canais do transdutor do equipamento de medição de intensidade, pois o sistema somente dará uma estimativa da intensidade sonora com exatidão se a diferença de fase entre os canais dos seus transdutores for suficientemente menor do que a diferença de fase entre as pressões nas posições dos microfones. O Critério 1 da norma ISO 9614-2 trata justamente disto.

Gade (1985) relacionou o erro devido à diferença de fase, $Erro_{fase}$, com a diferença entre o índice de intensidade residual do sistema de medição, L_{ko} , e o índice de reatividade do campo sonoro, L_k .

O índice de reatividade do campo sonoro é a diferença entre os níveis medidos de intensidade e de pressão. O autor supra citado concluiu que este erro pode ser estimado, em decibel, pela seguinte equação:

$$Erro_{fase} = -10 \cdot \log \left[1 \pm 10^{(L_{ko} - L_k)/10} \right] \quad 3.14$$

Da equação 3.14 observa-se que o índice de reatividade deve ser pelo menos 7 dB maior do que o índice de intensidade residual para assegurar que o erro, devido à diferença de fase, seja menor do que 1 dB, em módulo.

Dessa forma, Gade (1985) define a “Capacidade Dinâmica” de um sistema de medição de intensidade, ao adicionar 7 dB ao Índice de Intensidade Residual.

A norma ISO 9614, no entanto, vincula a Capacidade Dinâmica ao grau de exatidão, sendo a adição de 7 dB para grau 3 (*survey*) e 10 dB para grau 2 (engenharia) e grau 1 (precisão).

Na prática, a Capacidade Dinâmica é utilizada para estimar o limite inferior do alcance de frequências, com uma certa exatidão, em um determinado campo acústico.

Segundo Jacobsen (1997), com um espaçamento entre microfones de 12 mm, o erro de fase típico, ou seja, a diferença de fase entre os canais de medição, corresponde a um índice de pressão intensidade residual de 14 dB a 100 Hz e de 18 dB a 5 kHz.

Jacobsen (1997) também menciona a possibilidade de fazer “correções” do erro de fase, citando Jacobsen (1991), embora este último trabalho conclua que não se pode melhorar o desempenho de microfones bem casados com a técnica simples proposta.

Erro de Aproximação Finita

Os dois microfones da sonda de intensidade medem uma diferença da pressão sonora em dois pontos separados por uma distância finita. O uso dessa diferença da pressão sonora para determinar a velocidade de partícula gera um erro nas altas frequências.

Absorção Sonora da Fonte

Segundo a norma ISO 9614–2, na presença de fontes sonoras operando fora da superfície de medição, qualquer sistema dentro dessa superfície pode absorver uma parte da energia sonora proveniente dessas fontes. A potência sonora total absorvida dentro da superfície de medição aparecerá como uma contribuição negativa à potência da fonte em ensaio, e pode produzir um erro na determinação da sua potência sonora. Para minimizar esse erro, deve-se remover qualquer material absorvedor sonoro que esteja dentro da superfície de medição e que normalmente não está presente durante a operação da fonte sob ensaio.

Para Hübner & Wittstock (2001), o valor estimado da potência sonora, obtido utilizando-se a técnica de intensidade, pode divergir significativamente de seu valor verdadeiro no caso de elevada incidência de ruído externo sobre uma superfície com relevante absorção sonora. A magnitude desse efeito pode ser determinada por uma segunda medição com a fonte desligada e o ruído de

fundo inalterado, o que os autores chamaram de “teste do zero”. Se este teste não pode ser feito, alguns outros critérios utilizando os indicadores do campo sonoro podem ser utilizados para avaliar esse erro, mas apenas aproximadamente.

Limitações do campo próximo

A posição da medição de intensidade está localizada no ponto central da linha entre os microfones distanciados Δr . Como a intensidade é normalmente diferente ao longo dessa linha, há um erro de estimativa, maior quanto maior for a relação $\Delta r/r$, onde r é a distância entre a fonte e o ponto da medição. Gade (1982) mostra distâncias mínimas de medição para limitar esse erro de proximidade conforme alguns tipos ideais de fonte sonora. Para a mais simples fonte, um monopolo, o autor concluiu que o erro é menor do que 1 dB se $r > 1,1 \Delta r$, independente da frequência. Fontes mais complexas apresentam limites mais rigorosos.

As normas ISO 9614 estabelecem valores da distância mínima de medição em relação às superfícies das fontes. Esses valores apresentam alguma dependência do método de medição, se em pontos discretos ou por varredura, das dimensões da fonte, se extensa ou compacta, e também do tipo de fonte, se placa vibrante ou não, mas não dependem da frequência.

Sakao (2001) realizou ensaios com ruído aerodinâmico que mostraram que há interferência nas medições de intensidade, devido ao espalhamento provocado pela presença dos microfones, em distâncias até em torno de duas vezes a fronteira do campo próximo, ou seja, $\lambda/2\pi$. Portanto, o erro no campo próximo dependeria da frequência do ruído.

Temperatura da Fonte

A exposição da sonda de intensidade a gradientes de temperatura ao longo do seu eixo pode alterar as respostas dos dois microfones e introduzir erros sistemáticos nas estimativas de intensidade.

A norma internacional ISO 9614-2 especifica que a sonda não deve ser posicionada a menos de 20 mm de corpos que possuam uma temperatura significativamente diferente daquela do ar ambiente.

Características Físicas da Instrumentação

Para Fahy (1997), as aberturas para uniformizar a pressão estática podem causar erros de medição se a transmissão sonora através dessas aberturas não for adequadamente atenuada. A Norma IEC 61043 requer ensaios a serem feitos em um campo sonoro estacionário para demonstrar a adequação dessa atenuação.

Conforme Jacobsen (2001), o ruído elétrico de microfones e pré-amplificadores restringe a faixa dinâmica, em baixas frequências, dos atuais sistemas de medição que utilizam o princípio de dois microfones. Isso inviabiliza medições de intensidade sonora inferiores a 50 dB abaixo de 100 Hz.

Para Jacobsen (1997), o alcance de medição do método de dois microfones é bastante limitado por erros devido à diferença de fase entre os dois canais de medição, mesmo com a melhor instrumentação atualmente disponível. A norma IEC 61043 especifica um procedimento para verificação de desempenho que assegura que o erro de fase se encontra dentro de certos limites.

Microfones da marca dinamarquesa Brüel & Kjaer, como os utilizados nos ensaios desta pesquisa, atendem tradicionalmente às normas internacionais.

3.3.2 Erros Aleatórios

A seguir, é apresentada uma coletânea das principais observações sobre erros aleatórios encontradas no levantamento bibliográfico desta pesquisa.

Para Jacobsen (1997), pobres repetições e/ou reproduções dos resultados indicam a presença dos erros aleatórios. Por isso, recomenda-se sempre repetir a medição se há qualquer perigo de erros aleatórios dignos de nota, como é o caso de determinações da potência sonora usando a técnica de intensidade sem as condições de medição totalmente favoráveis. De forma teórica, os erros aleatórios podem ser reduzidos à insignificância simplesmente por aumentar o “esforço” de medição.

Para Fahy (1997) o erro aleatório é proveniente de:

- erro de amostragem espacial do campo de intensidade: função da irregularidade espacial da distribuição da componente de intensidade normal ao longo da superfície de medição.
- erro de estimativa do espectro: determinado principalmente (i) pelo produto entre o tempo de média e a largura de banda ($B.T$) da estimativa de intensidade e (ii) pela coerência entre os sinais dos dois microfones.

Para a norma ISO 9614-2, o erro de amostragem resultante do método de varredura é uma função da variação espacial da componente normal de intensidade sobre a superfície de medição, que por sua vez depende (i) da diretividade da fonte, (ii) da superfície de amostragem escolhida, (iii) das características e da velocidade da sonda de varredura e (iv) da proximidade de fontes externas à superfície de medição.

Ainda segundo a norma ISO 9614-2, a precisão da medição da componente normal da intensidade sonora em uma posição é sensível à diferença entre o nível de pressão sonora local e o nível de intensidade sonora normal local. Uma grande diferença é indesejável. Isto ocorre quando (i) o vetor intensidade em uma posição de medição estiver direcionado em um grande ângulo, próximo a 90° , em relação à normal da superfície de medição; (ii) o nível de pressão sonora local contiver forte contribuição de fontes externas à superfície de medição, mas associado a um pequeno fluxo líquido de energia sonora, como no campo reverberante de um volume fechado ou (iii) o campo sonoro for fortemente reativo devido à presença do campo próximo e/ou de ondas estacionárias.

Jacobsen (1997) cita três fontes de erro associadas ao processo de varredura, todas de natureza aleatória: (i) tempo de média finito; (ii) ruído térmico dos microfones e dos circuitos de pré-amplificadores e (iii) amostragem espacial. Posteriormente, Jacobsen (2000) estuda com mais detalhes a previsão dos erros aleatórios em medições de intensidade sonora.

Krishnappa (1994), para quem as medições de intensidade sonora apresentam crescente utilização na determinação da potência sonora de máquinas, especialmente operando *in situ*, o erro de amostragem resultante do processo de varredura depende (i) da diretividade da fonte; (ii) da superfície de amostragem escolhida; (iii) da amostragem do campo sonoro sobre a superfície de medição e (iv) da natureza das fontes sonoras externas à superfície de medição.

Para Hübner (1987), na análise de erros aleatórios, ao se determinar potência sonora por intensimetria, também deve ser considerada a incerteza referente ao erro real de medição, o que inclui as flutuações de temperatura ambiente e pressão atmosférica e erros aleatórios de monitoração, como orientação inadequada da sonda.

Ruído externo à fonte ensaiada

As distribuições de intensidade sonora são, por sua própria natureza, mais difíceis de serem caracterizadas do que as distribuições da pressão sonora, mais especificamente da pressão quadrática média. Fahy (1995) atribui isso ao fato da intensidade possuir sinal, ou seja, magnitude e sentido, por ser uma grandeza vetorial. Dessa forma, distribuições fortemente bipolares são comuns, especialmente na presença de expressivas fontes externas. Essa situação, ainda segundo o autor, pode levar a grandes incertezas na avaliação da potência sonora da fonte porque a potência líquida é derivada de duas quantidades de magnitudes similares, as potências entrando e saindo, cada uma carregando um grau de incerteza que pode ser da mesma ordem de magnitude que a da potência líquida verdadeira.

Segundo a norma ISO 9614-2, o fluxo de energia que entra no volume fechado pela superfície de medição, através de uma parte dessa superfície, afeta negativamente a precisão da determinação do nível de potência sonora mesmo havendo, em princípio, uma compensação pelo aumento do fluxo que sai desse volume através da parte remanescente da superfície. Isso ocorre na presença de uma forte fonte sonora externa à superfície de medição.

Por fim, o ruído das fontes externas à superfície de medição pode ser aceito dentro de certos limites de nível e de variabilidade temporal. As normas ISO 9614 apresentam critérios que, se atendidos, enquadram os resultados em uma determinada incerteza.

Fluxo de Ar

A norma ISO 9614-2 dedica espaço considerável para a questão do fluxo de ar na superfície de medição.

A norma ISO 9614-2 recomenda utilizar um protetor de vento nos casos onde há fluxo de fluido na superfície de medição e seguir os limites para desempenho satisfatório do sistema de medição conforme especificado pelo fabricante quanto às condições de fluxo de ar nas vizinhanças da sonda de intensidade.

Para a norma, se não é possível garantir que a máxima velocidade média no tempo de fluxo de ar, em todas as posições sobre a superfície de medição, seja menor do que 4 m/s deve-se previamente qualificar o ambiente de ensaio. O procedimento consiste em: (i) selecionar o segmento de medição considerado de máxima variação do fluxo de ar e (ii) determinar o nível de intensidade em duas varreduras ortogonais no segmento selecionado. A determinação do nível de potência só será possível se a diferença entre os dois valores medidos for menor que o limite correspondente à precisão requerida.

A norma ISO 9614-2 dedica um anexo específico, informativo, sobre os efeitos do fluxo de ar nas medições de intensidade, destaque-se:

- os efeitos de moderado fluxo de ar, velocidades até aproximadamente 17 m/s, são irrelevantes, exceto em campos altamente reativos. Mais sérios, provavelmente, são os efeitos causados por fluxo não estacionário, ou seja, turbulência presente no próprio fluxo ou devido à presença da sonda, o que pode gerar fortes sinais de falsa intensidade. O uso de protetores de vento ameniza esses efeitos, mas tem limites especialmente quando se trata de turbulência de grande escala e em frequência abaixo de 200 Hz. De qualquer forma, não se podem fixar valores aceitáveis devido à grande variedade de processos turbulentos, o que levou à conservadora limitação, global, da velocidade média de fluxo.

- como regra geral, a tendência das bandas de intensidade e/ou de velocidade de partícula a permanecer com níveis elevados, ou mesmo a crescer, em frequências abaixo de 100 Hz, é um sinal de perigo, a não ser que haja evidências de que a fonte radia fortemente em baixa frequência.

- níveis de intensidade e de velocidade de partícula fortemente não estacionários sinalizam a contaminação de valores de intensidade sonora por falsa intensidade devido à turbulência.
- um importante efeito adverso da contaminação por turbulência é uma redução da faixa dinâmica útil para medições de sinais de intensidade sonora, especialmente ao se utilizar instrumentação com a função de ajuste automático de faixa.

Fahy (1997) considera a questão do fluxo de ar como um problema difícil, especialmente em casos onde a fonte ensaiada é um dispositivo de movimentação de ar ou é resfriada por um fluxo. A turbulência em um fluxo de ar pode impor perturbações de pressão não acústica sobre os microfones, as quais podem ser suprimidas apenas até certo ponto pelos protetores de vento. Por isso, o autor recomenda para ajudar nessas situações: (i) utilizar grande espaçamento entre microfones, pois os maiores problemas tendem a ocorrer em frequências menores que 250 Hz e (ii) aumentar o tempo de média da medição para diminuir os erros aleatórios da medição.

Pesquisas, para avaliar a influência da turbulência por meio de um ensaio simples, em andamento e ainda não conclusivas, levaram a norma ISO 9614-2 a incorporar uma restrição abrangente na velocidade de ar máxima (Jacobsen, 1994).

Há diversos problemas associados à medição de intensidade com fluxo de ar. Jacobsen (1994), embora ressalte a escassez de literatura a esse respeito, cita: (i) o princípio de medição com dois microfones não é válido, a rigor, em um meio em movimento; (ii) o ruído do vento gerado pela turbulência produz falsos sinais de intensidade e (iii) os protetores de vento utilizados para suprimir o efeito de fluxos de ar não estacionários podem aumentar os erros de medição sob determinadas condições;

Jacobsen (1994) investigou empiricamente as medições de intensidade na presença de moderado fluxo de ar, menor que 10 m/s. Não foi possível detectar erros associados com a falta de validade estrita do princípio de medição, que não permitiria fluxos de ar, provavelmente devido à baixa velocidade de fluxo, além do que todos os ensaios foram realizados em condições razoavelmente brandas como vizinhanças moderadamente reflexivas e ruído de fundo insignificante. O fluxo de ar aumentou, em baixa frequência, falsos sinais de intensidade. O aumento do espaçamento entre microfones reduz a interferência e parece ser possível detectar erros devido ao fluxo de ar utilizando espaçamentos diferentes. O protetor de vento de espuma subestima a intensidade em campos sonoros reativos, portanto deve-se evitar utilizá-lo no campo próximo especialmente de pequenas fontes.

Li & Qiu (1996) utilizaram experimentalmente um sinal de referência, não correlacionado com o ruído do fluxo de ar, para aumentar a precisão da medição de intensidade sonora na presença de fluxo turbulento. Segundo os autores, obteve-se excelente resultado quando o ruído do microfone devido ao fluxo é cerca de 20 dB maior do que o sinal sonoro verdadeiro.

3.4 Ações de Melhoria

A norma ISO 9614-2 apresenta algumas ações para melhorar as condições dos ensaios que não conseguem atender aos seus critérios.

No entanto, a alta complexidade dos campos sonoros, principalmente os que são gerados pelas fontes nos seus ambientes normais de operação, impede a especificação de estratégias completamente confiáveis para aumentar a qualidade de uma determinação de potência sonora.

Segundo Fahy (1997), as razões técnicas para especificar essas ações são complexas e permanecem para serem validadas pela prática, embora algumas observações gerais possam ser feitas.

3.4.1 Fonte externa à superfície de medição

Uma forte fonte estranha à medição, próxima da fonte sob ensaio, gera potência parcial negativa no segmento da superfície entre as fontes. Essa condição aumenta o erro de medição, tanto o sistemático quanto o aleatório, o que é indicado pelo elevados valores dos indicadores de campo. Recomenda-se aproximar a superfície de medição da fonte sob ensaio ou colocar barreira temporária entre as duas fontes, mas suficientemente afastada da fonte sob ensaio para não causar problemas locais com o indicador de campo F_{pl} .

3.4.2 Forte Componente Reverberante

A presença, na superfície de medição, de forte componente reverberante do campo sonoro pode levar a valores inaceitáveis dos indicadores de campo. Recomenda-se aproximar a superfície de medição da fonte sob ensaio.

3.4.3 Campo Próximo

Se a medição não apresentar a capacidade dinâmica adequada devido a fortes componentes do campo próximo, recomenda-se afastar a superfície de medição da fonte sob ensaio, naturalmente, se o ruído de fundo permitir.

3.4.4 Radiação Localizada da Fonte

Nos casos de medição onde as duas varreduras ortogonais encontrem estimativas de potência parcial inaceitavelmente diferentes, apesar da falta de evidências de mudanças de emissão da fonte ou das condições ambientais, é possível a existência de regiões de forte radiação muito localizadas e que não são igualmente captadas pelas duas varreduras. Recomenda-se afastar a superfície de medição da fonte sob ensaio, mantendo a mesma densidade de linhas, pois em teoria a radiação se espalha com o aumento da distância da fonte.

Como exemplo sobre as dificuldades na definição das ações de melhoria podemos citar um impasse ocorrido entre especialistas. No método de pontos discretos, se o número inicial de pontos de medição não for suficiente para reduzir a variância dentro de limites toleráveis, a norma ISO 9614-1 recomenda aumentar o número de pontos enquanto que a norma ANSI S12.12 recomenda mudar apenas o arranjo espacial com o mesmo número de pontos. Segundo Fahy (1997), somente o tempo e a experiência acumulada resolverão essa questão que vem causando polêmica entre os dois grupos de pesquisadores.

3.5 Distância entre Microfones

A limitação do alcance das bandas de freqüências dos atuais sistemas de medição de intensidade normalmente exige mais do que um espaçamento entre microfones para cobrir toda a faixa de interesse (ver Figura 3.2).

Num certo sentido, espera-se melhorar a qualidade dos resultados dos ensaios com o aumento do espaçamento entre os microfones da sonda de intensidade, o que diminui o erro de diferença de fase e conseqüentemente amplia a capacidade dinâmica L_d do sistema de medição.

Essa expectativa de melhoria ao utilizar maiores distâncias entre microfones, no entanto, se limita às bandas de baixa freqüência, pois provoca concomitantemente o aumento do erro de aproximação de diferença finita, o que prejudica os resultados nas bandas de alta freqüência.

Dessa forma, o fabricante da sonda do sistema de medição utilizado nesta pesquisa não recomenda (Bruel & Kjaer, 1989) o espaçamento de 50mm, entre microfones de ½ polegada, para bandas de freqüências de 1/3 de oitavas superiores a 1,25 kHz.

Outra conseqüência não desejada da utilização de maiores distâncias entre microfones é o aumento do erro de campo próximo, que pode ser representativo para distâncias entre a fonte sonora e a superfície de medição inferiores a algo em torno de 2 ou 3 vezes o espaçamento entre microfones (Gade, 1982).

3.6 Resumo e Conclusões

Em resumo, os erros sistemáticos e aleatórios são provenientes do campo acústico e da instrumentação, o que na prática gera limites de freqüências para uma determinada incerteza de medição (Quadro 3.1).

O índice pressão intensidade e a diferença de fase do sistema de medição são parâmetros mais sensíveis nas baixas freqüências, o que os torna limitadores para a banda de freqüências inferior com resultados confiáveis. A Figura 3.2 apresenta uma noção desses limites. Valores mais confiáveis, no entanto, são obtidos ao se comparar o índice pressão intensidade do campo acústico amostrado com o índice pressão intensidade residual do sistema de medição.

O limite superior de freqüências, com resultados confiáveis, depende principalmente da distância entre microfones, como pode ser observado na Figura 3.2.

O erro devido ao elevado fluxo de ar na superfície de medição ocorre principalmente em baixas freqüências, mas não é significativo se os valores da potência parcial de duas varreduras ortogonalmente orientadas estiverem próximos.

Quadro 3.1: Fontes de erros e limites de freqüências

	Limite de Freqüência	Referência Bibliográfica
Campo Acústico	inferior	(Jacobsen, 1997) (Gade, 1985)
Diferença de Fase da Instrumentação	inferior	(Jacobsen, 1997) (Gade, 1985)
Espaçamento entre Microfones	superior	(Jacobsen <i>et al.</i> , 1998) (Gade, 1985)
Diâmetro dos Microfones	superior	(Jacobsen <i>et al.</i> , 1998)

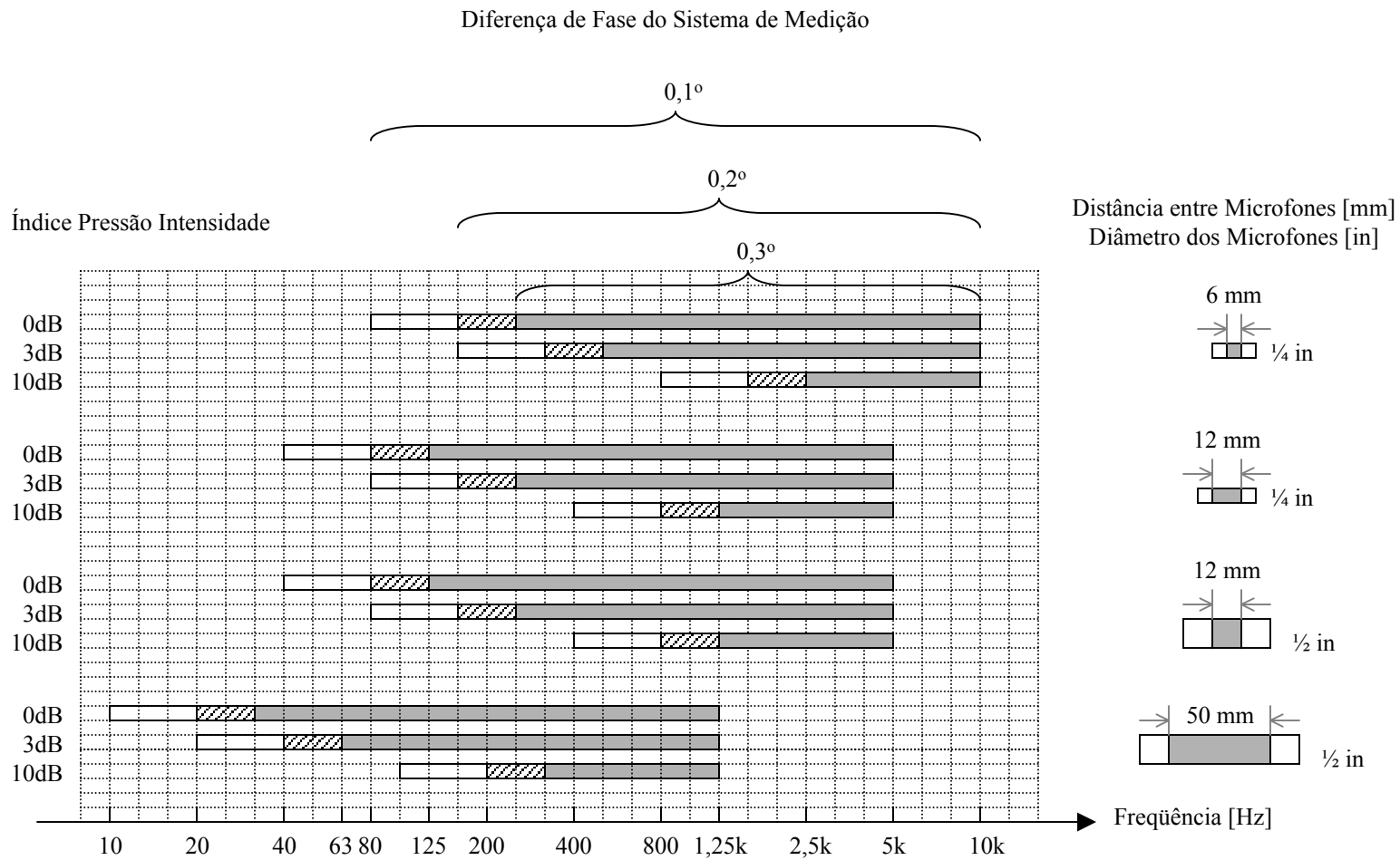


Figura 3.2: Limites das bandas de freqüências de medição com exatidão de 1 dB (Gade, 1985)

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS: RUÍDO DE FUNDO

Este capítulo apresenta as investigações experimentais para a determinação da potência sonora com elevado nível de ruído de fundo

Os ensaios, realizados em uma câmara semi-anecóica, ocorreram sob diferentes situações do nível de ruído de fundo, tanto moderado como elevado, inclusive além dos limites aceitos pelos critérios da norma ISO 9614-2.

Para cada experimento realizado, são descritos os objetivos, os procedimentos, as condições de ensaio, os valores obtidos dos indicadores de campo e respectivos critérios, as estimativas da potência sonora e as análises dos resultados.

São apresentados os parâmetros específicos escolhidos para cada ensaio realizado, pois os ensaios são baseados em procedimentos normalizados genéricos.

Foram realizados, também na câmara semi-anecóica, ensaios para determinação da potência sonora das fontes sem outras fontes significativas de ruído além daquela ensaiada. Os resultados dos ensaios sob essas condições ideais servem como referência para comparação com os ensaios com significativo ruído de fundo.

As medições de intensidade foram realizadas por varredura manual com uma sonda de dois microfones, de $\frac{1}{2}$ polegada de diâmetro, colocados face a face. Utilizou-se o espaçamento entre microfones, Δr , de 12mm. Em alguns casos, utilizou-se, também, o espaçamento de 50mm, pois cada espaçamento tem um alcance útil de freqüências de medição, conforme o campo acústico existente.

4.1 Procedimentos Metodológicos da Pesquisa

Conforme os procedimentos já publicados, a amostragem do campo de intensidade acústica para determinação da potência sonora pode ser feita por pontos discretos ou por varredura de linhas contínuas. A segunda, por ser mais prática no uso em campo e com exatidão semelhante à primeira, mostra-se mais conveniente para utilização em ambientes industriais.

Os procedimentos investigados, por medições de intensidade, podem ser utilizados em ambientes industriais, mesmo com a operação normal do processo de produção, o que normalmente não é possível ao utilizar medições de pressão sonora.

Em especial, os procedimentos desta pesquisa podem ser utilizados em determinados ambientes industriais nos quais, em função da complexidade do campo acústico, os procedimentos atualmente padronizados não são indicados ou não têm os seus critérios satisfeitos.

Os procedimentos propostos são, principalmente, complementares ou variações da série de normas ISO 9614, avançando uma linha de pesquisa já estabelecida. Se por um lado as normas ISO 9614 ainda apresentam muitas limitações para o uso em ruído industrial, por outro lado essas normas já possuem razoável aplicação prática, o que não é interessante desprezar.

Foram avaliados procedimentos normalizados de aplicação genérica, em especial para a característica de elevado nível de ruído de fundo. Os resultados desses ensaios estão apresentados neste Capítulo.

4.2 Procedimentos da Norma ISO 9614-2

Devido aos princípios da intensimetria acústica e às limitações da instrumentação atualmente disponível, a determinação da potência sonora pode conter erros significativos se não forem atendidos determinados critérios.

Os erros podem ser ainda maiores nas medições em campo acústico de ambientes não controlados, por exemplo, em áreas industriais com condições desfavoráveis de ruído de fundo excessivamente elevado ou não estacionário.

As pesquisas já realizadas serviram de base para a elaboração das atuais três normas de procedimento da série ISO 9614.

A aplicação dos procedimentos das normas exige a escolha de alguns parâmetros que definirão a qualidade da medição, tais como a forma e as dimensões da superfície de medição, o número de linhas de amostragem e o tempo de medição.

Naturalmente que, quanto mais complexo o campo acústico mais difícil se torna a escolha dos parâmetros de medição. Em função da diversidade de situações e, portanto, de campos acústicos, as normas ISO 9614 não têm como definir exatamente os parâmetro de medição, embora apresentem certos limites.

A escolha dos parâmetros de medição cabe ao executor do ensaio, sendo que o acerto dessa escolha somente será conhecido após a realização das medições, cálculo dos indicadores de campo e verificação dos critérios estabelecidos.

A norma ISO 9614-2, assim como as outras duas da série, pede a avaliação de alguns indicadores de campo obtidos simultaneamente às medições de intensidade. A análise desses indicadores e dos respectivos critérios torna o procedimento complexo.

O não atendimento aos critérios estabelecidos pela norma, no entanto, implica que os resultados obtidos podem conter um erro de tal grandeza que os valores encontrados não têm significado para a finalidade a que se propõe o ensaio.

Por outro lado, para atender a esses critérios, exclui-se grande parte dos ambientes acústicos que poderiam se beneficiar da intensimetria acústica.

4.3 Ensaios de Pressão para Determinar Potência

Foi utilizada uma semi-esfera como superfície de medição para a determinação da potência sonora conforme norma ISO 3745, em bandas de 1/1 oitava, em uma sala semi-anecóica. A superfície estava centrada na projeção do centro geométrico da fonte, com o raio da semi-esfera de 1,5 m.

Utilizou-se um conjunto de dez posições de microfone. Os pontos foram obtidos conforme recomendações da norma. O número de pontos de medição escolhido foi suficiente, pois a diferença em decibels entre o maior e o menor nível de pressão sonora medidos, em todas as faixas de frequência de interesse, foi numericamente menor do que a metade do número de pontos de medição.

Os valores da potência sonora determinados pelos ensaios de pressão serão comparados com os valores determinados pelos ensaios de intensidade.

4.4 Ensaios de Intensidade

Foram realizados ensaios para determinar a potência de fontes sonoras, em bandas de 1/1 oitava, na câmara semi-anecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina (LVA/UFSC) (Quadro 4.1). Foram utilizadas diferentes situações do campo de intensidade sonora.

Os ensaios foram baseados nos procedimentos contidos na norma ISO 9614-2.

Quadro 4.1: Ensaios conforme ISO 9614-2, com ruído de fundo

Item	Fonte Sonora	Ruído de Fundo	Fonte Sonora e Superfície de Medição (na média)
4.4.1	Tornado	moderado	distantes
4.4.2	Robot	elevado	distantes
4.4.3	Robot	elevado	próximas

4.4.1 Fontes Sonoras

Como fontes sonoras (Figura 4.1) foram utilizados dois aspiradores de pó domésticos (Quadro 4.2), simplesmente dispostos sobre o piso da câmara semi-aneecóica.

Os valores do nível de potência sonora L_w das fontes utilizadas atendem às necessidades desta pesquisa, no alcance de frequências de interesse entre 125 Hz e 4 kHz, em bandas de uma oitava (Quadro 4.3).

Quadro 4.2: Dimensões das fontes, comprimento C , largura L e altura H

Tornado	C [mm]	L [mm]	H [mm]
	460	400	400

Robot	C [mm]	L [mm]	H [mm]
	370	340	500



Figura 4.1: Fontes de ruído, Tornado (esquerda) e Robot

Quadro 4.3: Nível de potência sonora das fontes Tornado e Robot

Frequência [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
L_w [dB] Tornado (220 volts)	75,7	84,1	86,5	85,4	85,8	79,8
L_w [dB] Robot (220 volts)	70,5	75,7	83,6	81,2	79,2	76,3
L_w (Ref.: 1 pW) conforme ISO 9614-2, $\Delta r = 12\text{mm}$, sem ruído de fundo, sala semi-aneecóica						

O critério 3 da norma ISO 9614-2, que compara as potências parciais de duas varreduras ortogonalmente orientadas, foi atendido em todos os ensaios.

O índice pressão intensidade residual do sistema de medição atendeu a norma IEC 61043 nas frequências consideradas mas, em geral, próximo ao limite.

4.4.2 Forma de Avaliação dos Ensaios

A avaliação compreende comparar os valores da potência sonora, por bandas de frequência, determinados pelos ensaios com interferência de ruído externo e pelos ensaios da mesma fonte sem ruído externo, por medições de intensidade conforme ISO 9614-2 e com a mesma distância entre microfones. A avaliação também contempla os indicadores de campo e os critérios para encontrar a classe de exatidão de engenharia segundo as normas ISO 9614. Também serão avaliadas as diferenças entre os valores da potência sonora obtidos por medições de intensidade com aqueles determinados por medições de pressão conforme ISO 3745.

A diferença de nível, por bandas de frequências, entre a potência determinada pelo ensaio com significativo ruído de fundo e o ensaio em condições ideais é comparada com o desvio padrão s da classe de exatidão de engenharia. Os valores do desvio padrão s são aqueles apresentados nas normas ISO 9614.

A diferença entre o valor determinado por um ensaio e o valor verdadeiro se relaciona fundamentalmente com os erros sistemáticos dessa medição, enquanto que o desvio padrão s caracteriza os erros aleatórios do procedimento.

Assim, a utilização do desvio padrão s , como comparação com as diferenças de nível encontradas nos ensaios com e sem condições ideais, serve apenas como orientação da ordem de grandeza dos erros envolvidos no respectivo ensaio.

4.5 Ensaios de Intensidade Realizados

Foram realizados três conjuntos de ensaios: fonte Tornado, fonte Robot e fonte 2 Robot.

4.5.1 Ensaios Fonte Tornado

O objetivo específico destes ensaios é determinar a potência sonora, na presença de fraco ruído externo (Quadro 4.4).

A amostragem do campo de intensidade sonora na superfície de medição (Figura 4.2) é feita por varredura com linhas contínuas conforme norma ISO 9614-2 (Quadro 4.5).

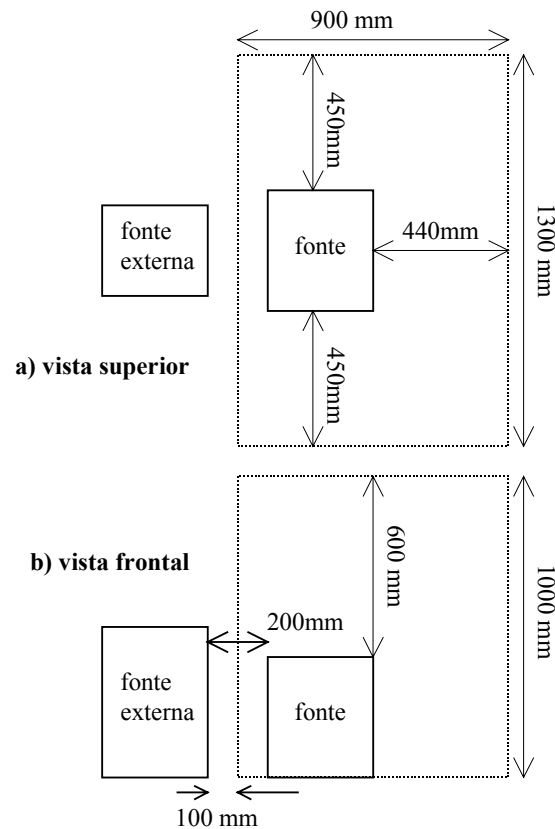
A fonte Tornado foi ensaiada sem fonte externa de ruído, com $\Delta r = 12\text{mm}$ e $\Delta r = 50\text{mm}$.

Quadro 4.4: Características dos ensaios fonte Tornado

Fonte Ensaçada	Tornado
Fonte Externa	Robot
Distância entre microfones (sonda)	(i) 12 mm e (ii) 50 mm

Quadro 4.5: Condições dos ensaios fonte Tornado

	Ensaio	Requisitos da norma ISO 9614-2
Número de superfícies parciais	5	Mínimo de 4
Distância entre linhas da varredura	100mm	Não ultrapassar a distância média da superfície parcial à superfície da fonte
Velocidade média da varredura	0,3 m/s	0,1 a 0,5 m/s, recomenda $\leq 0,25\text{m/s}$ se $F_{pl} > 10\text{dB}$
Tempo de varredura por superfície parcial	30 a 38 s	Pelo menos 20s
Distância entre superfície parcial e superfície da fonte	de 100 a 600 mm	Média mínima: 200mm (superfície extensa ou placa vibrante) ou 100mm (fonte compacta)

**Figura 4.2:** Superfície de medição, ensaios fonte Tornado

Análise dos Resultados dos Ensaio Fonte Tornado

De uma forma geral, os critérios da norma ISO 9614-2 foram atendidos (Figura 4.3). A exceção foi o critério 1 no ensaio com fonte externa e espaçamento de 12mm, nas baixas frequências. Nesse ensaio, a capacidade dinâmica L_d do sistema de medição apresentou valores estranhamente baixos, em relação aos outros ensaios, possivelmente obtidos numa calibração infeliz e que não representa a realidade do sistema de medição.

O desvio dos valores de potência entre os ensaios com e sem fonte externa foram no máximo 0,5 dB (Figura 4.4A). Isto era esperado por tratar-se de fraca fonte externa, como pode ser visto pelo valor nulo do indicador de potência parcial negativa, $F_{+/-}$ (Figura 4.3B). Uma exceção, no entanto, ocorreu na banda de 2 kHz, onde ocorreram desvios maiores, aproximadamente 1 dB com $\Delta r = 12\text{mm}$ e 1,5 dB com $\Delta r = 50\text{mm}$.

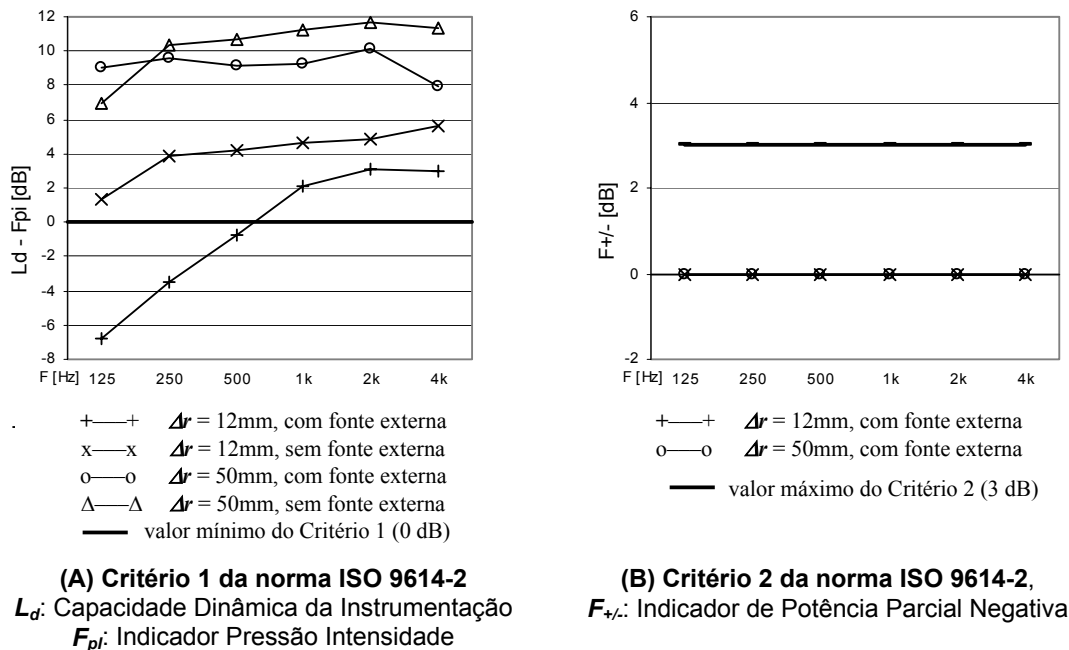


Figura 4.3: Critérios 1 e 2 dos ensaios fonte Tornado

Em comparação com os ensaios de pressão (Figura 4.4B), os desvios encontrados na estimativa da potência sonora por intensidade são compatíveis com a classe de exatidão de engenharia, com ou sem fonte externa, exceto nas altas freqüências. Na banda de 2 kHz há desvios ligeiramente superiores a um desvio padrão s e na banda de 4 kHz há desvios acentuadamente maiores, o que é esperado em função do erro de aproximação finita.

A banda de freqüências de 2kHz, nos ensaios de intensidade com fonte externa, não seguiu a mesma tendência de subestimar os valores obtidos no ensaio por pressão, diferentemente das outras bandas (Figura 4.4B).

O comportamento não típico na banda de freqüências de 2 kHz mereceria outros estudos para ser explicado, o que não cabe a esta pesquisa, pois, de qualquer forma, os desvios são suficientemente pequenos para que se aceite os resultados das medições.

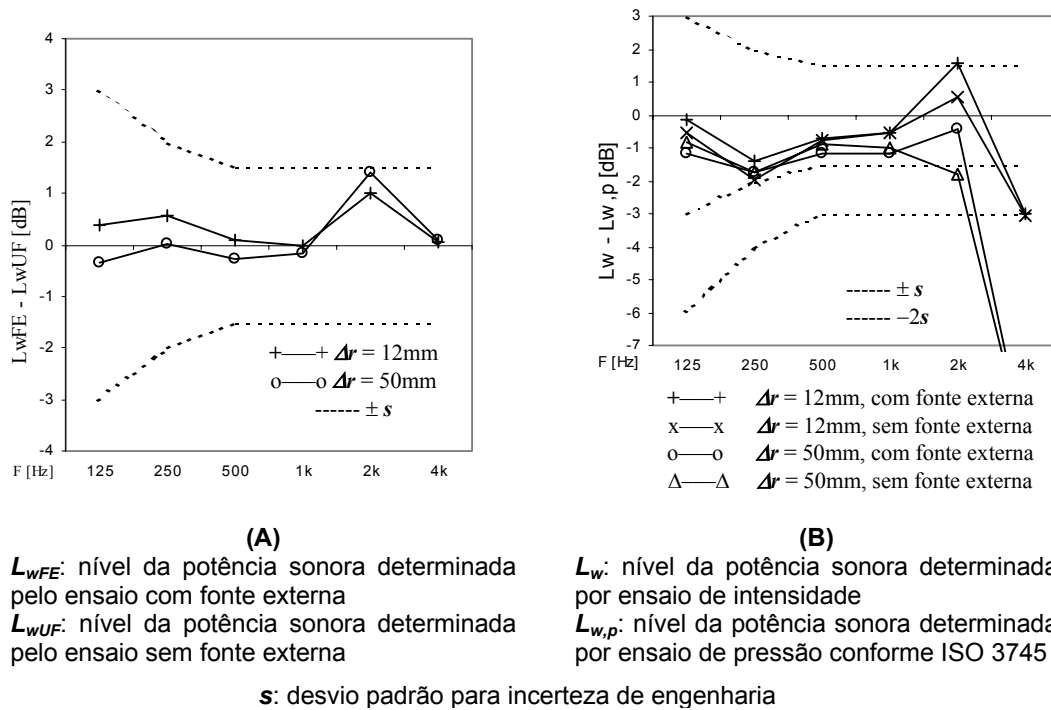


Figura 4.4: Potência sonora dos ensaios fonte Tornado

4.5.2 Ensaio Fonte Robot

O objetivo específico destes ensaios é determinar a potência sonora, na presença de elevado ruído externo (Quadro 4.6).

A amostragem do campo de intensidade sonora na superfície de medição (Figura 4.5) é feita por varredura com linhas contínuas conforme norma ISO 9614-2 (Quadro 4.7).

Além dos ensaios com fonte externa, a fonte Robot foi ensaiada sem fonte externa de ruído, com $\Delta r = 12\text{mm}$ e $\Delta r = 50\text{mm}$.

Quadro 4.6: Características dos ensaios fonte Robot

Fonte Ensaçada	Robot
Fonte Externa	Tornado
Distância entre microfones (sonda)	(i) 12 mm e (ii) 50 mm

Quadro 4.7: Condições dos ensaios fonte Robot

	Ensaio	Requisitos da norma ISO 9614-2
Número de superfícies parciais	5	Mínimo de 4
Distância entre linhas da varredura	100mm	Não ultrapassar a distância média da superfície parcial à superfície da fonte
Velocidade média da varredura	0,3 m/s	0,1 a 0,5 m/s, recomenda $\leq 0,25\text{m/s}$ se $F_{pl} > 10\text{dB}$
Tempo de varredura por superfície parcial	30 a 38 s	Pelo menos 20s
Distância entre superfície parcial e superfície da fonte	100mm a 500mm	Média mínima: 200mm (superfície extensa ou placa vibrante) ou 100mm (fonte compacta)

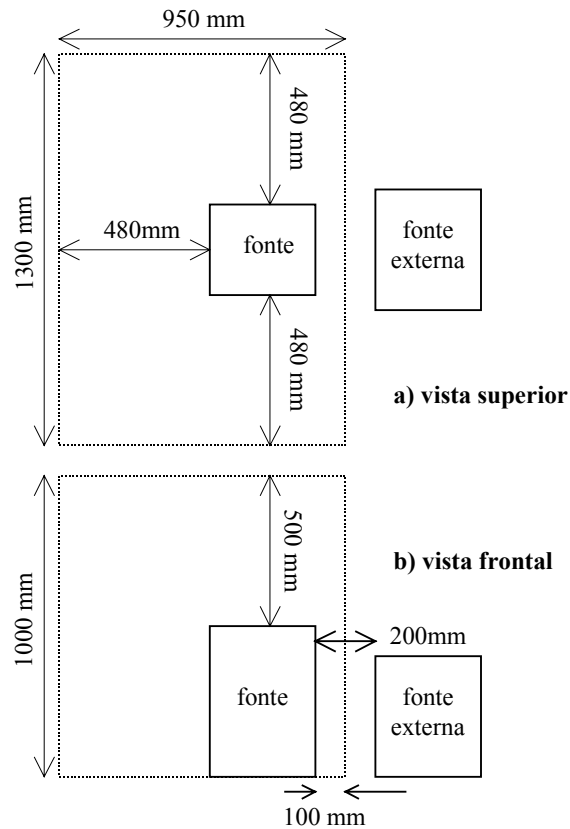
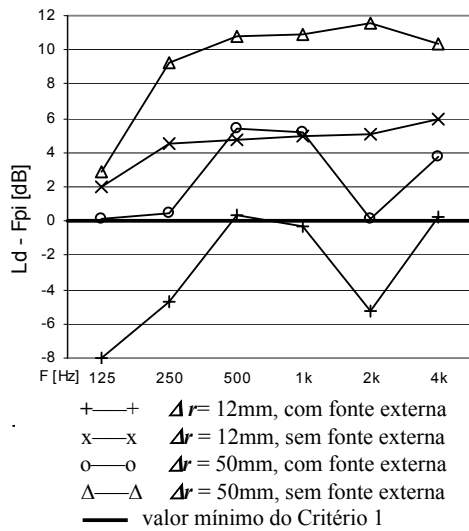


Figura 4.5: Superfície de medição, ensaios fonte Robot

Análise dos Resultados dos Ensaio Fonte Robot

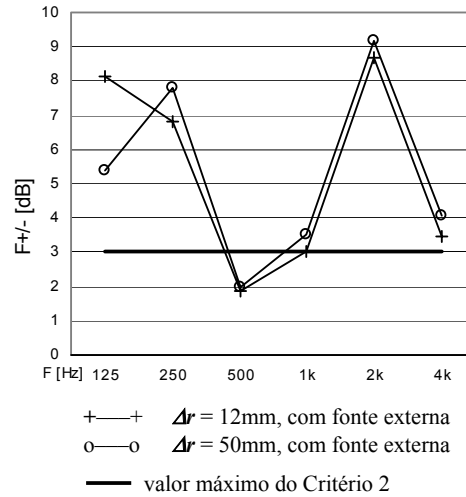
No ensaio com ruído externo e distância entre microfones de 12 mm apenas a banda de 500 Hz atendeu, rigorosamente, a todos os critérios da ISO 9614-2 (Figura 4.6). No entanto, as bandas de 250 Hz e de 1000 Hz também apresentaram valores de potência que se aproximaram do ensaio sem fonte externa (Figura 4.7A).

No ensaio com ruído externo e distância entre microfones de 50mm, o critério 1 foi satisfeito em todas as bandas de frequência em avaliação, mas quanto ao critério 2 praticamente nada mudou em relação ao ensaio com espaçamento de 12 mm. No entanto, todas as bandas, exceto 2 kHz, apresentaram resultados que se aproximaram do ensaio sem fonte externa à superfície de medição (Figura 4.7A).



(A) Critério 1 da norma ISO 9614-2

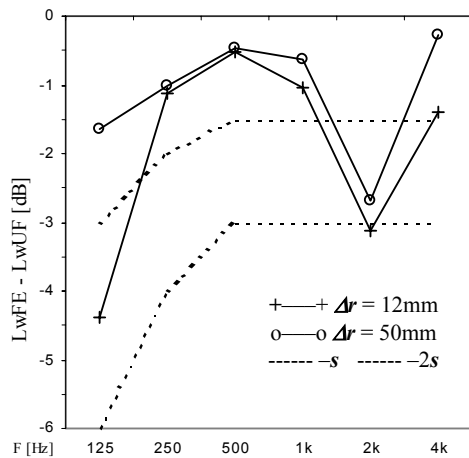
L_d : Capacidade Dinâmica da Instrumentação
 F_{pi} : Indicador Pressão Intensidade



(B) Critério 2 da norma ISO 9614-2,

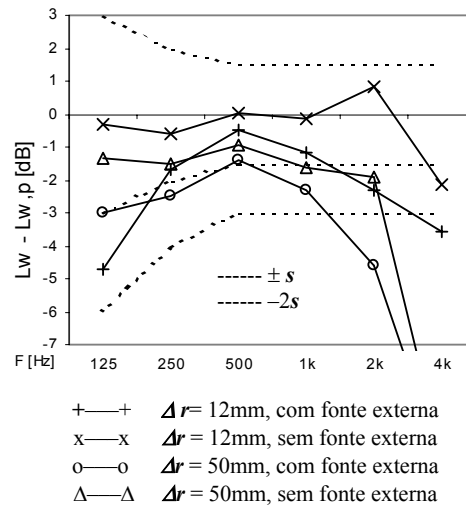
$F_{+/-}$: Indicador de Potência Parcial Negativa

Figura 4.6: Critérios 1 e 2 dos ensaios fonte Robot



(A)

L_{wFE} : nível da potência sonora determinada pelo ensaio com fonte externa
 L_{wUF} : nível da potência sonora determinada pelo ensaio sem fonte externa



(B)

L_w : nível da potência sonora determinada por ensaio de intensidade
 $L_{w,p}$: nível da potência sonora determinada por ensaio de pressão conforme ISO 3745

s : desvio padrão para incerteza de engenharia

Figura 4.7: Potência sonora dos ensaios fonte Robot

Assim como nos ensaios com $\Delta r = 12\text{mm}$, os valores do nível de potência sonora com $\Delta r = 50\text{mm}$ foram subestimados em relação ao ensaio sem fonte externa à superfície de medição.

Na comparação entre os resultados dos ensaios por intensidade, com e sem fonte externa, as bandas de frequência que apresentaram os maiores desvios das potências estimadas, inclusive além de um desvio padrão, foram 125 Hz e 2kHz.

Na banda de 125 Hz, o desvio mais acentuado ocorreu apenas na distância entre microfones de 12mm enquanto que na banda de 2 kHz ocorreu também na distância de 50mm (Figura 4.7A).

Pode ser visto que os maiores desvios ocorreram justamente nas bandas com os piores desempenhos dos indicadores de campo em relação aos critérios da norma ISO 9614-2.

No caso de 125 Hz, a mais baixa das bandas de frequências analisadas, é nítido o melhor desempenho da sonda com microfones distanciados de 50mm, em relação a 12mm, quando há presença de elevado ruído externo.

Observou-se, nos ensaios realizados, uma tendência do método de intensidade em resultar valores subestimados em relação ao ensaio por pressão (Figura 4.7B), exceto na banda de frequências de 2 kHz do ensaio sem fonte externa e $\Delta r = 12\text{mm}$.

4.5.3 Ensaio 2 Fonte Robot

Buscou-se determinar a potência sonora na presença de elevado ruído externo, mas com redução desta interferência em relação aos ensaios fonte Robot (Quadro 4.8). Para tanto, aproximou-se a superfície de medição da fonte ensaiada.

A amostragem do campo de intensidade sonora na superfície de medição (Figura 4.8) é feita por varredura com linhas contínuas conforme norma ISO 9614-2 (Quadro 4.9).

Quadro 4.8: Características do ensaio 2 fonte Robot

Fonte Ensaçada	Robot
Fonte Externa	Tornado
Distância entre microfones (sonda)	12 mm

Quadro 4.9: Condições do ensaio 2 fonte Robot

	Ensaio	Requisitos da norma ISO 9614-2
Número de superfícies parciais	5	Mínimo de 4
Distância entre linhas da varredura	100mm	Não ultrapassar a distância média da superfície parcial à superfície da fonte
Velocidade média da varredura	0,25 m/s	0,1 a 0,5 m/s, recomenda $\leq 0,25\text{m/s}$ se $F_{pl} > 10\text{dB}$
Tempo de varredura por superfície parcial	22 a 30 s	Pelo menos 20s
Distância entre superfície parcial e superfície da fonte	130mm a 155mm	Média mínima: 200mm (superfície extensa ou placa vibrante) ou 100mm (fonte compacta)

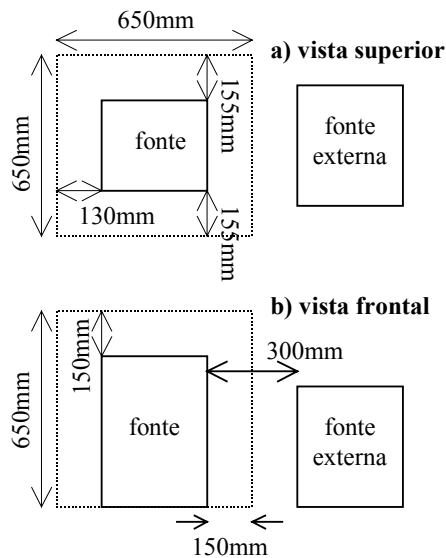


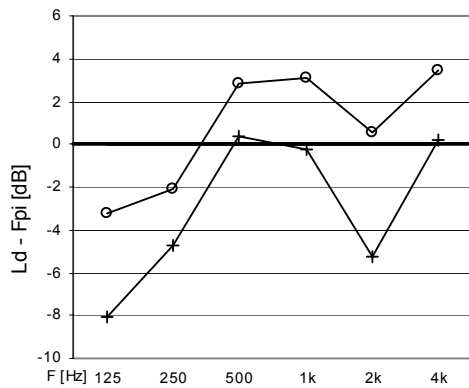
Figura 4.8: Superfície de medição, ensaio 2 fonte Robot

Análise dos Resultados do Ensaio 2 Fonte Robot

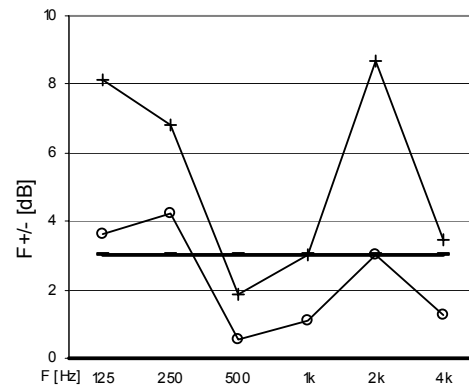
Os indicadores de campo obtidos no ensaio 2 fonte Robot foram mais favoráveis do que aqueles obtidos nos ensaios fonte Robot, em todas as bandas de frequência (Figura 4.9).

Os valores estimados do nível de potência apresentaram diferenças menores que um desvio padrão s para classe de exatidão de engenharia entre os ensaios de intensidade com e sem fonte externa (Figura 4.10A). Isso ocorreu em todas as bandas de frequências, inclusive nas bandas de 125 Hz e 250 Hz em que tanto o critério 1 quanto o critério 2 não foram satisfeitos, embora os indicadores de campo sejam bem mais favoráveis do que os indicadores dos ensaios fonte Robot. Na banda de 2 kHz, houve sucesso na aproximação entre fonte ensaiada e superfície de medição para enquadrar os indicadores dentro dos limites dos critérios da norma.

Na comparação com o método que utiliza apenas medições de pressão, foram encontrados valores de potência subestimados em todas as frequências, mas apenas ligeiramente, exceto em 4 kHz em que o desvio foi superior a um desvio padrão s (Figura 4.10B).



+—+ com fonte externa
 o—o com fonte externa, ensaio 2
 — valor mínimo do Critério 1



+—+ com fonte externa
 o—o com fonte externa, ensaio 2
 — valor máximo do Critério 2

(A)

Critério 1 da norma ISO 9614-2

L_d : Capacidade Dinâmica da Instrumentação

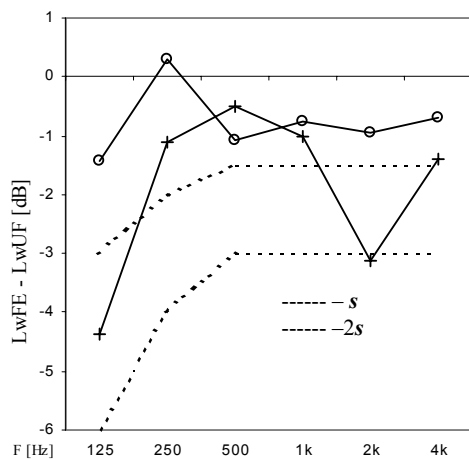
F_{pi} : Indicador Pressão Intensidade

(B)

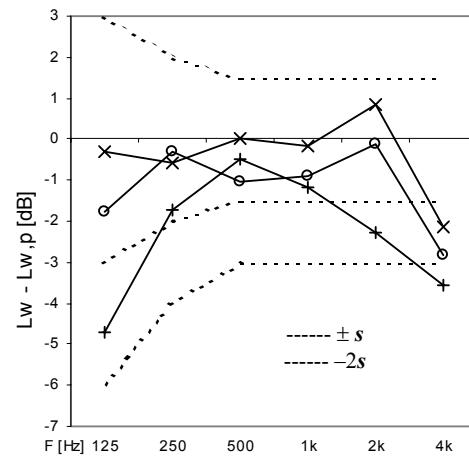
Critério 2 da norma ISO 9614-2,

$F_{+/-}$: Indicador de Potência Parcial Negativa

Figura 4.9: Critérios 1 e 2 do ensaio 2 fonte Robot, $\Delta r = 12\text{mm}$



+—+ $\Delta r = 12\text{mm}$
 o—o $\Delta r = 12\text{mm}$ ensaio 2



+—+ $\Delta r = 12\text{mm}$, com fonte externa
 x—x $\Delta r = 12\text{mm}$, sem fonte externa
 o—o $\Delta r = 12\text{mm}$, com fonte externa ensaio 2

(A)

L_{wFE} : nível da potência sonora determinada pelo ensaio com fonte externa

L_{wUF} : nível da potência sonora determinada pelo ensaio sem fonte externa

(B)

L_w : nível da potência sonora determinada por ensaio de intensidade

$L_{w,p}$: nível da potência sonora determinada por ensaio de pressão conforme ISO 3745

s: desvio padrão para incerteza de engenharia

Figura 4.10: Potência sonora do ensaio 2 fonte Robot

Portanto, ficou comprovada a correção da ação de reduzir a distância média entre a superfície de medição e a fonte ensaiada. Com isso, os indicadores de campo ficaram mais favoráveis e melhorou a qualidade dos resultados da determinação da potência sonora da fonte Robot, o que está bastante visível nas bandas de frequência de 125 Hz e 2 kHz.

4.6 Sistema de Medição

4.6.1 Sistema para os Ensaios de Intensidade Sonora

Nos ensaios desta pesquisa, foi utilizado um sistema de medição de intensidade sonora (Figura 4.11) composto dos seguintes equipamentos:

- analisador de frequências Brüel & Kjaer tipo 2144;
- filtros digitais Brüel & Kjaer tipo 7667;
- sonda de intensidade Brüel & Kjaer tipo 3548;
- par de microfones Brüel & Kjaer tipo 4181 de ½ polegada (campo livre);
- protetor de vento de espuma Brüel & Kjaer.
- calibrador de intensidade sonora Brüel & Kjaer tipo 3541 composto de
 - pistonfone Brüel & Kjaer tipo 4228;
 - acoplador Brüel & Kjaer UA 0914;
 - fonte sonora de banda larga Brüel & Kjaer 0055.

A instrumentação foi verificada e ajustada conforme informativo técnico do fabricante (Ginn¹) e também conforme a norma ISO 9614-2.

O índice pressão intensidade residual do sistema de medição atendeu a norma IEC 61043 nas frequências de interesse, a menos quando notado.

O analisador de frequências e a sonda de intensidade do sistema de medição foram verificados pelo fabricante Brüel & Kjaer, no Brasil.



Figura 4.11: Sistema de medição de intensidade sonora

4.6.2 Sistema para os Ensaios de Pressão Sonora

O seguinte sistema de medição foi utilizado para determinar a potência sonora em câmara semi-aneecóica:

- analisador de frequências Brüel & Kjaer tipo 2144;
- microfone capacitivo Brüel & Kjaer tipo 4165;
- pré-amplificador Brüel & Kjaer tipo 2639;
- calibrador acústico Brüel & Kjaer tipo 4230;
- câmara semi-aneecóica com $5,5 \times 5,5 \times 2,8 \text{ m}^3$.

4.7 Conclusões

De uma forma geral, os indicadores de campo sinalizaram de maneira eficiente a viabilidade em se utilizar medições de intensidade por varredura para determinar a potência sonora.

Os critérios da norma ISO 9614-2, que utilizam os indicadores de campo, mostraram-se, no entanto, rigorosos demais em algumas situações de elevado ruído de fundo.

Sendo assim, as medições que não atendem a esses critérios não precisam ser imediatamente descartadas, mas podem passar por uma avaliação mais detalhada e talvez possam ser aproveitadas.

Para bandas de frequências de 125 Hz, ou inferiores, recomenda-se, de preferência, utilizar a distância entre microfones de 50mm, ao invés de 12mm, principalmente para condições de elevado nível de ruído de fundo.

CAPÍTULO 5 – PROC. METODOLÓGICOS: LINHAS ALTERNADAS

Este capítulo apresenta um procedimento, diferente do utilizado pelas normas internacionais de determinação da potência sonora, para realizar a amostragem do campo de intensidade.

No procedimento apresentado, realizam-se varreduras, com a sonda de dois microfones, alternando-se linhas de amostragem pelas superfícies parciais que compõem a superfície de medição.

O objetivo do procedimento apresentado é ampliar o uso da intensimetria para determinar a potência sonora em determinados ambientes de medição com condições de ruído de fundo não estacionário, como ocorre comumente em áreas industriais.

A apresentação de um procedimento modificado é justificada pela dificuldade do procedimento tradicional de atender aos critérios estipulados pelas normas para ruído estacionário, nos ambientes com ruído de fundo não controlado.

Ainda mais grave é a possibilidade de acrescentar um erro nos resultados da medição, pois a avaliação dos critérios é feita apenas durante o período de amostragem de cada superfície parcial e não de toda a superfície de medição. Isso pode ocasionar a aceitação de amostragens das superfícies parciais com diferentes situações do ambiente acústico, contrariando o princípio do uso da intensimetria para determinar a potência sonora.

Dessa forma, foi realizado um conjunto de medições, com algumas situações diferentes de campo acústico, tanto com linhas alternadas quanto com linha contínuas. Os resultados foram comparados para mostrar que o procedimento proposto é adequado para ser utilizado em determinadas situações de ruído de fundo externo não estacionário, desde que também sejam atendidos os critérios correspondentes à classe de exatidão desejada.

5.1 Sobre a Varredura com Linhas Contínuas

A presença de ruído intermitente ou não estacionário, externo à superfície de medição, pode dificultar ou mesmo inviabilizar a utilização de medições de intensidade para a determinação da potência sonora da fonte ensaiada.

Essa dificuldade ocorre, especialmente, nas situações em que a interferência do ruído não estacionário ocorre concentrada na determinação da potência de uma ou de algumas superfícies parciais, e não distribuída, mais ou menos igualmente, por toda a superfície de medição.

A norma ISO 9614-2 estabelece a realização de duas varreduras ortogonalmente orientadas para cada superfície parcial de medição (Figura 5.1). A diferença entre as duas potências parciais assim estimadas deve ser menor que um certo valor, sendo este o Critério 3 da citada norma.

A comparação entre as potências parciais, das duas varreduras ortogonalmente orientadas, serve para verificar se o campo de intensidade é suficientemente estacionário para poder atender aos critérios correspondentes à classe de exatidão desejada.

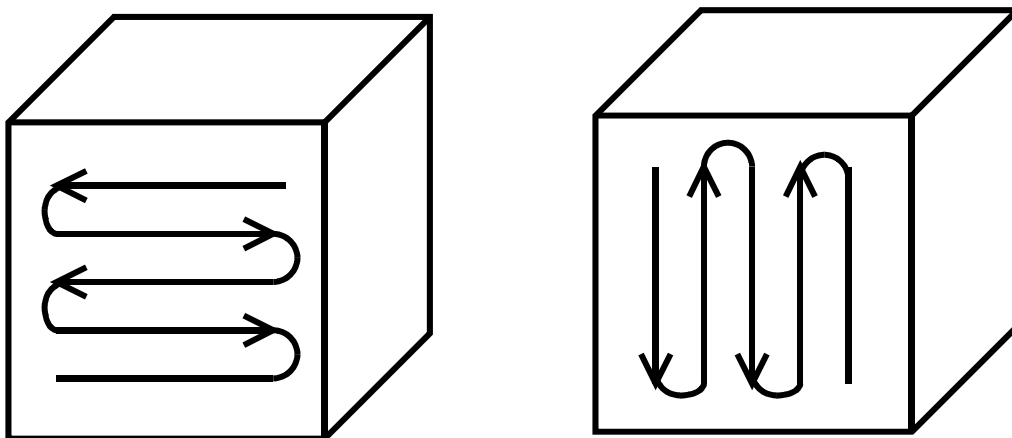


Figura 5.1: Varreduras contínuas ortogonalmente orientadas

5.1.1 Ruído de Fundo Não Estacionário

Segundo Jacobsen (1997), a influência do ruído de fundo não estacionário nunca foi realmente investigada e que, assim, deve-se confiar no bom senso e na avaliação de engenharia.

Para Fahy (1997), alterações significativas do campo de intensidade, que porventura ocorram quando da passagem de uma superfície parcial para outra, não serão detectadas. Isso pode ocorrer, ainda segundo o citado autor, principalmente, nas medições em ambientes não controlados, como fábricas, onde há ocorrências como fontes de ruído estranhas ao ensaio que são freqüentemente ligadas ou desligadas ou mesmo grandes mudanças do ambiente acústico pela abertura de grandes portas ou deslocamento de matérias-primas.

5.1.2 Simulação: Estudo de Caso com Fonte Externa Intermitente

A situação supra citada pode ser exemplificada pela simulação do ensaio de uma fonte, de potência sonora w . Essa fonte se encontra em um ambiente com outras fontes sonoras, intermitentes, externas à superfície de medição, cada uma delas com potência sonora w' quando em operação.

A fonte ensaiada e cada uma das fontes externas interferentes se encontram equidistantes d da superfície de medição (Figura 5.2).

As fontes estão dispostas diretamente sobre o piso.

A superfície de medição é um cubo apoiado sobre o piso e dividida em cinco superfícies parciais, sendo quatro verticais e uma horizontal superior.

Nesta simulação, a fonte externa interferente opera somente durante a medição da superfície parcial mais próxima.

Os desvios nos valores estimados da potência sonora da fonte ensaiada, provocados pela intermitência das fontes externas, dependem dos valores relativos entre as potências w e w' , do número de superfícies parciais em que há interferência da fonte externa e das distâncias entre as fontes e a superfície de medição.

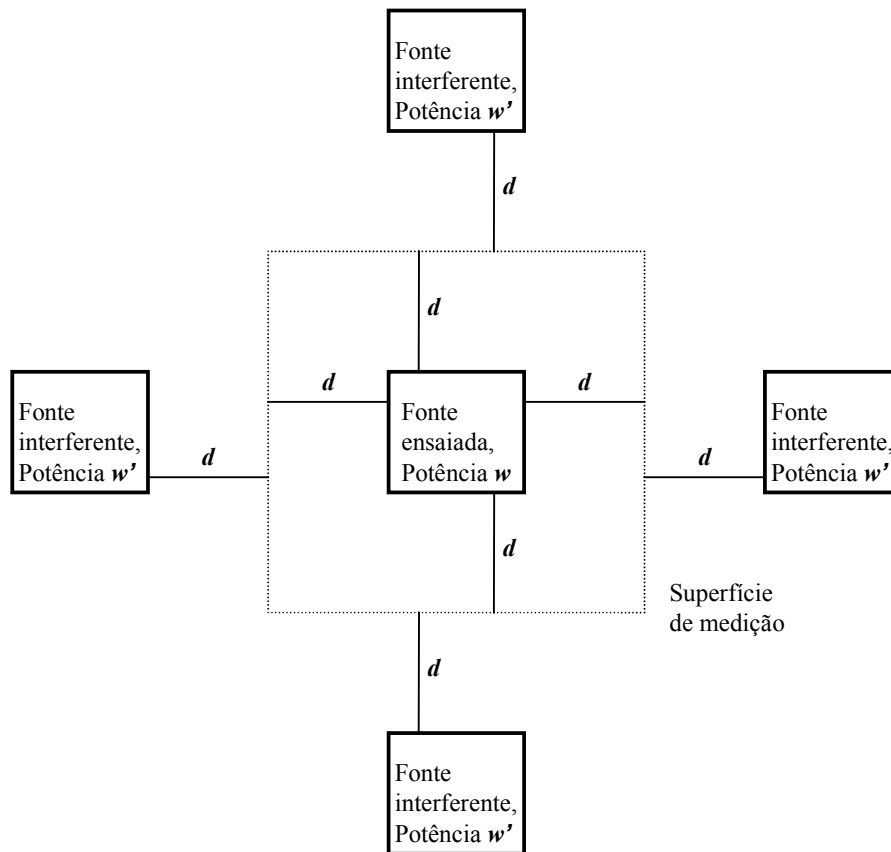


Figura 5.2: Simulação de ensaio com fontes interferentes intermitentes

Pode-se observar, na Figura 5.3, a expressiva deterioração dos resultados com o aumento tanto da potência da fonte interferente quanto do número de superfícies parciais com fonte externa interferente.

Dessa forma, as medições por varredura com linhas contínuas, neste estudo de caso, fornecem resultados com desvios acima dos erros inerentes ao método, pois concentram toda a interferência de uma fonte externa na amostragem do campo de intensidade sonora de uma única superfície parcial.

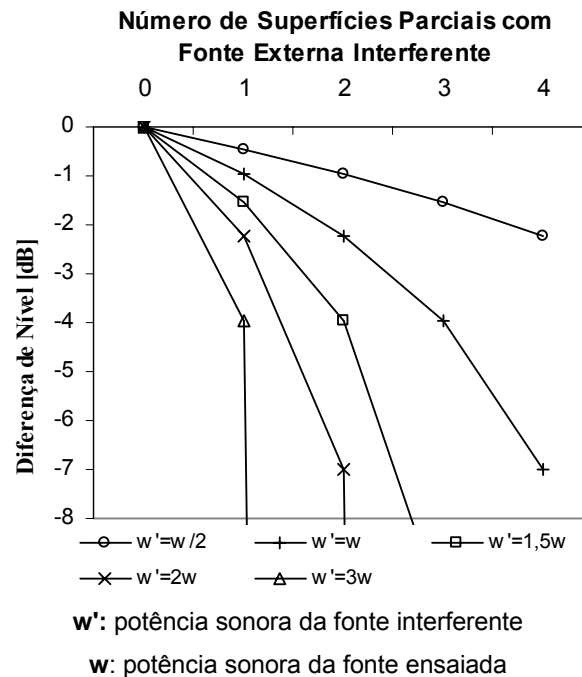


Figura 5.3: Erro na determinação da potência do estudo de caso

5.2 Procedimento de Varredura com Linhas Alternadas

A realização de medições de intensidade, para determinação de potência sonora, por varredura com linhas alternadas visa reduzir as limitações do uso da intensimetria, comparativamente às medições por varredura com linhas contínuas, em relação aos requisitos referentes ao ruído estacionário. Trata-se de um procedimento baseado na norma ISO 9614-2, mas modificado quanto à forma de obtenção da intensidade na superfície de medição.

No procedimento com linhas alternadas, ao invés de uma varredura contínua por toda a superfície parcial de medição, realiza-se a varredura de uma única linha passando-se para outra superfície parcial e retornando à primeira superfície parcial, para varrer outra linha, somente após todas as superfícies parciais serem contempladas com a varredura de uma linha.

As varreduras nas direções horizontal e vertical também são alternadas após a varredura de uma linha de cada superfície parcial (Figura 5.4).

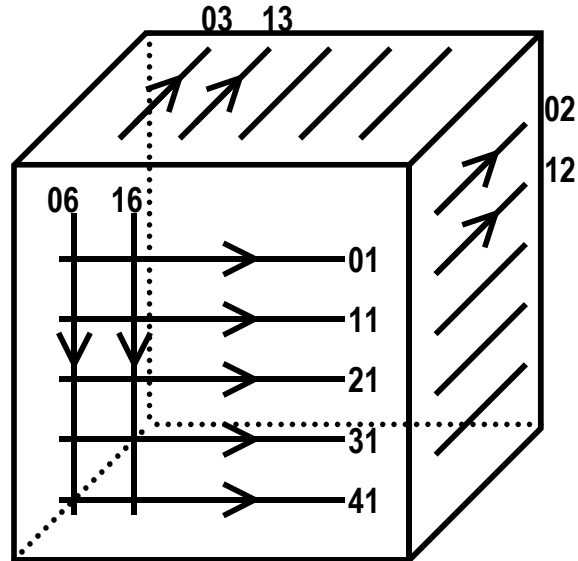


Figura 5.4: Varredura com linhas alternadas, na seqüência a partir da linha 01

O procedimento com linhas alternadas propicia uma melhor distribuição da amostragem ao longo do tempo. Dessa forma, aumenta-se a possibilidade do campo de intensidade acústico se enquadrar como estacionário dentro de um certo grau de incerteza, atendendo ao critério 3 da norma internacional ISO 9614-2, por exemplo.

Em termos de distribuição espacial, a varredura por linhas alternadas também evita as inversões de direção que são consideradas como os pontos mais sensíveis a erros da amostragem por linhas contínuas.

Acredita-se, então que o procedimento com linhas alternadas seja tão eficiente quanto com linhas contínuas para ruído estacionário, mas seja de aplicação mais abrangente para ruído não estacionário.

Por outro lado, o tempo de amostragem do campo de intensidade e o número de dados registrados aumentam nas medições por varredura com linhas alternadas, o que indica este procedimento, principalmente, para medições nas quais há dificuldade, com linhas contínuas, em atender a critério referente ao ruído estacionário.

Os resultados das medições de cada uma das linhas, entretanto, podem ser utilizados para avaliar a não uniformidade de campo e a adequação da densidade de linhas, respectivamente os critérios 4 e 5 da parte 3 da norma ISO 9614, método de precisão para medições por varredura.

5.3 Ensaios desta Pesquisa em Sala Comum

Foram realizados ensaios (Quadro 5.1) em uma sala comum de escritório mobiliada, de 70 m³.

Quadro 5.1: Resumo dos ensaios em sala comum, linhas alternadas

Item	Fonte Externa	Ruído de Fundo
5.3.1	não	estacionário
5.3.2	distante	estacionário
5.3.3	próxima	estacionário
5.3.4	próxima	não estacionário

O tempo de reverberação da sala foi medido conforme procedimento da norma ISO 354 (Quadro 5.2).

Quadro 5.2: Tempo de Reverberação da sala de ensaio, medido

Frequência [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Tempo de Reverberação [s]	0,49	0,54	0,64	0,59	0,59	0,59

Para cada condição de campo acústico, foram utilizados os dois procedimentos de medição por varredura (Quadro 5.3), com linhas alternadas e com linhas contínuas, na mesma superfície de medição (Figura 5.5) e atendendo, se aplicável, aos requisitos da norma ISO 9614-2 (Quadro 5.4).

Quadro 5.3: Características do ensaio

Fonte Ensaída	aspirador de pó ROBOT
Fonte Externa	aspirador de pó TORNADO
Distância entre microfones (sonda)	12 mm
Bandas de frequências	de 125 Hz a 4 kHz, em bandas de uma oitava
Superfície de medição	dividida em 5 superfícies parciais planas

Quadro 5.4: Condições dos ensaios com linhas alternadas e contínuas

	Ensaio	Requisitos da Norma ISO 9614-2
Número de superfícies parciais de medição	5	Mínimo de 4
Distância entre superfície parcial e superfície da fonte	de 315 a 500 mm	Média mínima: 200mm (superfície extensa ou placa vibrante) ou 100mm (fonte pequena e compacta)
Distância entre linhas da varredura	200mm	Não ultrapassar a distância média da superfície parcial à superfície da fonte
Número de linhas	5	Não especifica
Velocidade média da varredura	0,2 m/s	0,1 a 0,5 m/s, recomenda $\leq 0,25$ m/s se $F_{pl} > 10$ dB
Tempo de varredura da linha	± 5 s	Não existe
Tempo total de varredura da superfície parcial (média)	25 s	Pelo menos 20 s por superfície parcial de medição

A avaliação compreende comparar, com valores de referência, os valores de potência sonora determinados pelos ensaios realizados pelos dois procedimentos de varredura. Utilizou-se como referência os valores de potência sonora obtidos no ensaio de intensidade realizado por varredura com linhas contínuas e espaçamento entre microfones $\Delta r = 12$ mm, sem ruído externo e na câmara semi-anecóica, um ambiente sem ruído reverberante.

A avaliação inclui, também, a análise dos critérios da norma ISO 9614-2.

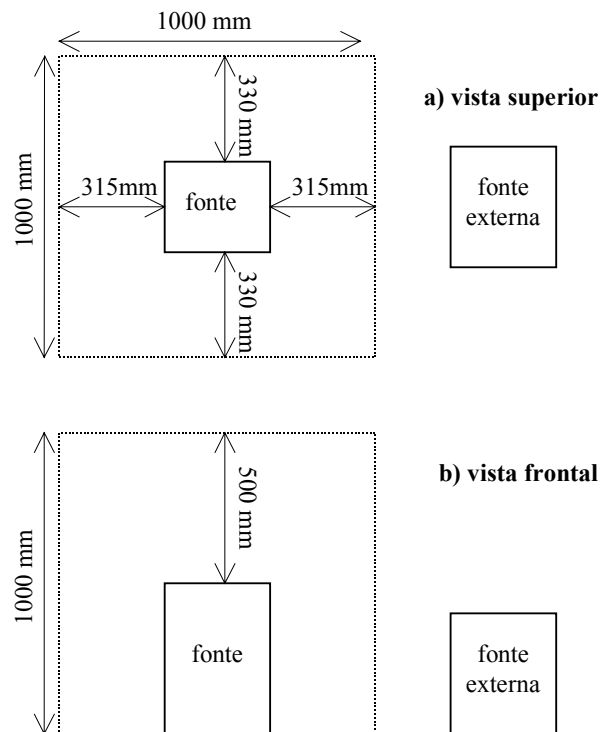


Figura 5.5: Superfície de medição ao redor da fonte sonora Robot

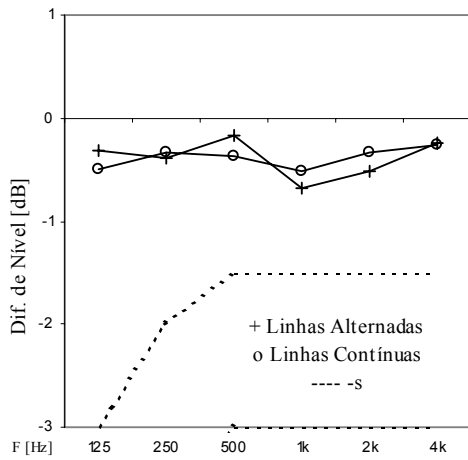
5.3.1 Ensaio sem Fonte de Ruído Externa à Superfície de Medição

O objetivo deste ensaio é determinar a potência sonora com a fonte externa não operante, ou seja, sem a presença de ruído externo relevante.

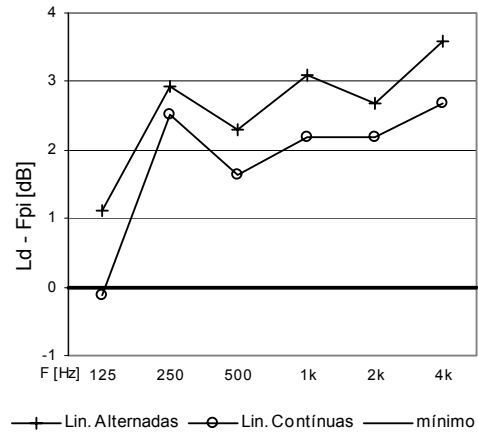
Os procedimentos por varredura com linhas alternadas e com linhas contínuas geraram resultados semelhantes para os valores estimados de potência, ambos subestimando apenas ligeiramente os resultados do ensaio de referência (Figura 5.6A).

Para o critério 1 (Figura 5.6B) e para o critério 3 (Figura 5.7) o procedimento com linhas alternadas foi levemente mais favorável.

Os indicadores de campo para o critério 2 tiveram valor zero como esperado para um ambiente sem ruído externo significativo.

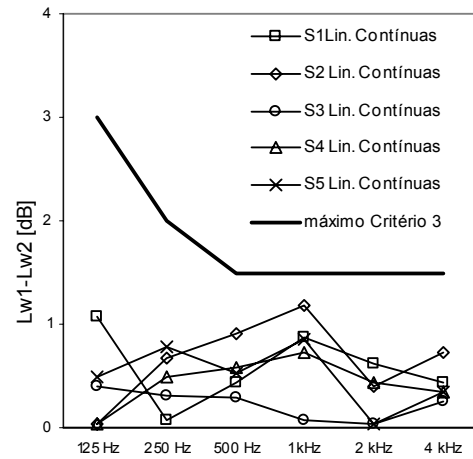
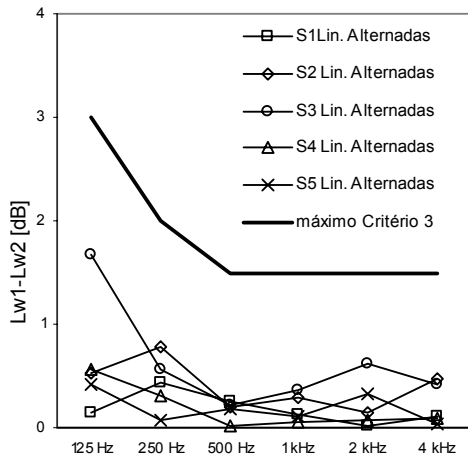


(A) Erro ao estimar a potência sonora
 s: desvio padrão para classe de exatidão de engenharia



(B) Critério 1, norma ISO 9614-2
 L_d : Capacidade Dinâmica da Instrumentação
 F_{pi} : Indicador Pressão Intensidade

Figura 5.6: Ensaio sem fonte externa



$Lw1-Lw2$: Diferença entre os níveis de potência sonora das duas varreduras ortogonais nas superfícies parciais S1 a S5

Figura 5.7: Critério 3 da norma ISO 9614-2, ensaio sem fonte externa

5.3.2 Ensaio com Fonte Externa de Ruído Estacionário Distante

O objetivo deste ensaio é determinar a potência sonora na presença de fonte de ruído estacionário, externa e distante da superfície de medição.

Quanto ao critério 2 da norma ISO 9614-2, o indicador de potência parcial negativa foi nulo em todas as frequências, em ambos os casos, o que indica fraca interferência da fonte externa.

Os ensaios resultaram em valores de potência com desvios menores do que um desvio padrão para incerteza de engenharia, mesmo nas bandas de 125 e 250 Hz que não atenderam ao critério 1. Observou-se a diferença entre 0,5 a 1 dB, entre os valores obtidos pelos ensaios por linhas alternadas e por linhas contínuas, tanto da potência sonora quanto do indicador de campo F_{pi} . (Figura 5.8).

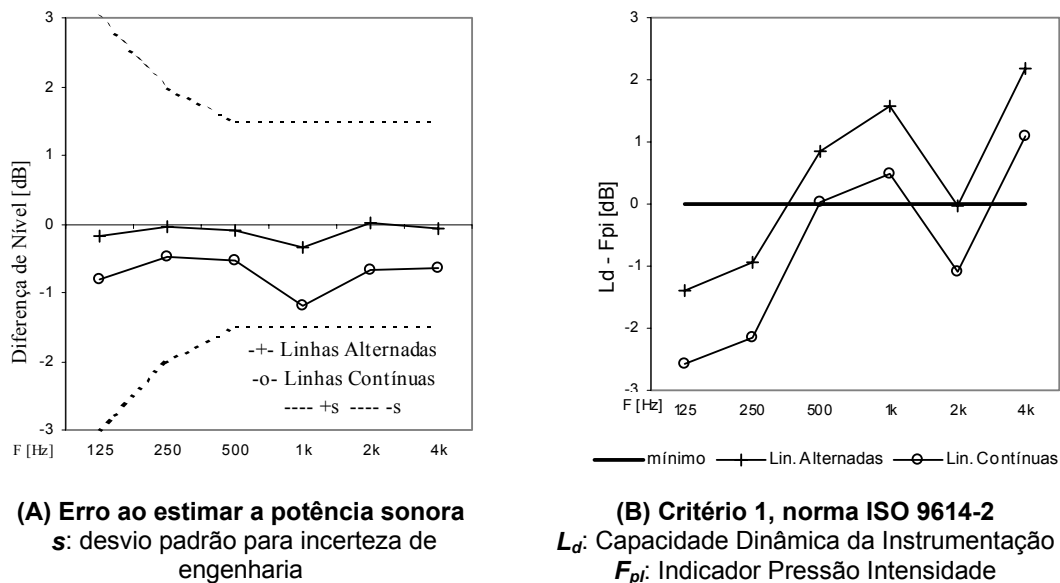


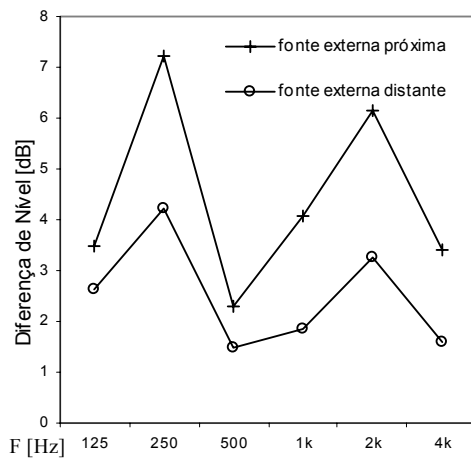
Figura 5.8: Ensaio com fonte externa de ruído estacionário distante

5.3.3 Ensaio com Fonte Externa de Ruído Estacionário Próxima

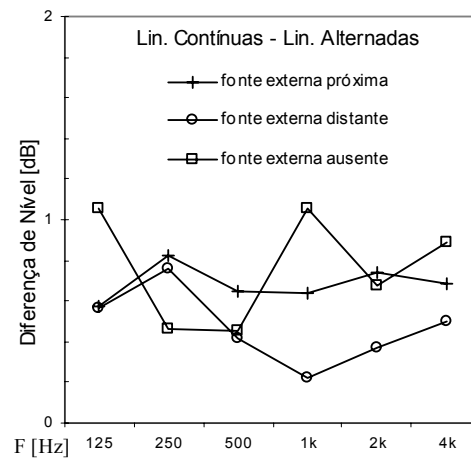
O objetivo deste ensaio é determinar a potência sonora, na presença de fonte externa, com ruído estacionário, próxima à superfície de medição.

A fonte externa foi posicionada a 200mm do centro de uma das superfícies parciais de medição. O aumento do nível médio de pressão sonora na superfície de medição pode ser visto na Figura 5.9A.

A pressão sonora média do ensaio com linhas contínuas mostrou-se um pouco acima dos valores do ensaio com linhas alternadas, em todas as bandas de frequência (Figura 5.9B).



(A) Aumento do nível médio de pressão sonora devido à fonte externa, próxima e distante, ensaio com linhas alternadas



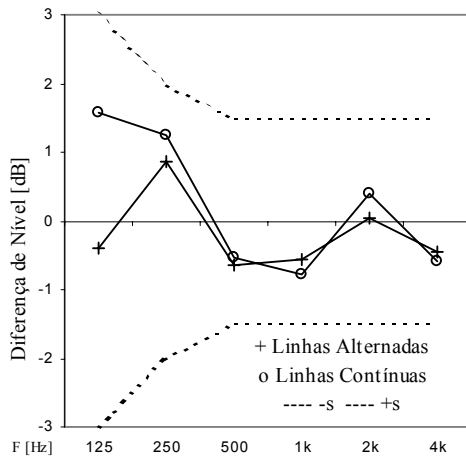
(B) Diferença entre os valores do nível médio de pressão sonora dos ensaios com linhas contínuas e alternadas

Figura 5.9: Ensaios com ruído externo estacionário

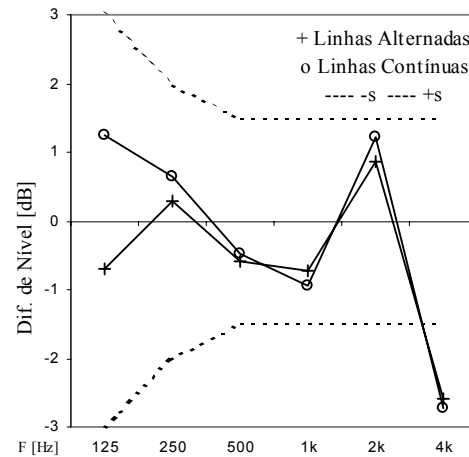
Os valores da potência sonora determinados pelos ensaios por varredura com linhas contínuas e com linhas alternadas mostraram-se semelhantes, tanto entre si quanto com relação aos valores de referência (Figura 5.10A). Houve apenas um desvio um pouco maior na banda de 125 Hz do que nas outras bandas, o que não surpreende, pois, teoricamente, o erro de diferença de fase do sistema de medição é maior em bandas de baixa frequência.

Também são comparados os valores da potência sonora determinados por medições de intensidade sonora com os determinados por medições de pressão sonora conforme ISO 3745.

Nessa comparação, houve diferença considerável apenas na banda de frequências de 4 kHz (Figura 5.10B), na qual já é significativa a influência do erro de aproximação de diferença finita das medições de intensidade.



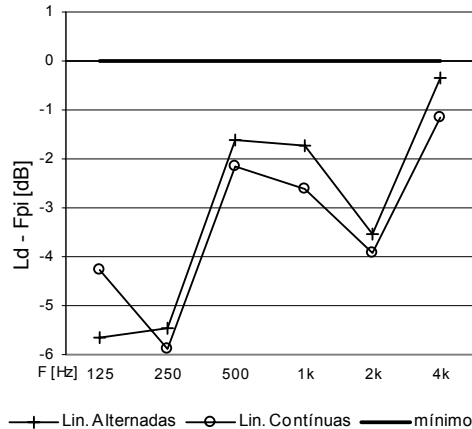
(A) Erro ao estimar a potência sonora
s: desvio padrão para incerteza de engenharia



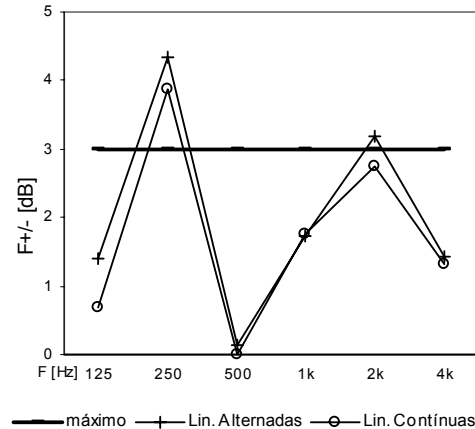
(B) Diferença entre os valores da potência sonora
determinados por medições de intensidade e de pressão (ISO 3745)

Figura 5.10: Ensaios com fonte externa próxima, ruído estacionário

Conseguiram-se resultados próximos aos valores de referência mesmo sem atender integralmente aos critérios da norma ISO 9614-2 para classe de exatidão de engenharia (Figura 5.11).



(A) Critério 1, norma ISO 9614-2,
 L_d : Capacidade Dinâmica da Instrumentação
 F_{pi} : Indicador Pressão Intensidade



(B) Critério 2, norma ISO 9614-2,
 $F_{+/-}$: Indicador de Potência Parcial Negativa

Figura 5.11: Ensaios com fonte externa próxima, ruído estacionário

5.3.4 Ensaio com Fonte Externa Próxima e Ruído Não Estacionário

O objetivo deste ensaio é determinar a potência sonora, na presença de fonte de ruído externo não estacionário no tempo, com a fonte localizada próximo à superfície de medição.

Procedimento

Foram combinadas as medições dos ensaios sem fonte externa e com fonte externa próxima da superfície de medição, respectivamente itens 5.3.1 e 5.3.3. O objetivo é simular ruído de fundo não estacionário, semelhante a ligar e desligar a fonte externa.

A fonte externa, aspirador de pó Tornado, foi posicionada a 200mm do centro de uma das superfícies parciais de medição.

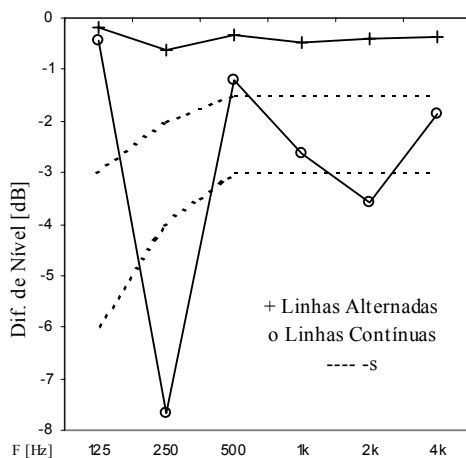
Obteve-se uma situação equivalente ao ensaio em que durante as medições iniciais não há fonte externa operante e durante as medições finais ocorre a operação da fonte externa. As medições iniciais representam 60% do total, enquanto que as medições finais correspondem aos restantes 40%.

No caso do ensaio por varredura com linhas contínuas, as medições finais correspondem às duas últimas superfícies parciais de medição. No caso do ensaio por varredura com linhas alternadas, as medições finais correspondem às duas últimas linhas de cada uma das cinco superfícies parciais.

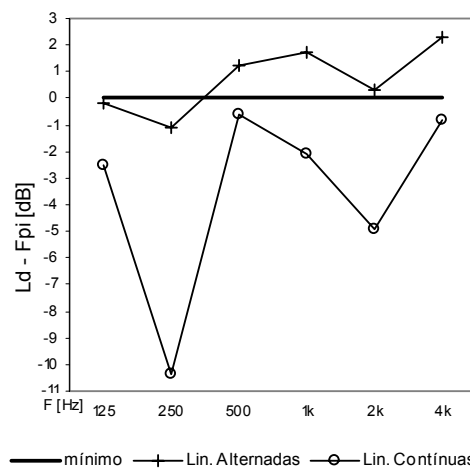
Avaliação dos Resultados

Os resultados dos ensaios realizados por varredura com linhas alternadas e com linhas contínuas foram comparados entre si. Também foram comparados com os resultados do ensaio de referência, realizado sem fonte externa e sem reverberação.

Observa-se que os valores do erro de determinação da potência sonora do ensaio com linhas alternadas são nitidamente menores que os valores do erro com linhas contínuas (Figura 5.12A), sendo a vantagem mais significativa quanto maior a diferença, entre as duas investigações, dos valores dos indicadores de campo F_{pi} (Figura 5.12B) e $F_{+/-}$ (Figura 5.13A).



(A) Erro ao estimar a potência sonora
s: desvio padrão para incerteza de engenharia



(B) Critério 1, norma ISO 9614-2,
 L_d : Capacidade Dinâmica da Instrumentação
 F_{pi} : Indicador Pressão Intensidade

Figura 5.12: Potência e Critério 1 dos ensaios com ruído não estacionário

O ensaio com linhas contínuas atende integralmente ao critério 3, relativo ao ruído estacionário (Figura 5.13B), o que não permite que a intermitência do ruído externo seja detectada.

Já para o ensaio com linhas alternadas, embora, em geral, o critério 3 também seja atendido, já há indícios das variações do ruído externo, o que serve de alerta ao condutor dos ensaios.

Uma das superfícies parciais de medição, S5, não é mostrada nessa figura, pois a sua potência parcial determinada é suficientemente menor que a soma da potência das outras superfícies parciais e pode assim ser desprezada no somatório total.

Elevadas diferenças entre as varreduras ortogonais 1 e 2, em algumas bandas de frequências, ocorreram na superfície S5, justamente pelos seus valores pequenos em relação à faixa dinâmica do sistema de medição.

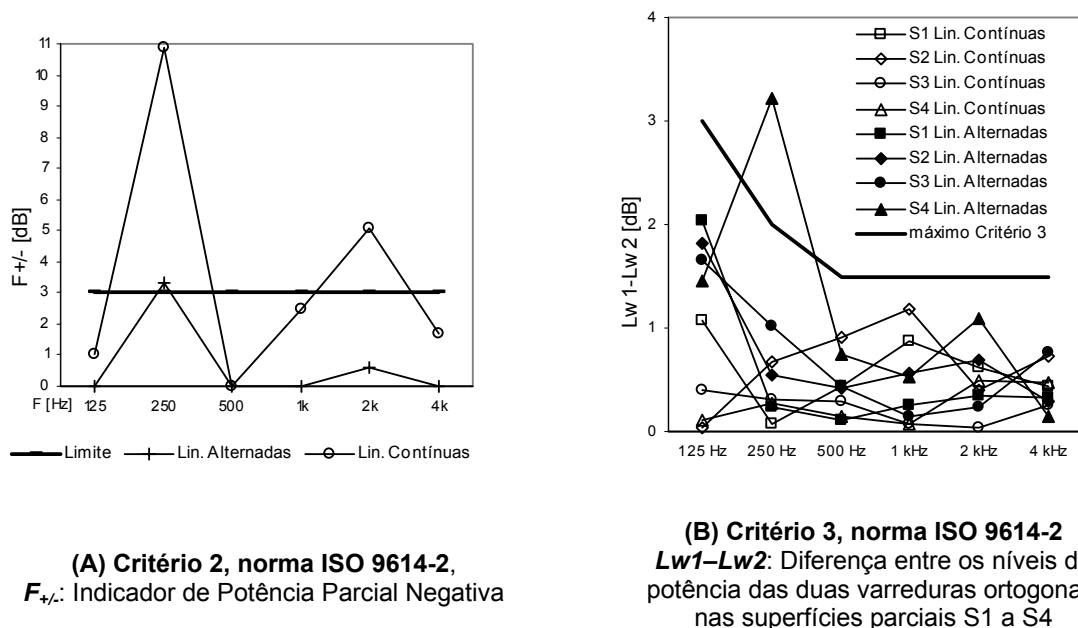


Figura 5.13: Critérios 2 e 3 dos ensaios com ruído não estacionário

5.4 Ensaios em Ambiente Industrial

O objetivo dos ensaios em ambiente industrial é determinar a potência sonora, pela intensimetria acústica, em uma área fabril com condições normais de produção, na presença de ruído de fundo elevado.

Procedimentos

Foram utilizados os procedimentos de varredura com linhas alternadas e também com linhas contínuas (Quadro 5.5) e condições dos ensaios conforme Quadro 5.4 (ver item 5.3).

As medições foram realizadas com a fonte sonora Tornado (Figura 5.14), colocada no piso de um grande galpão fabril de uma indústria de transformação de plásticos.

Avaliação dos Resultados

Os resultados dos ensaios em ambiente industrial, realizados por varredura com linhas alternadas e com linhas contínuas, foram comparados entre si e com os resultados do ensaio de referência, realizado por varredura com linhas contínuas, espaçamento entre microfones $\Delta r = 12\text{mm}$, em ambiente controlado, sem fonte externa e sem reverberação.

Os valores de potência sonora determinados nos ensaios em ambiente industrial também foram comparados com o valores determinados por medições de pressão conforme ISO 3745.

Quadro 5.5: Características do ensaio

Fonte Ensaada	aspirador de pó Tornado
Distância entre microfones (sonda)	12 mm
Bandas de frequências	de 125 Hz a 4 kHz em bandas de 1/1 oitava
Superfície de medição	dividida em 5 superfícies parciais planas

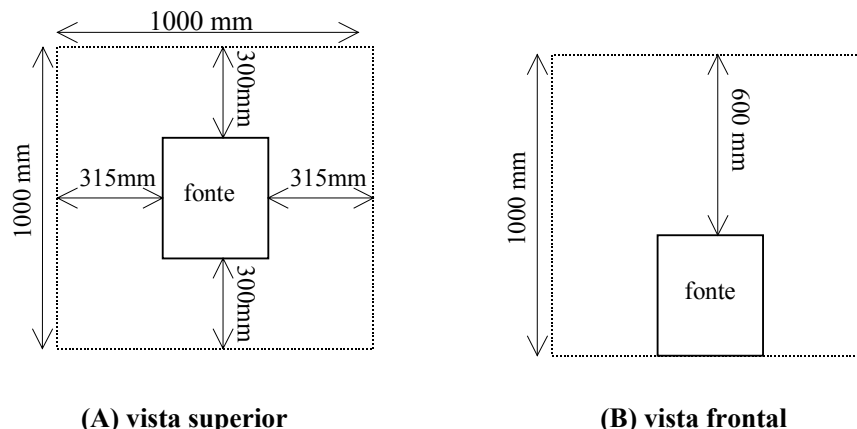


Figura 5.14: Superfície de medição, ambiente industrial

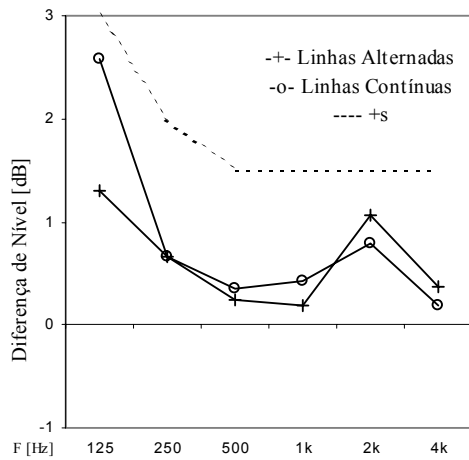
5.4.1 Resultados dos Ensaios em Ambiente Industrial

Os valores da potência sonora, determinados com as interferências do ambiente industrial na amostragem da intensidade acústica, não apresentaram erros significativos.

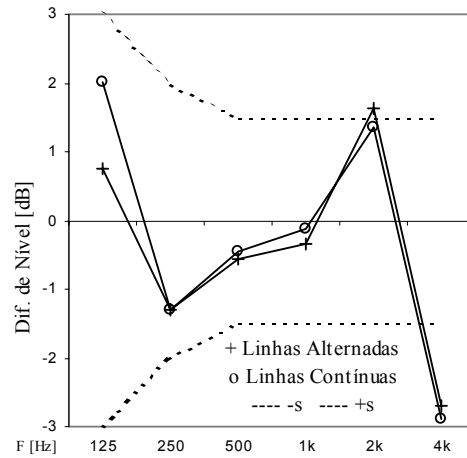
Os erros ao estimar a potência sonora foram menores do que um desvio padrão s , para classe de exatidão de engenharia, tanto para o ensaio com linhas contínuas quanto para o ensaio com linhas alternadas (Figura 5.15A).

Os maiores desvios para a potência determinada por medições de intensidade, com relação aos valores determinados pelo ensaio por pressão, se encontram na banda de 4 kHz, como esperado, em condições ideais, pelo erro de aproximação de diferença finita (Figura 5.15B).

Entre 250 Hz e 1 kHz, os valores dos critérios 1 e 2 encontrados para o ensaio por linhas alternadas estão mais compatíveis com os erros de medição do que os valores encontrados para o ensaio por linhas contínuas (Figura 5.16).

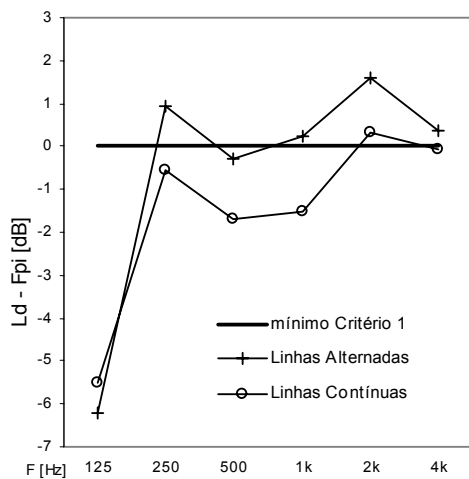


(A) Erro ao estimar a potência sonora
s: desvio padrão para incerteza de engenharia

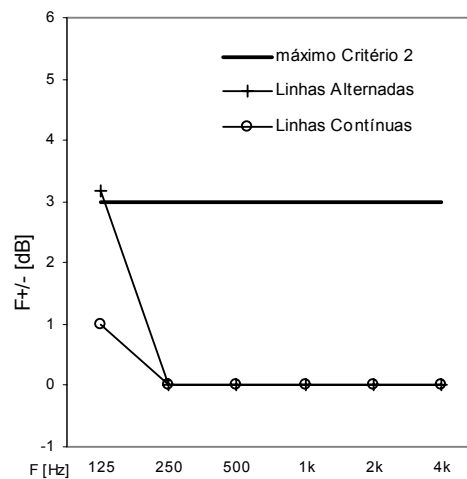


(B) Diferença entre os valores da potência sonora
determinados por medições de intensidade e de pressão (ISO 3745)

Figura 5.15: Erro na determinação do nível de potência, ambiente industrial



(A) Critério 1, norma ISO 9614-2,
 L_d : Capacidade Dinâmica da Instrumentação
 F_{pi} : Indicador Pressão Intensidade



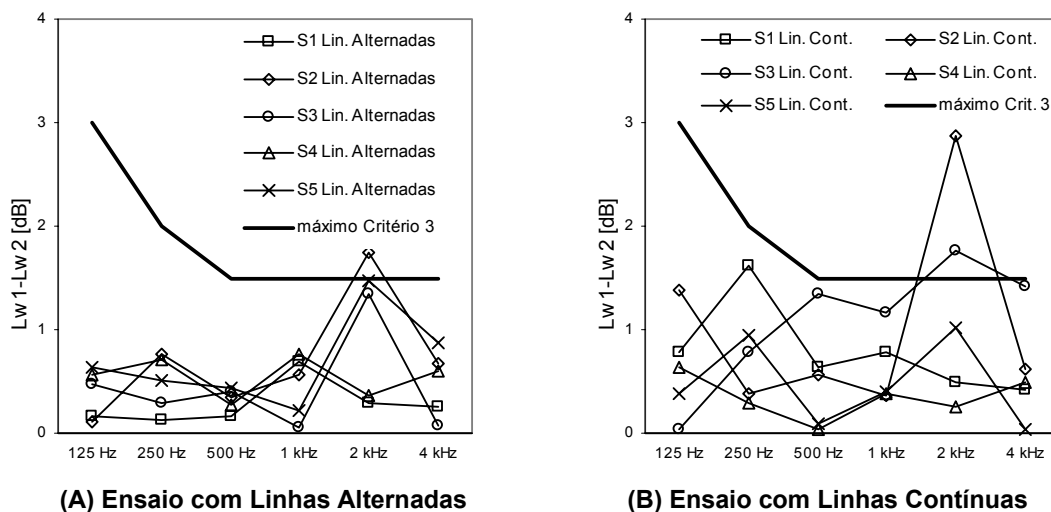
(B) Critério 2, norma ISO 9614-2,
 $F_{+/-}$: Indicador de Potência Parcial Negativa

Figura 5.16: Critérios 1 e 2 dos ensaios em ambiente industrial

Na banda de frequências de 125 Hz, os valores do critério 1 desencorajam utilizar as amostragens de intensidade, tanto por linhas contínuas quanto por linhas alternadas.

A banda de 125 Hz foi a que propiciou a maior diferença entre os resultados dos ensaios com linhas contínuas e linhas alternadas. No entanto, os valores de potência calculados estão dentro da faixa de um desvio padrão s , para classe de exatidão de engenharia.

Na banda de 2 kHz, os valores desfavoráveis do critério 3 (Figura 5.17) justificam os desvios encontrados para a potência, maiores do que os encontrados para as bandas entre 250 Hz e 1 kHz.



$Lw1-Lw2$: Diferença entre os níveis de potência das duas varreduras ortogonais nas superfícies parciais S1 a S5

Figura 5.17: Critério 3 da norma ISO 9614-2, ensaios em ambiente industrial

5.5 Sistema de Medição

Nos ensaios descritos neste capítulo, foi utilizado o mesmo sistema de medição apresentado no capítulo 4, item 4.6.

5.6 Conclusões

Para medições em ambientes com ruído externo à superfície de medição estacionário, os ensaios realizados mostraram que a utilização do procedimento de medição de intensidade por varredura com linhas alternadas resulta em valores de qualidade, no mínimo, tão boa quanto aos valores resultantes do procedimento com linhas contínuas.

As diferenças entre os dois métodos de varredura, pequena diga-se, nos valores do nível de pressão sonora medida ou de potência sonora determinada são compatíveis com as ligeiras diferenças na amostragem, pois a varredura com linhas alternadas evita a inversão do percurso da sonda onde há maior probabilidade de erro.

Para medições com ruído externo à superfície de medição não estacionário, o procedimento com linhas alternadas apresentou valores dos indicadores de campo mais próximos à verdadeira condição acústica ensaiada, o que permite, portanto, maior confiança no uso dos critérios de avaliação.

CAPÍTULO 6 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS: ALTA FREQUÊNCIA

Este capítulo investiga a extensão do limite superior de frequências, além do tradicionalmente aceito, para a determinação da potência sonora por intensimetria acústica.

A partir da pesquisa bibliográfica, foram selecionadas certas correções a serem feitas nos resultados das medições de intensidade para o cálculo da potência sonora.

São apresentados os resultados, com as respectivas correções, dos ensaios realizados em diferentes condições do campo acústico, nas bandas de 1/1 oitava de 4 kHz e 8 kHz.

Foram realizadas medições de intensidade, em um ambiente comum, em bandas de 1/3 oitava, entre 3150 Hz e 10 kHz e foram aplicadas as correções para o cálculo da potência sonora.

Os resultados mostraram que determinadas correções, nas bandas de alta frequência, aproximam os valores da potência sonora obtidos por medições de intensidade daqueles valores obtidos por medições de pressão.

6.1 Limitações da Intensimetria em Altas Frequências

O princípio da intensimetria com dois microfones baseia-se na aproximação de diferença finita da pressão sonora utilizado para determinar a velocidade de partícula (equação 3.6). Isso gera um erro, especialmente em altas frequências, pois para pequenos comprimentos de onda a diferencial de pressão ($\delta p / \delta r$) é muito diferente do gradiente de pressão ($\Delta p / \Delta r$), este último determinado pela diferença de pressão entre os dois microfones da sonda.

O erro de aproximação de diferença finita pode ser estimado, para onda senoidal plana que se propaga em campo livre na direção coincidente ao eixo de orientação da sonda (Gade, 1985), a partir da equação, que inclui o número de onda acústica k_0 e a distância entre microfones Δr :

$$\mathbf{Erro} = \frac{\mathbf{sen}(k_0 \Delta r)}{k_0 \Delta r} \quad 6.1$$

Em termos de níveis, a equação 6.1 pode ser escrita:

$$\mathbf{Erro [dB]} = 10 \log \left[\frac{\mathbf{sen}(k_0 \Delta r)}{k_0 \Delta r} \right] \quad 6.2$$

Gade (1985) não aconselha, no entanto, qualquer correção dos valores medidos pela equação 6.1, pois esta fornece somente uma idéia do limite de frequência superior.

Para fontes complexas, o erro de aproximação de diferença finita depende também das suas dimensões, além da frequência da onda sonora e da distância entre os microfones (Gerges, 1983).

Em medições reais, portanto, o erro envolvido depende do campo sonoro de uma forma complexa, mas segundo Jacobsen *et al.* (1998), a prática tem mostrado ser conservador o uso da equação 6.1, sendo, portanto, o erro menor do que 1 dB se $k_0 \Delta r < 1,15$.

Dessa forma, tem-se um limite superior em torno de 5 kHz para distância entre microfones de 12 mm. É claro que em campos muito reativos, como os encontrados muito próximo da fonte de ruído ou aqueles com ondas estacionárias, pode haver um erro maior do que o apontado por essa equação, conforme salienta Fahy (1995), na página 109.

A equação 6.1 é válida para onda senoidal plana, em campo livre, na direção coincidente ao eixo de orientação da sonda. Para um ângulo α qualquer entre a direção de propagação da onda sonora e o eixo da sonda de medição, mantidas as outras condições, o erro de aproximação finita é dado pela equação (Gade,1985):

$$\text{Erro} = \frac{\text{sen}(k \Delta r \cos \alpha)}{k \Delta r \cos \alpha} \quad 6.3$$

Observa-se da equação 6.3 que o erro diminui enquanto o ângulo α aumenta de 0° a 90° , sendo que neste último ângulo a parte ativa da intensidade é nula.

As correções através da equação 6.3 dificilmente podem ser feitas, pois o ângulo α não é facilmente conhecido, além de variar ponto a ponto. E ainda, as fontes reais normalmente não são pontuais e nem podem ser localizadas precisamente, o que exigiria a determinação da direção da intensidade ponto a ponto experimentalmente.

Portanto, como resumem Jacobsen *et al.* (1998), a equação 6.1 não poderia ser recomendada de forma geral, pois tende a superestimar a potência devido ao vetor intensidade, em geral, não ser perpendicular à superfície de medição.

Na prática, o erro de aproximação de diferença finita implica no estabelecimento de um limite superior no alcance de frequências.

As normas internacionais para determinação da potência sonora por medições de intensidade limitam a sua validade até a banda de frequências de de 6,3 kHz, em 1/3 de oitava.

Os fabricantes de sistemas de medição de intensidade sonora recomendam o limite superior no alcance de frequências conforme a distância entre microfones Δr . O fabricante dinamarquês Brüel & Kjaer, por exemplo, recomenda como limite superior a banda de 5 kHz para $\Delta r = 12\text{mm}$, sem correções.

6.2 Correções conforme Balant *et al.*

Balant *et al.*(1989) utilizaram a equação 6.1 para corrigir os resultados de medições de intensidade por pontos de ventiladores usados em computadores, ensaiados em uma sala comum e sem ruídos interferentes significativos.

A correção pela equação 6.1 foi considerada aceitável pelos autores acima citados devido às condições específicas dos ensaios realizados. O nível de ruído de fundo e as reflexões da sala teriam um efeito mínimo na potência sonora total. Além disso, a distância de 2 m entre a superfície de medição e a fonte sonora, de pequenas dimensões, foi considerada suficientemente elevada para que ondas acústicas pudessem ser assumidas como esféricas.

A equação 6.1 é válida, a rigor, somente para ondas planas, mas também aproximadamente válida para ondas esféricas se $r \gg \Delta r$, pois nessas distâncias as ondas esféricas se aproximam de planas e com direção próxima ao eixo da sonda.

6.2.1 Valores das Correções conforme Balant *et al.*

As correções dos valores medidos do nível de intensidade, supostamente superdimensionadas pela equação 6.2, podem ser somadas aos valores calculados do nível de potência, visto que intensidade e potência se relacionam diretamente (Quadro 6.1).

Quadro 6.1: Erros de aproximação de diferença finita, $\Delta r = 12\text{mm}$, $c = 340\text{m/s}$

F [kHz]	3,15	4	5	6,3	8	10
Erro [dB]	0,36	0,59	0,93	1,5	2,6	4,4

6.3 Correções conforme Jacobsen *et al.*

Jacobsen (2001) afirma que o erro de aproximação de diferença finita será parcialmente cancelado por uma ressonância se o diâmetro dos microfones se igualar à distância entre eles.

Dessa forma, o limite superior do alcance de frequências estende-se para duas vezes ao sugerido pelo erro de diferença finita. Por exemplo, o limite para $\Delta r = 12\text{mm}$ seria a banda de 10 kHz, ao invés da banda de 5 kHz como atualmente aceito. Vale lembrar, no entanto, que a norma IEC 61043, integrada às normas ISO 9614, estabelece requisitos somente até 6,3 kHz.

A conclusão anterior provém de Jacobsen *et al.* (1998), a partir de simulações numéricas utilizando modelos baseados no método de elementos de contorno. Os autores puderam, assim, analisar a influência no campo de intensidade acústica (i) da difração devido à presença dos microfones e (ii) da ressonância nas cavidades entre o elemento sólido de espaçamento e o diafragma de cada microfone. Essa influência aumentaria a pressão nos microfones de tal forma que compensaria o erro de diferença finita.

A superfície de medição utilizada nas simulações numéricas, formada por um cubo de 1m^3 , foi posicionada ao redor de uma fonte monopolo em campo livre. Dentre diferentes configurações da sonda, aquelas em que o diâmetro dos microfones e a distância entre eles são iguais apresentaram resultados destacadamente melhores entre 4 kHz e 10 kHz. Mesmo para essas configurações, no entanto, houve erro que variou conforme a potência e a localização da fonte externa, subestimando 4 dB em 8 kHz na situação mais desfavorável apresentada, com microfones de $\frac{1}{2}$ polegada e $\Delta r = 12\text{mm}$.

Os resultados experimentais mostraram desvios menores do que 1,5 dB na determinação da potência sonora. Os ensaios foram realizados em sala de 240m^3 e tempo de reverberação de 4 segundos, sob algumas situações diferentes de ruído externo. Os valores de referência, para avaliação entre 4 e 10 kHz, são aqueles obtidos no ensaio com microfones de $\frac{1}{4}$ de polegada e distanciados por 6mm, com compensação de diferença de fase feita a partir da repetição das medições com alternância dos microfones.

Jacobsen *et al.* (1998) e (1996) afirmam ser necessário compensar a redução da sensibilidade de pressão, em altas frequências, dos microfones de princípio construtivo conhecido como campo livre, tradicionalmente utilizados. Este é o caso dos microfones B&K 4181 do sistema de medição utilizado nos ensaios de nossa pesquisa. Dessa forma, os resultados das medições devem ser corrigidos pelos valores da resposta, ao atuador eletrostático, da pressão nos microfones, por bandas de frequências. Esses valores são determinados pelo próprio fabricante e se encontram, por exemplo, na carta de calibração dos microfones B&K 4181, nº série 1765797 (Quadro 6.2).

A correção da pressão sonora, obtida pela resposta ao atuador eletrostático, pode ser somada diretamente ao valor do nível de potência sonora determinado pelo ensaio. Isto ocorre, pois não há alteração da velocidade de partícula em virtude desta ser proporcional à inalterada diferença de pressão entre as duas posições de microfones.

Quadro 6.2: Resposta em frequência dos microfones
(correção segundo Jacobsen *et al.*)

F [kHz]	3,15	4	5	6,3	8	10
erro [dB]	0,7	1,0	1,5	2,1	3,2	4,5

6.4 Considerações sobre Determinação da Potência Sonora

Jonasson (1999) cita que já há um certo tempo que se suspeita que a norma ISO 9614-2 resulta valores do nível de potência sonora inferiores aos da série de normas ISO 3740.

Pode ser visto, pelos resultados do trabalho supra citado e de outros publicados, como (Balant *et al.*, 1989), que isso ocorre de forma mais acentuada nas altas frequências.

Para Jacobsen (2001), no entanto, o único fator conhecido a propiciar um erro sistemático negativo nas medições de potência sonora por intensidade é a absorção sonora da fonte ensaiada.

Os erros sistemáticos das séries de normas ISO 3740 e ISO 9614 têm recebido diversas pesquisas nos últimos vinte anos, sem que uma conclusão definitiva tenha sido alcançada sobre um possível valor verdadeiro do nível de potência sonora (Sehrndt, 1996).

6.5 Ensaios desta Pesquisa em Altas Frequências (1/1 oitava)

Foram feitas correções dos valores da potência sonora estimados por ensaios realizados em diferentes campos sonoros para as bandas de frequências, em 1/1 oitava, de 4 e 8 kHz (Quadro 6.3).

Quadro 6.3: Ensaios, fonte Robot

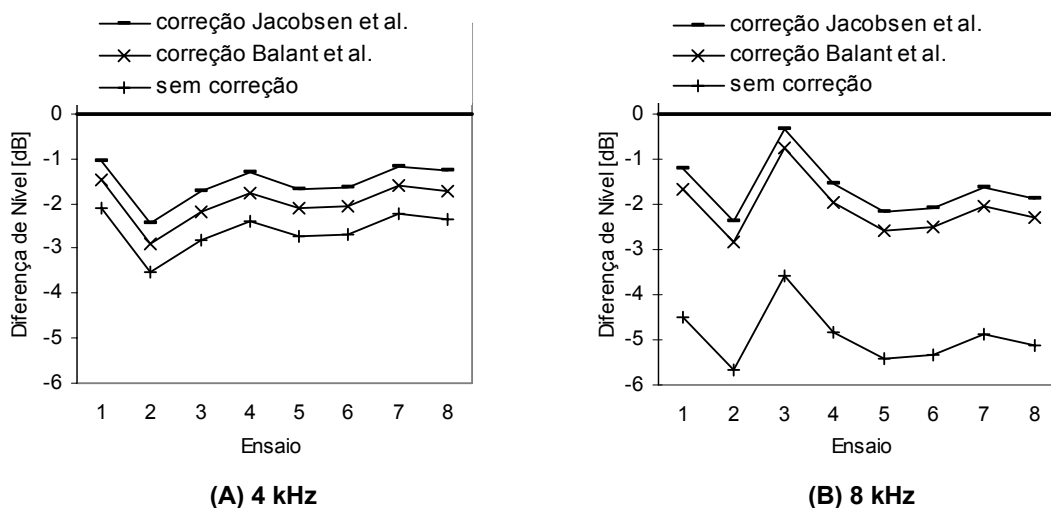
Ensaio	Ambiente	Fonte externa	Bandas de frequências
1	sala semi-aneecóica	não	1/1 oitava
2	sala semi-aneecóica	sim, distante	1/1 oitava
3	sala semi-aneecóica	sim, próxima	1/1 oitava
4	sala comum	não	1/1 oitava
5	sala comum	sim, distante	1/1 oitava
6	sala comum	sim, próxima	1/1 oitava
7	sala comum	não	1/3 oitava
8	sala comum	sim, distante	1/3 oitava

6.6 Resultados das Correções (bandas de 1/1 oitava)

As correções, tanto conforme Balant *et al.* como conforme Jacobsen *et al.*, resultaram na diminuição da diferença dos valores do nível de potência determinados pelas medições de intensidade em relação aos valores obtidos pelas medições de pressão, segundo norma ISO 3745, em câmara semi-anecóica.

Os valores de potência sonora determinados por intensidade, no entanto, permaneceram subestimados quando comparados aos valores obtidos por pressão (Figura 6.1). Entre as diversas condições ensaiadas do campos de intensidade sonora, a diferença média foi de 1,5 dB, tanto para a banda de 4 kHz quanto para a banda de 8 kHz, ambas em 1/1 oitava.

A potência sonora absorvida pela fonte não mostrou-se representativa para explicar a diferença entre ensaios de intensidade e de pressão. Pode, no entanto, ter contribuído na diferença, pequena diga-se, entre os ensaios de intensidade com fonte externa e os ensaios sem fonte externa, estes últimos são os ensaios 1, 4 e 7.



Diferença de nível em relação à potência sonora determinada por medições de pressão sonora conforme ISO 3745

Figura 6.1: Erro ao determinar a potência sonora em 4 kHz e 8 kHz

6.7 Ensaios desta Pesquisa em Altas Freqüências (1/3 oitava)

Para observar o comportamento do campo de intensidade sonora nas altas freqüências de forma mais detalhada, foram realizadas medições em bandas de 1/3 oitava, entre 3,15 kHz e 10 kHz.

A fonte ensaiada, Robot, foi disposta no piso da sala comum. Foi adotado como superfície de medição um cubo de 1m² de cada lado (Figura 5.5, Capítulo 5).

Foram realizados dois ensaios. O primeiro deles com a fonte ensaiada sendo a única fonte relevante.

O segundo ensaio foi realizado com uma fonte sonora externa relevante, embora distante da superfície de medição.

6.8 Resultados das Correções (bandas de 1/3 oitava)

Os valores das correções conforme Jacobsen *et al.* são maiores do que os valores conforme Balant *et al.*, exceto em 10 kHz onde as duas correções mostraram-se equivalentes.

Dessa forma, as estimativas da potência sonora com correções conforme Jacobsen *et al.* apresentaram menores desvios do que as estimativas com correções conforme Balant *et al.*, em relação aos valores de potência obtidos por medições pressão na câmara semi-anecóica (Figura 6.3).

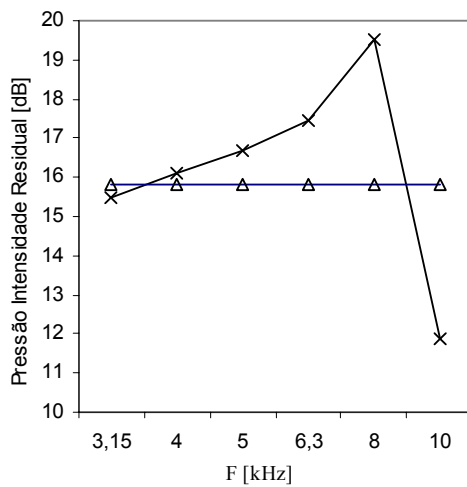
Ainda assim, as estimativas com as correções conforme Jacobsen *et al.* subestimam, em torno de 1,5 dB, aos valores de potência obtidos por medições pressão.

A correção conforme Balant *et al.*, feita pela equação 6.1, aproximou os valores estimados da potência sonora, mas mesmo os valores assim corrigidos ficaram subestimados em relação aos obtidos pelo método de pressão.

Somar os valores da compensação da redução de sensibilidade de pressão em altas freqüências, dos microfones de campo livre, com a equação 6.1 significa fazer ambas as correções, conforme Balant *et al.* e conforme Jacobsen *et al.*, o que foi chamado de dupla correção.

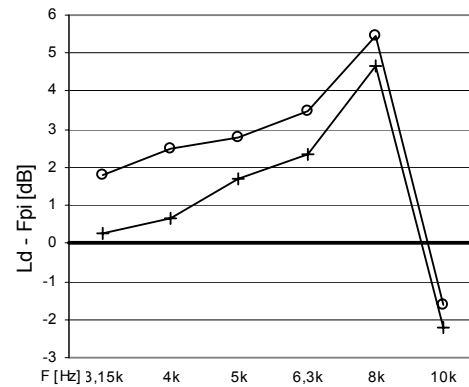
A dupla correção mostrou que as bandas de frequências de 3,15 kHz e 4 kHz ainda permaneceram com valores subestimados, cerca de 1 dB, e que as bandas entre 5 kHz e 8 kHz apresentaram pequenos desvios, até $\pm 0,5$ dB. Apenas na banda de 10 kHz observou-se superdimensionamento, de 3 dB. De qualquer forma, a dupla correção mostrou menores desvios do que cada uma delas individualmente, exceto na banda de 10 kHz.

Os valores da potência encontrados no ensaio com fonte sonora externa à superfície de medição foram muito semelhantes aos valores encontrados no ensaio sem fonte externa. Isso era esperado visto que os critérios da norma ISO 9614-2 foram atendidos em ambos os casos, exceto em 10 kHz (Figura 6.2B).



x—x sistema de medição
 Δ—Δ mínimo segundo IEC 61043

(A) Índice de Pressão Intensidade Residual



L_d : Capacidade Dinâmica do sistema de medição
 F_{pi} : Indicador Pressão Intensidade

+—+ com fonte externa
 o—o sem fonte externa
 — valor mínimo do Critério 1

(B) Critério 1 da norma ISO 9614-2

Figura 6.2: Ensaio em bandas em 1/3 oitava

6.9 Sistema de Medição

O sistema de calibração comercial padrão não contempla frequências acima de 6,3 kHz, pois a fonte sonora de banda larga gera baixos níveis de pressão a partir dessa banda. Assim, foi utilizado um alto falante como fonte sonora para a obtenção do índice de pressão intensidade residual (Figura 6.2A) para as bandas de frequências mais elevadas, em 1/3 de oitava. O valor obtido em 10 kHz, no entanto, mostrou-se relativamente baixo, inclusive ao extrapolar os valores dados como mínimo pela norma IEC 61043, que apresenta valores apenas até 6,3 kHz. Dessa forma, o índice de pressão intensidade residual, a princípio, não credencia o sistema de medição para a análise da banda de 10kHz.

No restante, o sistema de medição utilizado foi o mesmo descrito no capítulo 4, item 4.6.

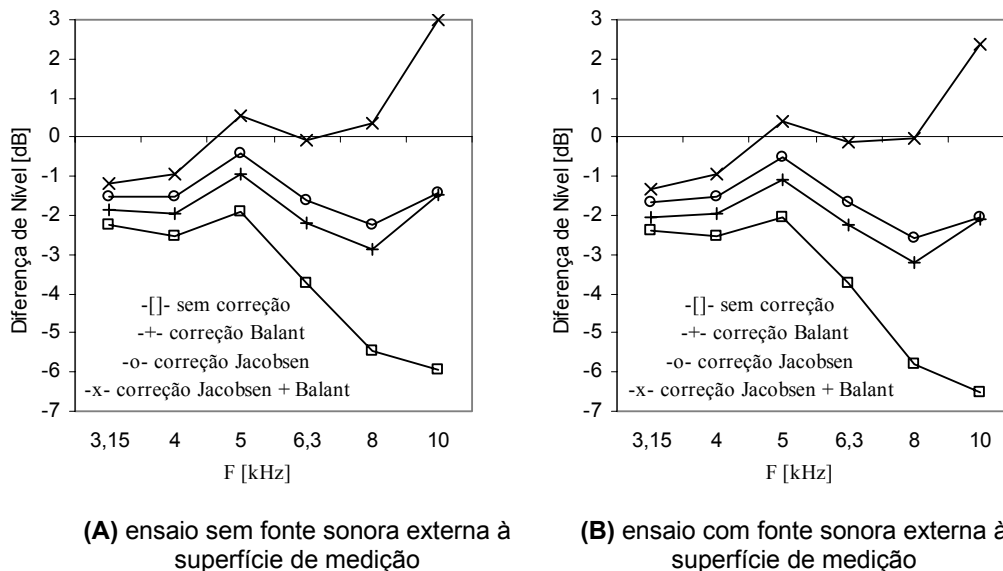


Figura 6.3: Erro ao estimar a potência sonora em bandas de 1/3 oitava

6.10 Conclusões

A pesquisa mostrou uma sensível aproximação entre os valores da potência sonora, determinados pela intensimetria acústica e pelas medições de pressão sonora, ao ser feita a compensação da redução de sensibilidade de pressão dos microfones de campo livre, conforme a recomendação de Jacobsen *et al.* Isso ocorreu nas bandas de 1/3 oitava entre 3,15 kHz e 10 kHz em um ambiente comum, com e sem ruído externo moderado, e também nas bandas de 1/1 oitava de 4 kHz e 8 kHz em diferentes campos acústicos.

Apesar dessa aproximação, ainda restou uma diferença em torno de 1,5 dB. Essa diferença restante pode ser creditada a não completa compensação do erro de diferença finita pelas ressonâncias nas cavidades junto aos microfones, mesmo ao utilizar microfones de diâmetro idêntico ao espaçamento entre eles.

Sabe-se que erro de diferença finita depende, de forma complexa, do campo acústico. O uso da equação 6.1, para corrigir os valores da potência, é recomendado, naturalmente, apenas para os casos que se aproximam das suas suposições. Para as outras situações, essa equação forneceria, teoricamente, uma correção em excesso. Pelos ensaios realizados nesta pesquisa, a maior aproximação entre os valores da potência sonora determinados pela intensimetria acústica e pelas medições de pressão sonora, exceto na banda de 10 kHz, ocorreu para a dupla correção, ou seja, ao utilizar a equação 6.1 mais a compensação da redução de sensibilidade de pressão dos microfones de campo livre em altas frequências.

A exceção na banda de 10 kHz não surpreende em virtude de não ter sido encontrado, nesta pesquisa, o índice de pressão intensidade residual que pudesse credenciar o sistema de medição para essa banda de frequências. Dessa forma, uma outra investigação seria necessária para confirmar se a banda de 10 kHz tem comportamento diferente das outras bandas quanto à dupla correção.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os procedimentos utilizados nesta pesquisa e os resultados alcançados pelos ensaios assim realizados recomendam a intensimetria acústica como ferramenta na solução de problemas de ruído industrial, especialmente em situações de difícil solução técnica ou em situações onde se consiga considerável redução do investimento necessário, o que implicará em significativa redução da exposição do trabalhador ao ruído ocupacional.

7.1 Análise e Recomendações sobre a Norma ISO 9614-2

Os resultados dos ensaios sinalizam um excessivo rigor dos critérios da ISO 9614-2 para medições em ambientes com elevado ruído de fundo. Dessa forma, parece possível conseguir resultados úteis no controle de ruído industrial, com incerteza dentro da classe de exatidão de engenharia, mesmo sem atender aos critérios da norma.

Essas conclusões são válidas para as bandas de frequências de 1/1 oitava entre 125 e 2 kHz. Frequências superiores requerem correções, com as quais há significativa melhoria dos resultados.

No entanto, somente ensaios mais extensivos poderão indicar a incerteza envolvida e a possibilidade de amenizar o rigor desses critérios para as condições de ambientes industriais.

Dessa forma, seria conveniente que na próxima revisão da norma ISO 9614-2 fossem analisadas possíveis mudanças dos critérios, especialmente para medições em ambientes de elevado ruído de fundo como os ambientes industriais.

Alternativamente poderia ser criada uma nova norma especificamente para determinação da potência sonora por medições de intensidade para ambientes industriais.

Embora tenha a proposta de ser abrangente, as normas ISO 9614 têm diversas restrições para a sua aplicação. Algumas questões, no entanto, ainda precisam ser melhor avaliadas nas medições em ambientes industriais, tais como a presença de ruídos impulsivos, que podem ocasionar sobrecarga (*overload*) no sistema de medição, e a agressividade do ambiente, que pode comprometer os "frágeis" equipamentos de medição tanto na sua integridade física quanto na exatidão dos resultados, incluindo-se restrições a elevados fluxos de ar e temperaturas.

7.2 Avaliação das Medições com Linhas Alternadas

Para medições em ambientes com ruído estacionário no tempo, externo à superfície de medição, os ensaios realizados mostraram que a utilização do procedimento de medição de intensidade por varredura com linhas alternadas resulta em valores de qualidade, no mínimo, tão boa quanto aos valores resultantes do procedimento com linhas contínuas.

Para medições com ruído não estacionário no tempo, externo à superfície de medição, o procedimento com linhas alternadas apresentou valores dos indicadores de campo mais próximos à verdadeira condição acústica ensaiada, o que permite, portanto, maior confiança no uso dos critérios de avaliação.

Como o procedimento com linhas alternadas realiza a amostragem da intensidade sonora com melhor distribuição temporal do que o procedimento com linhas contínuas, o primeiro é recomendado para situações em que o ruído de fundo varia de forma significativa.

Dessa forma, recomenda-se incluir a amostragem da intensidade sonora por varredura com linhas alternadas nas ações de melhoria da norma ISO 9614-2, nos casos em que há dificuldade para atender ao critério 3 e as ações atualmente propostas pela norma não forem suficientes, ou cabíveis.

O procedimento com linhas alternadas também mostra-se interessante para medições em ambientes com leiaute denso onde a varredura contínua seria dificultada e exigiria muitas pausas na medição.

7.3 Avaliação dos Ensaios em Bandas de Alta Frequência

No caso da utilização de sonda de intensidade com microfones de campo livre, os valores da potência sonora assim determinados precisam ser corrigidos, nas bandas de altas frequências, mesmo ao usar dois microfones de ½ polegada e espaçados em 12mm. Isto se deve para compensar a redução da sensibilidade de pressão, em altas frequências, desse tipo de microfones.

Correções para compensar o erro de diferença finita dependem de forma complexa do campo sonoro. No entanto, para os diferentes campos sonoros pesquisados, o uso da equação de estimativa teórica do erro da onda plana mostrou-se efetivo para reduzir a diferença entre as determinações de potência por intensimetria acústica e por medições de pressão em ambiente semi-anecóico.

7.4 Análise e Recomendações sobre o Sistema de Medição

Nos primeiros ensaios realizados, observou-se que a qualidade das medições por varredura melhorou quando se deu maior atenção à faixa dinâmica do sistema de medição. A função *auto range* do sistema utilizado, que fixa o valor do limite superior da faixa dinâmica da medição de intensidade, *input*, precisou ser aumentado manualmente, em muitas ocasiões, devido à ocorrência de sobrecarga (*overload*).

Como se poderia esperar, ao aumentar excessivamente o *input*, houve maior erro na medição dos valores inferiores de intensidade. Isso dificultou, inclusive, ao atendimento do critério 3 da norma ISO 9614-2 nas superfícies parciais com valores de potência relativamente baixos. No entanto, isso pode ser desprezado no cálculo da potência da fonte ensaiada, desde que o valor da soma das potências parciais das superfícies desprezadas seja pelo menos 10 dB abaixo da soma das outras superfícies, o que ocorreu em nossos ensaios, na maioria das vezes.

Recomenda-se, sobretudo aos novos usuários desta técnica, fazer uma criteriosa avaliação do seu sistema de medição utilizando-se de procedimentos tanto fornecidos pelo fabricante do sistema como os apresentados na bibliografia, em especial nas normas IEC 61043 e ISO 9614.

A incorporação de uma fonte sonora de referência pode dar também maior confiança aos primeiros resultados.

Ao adquirir instrumentação para medição de intensidade, notadamente para trabalhos em campo, recomenda-se avaliar com bastante atenção suas características técnicas, principalmente a Capacidade Dinâmica do sistema.

7.5 Limitações dos Resultados da Pesquisa

Conforme dito no Capítulo 1, a generalização das conclusões sobre os resultados, além das próprias condições dos ensaios, exige a utilização dos procedimentos em diversas situações práticas e por diferentes usuários.

A aplicação mais generalizada da intensimetria acústica na indústria depende, no entanto, de elevado investimento em sistemas de medição e em pessoal especializado. Recomenda-se, assim, a formação de convênios entre setores empresariais com problemas de ruído e instituições capacitadas no uso da intensimetria acústica.

Dessa forma, a indústria teria diagnosticado os seus problemas de ruído, comuns às empresas daquele determinado setor empresarial, e por outro lado as instituições desenvolveriam tecnologia nesse complexo assunto. Os trabalhadores da indústria serão os próximos beneficiados, após a implantação das medidas de controle nas principais fontes de ruído diagnosticadas.

7.6 Sobre a Determinação da Potência Verdadeira

As correções sugeridas visam aproximar os valores estimados da verdadeira potência sonora, mas como obtê-la? A amostragem do campo de intensidade fornece diretamente a potência gerada dentro da superfície de medição, o que é uma vantagem em relação ao método indireto por medições de pressão. No entanto, as limitações da intensimetria com dois microfones, nas altas frequências, não permite adotar os valores obtidos diretamente por esse método como os “verdadeiros”.

Dentre os ensaios realizados nesta pesquisa, dois deles se apresentaram como os mais adequados para serem os responsáveis para fornecer os valores de referência, ou verdadeiros, da potência sonora. Tratam-se dos ensaios por intensidade e por pressão, ambos sem ruído externo interferente e em ambiente semi-anecóico. Mesmo assim, cada um dos métodos pode apresentar erros sistemáticos, sendo os mais significativos o erro de aproximação de diferença finita para o método por intensidade e o erro sistemático angular para o método por pressão.

Para reduzir esses erros, ensaios podem ser feitos utilizando-se outros recursos. Para o ensaio de intensidade poderia ser usada sonda com microfones de $\frac{1}{4}$ ”, espaçados por 6mm, para fazer duas medições idênticas alternando-se os microfones nos canais de medição, para determinar e corrigir os erros de diferença de fase, acentuados nessa configuração da sonda (Jacobsen *et al.*, 1998). Para o método por pressão, poderia ser determinado o valor da correção angular, para a determinação da potência sonora por medições do nível de pressão sonora sobre uma superfície envolvente, utilizando-se uma fonte sonora de referência de dimensões significativamente menores que as dimensões da superfície de medição (Sehrndt, 1996).

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

8.1 Elevado Ruído de Fundo e Norma ISO 9614-2

Conclusões

Foram alcançados resultados úteis na determinação da potência sonora para a engenharia de controle de ruído, mesmo em situações que, devido ao elevado ruído de fundo, não atendiam aos critérios da norma ISO 9614-2.

Recomendações

Recomenda-se reduzir o rigor dos critérios da norma ISO 9614-2 quanto ao ruído de fundo elevado. Alternativamente, poderia ser desenvolvida uma nova norma, específica para as condições encontradas em ambientes industriais.

8.2 Medições por Varredura com Linhas Alternadas

Conclusões

O procedimento de varredura com linhas alternadas e o procedimento de varredura com linhas contínuas apresentaram resultados semelhantes para ruído estacionário no tempo. No entanto, o procedimento com linhas alternadas foi superior para ruído não estacionário, pois apresentou erros menores e indicadores do campo acústico mais representativos.

Recomendações

Recomenda-se adotar o procedimento de varredura por linhas alternadas para determinar a potência sonora de fontes de ruído industrial.

Recomenda-se incluir o procedimento de varredura por linhas alternadas nas ações de melhoria da norma ISO 9614-2.

8.3 Intersimetria Acústica e Frequência Superior Estendida

Conclusões

Os resultados dos ensaios para determinar a potência sonora, nas altas frequências, melhoraram com a correção da perda da sensibilidade de pressão dos microfones normalmente utilizados pelos sistemas comerciais de medição de intensidade acústica.

A correção teórica para onda plana, do erro de diferença finita, aproximou os valores de potência determinados por medições de intensidade e os determinados por medições de pressão.

Recomendações

Recomenda-se sempre corrigir a sensibilidade de pressão dos microfones de campo livre para as medições de intensidade nas bandas de alta frequência.

Recomenda-se avaliar o campo acústico e, se for o caso, fazer a correção teórica para onda plana dos resultados dos ensaios para determinar a potência sonora por intersimetria, nas bandas de alta frequência.

8.4 Recomendações de Futuros Trabalhos

As limitações dos procedimentos utilizados nesta pesquisa, quanto à determinação da potência sonora de fontes de ruído com fluxo de ar elevado nas suas proximidades, deixam dúvidas sobre a utilização da intensimetria acústica em diversos problemas acústicos de ambientes industriais. Isto se refere, principalmente, à determinação da potência sonora de dutos de ar com extremidade aberta e à avaliação do desempenho de atenuadores de ruído de dutos (silenciadores).

Recomenda-se, assim, como futuro trabalho, de especial interesse para a indústria, uma pesquisa, com acentuada ênfase experimental, sobre as limitações efetivas dos procedimentos atuais e o desenvolvimento de novos procedimentos, ou mesmo técnicas mais abrangentes, para atender a solicitação da intensimetria acústica com fluxo de ar elevado.

Esta pesquisa não avaliou a determinação da potência sonora em bandas de frequências abaixo de 100 Hz, o que é uma linha de pesquisa de interesse, pois há uma parcela significativa, embora não majoritária, de fontes de ruído com participação importante das baixas frequências.

REFERÊNCIAS

ANSI S12.12, Engineering Method for the Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Intensity, 1992 (R1997).

Balant, A. C., Maling C. G. & Yeager, D. M., Measurement of blower and fan noise using sound intensity techniques, Noise Control Engng. J., Vol. 33, No. 2, pp. 77-88, 1989.

Brüel & Kjaer, Sound Intensity, Brüel & Kjaer Booklet, 1989.

Fahy, F. J., International Standards for determination of sound power levels of sources using sound intensity measurement: an exposition. Applied Acoustics, 50 (2), pp. 97-109, 1997.

Fahy, F.J., Sound Intensity (2nd edition). E & FN Spon, London, 1995.

Gade, S., Validity of intensity measurements in partially diffuse sound field, B&K Technical Review, N. 4, 1985. pp. 03-31.

Gade, S., Sound Intensity, B&K Technical Review, N. 3, 1982.

Gerges, Samir N. Y., Ruído: Fundamentos e Controle, NR Editora, 2000.

Gerges, Samir N. Y., Inherent errors in acoustic intensity measurements for piston-type sources, In: Internoise, **Proceedings...** 1983.

Ginn¹, K. B., Calibration and correction for phase mismatch of an intensity analysing system based on the dual channel real-time frequency analyzer type 2133, Brüel & Kjaer application notes, BO 0194-11.

Ginn², K. B., Active and reactive intensity measurements using the dual channel real-time frequency analyzer type 2133, Brüel & Kjaer application notes, BO 0193-1 1.

Goelzer, B., Hansen, C. & Sehrndt, G., Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control, World Health Organization, 2000.

Hübner, G., Sound intensity measurement method – errors in determining the sound power levels of machines and its correlation with sound field indicators, In: Internoise, **Proceedings...**1987.

Hübner, Gerhard & Wittstock, Volker. Investigations into the correlation between field indicators and sound absorption. In: ICA, **Proceedings...**2001.

Hübner, Gerhard & Wittstock, Volker. Further investigations to check the adequacy of sound field indicators to be used for sound intensity technique determining the sound power level. In: Internoise, **Proceedings...**1999.

IEC 61043, Electroacoustics - Instruments for the measurement of sound intensity - Measurements with pairs of pressure sensing microphones, Ed. 1.0 b:1993.

ISO 354, Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room, 1985.

ISO 1999, Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment, 1990.

ISO 3745, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms, 1977.

ISO 9612. Acoustics – Guidelines for the measurement and assessment of exposure to noise in a working environment, 1997.

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

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

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

ISO 11690-1, Acoustics – Recommended practice for the design of low-noise workplaces containing machinery – Part 1: noise control strategies, 1996.

Jacobsen, Finn, State of art of sound intensity and its measurement and applications, In: ICA, **Proceedings...2001**.

Jacobsen, Finn. Prediction of random errors in sound intensity measurement. International Journal of Acoustics and Vibration, 5 (4), pp. 173-178, 2000.

Jacobsen, Finn, An overview of the sources of error in sound power determination using the intensity technique, Applied Acoustics, Vol. 50, No. 2, pp. 155-166, 1997.

Jacobsen, Intensity measurements in the presence of moderate airflow, In: Internoise, **Proceedings...1994**, pp. 1737-1742.

Jacobsen, Finn, A simple and effective correction for phase mismatch in intensity probes, Applied Acoustics, Vol. 33, pp. 165-180, 1991.

Jacobsen, F., Cutanda, V., & Juhl, P. M., A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies, In: J. Acoust. Soc. Am. 103 (2), pp. 953-960, 1998.

Jacobsen, F., Cutanda, V., & Juhl, P. M., A sound intensity probe for measuring from 50 Hz to 10 kHz, In: Brüel & Kjaer Technical Review 1, 1996.

Jacques J., Higginson, R. & Kurtz, P., Noise Control and the machinery safety standardisation programme of CEN (European Standardisation Committee), In: Noise-con, **Proceedings...2000**.

Jonasson, Noise emission measurements – systematic errors, In: Internoise, **Proceedings...1999**.

Krishnappa, G., Examination of scanning sound intensity technique for sound power determination of practical noise source, In: Internoise, **Proceedings...1994**, pp. 1781-1786.

Li, Wen L. & Qiu, Yuan, measurement of sound intensity in the presence of mean flow, In: Noise-con, **Proceedings...1996**, pp. 717-722.

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

NR 15, Atividade e Operações Insalubres, Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego aprovadas pela Portaria no 3.214, de 08 de junho de 1978.

Putnam, R. Noise control engineering challenges in designing plants to meet noise limits. In: Noise-con, **Proceedings...2000**.

Roth, Stephen, Industrial noise control – its time is now, Noise/News – President's Column, 1999 December.

Sakao, F., Measurement of acoustic intensity in a near fields space, In: 8^o ICSV, **Proceedings...**2001, pp. 143 a 150.

Sehrndt, G. A., Remarks on the true value of the sound power level, In: Internoise, **Proceedings...**1996, pp. 2703-2706.

Vanweert, Harmful noise in the workplace of the Dutch paper, cardboard and corrugated cardboard industry: an inventory of the current situation and the options to reduce noise. In: Internoise, **Proceedings...**2001.

Ward T, Compliance with noise at work regulations – a targeted enforcement approach, In: Internoise, **Proceedings...**2001.

APÊNDICE – AVALIAÇÕES PRELIMINARES

A norma ISO 9614-2 admite o uso do seu procedimento de medição de intensidade para determinar a potência sonora em campo.

As condições de ensaio em uma área fabril, no entanto, podem não atender plenamente aos requisitos da norma. Observações nesse sentido foram feitas em visitas a várias fábricas de diversos setores industriais, como alimentos e bebidas, produtos de higiene e limpeza, embalagens, metalurgia e outros.

A1 Visitas a Fábricas

Durante visitas a diversas fábricas (Quadro A1) foram observadas características locais que poderiam interferir na determinação da potência sonora, tanto por medições de intensidade sonora quanto por medições de pressão sonora.

As visitas ocorreram em fábricas que voluntariamente procuraram o LARI, Laboratório de Ruído Industrial da UFSC. Todas as indústrias visitadas queriam avaliar os níveis de ruído ocupacional existentes ou já tomar providências para reduzi-lo.

Não houve levantamento numérico da representação percentual de fábricas visitadas em relação à população total de fábricas existente e que apresentam fontes de ruído com nível elevado. Acredita-se, no entanto, ter sido uma amostra qualitativamente representativa, pelo menos quanto a indústrias que nestes últimos anos têm buscado soluções para o problema do ruído ocupacional.

De qualquer forma, não há pretensão de ser exaustivo quanto às possíveis condições de campo existentes.

Quadro A1: Fábricas visitadas

Indústria	unidades visitadas	% do total
metal mecânica	7	18,9
alimentícia	5	13,5
higiene e limpeza	4	10,8
outras	21	56,8
Total	37	100

Os valores do **Nível de Ruído Ambiente** encontrados nas áreas visitadas se encontravam, salvo algumas poucas exceções, entre 80 dBA e 115 dBA. Na bibliografia pesquisada não há restrições para o uso da intensimetria acústica nessa faixa.

A presença de **fontes de grandes dimensões**, especialmente com altura elevada, dificulta a varredura, principalmente da superfície superior. Para essas situações alguns artifícios precisam ser analisados para elevar a sonda por meio de prolongadores, ou então, para elevar o operador por meio de escadas, pontes rolantes, empilhadeiras, etc..

No que se refere ao **Leiaute da Fábrica**, foram atribuídas algumas categorias, de forma comparativa, com base nos ambientes observados. A essas categorias relaciona-se um grau de dificuldade para a execução da varredura devido à presença de máquinas, tubulações ou outros obstáculos físicos à movimentação da sonda e/ou do seu operador (Quadro A2). Essas dificuldades podem ser minimizadas utilizando-se um número maior de medições parciais ou interrompendo a varredura por meio do recurso de pausa do sistema de medição.

A presença de certos obstáculos, no entanto, pode facilitar a fixação de marcas de referência para as superfícies de medição e para as linhas de varredura da intensidade sonora.

Quadro A2: Interferência na varredura

Leiaute da Fábrica	Interferência
muito denso	extrema
denso	razoável
normal	pouca
ocioso	nenhuma

Materiais auxiliares para fixar marcas de referência, todavia, são indispensáveis, tais como giz, barbante, fita adesiva, tripé e trena.

A **Absorção Sonora da Fonte** foi considerada “relevante” em fontes que apresentavam, em avaliação subjetiva, quantidade significativa de materiais de elevado coeficiente de absorção sonora em média e/ou alta frequência, devido à presença de isolante térmico, revestimento acústico, produtos porosos ou fibrosos, tecidos etc.. Uma idéia mais precisa da interferência desse fator na incerteza da medição depende da potência absorvida em relação à potência efetivamente emitida pela fonte. A norma internacional (ISO 9614-2) recomenda que a diferença entre a potência determinada e a potência absorvida não seja menor do que 10 dB. A potência realmente absorvida só pode ser obtida por meio de um ensaio com a fonte em questão desligada e o restante do campo acústico inalterado.

Para a norma internacional (ISO 9614-2), **ruído estacionário** é aquele cujas propriedades médias no tempo, de uma medição em um ponto ou em um segmento da superfície de medição, são iguais àsquelas obtidas sobre o mesmo ponto ou segmento se o tempo de média fosse igual ao tempo total gasto para medir em todos os pontos ou segmentos da superfície de medição. E ainda, os ruídos cíclicos ou periódicos são estacionários se, em cada ponto ou segmento, o tempo de medição se estender por pelo menos dez ciclos.

Ruído não estacionário da fonte

Muitas das fontes sonoras de interesse apresentam, de alguma forma, ruído não estacionário.

A percepção da presença de ruído não estacionário, antes mesmo da avaliação dos resultados de medição, pode ser útil na condução do ensaio, em especial, para evitar erros nos resultados ou gasto desnecessário de tempo. O ruído não estacionário pode, por vezes, ser percebido, seja por visualização de alterações no processo ou mesmo pela própria audição.

De qualquer forma, a potência sonora da fonte ensaiada é a média da potência instantânea ao longo do período em que efetivamente a intensidade sonora foi amostrada.

Ruído de fundo não estacionário

Em diversos processos produtivos, há intermitência do ruído externo à superfície de medição, devido a pausa ou alteração das características desse processo, tais como mudanças de força ou velocidade de operação.

Há também eventos que tornam o ruído de fundo não estacionário, sejam eventos esporádicos como o sinal sonoro da parada de uma máquina, ou eventos cíclicos, como as descargas de ar comprimido de sistemas pneumáticos, ou ainda eventos repetitivos sem periodicidade bem definida, como a passagem de empilhadeiras.

Naturalmente que, durante as medições para determinar a potência sonora, é mais difícil a percepção de alterações do nível sonoro no ruído de fundo do que no ruído da fonte ensaiada.

A2 Conclusões

Das características de campo observadas e que interferem no procedimento de varredura (Quadro A3), o ruído não estacionário mostrou-se como a característica mais presente, o que, portanto, não atende aos requisitos da série de normas ISO 9614.

Os indicadores de campo e os critérios de variabilidade temporal do ruído têm utilidade limitada. O critério 3 da parte 2 da norma ISO 9614 e os indicadores F_1 e F_T das partes 1 e 3, respectivamente, avaliam ruído não estacionário mas não levam em conta as mudanças significativas do ruído de fundo entre a amostragem de duas superfícies parciais. Dessa forma, é conveniente o desenvolvimento de procedimentos mais amplos quanto a essa questão e que possam abranger um número maior de situações reais dentro dos ambientes industriais.

Quadro A3: Características das principais fontes de ruído das fábricas visitadas

Total de fábricas	37
Porte da Empresa	grande: 75%; média: 25%
Fontes de Ruído	diversas
Nível de Ruído Ambiente	80 a 115 dBA
Dimensões das Fontes	fontes com altura elevada: 40%
Leiaute da Fábrica	denso e muito denso: 50%
Tipo de Ruído de Fundo	não contínuo: 85%
Absorção Sonora da Fonte, em média e alta freqüência (qualitativo)	relevante: 15%
Fluxo de ar elevado	não avaliado
Possível Funcionamento Parcial (para medições de pressão)	não: 75%; talvez: 15%
Ruído em bandas acima de 6,3 kHz	55% das fontes
Ruído em bandas abaixo de 100 Hz	15% das fontes